



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมในกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า เพื่อบำบัดน้ำเสียย้อมคราม

Reuse of aluminum electrodes in electrocoagulation process
for indigo dyeing wastewater treatment

ทองพล ประโยชน์มี พนมชัย วีระยุทธศิลป์ และ กัลยกร ขวัญมา *

Songphon Prayochmee, Panomchai Weerayuttil and Kulyakorn Khuanmar *

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen

Received: 7 May 2020

Revised: 25 July 2020

Accepted: 30 July 2020

Available online: 7 December 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมในกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเพื่อบำบัดน้ำเสียจากการย้อมคราม การทดลองดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมความหนา 0.5 มิลลิเมตร นอกจากนี้ได้ศึกษาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากการย้อมครามด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า การกำหนดปัจจัยในกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า ประกอบด้วย ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์แปร์/ตารางเมตร ค่า pH ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการที่ pH 11 และไม่มีการปรับค่า pH ในการทดลองกับถังปฏิกรณ์ต้นแบบ พบว่า การใช้ซ้ำ 3 ครั้ง ยังคงรักษารูปร่างและสีของขั้วไฟฟ้าด้านที่มีการละลายคือ แอโนด ไว้เหมือนด้านที่ไม่มีการละลายคือ แคโทด การทดลองใช้ถังปฏิกรณ์ต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการย้อมครามในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีอินทรีย์และสีเคมีร้อยละ 76.75 และ 76.39 ตามลำดับ สำหรับการใช้ขั้วไฟฟ้าด้านแอโนดซ้ำ 3 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายประมาณ 1,426.22 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร หากการใช้ซ้ำของขั้วด้านแอโนดจนละลายหมด มีค่าใช้จ่ายประมาณ 169.59 บาท ต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

คำสำคัญ: ขั้วอลูมิเนียม การตกตะกอนทางไฟฟ้า น้ำเสียย้อมคราม ถังปฏิกรณ์ต้นแบบ

Abstract

This research aimed to study the reuse of aluminum electrode in electrocoagulation process for wastewater treatment from indigo dyeing process. The experiments were conducted both in laboratory scale and small industry. An aluminum sheet thickness of 0.5 mm was used as electrodes in electrocoagulation process. Moreover, the cost of wastewater treatment was also studied. The conditions for electrocoagulation process were set as follow; electrolysis time of 60 minutes, current density of 300 A/m^2 , and initial pH of 11 or without adjustment when the experiments were conducted in prototype reactor. At the laboratory scale experiments, it was found that 3-times reuse could maintain the rectangular shape of anode electrodes as the shape of cathode. The prototype reactor for wastewater treatment from real indigo dyeing in a small industry, the efficiency of the 9-liters prototype reactor presented COD and color removal of 76.75% and 76.39% respectively. For 3-times reuse of anode electrode, it was costly 1,426.22 bath per cubic meter. Moreover, if the reuse of electrode was repeated until the anode was dissolved completely, the cost of treatment was about 169.59 bath per cubic meter.

Keywords: Aluminum electrode: Electrocoagulation: Indigo dyeing wastewater: Prototype reactor

*ติดต่อ: kulyakorn@kku.ac.th

1. บทนำ

มนุษย์ใช้สีย้อมจากธรรมชาติ (natural dyes) ตั้งแตยุคโบราณถึงกลางศตวรรษที่ 19 [1] โดยทั่วไปสีย้อมธรรมชาติได้จาก พืช สัตว์ และแร่ธาตุ โดยส่วนใหญ่เป็นสีที่ได้จากพืชเพราะหาได้ง่าย น้ำย้อมจากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติจัดได้ว่าเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ หรือ biodegradable organic compounds ต่อมา มีการพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ และการพัฒนาสีสังเคราะห์เพื่อให้ได้ปริมาณมากพอกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมมากขึ้น เป็นผลให้เกิดปัญหาอันเนื่องมาจากสารเคมีที่มีความเป็นอันตรายทั้งต่อสุขภาพของมนุษย์และต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จัดว่าเป็นสารประกอบ

อินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก หรือ non-biodegradable organic compounds [2]

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีความสนใจกลับมาใช้สีย้อมจากธรรมชาติในการย้อมสิ่งทอมากขึ้น จึงได้มีการฟื้นฟูการย้อมผ้าด้วยสีย้อมจากธรรมชาติ ซึ่งจังหวัดสกลนครเป็นอีกแหล่งที่ได้ฟื้นฟูการย้อมสีธรรมชาติโดยใช้สารธรรมชาติจากต้นคราม ผ้าครามจึงถือเป็นอัตลักษณ์และเป็นผลิตภัณฑ์ประจำถิ่นของสกลนคร เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทรงคุณค่าทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคมและวัฒนธรรม ได้รับการยอมรับว่ามีเนื้อสัมผัสเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว โดยมีการจัดตั้งเป็นกลุ่มวิสาหกิจชุมชนขนาดเล็ก ส่วนใหญ่มีการฟอกย้อมตามฤดูกาล สีครามที่ได้จากการสกัดจากต้นครามยังมีคุณสมบัติยึดติดกับโครงสร้างของใยผ้าฝ้าย

ได้ดีเนื่องจากสีครามเป็นสีย้อมประเภทแคว้ตาย (vat dye) [3] จึงทำให้ผ้าย้อมครามมีคุณสมบัติสีติดทนเป็นพิเศษ ผ้าย้อมครามได้รับการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ทั้งที่คงเอกลักษณ์ท้องถิ่นและปรับปรุงตามยุคสมัย อาทิเช่น เสื้อผ้า ผ้าพันคอและกระเป๋า การย้อมผ้าครามแม้จะเป็นกลุ่มวิสาหกิจขนาดเล็กมีน้ำเสียปริมาณไม่มาก และเป็นน้ำเสียประเภทสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ แต่หากน้ำเสียเหล่านี้มีการระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่มีการปรับปรุงคุณภาพก่อน สีครามที่ปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในน้ำ บดบังการส่องผ่านของแสงในแหล่งน้ำ จึงจำเป็นจะต้องบำบัดน้ำเสียจากการย้อมครามก่อนปล่อยลงสู่แหล่งรองรับทางธรรมชาติ

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีไม่นิยมใช้วิธีการทางชีววิทยาเพราะประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ ดังนั้นมีหลายงานวิจัยใช้เทคนิคทางกายภาพและทางเคมี ตั้งแต่เทคนิคที่ไม่ซับซ้อน เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี [4] การดูดซับ [5, 6] และเทคนิคที่ซับซ้อนขึ้น เช่น Advance Oxidation Processes (AOPs) [7]

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (electrocoagulation) เป็นการตกตะกอนโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีร่วมกับการตกตะกอน ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน ใช้งานได้ง่าย และเป็นการลดการใช้สารเคมี [8] เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการอื่น ๆ นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้ายังสามารถนำมาใช้งานได้ซ้ำหลายครั้งและขนาดของระบบบำบัดมีขนาดเล็กใช้พื้นที่น้อย ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสี ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้ามีงานวิจัยหลายเรื่องที่ศึกษาการ

บำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการนี้ โดยศึกษาการบำบัดในน้ำเสียจากชุมชน [9 - 11] และบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น การฟอกหนัง [12, 13] เยื่อกระดาษ [14] รวมถึงการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ [15 - 18] ด้วยเช่นกัน

ปัจจุบันไม่มีกฎหมายควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมขนาดเล็กระดับครัวเรือน แต่หากต้องการยกระดับผลิตภัณฑ์ให้เป็นสินค้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หรือ Green Products จำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียให้ได้ระดับที่ไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นเทคนิคการบำบัดน้ำเสียที่มีกระบวนการไม่ซับซ้อนและสามารถใช้ได้ในอุตสาหกรรมย้อมครามขนาดเล็ก เนื่องจากค่าใช้จ่ายของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า สารเคมี ขั้วไฟฟ้า (electrode) มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ไม่สูง กระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการย้อมครามของอุตสาหกรรมขนาดเล็กระดับครัวเรือน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความสามารถในการใช้งานขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมในการบำบัดน้ำเสียจากการย้อมคราม โดยศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการรวมตะกอนทางไฟฟ้า และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการทดลองใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

2. วิธีการวิจัย

การศึกษาศักยภาพในการใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้า โดยใช้แผ่นอลูมิเนียม เพื่อบำบัดน้ำเสียย้อมครามด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า ในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) และทดลองใช้จริงด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบ (prototype) ในระดับ

อุตสาหกรรมขนาดเล็ก เนื่องจากอลูมิเนียมเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้า ขั้วแอโนดจะละลายและเปลี่ยนรูปเป็นอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $Al(OH)_3$ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตกตะกอนร่วม และขั้วแคโทดจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นช่วยให้เกิดการลอยตัวของตะกอนขึ้นไปที่ผิวน้ำ โดยการทดลองแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

2.1 การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

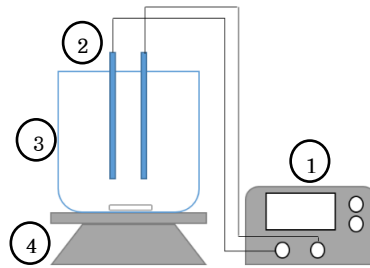
- 1) ถึงปฏิกรณ์สำหรับทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ใช้ปฏิกิริยาปริมาตร 500 มิลลิลิตร
- 2) ขั้วไฟฟ้าใช้แผ่นอลูมิเนียมความหนา 0.5 มิลลิเมตร เกรด 1100
- 3) ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมมีขนาด 50×150 มิลลิเมตร ความลึกใช้งาน 75 มิลลิเมตร
- 4) จัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Monopolar ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร
- 5) แหล่งพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น KPS3010D สามารถกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 30 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด 10 แอมป์แปร์ ขณะทดลองมีการควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแม่เหล็ก
- 6) กำหนดปัจจัยในการทดลอง คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์แปร์/ตารางเมตร และค่า pH ใช้ค่าที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียจริงที่ pH 11

7) หลังบำบัดตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที นำน้ำส่วนที่แยกตะกอนออกแล้วไปกรองด้วยทรายกรองขนาด 0.4-0.6 มิลลิเมตร ความหนาชั้นทรายกรอง 0.6-0.75 เมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและสี

8) ศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำจากน้ำหนักของขั้วแอโนดที่เปลี่ยนแปลง ลักษณะการกัดกร่อนของผิวขั้ว พร้อมลักษณะและสัญญาณของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) การติดตั้งชุดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 1

2.2 การทดลองใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

- 1) ถึงปฏิกรณ์ต้นแบบ ขนาดใช้งานในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก (กว้าง $200 \times$ ยาว $300 \times$ ลึก 300 มิลลิเมตร) ปริมาตรใช้งาน 9 ลิตร กันถังมีความดัน 45 องศา
- 2) ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมมีขนาด 90×300 มิลลิเมตร ความลึกใช้งาน 150 มิลลิเมตร
- 3) จัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Monopolar electrodes in series connections (MP- S) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 5 คู่ ระยะห่าง 15 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 การติดตั้งชุดการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (1) DC power supply
(2) Aluminum electrodes (3) EC reactor และ (4) Stirrer Plate

4) แหล่งพลังงานใช้สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแบบคงค่าแรงดัน (Switching Power supply) ค่าศักย์ไฟฟ้า 24 โวลต์ และค่ากระแสไฟฟ้า 20 แอมป์แปร์

5) เติมสารช่วยตกตะกอน ด้วย Cationic Polymers ปริมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

6) กำหนดปัจจัยในการทดลอง คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์แปร์/ตารางเมตร และใช้น้ำเสียจริงจากการย้อมคราม ไม่ปรับ pH ของน้ำเสีย

7) วิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสีไครีและค่าสี ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การทดลองใช้น้ำเสียจริงจากกระบวนการย้อมคราม จากวิสาหกิจชุมชนผ้าฝ้ายมัดย้อม บ้านสบเปือย อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร โดยทดลองในสถานที่จริงจำนวน 3 ครั้ง

ทั้งนี้การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งในถังปฏิกรณ์จะทำให้ฟล็อกแตกและตัวอย่างน้ำที่จะนำไปวิเคราะห์จะมีปริมาณตะกอนปนมาด้วย จึงมีการใช้การกรองด้วยทรายช่วยในการแยกตะกอนในกระบวนการทดลอง โดยการติดตั้งชุดการทดลอง ดังรูปที่ 2

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

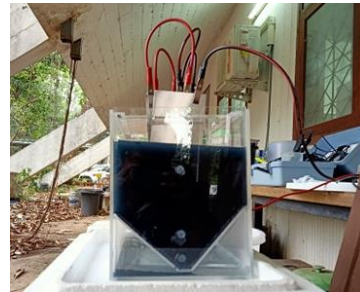
การศึกษาการใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมหนา 0.5 มิลลิเมตร เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ กำหนดเวลาการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์แปร์/ตารางเมตร โดยปรับค่า pH ให้มีค่าที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียจริงคือ pH เท่ากับ 11 ผลการทดลองแสดงได้ ดังนี้

3.1 ตัวอย่างน้ำเสีย

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เกิดขึ้นจากกระบวนการย้อมผ้าคราม จากการล้างสีที่ย้อมที่ไม่ติดกับเส้นใย น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีสีน้ำเงินเข้มอมเขียว โดยค่าที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาน้ำเสียจากกระบวนการย้อมผ้าครามจัดได้ว่าเป็นน้ำเสียประเภทสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable organic compounds) น้ำเสียจากกระบวนการย้อมผ้าคราม พารามิเตอร์หลักที่ก่อปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมคือสีครามที่คงเหลือในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมคราม

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากการล้างผ้าภายหลังการซักหม้อคราม

พารามิเตอร์	ค่าที่วิเคราะห์
pH	10.5-12.5
COD (mg/L)	2,500–3,100
Color (ADMI)	800-930
Total suspended solids (mg/L)	3,200-3,800
Total Dissolved solids (mg/L)	3,100-5,200
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1,870-3,900



รูปที่ 2 การติดตั้งชุดการทดลองใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบ

3.2 การกักกรองของขี้ไฟฟ้า

การกักกรองของขี้ไฟฟ้าจากการใช้งานถึงครั้งที่ 6 พบว่า ขี้แอมโมเนียเกิดการกักกรองที่ผิวหน้าตั้งแต่ใช้งานครั้งแรก โดยเริ่มแสดงให้เห็นการกักกรองจากบริเวณขอบด้านข้างและเห็นการเปลี่ยนแปลงจากการกักกรองที่ผิวของขี้ไฟฟ้าทำให้ขี้ไฟฟ้ามีลักษณะเปลี่ยนไปอย่างชัดเจนในการใช้ซ้ำครั้งที่ 3 และถูกกักกรองประมาณร้อยละ 35 ในครั้งที่ 6 ดังรูปที่ 3

ลักษณะและสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขี้ไฟฟ้าออลูมิเนียมจากภาพ Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงให้เห็นลักษณะสัณฐานของพื้นผิวขี้ไฟฟ้าออลูมิเนียมก่อนและหลังการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4 ก่อนการทดลองขี้ไฟฟ้า

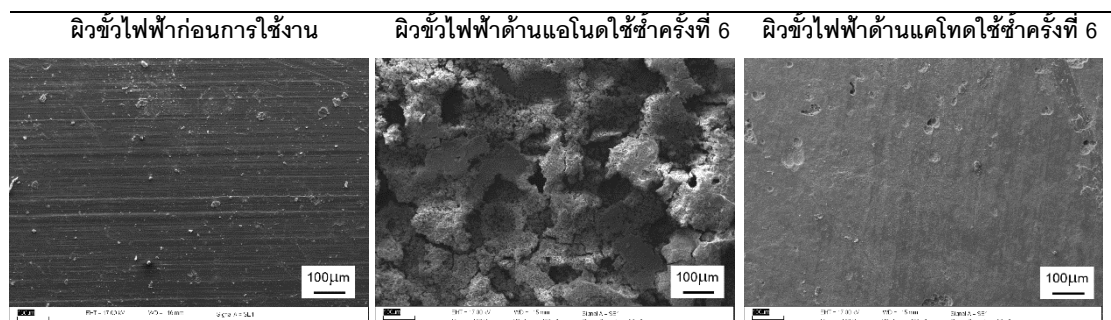
มีลักษณะสัณฐานและมีพื้นผิวที่เรียบและไม่มีรอยแตกร้าวบนพื้นผิว ขี้แอมโมเนียเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่พื้นผิวของขี้ ขี้ออลูมิเนียมด้านแอมโมเนียจะละลายอยู่ใน species ของออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ ช่วยในการรวมตะกอน ซึ่งลักษณะสัณฐานของพื้นผิวขี้แอมโมเนียหลังการทดลองซ้ำ 6 ครั้ง ขี้จะเกิดรอยแตกเป็นหลุมลึกที่เกิดจากการละลายของพื้นผิวโดยเกิดขึ้นทั่วทั้งแผ่น ส่วนด้านขี้แคโทดขี้มีการกักกรองเพียงเล็กน้อย เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่พื้นผิวของขี้แคโทดทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน จึงไม่มีการกักกรองในส่วนของขี้ออลูมิเนียมด้านขี้แคโทด

3.3 น้ำหนักที่ลดลงของขั้วไฟฟ้า

การทดลองบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในระดับห้องปฏิบัติการ หลังการทดลองแต่ละครั้งน้ำหนักของขั้วอิเล็กโทรดจะลดลงเนื่องจากเกิดการละลายไอออนของโลหะจากขั้วไฟฟ้าด้านแอโนด น้ำหนักของขั้วแอโนดจะลดลงหลังการทดลองในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 2 ซึ่งขั้วไฟฟ้าความหนา 0.5 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยในการลดลงของน้ำหนักขั้วไฟฟ้าด้านแอโนด เท่ากับ 0.44 กรัม หรือคิดเป็นการลดลงร้อยละ 5.77 ตามลำดับ

ขั้วไฟฟ้า	ก่อน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
ขั้วแอโนด							
ขั้วแคโทด							

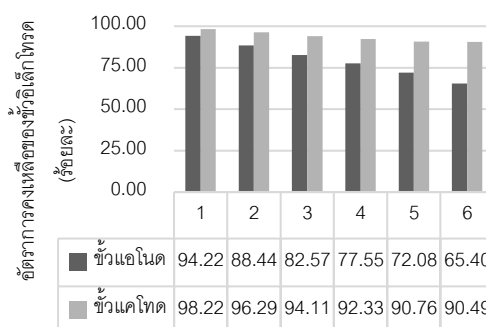
รูปที่ 3 ลักษณะการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ก่อนและหลังการใช้งาน



รูปที่ 4 ลักษณะและสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (SEM กำลังขยาย 100X)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า
 ขั้วไฟฟ้าให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสี มี
 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีเฉลี่ยร้อยละ
 67.98 และ 77.41 ตามลำดับ และโดยค่าเบี่ยงเบน
 มาตรฐาน (Standard deviation) มีค่าเท่ากับ 2.02

และ 1.54 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดสีโอดีขึ้นอยู่กับปริมาณสารแขวนลอยในน้ำเสีย โดยเฉพาะสารที่ตกตะกอนยาก เช่น คอลลอยด์ สำหรับค่าสีมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง เนื่องจากสีในน้ำเสียส่วนใหญ่อยู่ในรูปสาร Indigotin ที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำเสียอย่างมาก



รูปที่ 5 สัดส่วนน้ำหนักที่ลดลงของข้าวไฟฟ้าภายหลัง
การใช้งาน

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์สัดส่วนน้ำหนักที่ลดลงของข้าวไฟฟ้าภายหลังการใช้งาน

ประเภทข้าวอิเล็กทรอนิกส์		จำนวนการใช้งาน (ครั้งที่)						
		ก่อน	1	2	3	4	5	6
ข้าวแอนด์	น้ำหนัก (กรัม)	7.55	7.12	6.68	6.24	5.86	5.44	4.94
	ร้อยละ	100.0	94.22	88.44	82.57	77.55	72.08	65.40
ข้าวแคโทด	น้ำหนัก (กรัม)	7.47	7.34	7.19	7.03	6.90	6.78	6.76
	ร้อยละ	100	98.22	96.29	94.11	92.33	90.76	90.49

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และสี ในระดับห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพจากการใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้า (ร้อยละ)							
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	เฉลี่ย	SD
ซีโอดี	68.08	68.49	69.83	66.47	70.15	64.86	67.98	2.02
สี	74.86	76.63	79.37	77.50	78.27	77.85	77.41	1.54

อย่างไรก็ตาม สารคอลลอยด์ในน้ำเสียส่วนใหญ่จะมีประจุลบ การเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี สามารถทำได้โดยการเติมสารช่วยสร้างตะกอนด้วย Cationic Polymer ที่มีประจุเป็นบวก จึงจะช่วยลดค่าซีโอดีได้ ดังนั้น การทดลองใช้งานในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก จะทดลองด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบขนาด 9 ลิตร ร่วมกับการเติมสาร Cationic Polymer เพิ่มประสิทธิภาพในการรวมตะกอน

3.5 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียย้อมครามในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

การบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบได้ทดลอง ณ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดสกลนคร โดยกำหนดปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ ค่า pH ของน้ำเสียจริงที่ไม่ได้ปรับสภาพ สาร Cationic Polymer 5 มิลลิกรัม/ลิตร ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์แปร์/ตารางเมตร เวลา 60 นาที จัดวางขั้วแบบ Monopolar electrodes in series connections (MP- S) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ ด้วยขั้วไฟฟ้าเดียวกัน หลังการทดลองในแต่ละครั้งจะระบายน้ำทิ้งลงถังกรองทราย แล้วเติมน้ำเสียลงถังปฏิกรณ์เพื่อทดลองซ้ำโดยไม่ล้างถังและขั้วไฟฟ้า ผลของประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีจากการทดลอง ดังตารางที่ 4

ประสิทธิภาพจากการทดลอง 3 ซ้ำ สามารถบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 76.59 74.63 และ 79.02 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ร้อยละ 77.31 76.74 และ 75.12 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากมีการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ดังนั้น วิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในกระบวนการรวมตะกอนไม่ควรมีการกวน

ระบบในขั้นตอนการรวมตะกอน เพราะจะทำให้ฟล็อกแตกและตกตะกอนได้ช้าลง

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และสี ในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

การใช้ซ้ำ (ครั้งที่)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	
	ซีโอดี	สี
1	76.59	77.31
2	74.63	76.74
3	79.02	75.12

เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ก่อนและหลังการบำบัดกับค่ามาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งหลังการบำบัด พบว่า ค่า pH ลดลงอยู่ในช่วง 9.18-9.28 ค่าซีโอดีลดลงเหลือ 607-734 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าสีลดลงเหลือ 196-215 ADMI และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับ 32-33 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน จะเห็นว่า ค่า pH และซีโอดี ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ยังมีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตามน้ำล้างผ้าครามเป็นน้ำที่เกิดจากการเตรียมตามวิธีการทางธรรมชาติไม่มีการเติมสารเคมีใด ๆ ความสกปรกในรูปซีโอดีนั้นเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ โดย ปริมาณน้ำทิ้งขึ้นอยู่กับขนาดของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนและลักษณะเฉพาะของการย้อมครามในแต่ละพื้นที่ซึ่งมีความแตกต่างกัน ส่วนค่าสีภายหลังการบำบัดแล้วมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน อุณหภูมิภายหลังการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นแต่ไม่เกินกว่าค่ามาตรฐาน โดยผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดังตารางที่ 5

3.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

พิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายสิ้นเปลืองที่เกิดขึ้น ได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าสารเคมีและค่าหัวไฟฟ้า โดยดำเนินการบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบ มีรายละเอียด ดังนี้

1) ค่าพลังงานไฟฟ้า

การบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบ ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้า 24 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้า 20 แอมป์แอมป์ หรือมีกำลังไฟฟ้า 480 วัตต์ ใช้บำบัดน้ำเสีย 3 ครั้งรวม 3 ชั่วโมง สามารถคำนวณค่าไฟฟ้าได้ 1.44 กิโลวัตต์หรือยูนิต์ เมื่อกำหนดเป็นค่าไฟฟ้าตามประกาศการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย จะคำนวณค่าไฟฟ้า รวมค่า Ft และภาษี สำหรับการบำบัดน้ำเสีย 3 ครั้งเท่ากับ 3.4404 บาท หรือ 127.80 บาท/ลูกบาศก์เมตร

2) ค่าสารช่วยสร้างตะกอน

การทดลองได้เติมสารช่วยสร้างตะกอน ประเภท Cationic Polymer ปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อครั้ง หรือทดลอง 3 ครั้งใช้ 135 มิลลิกรัม โดย Cationic Polymer 1 กิโลกรัม ราคา 500 บาท ดังนั้น

การบำบัดน้ำเสีย 3 ครั้ง 27 ลิตร สามารถคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายได้เท่ากับ 0.0675 บาท หรือ 2.50 บาท/ลูกบาศก์เมตร

3) ค่าหัวไฟฟ้าอลูมิเนียม

ค่าหัวไฟฟ้าพิจารณาจากการใช้งาน ซึ่งไม่สามารถใช้งานส่วนปลายหัวที่เชื่อมกับสะพานไฟ เกิดเป็นของเสียที่ใช้งานไม่ได้ แต่นับเป็นค่าใช้จ่าย โดยคิดเฉพาะหัวแอดโนดที่เป็นหัวสิ้นเปลือง ส่วนหัวแคโทดสามารถใช้งานซ้ำได้หลายครั้ง โดยหัวไฟฟ้าอลูมิเนียมมีราคาประมาณ 7.00 บาทต่อหัว การทดลองใช้หัวแอดโนด 5 แผ่น ราคา 35.00 บาท สามารถคิดค่าใช้จ่ายได้ 2 กรณี (1) กรณีใช้งาน 3 ชั่วโมง บำบัดน้ำเสียรวม 27 ลิตร ค่าหัวไฟฟ้า 35.00 บาท หรือ 1,296.30 บาท/ลูกบาศก์เมตร (2) กรณีการใช้งานหัวส่วนที่จุ่มลงในน้ำเสียจนหัวละลายหมด เมื่อพิจารณาน้ำหนักหัวไฟฟ้าก่อนทดลองมีน้ำหนักประมาณ 16.25 กรัม หลังการทดลองมีน้ำหนักลดลง 0.163 กรัมต่อครั้ง ดังนั้น สามารถใช้งานหัวได้ 99 ครั้ง หรือบำบัดน้ำเสียรวม 891 ลิตร ค่าหัวไฟฟ้าอลูมิเนียม 35.00 บาท หรือ 39.29 บาท/ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 5 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ก่อนและหลังการบำบัดกับค่ามาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานฯ

พารามิเตอร์	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	มาตรฐาน*
พีเอช	10.47-10.80	9.18-9.28	5.5-9.0
ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	2,893	607-734	400
สี (ADMI)	864	196-215	300
อุณหภูมิ (°C)	30	32-33	40

* หมายเหตุ : มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิด ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมจำพวกที่ 2 และจำพวกที่ 3 โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสิ่งทอ ด้ายหรือเส้นใย

การบำบัดน้ำเสียจากการย้อมครามด้วย
ถึงปฏิกรณ์ต้นแบบ เมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทาง
เศรษฐศาสตร์จาก 3 ส่วน ได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่า
สารเคมีและค่าขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม กรณีใช้งาน 3 ชั่วโมง
มีค่าใช้จ่าย 1,426.60 บาท/ลูกบาศก์เมตร หากการใช้
งานขั้วไฟฟ้าด้านแอโนด ส่วนที่จุ่มลงในน้ำเสียจน
ขั้วแอโนดละลายหมด มีค่าใช้จ่ายประมาณ 169.59
บาท/ลูกบาศก์เมตร

4. สรุปผลการทดลอง

การใช้งานขั้วขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมในระดับ
ห้องปฏิบัติการ พบว่า ใช้งานได้ดีที่สุด 3 ครั้ง โดย
น้ำหนักขั้วลดลงร้อยละ 17.43 จากนั้นลักษณะขั้วจะ
เปลี่ยนรูปจากการกัดกร่อนอย่างชัดเจน โดยขั้วยัง
สามารถใช้งานได้แต่พื้นที่ผิวจะลดลง ส่วนขั้วแคโทด
สามารถใช้งานซ้ำได้หลายครั้งเนื่องจากการกัดกร่อน
น้อย

การทดลองใช้งานในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก
ด้วยถึงปฏิกรณ์ต้นแบบ และเติมสาร Cationic
Polymer เพิ่มประสิทธิภาพในการรวมตะกอน มี
ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีเฉลี่ยร้อยละ 76.75
และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีเฉลี่ยร้อยละ 76.39
เปรียบเทียบค่าหลังการบำบัดกับค่ามาตรฐานการ
ระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ค่า pH และค่า
ซีไอดี มีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนค่าสีมีค่าเป็นไป
ตามเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เน้น
การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กระดับ
ครัวเรือน หากมีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ
ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน
น่าจะเพียงพอที่ไม่เปลี่ยนแปลงสีในแหล่งน้ำธรรมชาติ

ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พิจารณาเฉพาะ
ค่าใช้จ่ายสิ้นเปลือง ได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่า
ขั้วไฟฟ้าและค่าสารเคมี การบำบัดน้ำเสียด้วย
ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมซ้ำ 3 ครั้ง บำบัดน้ำเสียรวม 27 ลิตร
มีค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 38.51 บาท หรือ 1,426.22 บาท/
ลูกบาศก์เมตร และหากการใช้ซ้ำของขั้วแอโนดจนละลาย
หมด จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 169.59 บาท/ลูกบาศก์
เมตร

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและ
เทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนงบประมาณในการ
ศึกษาวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Erkan G, Sengül K, Kaya S. Dyeing of white and indigo dyed cotton fabrics with Mimosa tenuiflora extract. Journal of Saudi Chemical Society. 2014; 18(2): 139–48.
- [2] Lellis B, Fávaro- Polonio CZ, Pamphile JA, Polonio JC. Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. Biotechnology Research and Innovation. 2019; 3(2): 275–90.
- [3] Secula MS, Crežescu I, Petrescu S. An experimental study of indigo carmine removal from aqueous solution by electrocoagulation. Desalination. 2011; 277(1–3): 227–35.

- [4] Albuquerque LF, Salgueiro AA, Melo JLDS, Chiavone-Filho O. Coagulation of indigo blue present in dyeing wastewater using a residual bittern. *Separation and Purification Technology*. 2013; 104: 246–9.
- [5] Hu Y, Chen X, Liu Z, Wang G, Liao S. Activated carbon doped with biogenic manganese oxides for the removal of indigo carmine. *Journal of Environmental Management*. 2016; 166: 512–8.
- [6] Zhu X, Bao L, Wei Y, Ma J, Kong Y. Removal of toxic indigo blue with integrated biomaterials of sodium carboxymethyl cellulose and chitosan. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2016; 91: 409–15.
- [7] Naciri N, et al. Effective photocatalytic decolorization of indigo carmine dye in Moroccan natural phosphate-TiO₂ aqueous suspensions. *Opt Mater (Amst)* 2016; 52: 38–43.
- [8] Emamjomeh MM, Sivakumar M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Environmental Management*. 2009; 90(5): 1663–79.
- [9] Anfruns-Estrada E, Bruguera-Casamada C, Salvadó H, Brillas E, Sirés I, Araujo RM. Inactivation of microbiota from urban wastewater by single and sequential electrocoagulation and electro-Fenton treatments. *Water Research*. 2017; 126: 450–9.
- [10] Elazzouzi M, Haboubi K, Elyoubi MS. Electrocoagulation flocculation as a low-cost process for pollutants removal from urban wastewater. *Chemical Engineering Research and Design*. 2017; 117: 614–26.
- [11] Elazzouzi M, El Kasmi A, Haboubi K, Elyoubi MS. A novel electrocoagulation process using insulated edges of Al electrodes for enhancement of urban wastewater treatment: Techno-economic study. *Process Saf Environ Prot*. 2018; 116: 506–15.
- [12] Deghles A, Kurt U. Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/electrodialysis process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2016; 104: 43–50.
- [13] Moradi M, Moussavi G. Enhanced treatment of tannery wastewater using the electrocoagulation process combined with UVC/ VUV photoreactor: Parametric and mechanistic evaluation. *Chemical Engineering Journal*. 2019; 358 (April 2018): 1038–46.

- [14] Camcioglu S, Ozyurt B, Hapoglu H. Effect of process control on optimization of pulp and paper mill wastewater treatment by electrocoagulation. *Process Safety and Environmental Protection* 2017; 111: 300–19.
- [15] Khorram AG, Fallah N. Treatment of textile dyeing factory wastewater by electrocoagulation with low sludge settling time: Optimization of operating parameters by RSM. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018; 6(1): 635–42.
- [16] Hendaoui K, Ayari F, Rayana I Ben, Amar R Ben, Darragi F, Trabelsi- Ayadi M. Real indigo dyeing effluent decontamination using continuous electrocoagulation cell: Study and optimization using Response Surface Methodology. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018; 116: 578–89.
- [17] Zazou H, Afanga H, Akhouairi S, Ouchtak H, Addi AA, Akbour RA, et al. Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electrochemical advanced oxidation process. *Journal of Water Process Engineering*. 2019; 28(February): 214–21.
- [18] Bilinska L, Blus K, Gmurek M, Ledakowicz S. Coupling of electrocoagulation and ozone treatment for textile wastewater reuse. *Chemical Engineering Journal*. 2019; 358(October 2018): 992–1001.