

Research Article

# การบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

## Wastewater Treatments for Textile Industry by Electrocoagulation Process

ทิพย์สุรีย์ กรบุญรักษา<sup>1\*</sup> และ ธิดารัตน์ ชมภูราช<sup>2</sup>

Thipsuree Kornboonraksa<sup>1\*</sup> and Tidarad Chompurach<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง ชลบุรี 20131 ประเทศไทย

<sup>1,2</sup> Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Muang District, Chonburi 20131, Thailand

\*E-mail: thipsuree@eng.buu.ac.th

Received: 20/04/2021; Revised: 24/07/2021; Accepted: 17/08/2021

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ากับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีสภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่า pH ที่ 7 และ 10 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.01, 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 10 ถึง 60 นาที จากผลการทดลองพบว่า เมื่อน้ำเสียที่ค่า pH 10 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.02 แอมแปร์/ตร.ซม. เวลา 20 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ความขุ่นและซีโอดีได้ดีกว่าที่ค่า pH 7 โดยมีค่าเป็น 92.6%, 69.1% และ 89.1% ตามลำดับ ในขณะที่ค่า pH 7 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์/ตร.ซม. เวลา 40 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ความขุ่นและซีโอดีเป็น 90.0 %, 10.7 % และ 92.6% ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดจากสภาวะที่เหมาะสมของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ค่า pH 10 เท่ากับ 58.0 บาท/ลบ.ม. ในขณะที่ค่า pH 7 เท่ากับ 94.1 บาท อัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ค่า pH 7 และ 10 เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมของระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) กับการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าพบว่า ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งมีประสิทธิภาพดีกว่าในการกำจัดสี ความขุ่นและซีโอดี แต่หากนำระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งมาใช้ร่วมกับการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าจะทำให้สามารถกำจัดสีของน้ำเสียได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้

**คำสำคัญ:** การบำบัดน้ำเสีย โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

### Abstract

The objective of this research was to study the wastewater treatment for the textile industry by electrocoagulation process with synthetic wastewater. The experimental conditions including the initial pH of 7 and 10, the current densities of 0.01, 0.02 and 0.03 A/cm<sup>2</sup> with the reaction time from 10 to 60 min. The experimental results revealed that the initial pH of 10, the current density of 0.02 A/cm<sup>2</sup> and the reaction time of 20 min were the optimum conditions, resulting in the color, turbidity, and chemical oxygen demand (COD) removal efficiencies of 92.6%, 69.1%, and 89.1%, respectively. While the initial pH of 7, the current density of 0.01 A/cm<sup>2</sup> and the reaction time of 40 min were the optimum conditions, resulting in the color, turbidity, and chemical oxygen demand (COD) removal efficiencies of 90.0%, 10.7%, and 92.6%, respectively. The operational costs of initial pH of 10 and pH of 7 were 58.0 bath/m<sup>3</sup> and 94.1 bath/m<sup>3</sup>, respectively. The study indicated that electrocoagulation process at an initial pH of 7 and 10 followed the second-order kinetics. It was found that the activated sludge (AS) system was capable to treat the real textile wastewater better than the electrocoagulation in terms of higher turbidity and COD removal efficiency. Nevertheless, the results suggested that the activated sludge system followed by the electrocoagulation increases the color removal efficiency of the textile industry wastewater. It can be the alternative wastewater treatment for textile industry.

**Keywords:** Wastewater treatment, textile industry, electrocoagulation

### บทนำ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้น้ำและสารเคมีในกระบวนการผลิตในปริมาณมากและมีปริมาณน้ำเสียเกิดขึ้นสูงถึง 20,000-40,000 ลบม./เดือน รวมไปถึงมลสารต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียนั้นสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ โดยปัญหาหลักที่พบคือมีค่าสีปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่สูงถึง 600-4,000 ADMI (Tuba, 2017) โดยสีที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากกระบวนการย้อมสี การพิมพ์ผ้าและการฟอกขาว สีบางชนิดสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีทั่วไป แต่สีบางชนิดก็ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งสีย้อมที่นิยมใช้ทั่วไปนั้นมีอยู่หลายชนิด เช่น สีย้อมชนิดรีแอคทีฟ (Reactive dyes) เป็นสีย้อมที่ติดอยู่บนเส้นใยได้ด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ทำให้ทนทานต่อการซักล้าง สามารถย้อมได้เกือบทุกชนิด จึงทำให้สีย้อมชนิดนี้เป็นที่นิยมอย่างมาก โดยทั่วไปอุตสาหกรรมฟอกย้อมนิยมใช้ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) ในการบำบัดน้ำเสียเนื่องจากมีราคาไม่แพง แต่ก็ยังคงมีปัญหาเรื่องสีในน้ำทิ้ง

ภายหลังผ่านการบำบัดทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านออกจากระบบบำบัดไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ทั้งนี้อาจพบปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอติและบีโอติในน้ำทิ้งที่มีค่าที่สูงและมีปริมาณสีที่ตกค้างอยู่มาก (จริยา, 2557) ปัจจุบันเทคโนโลยีที่สามารถนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหานี้ได้แก่ การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่มีการใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยาโดยตรง แต่อาศัยขั้วแอโนดและแคโทดในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันและปลดปล่อยประจุบวกอิสระที่มีความสามารถในการกำจัดมลสารในน้ำเสียได้ แต่ก็ต้องมีการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้า ค่า pH เวลาในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาการตกตะกอนให้เหมาะสม จากผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าพบว่าวิธีนี้สามารถกำจัดสีย้อมประเภท รีแอคทีฟได้มากกว่า 90% (Sengil & Özacar, 2009; Daneshvar et al., 2004) และสามารถกำจัดซีโอติได้ในช่วง 37-76% (Arslan-Alaton et al., 2008) ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากสีย้อมชนิดรีแอคทีฟโดยใช้การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเพื่อหาสภาวะในการบำบัดที่เหมาะสม การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดสีโดยอาศัยแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งและปฏิกิริยาอันดับที่สอง รวมถึงการประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเมื่อใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ถูกเตรียมขึ้นให้มีคุณลักษณะใกล้เคียงกับน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีค่าซีโอติอยู่ในช่วง 500-600 มก./ล. ทำการปรับค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนนำไปทดลองที่ค่า pH 7 และ 10 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมดังตารางที่ 1 และคุณลักษณะของน้ำเสียฟอกย้อมสังเคราะห์ที่เตรียมได้ดังตารางที่ 2



รูปที่ 1 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมแห่งหนึ่งในนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี

ตารางที่ 1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียฟอกย้อมสังเคราะห์ (Şahinkaya, 2013)

สารเคมี	ความเข้มข้น
สีย้อมชนิด Reactive blue dye	100 มก./ล.
แป้ง (Starch)	500 มก./ล.
โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	200 มก./ล.
โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ )	200 มก./ล.
โซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ )	300 มก./ล.
โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )	100 มก./ล.
กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )	60 มก./ล.

การเลือกสีย้อมชนิด Reactive blue dye เพื่อใช้ในการเตรียมน้ำเสียฟอกย้อมสังเคราะห์ครั้งนี้เนื่องจากเป็นสีย้อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยโครงสร้างทางเคมีสีย้อมชนิด Reactive blue dye มีประจุเป็นลบที่ประกอบด้วย กลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม ซึ่งสามารถแสดงเป็น โครงสร้างโดยทั่วไปได้ดังนี้ (วรรณวรรณ เทียงวรรณ กานต์, 2546)

#### S-D-T-X

- โดย S คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟเนต ( $-\text{SO}_2\text{Na}$ ) ซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์
- D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่า กลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore)
- T คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์
- X คือ กลุ่มรีแอคทีฟ (Reactive group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย

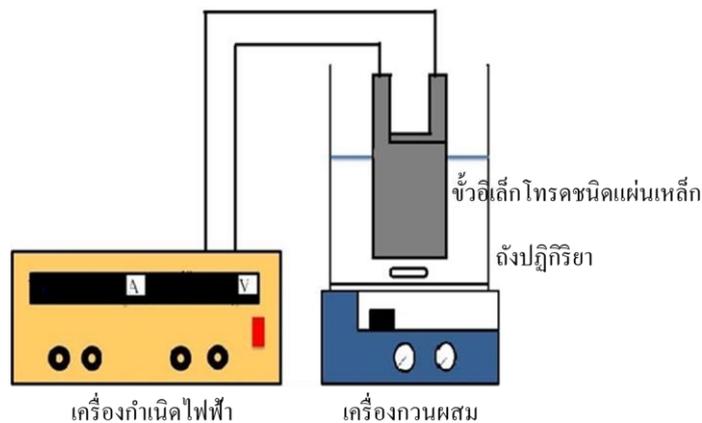
ในปัจจุบันนี้สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) เป็นสีย้อมที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการย้อมเส้นใยอย่างกว้างขวาง เพราะสีรีแอคทีฟนั้นจะติดอยู่บนเส้นใยด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ทำให้ทนทานต่อการซักล้าง สามารถย้อมได้เกือบทุกชนิด สีที่ได้มีความสดใส ด้วยจุดเด่นนี้จึงทำให้สีรีแอคทีฟเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของน้ำเสียฟอกย้อมสังเคราะห์ที่เตรียมได้

คุณลักษณะ	ความเข้มข้น	
	น้ำเสียดำ pH เริ่มต้น 7	ค่า pH เริ่มต้น 10
ค่า pH	7.03 ± 0.02	10.03 ± 0.02
ซีโอดี (COD)	564.78 ± 70.26	602.76 ± 29.14
สี (Color)	42.80 ± 19.64	39.99 ± 10.98
ความขุ่น (Turbidity)	70.89 ± 7.00	80.23 ± 6.21
ของแข็งละลายน้ำ (TDS)	1052.20 ± 24.92	1010.41 ± 63.54
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	2238.39 ± 52.98	2149.31 ± 135.20

#### การทดลองของกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)

การทดลองโดยติดตั้งขั้วอิเล็กโทรดชนิดแผ่นเหล็ก จำนวน 4 แผ่น ขนาดแผ่นละ 8.8x24 ตร.ซม. วางห่างกันแผ่นละ 1.5 ซม. ลงในถังปฏิกรณ์ขนาด 17x32x28 ลบ.ซม. ปริมาตร 9 ลิตร อัตราการกวนผสม 2000 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 2 โดยมีค่า pH ที่ใช้ในการทดลอง คือ 7 และ 10 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง คือ 0.01, 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ ทำการกวนน้ำเสียด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำตัวอย่างน้ำที่บำบัดได้ไปตรวจวัดค่า pH ความขุ่น สี และซีโอดี ตามวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของ APHA, AWWA & WEF (2017)



รูปที่ 2 การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

### การวิเคราะห์จลนศาสตร์ของปฏิกิริยา (Kinetic analysis)

การวิเคราะห์จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเป็นการศึกษาอัตราเร็วในการเกิดขึ้นของกระบวนการ รวมไปถึงการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา สามารถนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม โดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและอันดับสองนั้นเป็นปฏิกิริยาที่พบมากที่สุด ซึ่งปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่งดังสมการที่ 1 (Khan et al., 2010)

$$\frac{-dC}{dt} = kC \quad (1)$$

โดยที่  $dC/dt$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลสาร

- คือ เครื่องหมายลบที่บ่งบอกถึงการลดลงของความเข้มข้นของมลสารที่เวลา  $t$
- $k$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (นาที่<sup>-1</sup>)
- $C$  คือ ความเข้มข้นของมลสารที่เวลา  $t$

ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสารที่เวลา  $t = 0$  เป็น  $C_0$  และที่เวลา  $t$  ต่อมา ความเข้มข้นของมลสารจะเป็น  $C_t$  โดยสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order) ได้จากสมการที่ 2

$$\ln C_t = \ln C_0 - k_1 t \quad (2)$$

สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง (Second-order reaction) นั้นเป็นปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง ดังสมการที่ 3 ซึ่งถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสารที่เวลา  $t = 0$  เป็น  $C_0$  และที่เวลา  $t$  ต่อมาความเข้มข้นของมลสารจะเป็น  $C_t$  โดยสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Second order) ได้ดังสมการที่ 4 (Al-Shannag et al., 2015)

$$\frac{-dC}{dt} = kC^2 \quad (3)$$

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_0} + k_2 t \quad (4)$$

โดยที่  $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสารที่เวลา  $t = 0$

$C_t$  คือ ความเข้มข้นของมลสารที่เวลา  $t$

$k_1$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (นาที่<sup>-1</sup>)

$k_2$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง ((มก/ล)<sup>-1</sup>.นาที่<sup>-1</sup>)

$t$  คือ เวลาที่ใช้ของปฏิกิริยา (นาที่)

### การประเมินค่าใช้จ่ายจากการบำบัดน้ำเสียโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

การบำบัดน้ำเสียโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีปัจจัยนำเข้าที่ถูกลำมาใช้ในการประเมินค่าใช้จ่าย ได้แก่ ปริมาณแผ่นอิเล็กโทรดที่ใช้ไปในการทำปฏิกิริยา ราคาของขั้วอิเล็กโทรด พลังงานที่ใช้ ค่าใช้จ่ายในการปรับค่า pH ดังแสดงในสมการที่ 4 (Koby & Demirbas, 2015)

$$OC = (\alpha \times C_{energy}) + (\beta \times C_{electrode}) + Cost_{pH} \quad (4)$$

โดยที่  $OC$  คือ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย (บาท/ลบ.ม.)

$\alpha$  คือ ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง) คือ 2.35 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง

$C_{energy}$  คือ ปริมาณของพลังงานที่ถูกใช้ไป (กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.)

$\beta$  คือ ราคาขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ (แผ่นเหล็ก) (บาท/กก.) คือ 23 บาท/กก.

$C_{electrode}$  คือ ปริมาณอิเล็กโทรดที่ถูกใช้ไป (กก./ลบ.ม.)

$Cost_{pH}$  คือ ค่าใช้จ่ายในการปรับค่า pH ของน้ำเสีย (บาท/ลบ.ม.)

ปริมาณพลังงาน (Energy consumption) หาได้จากสมการที่ 5 และปริมาณอิเล็กโทรดที่ใช้ไป (Electrode consumptions) หาได้จากสมการที่ 6

$$C_{energy} = \frac{U \times I \times t_{EC}}{v} \quad (5)$$

$$C_{electrode} = \frac{I \times t_{EC} \times MW}{z \times F \times v} \quad (6)$$

โดยที่  $C_{energy}$  คือ ปริมาณของพลังงานที่ถูกใช้ไป (กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.)

$U$  คือ ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

$I$  คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

$t_{EC}$  คือ เวลาในการทำปฏิกิริยา (วินาที)

- $v$  คือ ปริมาตรของน้ำเสียในถังปฏิกิริยา (ลบ.ม.)  
 $C_{electrode}$  คือ ปริมาณอิเล็กโทรดที่ถูกรีด (กก./ลบ.ม.)  
 $MW$  คือ มวลโมเลกุลของเหล็ก (Fe) คือ 55.84 กรัม/โมล  
 $z$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาออกซิเดชัน/รีดักชัน ( $z = 2$ )  
 $F$  คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ (Faraday's constant) คือ 96,487 คูลอมป์/โมล

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### ค่า pH

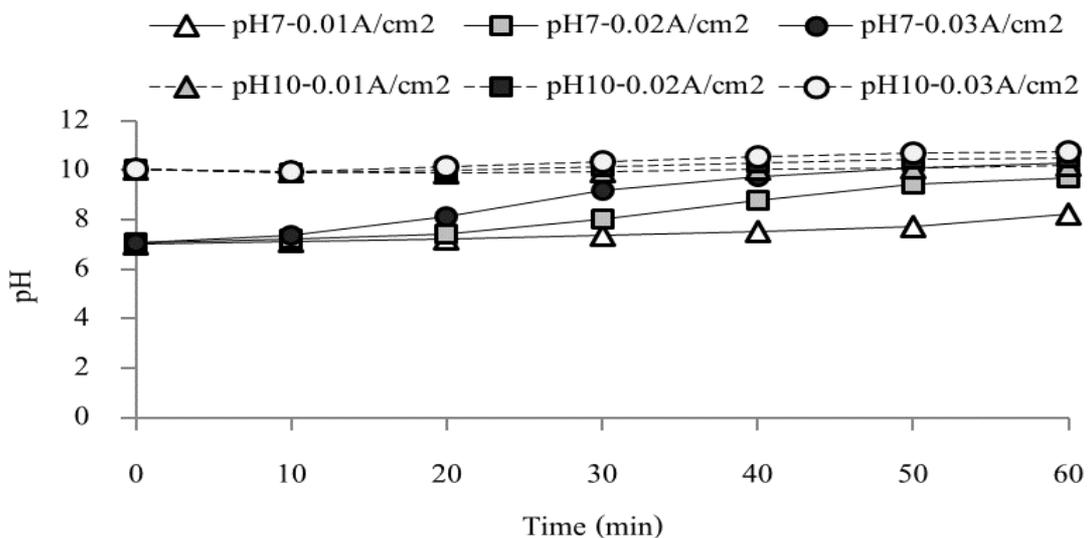
ในการทำงานของกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้านั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ขึ้น โดยขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ และค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสีย ในกรณีที่ใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้มีไอออนของเหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) ละลายออกมาในน้ำ และที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็นไอออนของไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) และก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ปริมาณของ  $OH^-$  ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดเกิดแสดงดังตารางที่ 3 โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ผลลัพท์ของปฏิกิริยามีค่า pH ที่สูงในน้ำทิ้งที่ผ่านบำบัดแล้ว

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของ  $OH^-$  ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของ $OH^-$ (โมล/ลิตร)					
	ค่า pH เริ่มต้น 7			ค่า pH เริ่มต้น 10		
	0.01 แอมแปร์/ตร. ชม.	0.02 แอมแปร์/ตร. ชม.	0.03 แอมแปร์/ตร. ชม.	0.01 แอมแปร์/ตร. ชม.	0.02 แอมแปร์/ตร. ชม.	0.03 แอมแปร์/ตร. ชม.
0	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-4}$
10	$1.4 \times 10^{-7}$	$1.7 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-7}$	$9.1 \times 10^{-5}$	$8.3 \times 10^{-5}$	$9.3 \times 10^{-5}$
20	$1.6 \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-6}$	$8.0 \times 10^{-5}$	$9.5 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-4}$
30	$2.4 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.6 \times 10^{-5}$	$8.9 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-4}$
40	$3.5 \times 10^{-7}$	$5.8 \times 10^{-6}$	$5.7 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-4}$
50	$5.3 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-4}$
60	$1.7 \times 10^{-6}$	$5.2 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-4}$	$5.7 \times 10^{-4}$

จากปฏิกิริยารีดักชันที่ทำให้มี  $\text{OH}^-$  เกิดขึ้นในระบบแล้ว  $\text{OH}^-$  บางส่วนยังสามารถรวมตัวกับ  $\text{Fe}^{2+}$  ในน้ำเกิดเป็น  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ซึ่งเป็นตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ และเกิดไอออนไฮดรอกไซด์ของเหล็กในรูปต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นกับค่า pH ของน้ำ (สุกมาส, 2557) เช่น หากค่า pH อยู่ระหว่าง 7 ถึง 10 จะเกิดเป็น  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$  และ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  เป็นต้น และไอออนของเหล็กในเหล่านี้จะสามารถดูดซับ และจับเกาะสิ่งที่เป็นอนินทรีย์ในน้ำได้ทำให้เกิดการดูดซับและเกาะรวมตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและแยกตัวออกจากน้ำได้ง่าย กรณีที่ค่า pH เป็น 10 เหล็กที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูป  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  เกือบทั้งหมด ซึ่งไฮดรอกไซด์ในรูปดังกล่าวนี้จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับมลสารได้ดีกว่าไฮดรอกไซด์ในรูปอื่น ๆ

จากรูปที่ 3 พบว่าเมื่อค่า pH เริ่มต้นเป็น 7 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01, 0.02, และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. ค่า pH ของน้ำเสียจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าจนครบ 60 นาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01, 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. จะมีค่า pH เป็น 8.2 9.7 และ 10.3 ตามลำดับ และเมื่อค่า pH เริ่มต้นเป็น 10 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01, 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าจนครบ 60 นาที จะมีค่า pH เป็น 10.2, 10.5 และ 10.8 ตามลำดับ โดยค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีค่า pH เริ่มต้นเป็น 7 จะมีค่า pH เพิ่มขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ค่า pH เริ่มต้นเป็น 10 ค่า pH จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นน้อยกว่า เนื่องจากที่ค่า pH ดังกล่าวได้เข้าถึงขั้นสมดุลแล้ว



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่าง ๆ

### ความขุ่น (Turbidity)

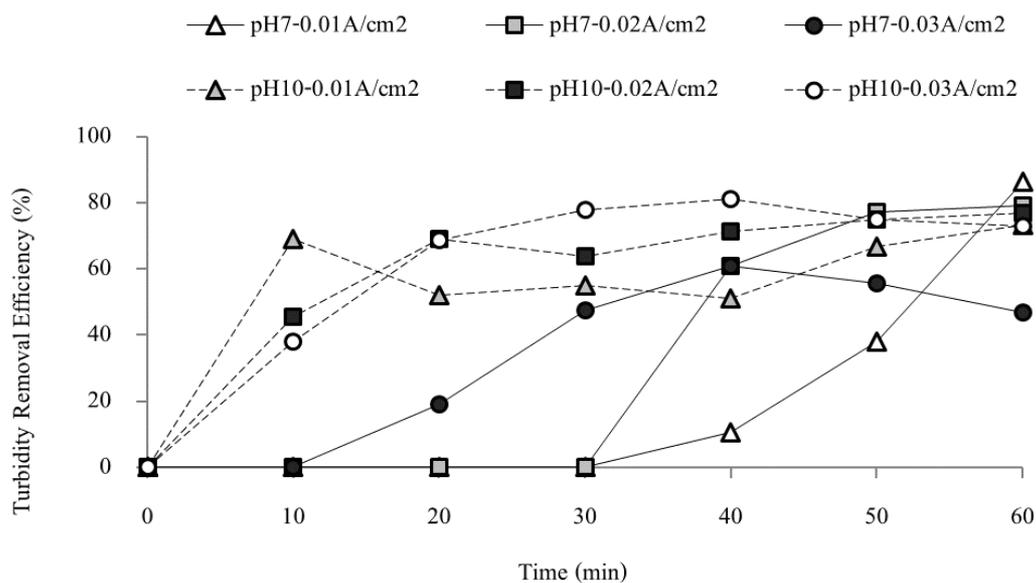
ความขุ่นในน้ำนั้นเกิดจากการที่มีสารที่ไม่ละลายน้ำแขวนลอยอยู่ เมื่อทำการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าจะมีตะกอนที่เกิดขึ้นทั้งในรูปของตะกอนที่จมตัวได้และตะกอนที่ลอยอยู่บนผิวน้ำที่เกิดจากการนำพาของก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ทั้งนี้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีความสำคัญต่อการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้นั้นจะเป็นตัวกำหนดปริมาณไอออนเหล็กที่ละลายออกมา เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ไอออนเหล็กละลายออกมาได้มากขึ้น และสามารถจับตัวกับที่อนุภาคปนเปื้อนในน้ำเสียเกิดเป็นตะกอนได้ดีขึ้นด้วย (Joseph & Obi, 2017) อีกทั้งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีผลต่อสภาวะจลนศาสตร์ในการกำจัดความขุ่น หากใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียก็มีแนวโน้มลดลง และยังส่งผลให้มีอัตราการสร้างฟองก๊าซ  $H_2$  ที่เพิ่มขึ้น และขนาดฟองก๊าซ  $H_2$  จะลดลงตามความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์ต่อการกำจัดความขุ่น โดยอาศัยหลักการลอยของก๊าซ  $H_2$  และนำพาอนุภาคความขุ่นขึ้นสู่ผิวน้ำก่อนกำจัดด้วยวิธีการตักกวาดออกไป (Abeer & Nemr, 2012)

จากรูปที่ 4 เมื่อใช้การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมสังเคราะห์ พบว่าหากมีค่า pH เริ่มต้นเป็น 7 ในช่วง 10-20 นาทีแรก ระบบไม่สามารถกำจัดความขุ่นลงไปได้ เนื่องจากอยู่ในช่วงของการรวมและสร้างตะกอน (Coagulation and flocculation) ระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำกับประจุบวกของ  $Fe^{2+}$  ที่ถูกกระตุ้นออกมาจากขั้วอิเล็กโทรดด้วยกระแสไฟฟ้า ทำให้ตะกอนที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วสามารถจับตัวกันได้จนมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ยังแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามความขุ่นจะมีค่าลดลงเนื่องจากตะกอนที่รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่สามารถตกตะกอนลงไปที่ก้นถังปฏิกิริยาได้ และเมื่อมีค่า pH เริ่มต้นเป็น 10 พบว่าที่กระแสไฟฟ้าต่าง ๆ จะกำจัดความขุ่นได้เร็วตั้งแต่ที่เวลา 10 นาที เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การกำจัดความขุ่นจะเพิ่มขึ้นและคงที่ โดยที่เวลา 20 นาที จะเห็นว่าความขุ่นนั้นจะลดลงไปได้มากและที่เวลาเพิ่มขึ้นความขุ่นจะเริ่มคงที่ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของเวลาจะทำให้ค่า pH ของน้ำเสียมมีค่าเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้ขั้นสมดุลของการเกิดตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_3$ ) โดยตะกอนดังกล่าวนี้จะเกิดมากขึ้นที่ค่า pH สูง ๆ เนื่องจากตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_3$ ) จะอยู่ในรูปของแข็ง (Solid form) และมีคุณสมบัติในการดูดซับมลสารอนุภาคต่าง ๆ ในน้ำเสียได้ดีกว่าไฮดรอกไซด์ในรูปอื่นที่อยู่ในรูปไอออน จึงทำให้ค่าความขุ่นถูกดูดซับและตกตะกอนลงได้ดีกว่า กรณีที่น้ำเสียที่มีค่า pH เริ่มต้นเป็น 10 นั้นเป็นค่า pH ที่สามารถทำให้เกิด  $Fe(OH)_3$  มากขึ้น จึงสามารถกำจัดความขุ่นไปได้มากและรวดเร็วตั้งแต่ช่วงแรกของการเดินระบบ

เมื่อมีค่า pH เริ่มต้นเป็น 7 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01, 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. ที่เวลา 60 นาที สามารถกำจัดค่าความขุ่นไปได้ 46.3% 79.2% และ 46.8% ตามลำดับ และเมื่อค่า pH เริ่มต้นเป็น 10 พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01, 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. เมื่อใช้เวลาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์/ตร.ซม. จะกำจัดความขุ่นได้สูงสุด 73.2% ที่เวลา 60 นาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.02 แอมแปร์/ตร.ซม. จะกำจัดความขุ่นได้สูงสุด 76.7% ที่เวลา 60 นาที และที่

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. จะกำจัดความขุ่นได้สูงสุด 81.0% ที่เวลา 40 นาที โดยที่ค่า pH 10 สามารถกำจัดความขุ่นได้ดีกว่าค่า pH 7 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 3 พบว่าปริมาณของ OH<sup>-</sup> ที่ pH 10 มีค่ามากกว่าที่ pH 7 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาในการทำปฏิกิริยาเดียวกัน จึงส่งผลทำให้เกิดตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)<sub>3</sub>) ที่อยู่ในรูปของแข็ง (Solid form) ที่ pH 10 มากกว่า pH 7 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ดีกว่านั่นเอง

จากการสังเกตปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการบำบัดพบว่าเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าและมีไอออนของเหล็กละลายออกมานั้นจะเริ่มสังเกตเห็นตะกอนขนาดเล็กเกิดขึ้นในน้ำเสีย เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนเริ่มมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งตะกอนบางส่วนจะจมอยู่บริเวณด้านล่างและบางส่วนจะลอยขึ้นบริเวณผิวน้ำโดยแก๊สไฮโดรเจน ทำให้สามารถแยกตะกอนออกจากน้ำเสียได้ง่าย ความขุ่นในน้ำจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในการปล่อยน้ำเสียให้ตกตะกอนที่เวลา 30 นาทีนั้น ในน้ำเสียจะยังคงมีตะกอนขนาดเล็กอีกส่วนหนึ่งยังคงแขวนลอยอยู่ แต่หากมีการเพิ่มเวลาในการตกตะกอนมากขึ้นก็สามารถที่จะลดค่าความขุ่นในน้ำลงไปอีกได้



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ที่ค่า pH 7 และ 10 กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างกัน

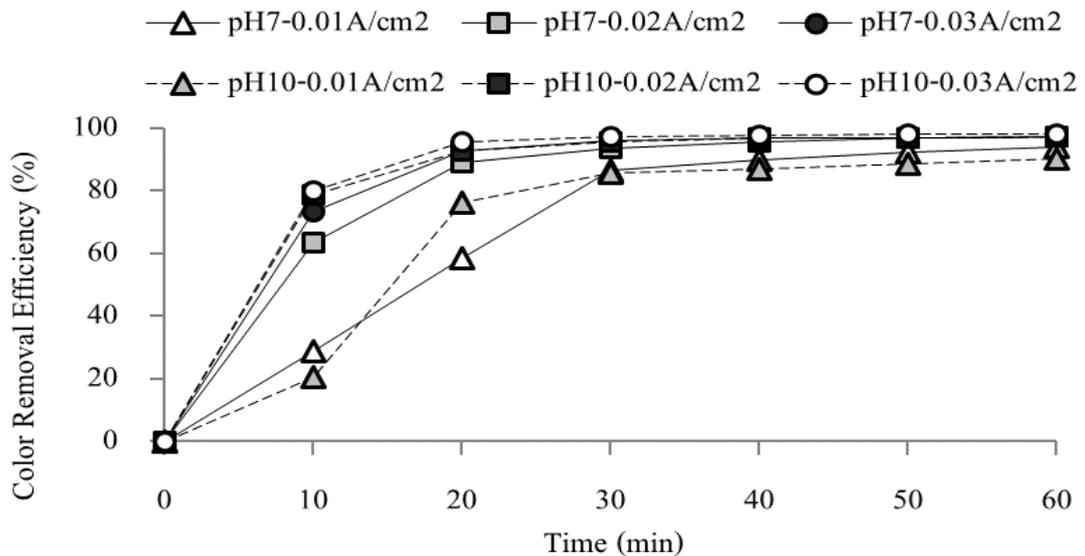
ในกรณีของการเติมแป้ง (Starch) ที่เป็นสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียฟอกข้อมสังเคราะห์ พบว่าแป้งสามารถสร้างกลไกในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ได้ด้วยการเป็นสะพานเชื่อมต่ออนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging) ทั้งนี้การเกาะติดอาจเป็นผลมาจากประจุที่แตกต่างกันของแป้งและอนุภาคคอลลอยด์ หรือเป็นแรงทางปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของแป้งและคอลลอยด์ (รัชฎาวรรณ, 2540) ทั้งนี้แป้งสามารถทำ

หน้าที่เป็นสารสร้างตะกอนหรือโคแอกกูแลนต์ร่วมในการกำจัดคอลลอยด์ได้ (มันสิน, 2542) ซึ่งทำให้สามารถกำจัดความขุ่นได้ดีขึ้น

### สี (Color)

ในการกำจัดสีข้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าพบว่ากลไกการกำจัดสีข้อมนั้นเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ การตกตะกอนและการดูดซับบนผิวของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะที่เกิดขึ้น การจะเกิดกลไกในการกำจัดสีข้อมแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำเสีย หากน้ำเสียมีค่า pH มากกว่า 6.5 ส่วนใหญ่จะเกิดการดูดซับโดยการตะกอนสารประกอบไฮดรอกไซด์โลหะ ในระหว่างกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าโมเลกุลสีข้อมที่มีประจุลบจะถูกทำให้เป็นกลางด้วยประจุบวกของเหล็กออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากขั้วเล็กโทดชนิดแผ่นเหล็ก ทำให้โมเลกุลสีข้อมสามารถรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนลงมาได้ ส่วนกลุ่มอนุภาคที่เกาะรวมตัวกันและมีประจุบวกจะเกิดจากการดูดซับของสีข้อมในรูปฟุ้งที่เป็น โมเนอร์เมอร์และ โพลีเมอร์ (ศุภมาส, 2557) นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้านั้นจะส่งผลต่อการเกิดสารรวมตะกอน  $Fe(OH)_3$  มีผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นและสามารถบำบัดได้เร็วขึ้น กรณีที่ค่า pH มากกว่า 7 พบว่าเป็นค่า pH ที่เหมาะสมต่อการเกิดสารรวมตะกอน ( $Fe(OH)_3$ ) เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดจากขั้วแคโทดจะทำปฏิกิริยากับ  $Fe^{2+}(aq)$  หรือ  $Fe^{3+}(aq)$  เกิดเป็น  $Fe(OH)_2(s)$  หรือ  $Fe(OH)_3(s)$  (พลกฤษณ์ และคณะ, 2559) ที่ค่า pH 10 จึงบำบัดได้ดีกว่าที่ค่า pH 7 โดยใช้เวลาในการบำบัดน้อยกว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเดียวกัน ทั้งนี้ผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาของ Phalakornkule et al. (2010) และ Sengil & Özacar (2009) ที่พบว่าน้ำเสียในช่วงค่า pH สูงนั้นจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ดีกว่า โดยจะใช้เวลาในการกำจัดสีน้อยกว่าเมื่อน้ำเสียมีค่า pH ต่ำ และเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นก็จะใช้เวลาในการกำจัดสีน้อยลงด้วย

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5 เมื่อน้ำเสียมีค่า pH เริ่มต้นเป็น 7 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์/ตร.ซม. พบว่าการกำจัดสีจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. การกำจัดสีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา หลังจากนั้นถึงแม้จะเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาแต่การกำจัดสีจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ในขณะที่เมื่อค่า pH เริ่มต้นเป็น 10 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์/ตร.ซม. พบว่าการกำจัดสีจะเกิดขึ้นช้าในช่วงแรกของปฏิกิริยาและการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น และเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. การกำจัดสีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเริ่มคงที่เช่นเดียวกันกับที่ค่า pH 7



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการกำจัดสี ที่ค่า pH 7 และ 10 กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างกัน

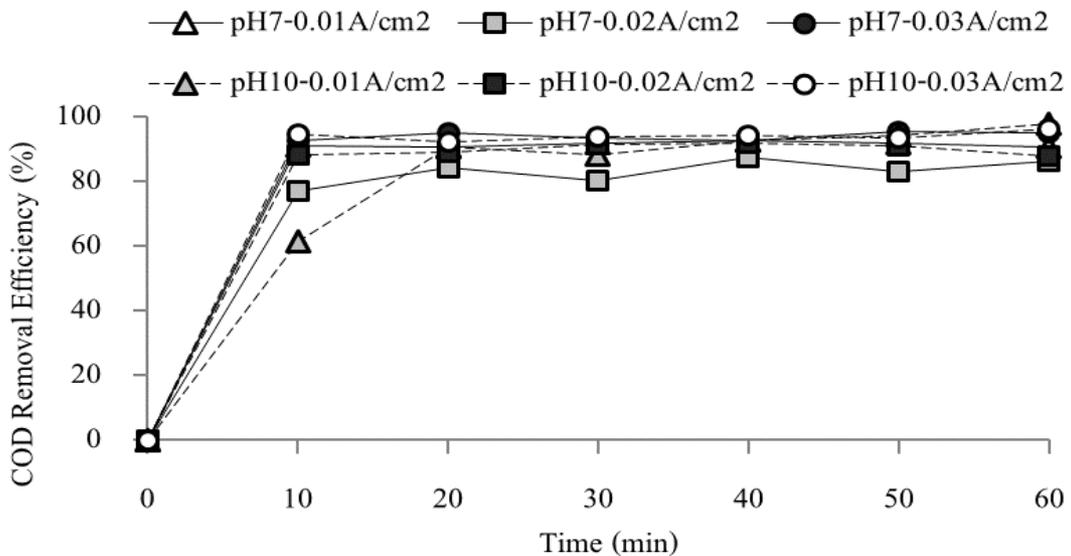
จากรูปที่ 5 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้น และการกำจัดสีจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที โดยที่ค่า pH เริ่มต้นเป็น 7 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์/ตร.ซม. เวลา 10-60 นาที จะกำจัดสีได้ 28.8%-94.1% ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.02 แอมแปร์/ตร.ซม. เวลา 10-60 นาที กำจัดสีได้ 63.5%-97.1% และที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. เวลา 10-60 นาที กำจัดสีได้ 73.2%-97.3% โดยน้ำเสียจากที่มีสีน้ำเงินเข้มจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้มอมน้ำตาล และมีสีอ่อนลงเรื่อยๆ ในกรณีที่มีค่า pH เริ่มต้นเป็น 10 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์/ตร.ซม. เวลา 10-60 นาที กำจัดสีได้ 20.7%-90.4% ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.02 แอมแปร์/ตร.ซม. กำจัดสีได้ 78.5%-97.1% และที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. กำจัดสีได้ 79.8%-98.2% ตามลำดับ เมื่อผ่านการบำบัด น้ำเสียจากที่มีสีน้ำเงินเข้มจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมน้ำตาลและใสขึ้น จากลักษณะสีของน้ำเสียที่มีการเปลี่ยนแปลงไปนั้น อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรดในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า หากปล่อยกระแสไฟฟ้าไปที่ขั้วเหล็ก แผ่นเหล็กจะถูกกัดกร่อนได้เป็นไอออนของเหล็กละลายออกมา ซึ่งในน้ำเสียจะมีไอออนของเหล็กในรูปแบบต่างๆ ปะปนกันอยู่ รวมถึง  $Fe(OH)_2$  โดย  $Fe(OH)_2$  นี้จะมีสีเขียวหรือสีเขียวอมดำเมื่อถูกออกซิเดชัน โดยอากาศ และเมื่อได้รับออกซิเจนมากเกินพอจะได้เป็น Hydrated ferric oxide หรือ Ferric hydroxide ซึ่งมีสีส้มหรือแดงอมน้ำตาล (Moreno et al., 2009) เมื่อสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่เกิดการดูดซับกับโมเลกุลของสีย้อมซึ่งมีสีน้ำเงิน จึงทำให้สีของน้ำเสียมีลักษณะเปลี่ยนไปเป็นสีเขียวอมน้ำตาลดังที่ได้จากการทดลอง โมเลกุลของสีที่ถูกดูดซับจะเกิดเป็นตะกอนแยกออกจากน้ำเสียไป เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นสีที่ปนเปื้อนจึงลดน้อยลง น้ำเสียที่ได้จึงมีลักษณะใสขึ้น

กรณีที่น้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 10 บำบัดได้ดีกว่าที่ pH 7 นั้น เนื่องจากน้ำเสียที่ค่า pH มากกว่า 7 เป็น pH ที่เหมาะสมต่อการเกิดสารรวมตะกอน ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดจากขั้วแคโทดจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$  หรือ  $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$  เกิดเป็น  $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$  หรือ  $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$  (พลกฤษณ์ และคณะ, 2559) นอกจากนี้ผลการทดลองยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Phalakornkule et al. (2010) และ Şengil and Özacar (2009) ที่พบว่า น้ำเสียในช่วงค่า pH สูงนั้นจะมีประสิทธิภาพการกำจัดได้ดีกว่า โดยจะใช้เวลาในการกำจัดน้อยกว่าเมื่อน้ำเสียมีค่า pH ต่ำ และเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ก็จะใช้เวลาในการกำจัดสั้นลงด้วย

ในการเลือกสภาวะเดินระบบบำบัดที่เหมาะสมจะพิจารณาจากการกำจัดค่าในน้ำทิ้งให้ได้ต่ำกว่า 300 ADMI ซึ่งเป็นไปตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานได้กำหนดไว้ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560) สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดหากน้ำเสียมีค่า pH เริ่มต้น 7 คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์/ตร.ซม. ที่เวลา 30 นาที มีค่าสีเท่ากับ 184.4 ADMI ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.02 แอมแปร์/ตร.ซม. ใช้เวลา 20 นาที มีค่าสีเท่ากับ 192.4 ADMI และที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. ใช้เวลา 20 นาที มีค่าสีเท่ากับ 139.3 ADMI ในกรณีที่น้ำเสียมีค่า pH เริ่มต้น 10 พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์/ตร.ซม. ที่เวลา 20 นาที มีค่าสีเท่ากับ 209.4 ADMI ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.02 แอมแปร์/ตร.ซม. ใช้เวลา 10 นาที มีค่าสีเท่ากับ 254.4 ADMI และที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. ใช้เวลา 10 นาที มีค่าสีเท่ากับ 251.2 ADMI

### ซีโอดี (COD)

ค่าซีโอดีเป็นค่าใช้ในการบ่งชี้ถึงความสกปรกของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสารเคมีต่าง ๆ รวมถึงอนุภาคคอลลอยด์ที่ก่อให้เกิดความขุ่นและโมเลกุลจากสีข้อม หากสามารถกำจัดค่าความขุ่นและสีออกจากน้ำเสียได้โดยกลไกการสร้างตะกอน การรวมตะกอนและการตกตะกอน ก็จะทำให้การปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำทิ้งมีน้อยลง เมื่อพิจารณาในเชิงประสิทธิภาพของการกำจัดค่าซีโอดีก็จะพบว่า มีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ในปฏิกิริยามีตะกอนไฮดรอกไซด์ของเหล็กเกิดขึ้นซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นนี้จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับอนุภาคต่าง ๆ ในน้ำเสียได้เช่นกัน โดยประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำเสียนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาตามกฎฟาราเดย์ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าหรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดปริมาณเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์มากขึ้น มลสารต่าง ๆ ก็สามารถถูกดูดซับและกำจัดออกได้มากขึ้น เมื่อมลสารในน้ำถูกกำจัดไปทั้งในรูปความขุ่นและสีของน้ำ จึงส่งผลให้ค่าซีโอดีลดลงด้วยเช่นกัน ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ค่า pH 7 และ 10 กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 6 พบว่าที่ค่า pH 7 และ 10 สามารถกำจัดค่าซีโอดีได้ค่อนข้างเร็วตั้งแต่ช่วงแรกของการทำปฏิกิริยา และจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองดังรูปที่ 8 พบว่าการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถกำจัดค่าซีโอดีได้ดีและมีค่าไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำที่กำหนด คือ 400 มก./ล. กรณีที่น้ำเสียมีค่า pH 7 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01, 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. ค่าซีโอดีลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก และที่เวลา 20 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ในทุก ๆ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า คิดเป็น 90.4%, 84.5% และ 95.2% ตามลำดับ สำหรับกรณีที่น้ำเสียมีค่า pH 10 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01, 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. สามารถกำจัดค่าซีโอดีได้ในช่วง 10 นาทีแรกเช่นเดียวกัน และที่เวลา 20 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีแนวโน้มคงที่ในทุก ๆ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า คิดเป็น 90.7%, 89.1% และ 92.1% ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าทั้งน้ำเสียที่ค่า pH 7 และ 10 สามารถกำจัดค่าซีโอดีได้ดี ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.01, 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. จะทำให้ค่า pH ในน้ำเสียมีแนวโน้มสูงขึ้น การที่น้ำเสียมีค่า pH สูงขึ้นนั้นจะมีผลต่อการเกิดเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่จะสามารถดูดซับมลสารต่างๆ ในน้ำเสีย และการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านั้นจะทำให้เกิดปริมาณเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์มากขึ้น มลสารต่างๆ ก็สามารถถูกดูดซับและกำจัดออกได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าซีโอดีลดลง และเนื่องจากเมื่อน้ำเสียมีค่า pH สูงขึ้นจนใกล้หรือเข้าสู่จุดสมมูล การกำจัดซีโอดีจึงมีแนวโน้มที่จะคงที่

### อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสี (Kinetic)

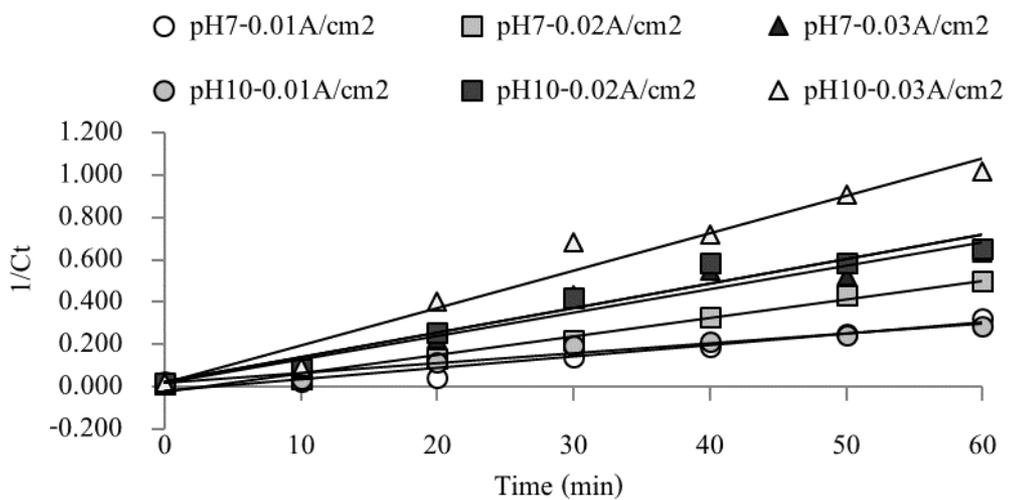
การศึกษ้อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Kinetic) ในการกำจัดสี พิจารณาจากความเข้มข้นในน้ำเสีย ค่า pH เริ่มต้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ทั้งนี้แบบจำลองสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order) และปฏิกิริยาอันดับสอง (Second order) ใช้ในการอธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาการ กำจัดสี สำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ทำการพล็อตกราฟเส้นตรงระหว่างค่า  $\ln C_t$  กับ  $t$  และปฏิกิริยา อันดับสอง ทำการพล็อตกราฟเส้นตรงระหว่างค่า  $\frac{1}{C_t}$  กับ  $t$  จะได้ค่าคงที่  $k_1$  และ  $k_2$  จากความชัน ตามลำดับ แสดงดัง ตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าคงที่อัตราและค่า R-Square ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและอันดับสองในการกำจัดสี

pH	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์/ตร.ซม.)	First-order Reaction		Second-order Reaction	
		$k_1$ (นาที <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	$k_2$ (มก./ล. <sup>-1</sup> นาที <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
7	0.01	0.0513	0.9505	0.0054	0.9558
	0.02	0.0583	0.9003	0.0087	0.9851
	0.03	0.0570	0.8081	0.0111	0.9373
10	0.01	0.0412	0.8603	0.0046	0.9591
	0.02	0.0544	0.8005	0.0115	0.9514
	0.03	0.0618	0.7890	0.0177	0.9642

กรณีที่น้ำเสียมีค่า pH 7 และ 10 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01, 0.02 และ 0.03 แอมแปร์/ตร.ซม. สามารถใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Second order) ในการอธิบายได้ทุกสภาวะ โดยดูจากค่า R-Square ที่มีค่ามากกว่า 0.9 และจากค่า  $k_2$  จะเห็นว่า ค่า  $k_2$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 7 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\frac{1}{C_t}$  กับ  $t$  ที่มีแนวโน้มมีความเป็นเส้นตรง หมายถึงหากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อัตราการกำจัดสีก็จะเกิดได้เร็วขึ้นด้วย ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองนั้นหมายถึงสารตั้งต้นสองตัวมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยในการศึกษาครั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสีย และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ให้ความเข้มข้นของน้ำเสียเป็นค่าคงที่ ซึ่งค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีผลต่อความเข้มข้นของไอออนเหล็กหรือปริมาณไอออนเหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า หากค่า pH มีค่ามากจะทำให้ไอออนเหล็กละลายออกมาในปริมาณมาก และเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะทำให้ ไอออนเหล็กละลายออกมาได้มากเช่นกัน เมื่อในปฏิกิริยามีปริมาณไอออนเหล็กมาก ไอออนเหล็กนี้จะทำปฏิกิริยา

กับโมเลกุลของสีได้มาก ทำให้กำจัดสีออกจากน้ำเสียได้มากขึ้น อัตราการกำจัดสีที่ได้จึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่การศึกษาของ Şengil & Özacar (2009) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive blue dye โดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าและใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแผ่นเหล็ก พบว่าเป็นจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $R^2$  ที่ได้จากการพล็อตกราฟใกล้เคียง 1 ซึ่งเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของสีลดลงเมื่อเทียบกับเวลา ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มีความแตกต่างกันเนื่องด้วยความแตกต่างของสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ความเข้มข้นของสี ค่า pH ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C_t$  กับ  $t$  ของการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง

#### การประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัด (Operational Cost)

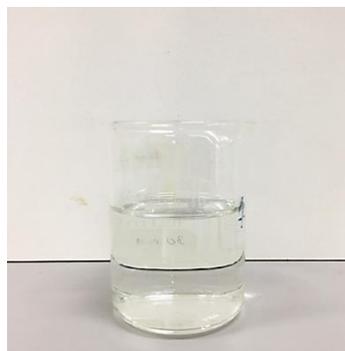
สำหรับการประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่าใช้จ่ายในการปรับค่า pH ของน้ำเสีย และปริมาณของแผ่นอิเล็กโทรดเหล็กที่ใช้ หากใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าใช้จ่ายในการบำบัดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย จากสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากประสิทธิภาพการกำจัดสีพบว่าหากค่า pH เริ่มต้นเป็น 7 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์/ตร.ซม. ที่เวลา 40 นาที มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดเท่ากับ 94.1 บาท/ลบ.ม. หากค่า pH เริ่มต้นเป็น 10 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.02 แอมแปร์/ตร.ซม. ที่เวลา 20 นาที มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดเท่ากับ 58.0 บาท/ลบ.ม. เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการบำบัด พบว่าที่ค่า pH เริ่มต้นเป็น 10 ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.02 แอมแปร์/ตร.ซม. นาน 20 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดี ใช้เวลาน้อยกว่า และมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่ต่ำกว่าค่า pH 7 เนื่องจากที่ค่า pH เริ่มต้น เป็น 7 ใช้เวลาในการบำบัดมากกว่า อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการปรับค่า pH ของน้ำเสียด้วย

ในสภาวะการณ์จริงน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีค่า pH ใกล้เคียง 10 ซึ่งนับเป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการเดินระบบด้วยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยไม่จำเป็นต้องปรับค่า pH ในน้ำเสียก่อนการบำบัด อันจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการปรับค่า pH ก่อนการบำบัดลงได้

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมจริงของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าในสภาวะที่เหมาะสมที่ค่า pH 10 กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งซึ่งเป็นระบบบำบัดที่ใช้กับน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมในรูปแบบที่ 2 พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge, AS) มีประสิทธิภาพมากกว่าการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC) โดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สี และซีโอดีอยู่ที่ 70.4%, 93.4% และ 62.1% ตามลำดับ แต่หากมีการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งมาใช้ร่วมกับการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าจะทำให้สีจริงของน้ำทิ้งภายหลังการกรองมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเป็น 98.1% ดังแสดงในรูปที่ 8 (ข)



(ก) การบำบัดด้วยระบบ AS



(ข) การบำบัดด้วยระบบ AS ตามด้วย EC

รูปที่ 8 เปรียบเทียบสีของน้ำเสียภายหลังการบำบัดด้วยระบบ AS และการบำบัดด้วยระบบ AS ตามด้วย EC

### สรุปผลการทดลอง

1. สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียที่ค่า pH 10 คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.02 แอมแปร์/ตร. ซม. เวลา 20 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ความขุ่น และซีโอดีเป็น 92.6%, 69.1% และ 89.1% ตามลำดับ โดยมีความใช้จ่ายในการบำบัดจากสภาวะที่เหมาะสมของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ค่า pH 10 เท่ากับ 58.0 บาท/ลบ.ม.
2. สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียที่ค่า pH 7 คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์/ตร. ซม. เวลา 40 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ความขุ่น และซีโอดีเป็น 90.0%, 10.7% และ 92.6% ตามลำดับ โดยมีความใช้จ่ายในการบำบัดจากสภาวะที่เหมาะสมของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ค่า pH 10 เท่ากับ 58.0 บาท/ลบ.ม. ในขณะที่ค่า pH 7 เท่ากับ 94.1 บาท/ลบ.ม.

3. น้ำเสียค่า pH เริ่มต้น 10 ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.02 แอมแปร์/ตร.ซม. นาน 20 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดี ใช้เวลาน้อยกว่า และมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่ต่ำกว่าที่ค่า pH 7

4. จากการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Kinetic) การกำจัดสีโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าทั้งที่ค่า pH 7 และ 10 พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง และจากค่า  $k$  นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะทำให้อัตราการกำจัดสีเกิดได้เร็วขึ้น

5. ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งมีประสิทธิภาพมากกว่าการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สี และซีโอดีอยู่ที่ 70.4%, 93.4% และ 62.1% ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อใช้ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งร่วมกับการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าจะทำให้สีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดดีขึ้น ซึ่งสามารถนำระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งมาใช้ร่วมกับการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าจะทำให้สีจริงของน้ำทิ้งภายหลังการกรองมีคุณภาพที่ดีขึ้น

#### เอกสารอ้างอิง

- Abeer, A. M., & Nemr, A. E. (2012). Electro-Coagulation for Textile Dyes Removal. In Ahmed, E.N. (Eds.), *Non-Conventional Textile Waste Water Treatment*, 161-204, Nova Science Publishers.
- Al-Shannag, M., Al-Qodah, Z., Bani-Melhem, K., Qtaishat, M. R., & Alkasrawi, M. (2015). Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance. *Chemical Engineering Journal*, 260, 749-756.
- APHA, AWWA, & WEF. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23<sup>rd</sup> ed.). Washington, DC: American Public Health Association.
- Arslan-Alaton, I., Kabdaşlı, I., Hanbaba, D., & Kuybu, E. (2008). Electrocoagulation of a real reactive dyebath effluent using aluminum and stainless steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 150(1), 166-173.
- Daneshvar, N., Ashassi Sorkhabi, H., & Kasiri, M. B. (2004). Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. *Journal of Hazardous Materials*, 112(1), 55-62.
- Danwittayakul, S. (2014). Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Technology material journal*, 90, 35-41. (in thai)
- Jitto, P., Chaikrathang, T., & Nakbanpote, W. (2016). Silk Textile Wastewater Treatment by Electrocoagulation Process. *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, 7(2), 228-239. (in thai)

- Joseph, T. N., & Obi, C. C. (2017). Abattoir Wastewater Treatment by Electrocoagulation Using Iron Electrodes. *Der Chemica Sinica*, 8(2), 254-260.
- Khan, H., Ahmad, N., Yasar, A., & Shahid, R. (2010). Advanced Oxidative Decolorization of Red CI-5B: Effects of Dye Concentration, Process Optimization and Reaction Kinetics. *Polish journal of environmental studies*, 19(1), 83-92.
- Kobyas, M., & Demirbas, E. (2015). Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Journal of Water Process Engineering*, 8, 64-74.
- Ministry of Industry. (2017). *Royal Gazette*, Volume 134, Special Issue 153. pp. 11-15.
- Moreno C. H. A., Cocke, D. L., Gomes, J. A. G., Morkovsky, P., Parga, J. R., Peterson, E., & Garcia, C. (2009). Electrochemical reactions for electrocoagulation using iron electrodes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(4), 2275-2282.
- Panathampon, R. (1997). *Feasibility study on high turbidity and poorly settleable raw water for water supply production by coagulation* [Unpublished master's thesis]. Kasetsart University. (in thai)
- Phalakornkule, C., Polgumhang, S., Tongdaung, W., Karakat, B., & Nuyut, T. (2010). Electrocoagulation of blue reactive, red disperse and mixed dyes, and application in treating textile effluent. *Journal of Environmental Management*, 91(4), 918-926.
- Şahinkaya, S. (2013). COD and color removal from synthetic textile wastewater by ultrasound assisted electro-Fenton oxidation process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(2), 601-605.
- Şengil, İ. A., & Özacar, M. (2009). The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2), 1369-1376
- Tanthulwet, M. (1999). *Water supply engineering*. (3<sup>rd</sup> ed.). Bangkok: Chulalongkorn university. (in thai)
- Toprak, T., & Anis, P. (2017). Textile industry's environmental effects and approaching cleaner production and sustainability, an overview. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 2(4), 429-442.
- Yimrattanabovorn, C. (2014). *Lifespan of shale subsurface flow constructed wetland for the treatment of textile wastewater* [Unpublished master's thesis]. Suranaree University of Technology. (in thai)