

การกำจัดไอออนสังกะสีจากน้ำเสียเส้นด้ายยางโดยใช้เทคนิคการตกตะกอนทางเคมี

Removal of Zinc Ions from Rubber Thread Wastewater using Chemical Precipitation Techniques

ชนิษฐา เจริญลาภ^{1*}, ฉันทมณี พูลเจริญศิลป์²
Khanittha Charoenlarp^{1*}, Chantamane Poonjarernsil²

^{1*}คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

¹Faculty of Textile Industries, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand

²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand

*Corresponding Author E-mail: khanittha.c@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดไอออนสังกะสีจากน้ำเสียเส้นด้ายยาง โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการตกตะกอน โดยใช้สารตกตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ (โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์) ศึกษาปริมาณของสารตกตะกอน เวลาการกวน เวลาการตกตะกอน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีของสารตกตะกอนแต่ละชนิด ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนสังกะสีด้วยวิธีการตกตะกอนคือใช้โซเดียมซัลไฟด์เข้มข้น ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิลิตร ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร อัตราการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราการกวนช้า 30 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที ปล่อยให้ตกตะกอน 60 นาที น้ำหลังบำบัดมีปริมาณไอออนสังกะสี 0.13 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 99.99 ± 0.03 นอกจากนี้ยังมีค่าพีเอช 4.77 ± 0.01 การนำไฟฟ้า 10.55 ± 0.06 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ซีโอดี $1,643.84 \pm 91.32$ มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งแขวนลอย 4.50 ± 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าใช้จ่ายในการบำบัด 91.32 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

คำสำคัญ: ไอออนสังกะสี น้ำเสียจากการผลิตเส้นด้ายยาง การตกตะกอน

ABSTRACT

The objective of this research was to remove zinc ions from rubber thread wastewater. The experiment was conducted by studying the optimum conditions of the precipitation process, i.e. the precipitant types (Sodium hydroxide, calcium hydroxide and sodium sulfide), amount of the precipitant, stirring time, settling time and comparison of zinc removal efficiency for each coagulant. The results showed that the optimum condition for the removal of zinc ions

by the precipitation method was to use sodium sulfide at a concentration of 10% by weight/volume at a volume of 26.67 mL per 1 L of wastewater, fast stirring rate 100 rpm for 1 minute, slow stirring rate 30 rpm for 30 minutes and the settling time for 60 minutes. The zinc content of water after treatment was 0.13 ± 0.05 mg/L, corresponding to 99.99 ± 0.03 % removal efficiency. Moreover, pH value 4.77 ± 0.01 , conductivity 10.55 ± 0.06 μ S/cm, COD $1,643.84 \pm 91.32$ mg/L. and suspended solids 4.50 ± 1.00 mg/L were obtained. The cost of wastewater treatment was 91.32 baht per cubic meter of wastewater.

Keyword: Zinc ion, Rubber thread wastewater, precipitation

1. บทนำ

เส้นด้ายยางเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตสินค้าในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุปกรณ์กีฬา รองเท้าสตรี และวัสดุทางการแพทย์ การผลิตเส้นด้ายยางเริ่มจากขนส่งน้ำยางพาราดิบสู่โรงงานแปรรูป ซึ่งมีการเติมแอมโมเนียผสมลงในน้ำยาง เพื่อไม่ให้น้ำยางเกิดการเน่าเสีย ในขั้นตอนการผลิตจะนำน้ำยางดิบผสมสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพยาง โดยมีซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นส่วนผสมหลัก น้ำยางดิบที่ผสมสารเคมีจะส่งไปยังถังอัดกรอง และฉีดเป็นเส้นด้ายยาง ทำให้คงรูปด้วยกรดแอซิดิก ตามด้วยการล้างเส้นด้ายยางที่ได้ด้วยน้ำร้อน เพื่อทำความสะอาดสารเคมีซึ่งติดที่ผิวด้านนอกของเส้นยาง จากกระบวนการเหล่านี้ ทำให้น้ำเสียที่เกิดจากการผลิตเส้นด้ายยาง มีค่าซีไอดีสูงจากการใช้กรดแอซิดิก แอมโมเนีย และสารเคมีที่ใช้ในการให้เส้นยางคงรูปซึ่งมีสังกะสีเป็นองค์ประกอบ ไอออนสังกะสีที่ปนเปื้อนในน้ำเสียถ้ากำจัดออกไม่หมดจะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพล้มเหลว ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดไอออนสังกะสีออกก่อนที่จะนำน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพ การกำจัดสารประเภทโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโดยทั่วไปจะใช้กระบวนการ

ตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารที่อยู่ในรูปสารละลายให้เป็นรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ โดยเติมสารเคมีผสมกับน้ำเสียเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้สามารถแยกมลสารในรูปของแข็งที่ไม่ต้องการออกจากน้ำเสีย ของแข็งที่ตกตะกอนสามารถแยกออกจากสารละลายน้ำโดยการตกตะกอนหรือการกรอง [1–3] กระบวนการตกตะกอนทางเคมีของโลหะหนักมีหลายรูปแบบ เช่น การตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation) การตกตะกอนในรูปซัลไฟด์ (Sulfide precipitation) การตกตะกอนในรูปคาร์บอเนต (Carbonate precipitation) [4–5] การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ เป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยเติมสารเคมี ได้แก่ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภท แต่มีข้อจำกัดคือโลหะไฮดรอกไซด์มีสมบัติแอมโฟเทอริก (Amphoteric property) คือไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับนิกเกิลคือ 10.0 – 10.5 สำหรับสังกะสีคือ 9.0 – 9.5 และสำหรับทองแดงคือ 8.5 – 9.5 [6] และสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์สามารถละลายถ้าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกตะกอนผลึก [7] การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ ซัลไฟด์ที่ใช้ในการตกตะกอนมีหลายรูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ละลายน้ำได้ เช่น โซเดียมซัลไฟด์

(Na₂S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) รูปแบบที่ละลายได้เล็กน้อยเช่นแคลเซียมซัลไฟด์ (CaS) รูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) หรือรูปแบบแก๊ส เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) [8] การตกตะกอนโลหะหนักโดยใช้สารประกอบซัลไฟด์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับการใช้สารตกตะกอนชนิดอื่น เนื่องจากตะกอนในรูปโลหะหนักซัลไฟด์มีความสามารถในการละลายต่ำ [9] ในส่วนของค่าพีเอชในน้ำเสียนั้น ค่าพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการแบบซัลไฟด์อยู่ในช่วงพีเอชที่เป็นกลางไปจนถึงช่วงที่เป็นด่างเล็กน้อย หากพีเอชเป็นกรดจะทำให้โลหะถูกกำจัดได้น้อยและเป็นสาเหตุให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ [10] การตกตะกอนผลึกคาร์บอเนต ส่วนใหญ่ใช้โซเดียมคาร์บอเนตหรือโซดาแอช (Na₂CO₃) หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) การตกตะกอนผลึกคาร์บอเนต เหมาะสำหรับการตกตะกอนแคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว และมีค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนต่ำกว่าในกรณีของการตกผลึกไฮดรอกไซด์ และไม่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ อีกทั้งสัณฐานที่เกิดขึ้นจะตกตะกอน และรีดน้ำออกได้ง่ายกว่าการตกผลึกไฮดรอกไซด์ [11-12] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของสารตกตะกอนสามชนิด คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ ในการกำจัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียโรงงานเส้นด้ายยาง รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียระหว่างสารตกตะกอนทั้งสามชนิด

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

2.1 วัสดุและสารเคมี

สารเคมี

สารเคมีเกรดสำหรับวิเคราะห์ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์

(Ca(OH)₂ โซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) สารละลายมาตรฐาน สังกะสี ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag₂SO₄) โพแทสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇) เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FeSO₄·(NH₄)SO₄·6H₂O) เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ สารซินكرون (C₂₀H₁₅N₄NaO₆) และกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H₂SO₄) ของบริษัท Ajax finchem, Australia

ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นด้ายยาง โดยเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วง (grab sample) จากบ่อพัก น้ำเสีย เก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 1 ครั้ง เป็นเวลา 6 สัปดาห์

อุปกรณ์

เครื่องวัดค่าพีเอช ยี่ห้อ CyberScans รุ่น PC 200 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ยี่ห้อ CyberScan รุ่น CON 410 เครื่องทดสอบการตกตะกอนจาร์เทสต์ ยี่ห้อ VELP รุ่น FP4 และเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ยี่ห้อ PG Instrument รุ่น T110

2.2 วิธีทดลอง

(1) เตรียมสารรวมตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

(2) ศึกษาชนิดและปริมาณของสารตกตะกอน ทดลองด้วยเครื่องจาร์เทสต์ ด้วยสภาวะดังนี้ ปริมาตรน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร อัตราทวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราทวนช้า 20 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที และเวลาตกตะกอน 60 นาที [13] โดยแปรผันชนิดและปริมาณของสารรวมตะกอน วิเคราะห์ปริมาณไอออนสังกะสีหลังการบำบัด เลือกชนิดและปริมาณของสารตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดไอออนสังกะสี นำไปทดลองหาเวลาทวนช้า

(3) ศึกษาเวลาทวนช้า โดยใช้ชนิดและปริมาณของสารตกตะกอนที่ได้จากข้อ (1) อัตราทวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราทวนช้า 20

รอบต่อนาที แปรผันเวลากวนซ้ำที่ 15, 30, 45, 60 นาที และเวลาตกตะกอน 60 นาที เลือกเวลากวนซ้ำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดไอออนสังกะสี นำไปทดลองหาเวลาตกตะกอน

(4) ศึกษาเวลาตกตะกอน โดยใช้ชนิดและปริมาณของสารตกตะกอนที่ได้จากข้อ (1) อัตราความเร็วที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราการกวนซ้ำที่ความเร็ว 20 รอบต่อนาที เวลากวนซ้ำที่ได้

จากข้อ (2) แปรผันระยะเวลาตกตะกอน 30, 60, 90, 120, 150 นาที เลือกเวลาตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดไอออนสังกะสี

(5) เปรียบเทียบสมบัติของน้ำเสียก่อนและหลังบำบัดด้วยสารตกตะกอนในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (1) – (3) โดยวิเคราะห์สมบัติของน้ำตามตารางที่ 1 ทั้งนี้ในแต่ละการทดลองจะทำซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ 1 วิธีการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย

พารามิเตอร์	วิธีการ	หมายเหตุ
พีเอช	ใช้เครื่องวัดพีเอช	[14]
การนำไฟฟ้า	ใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้า	[14]
ของแข็งแขวนลอย	กรองน้ำตัวอย่างที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันผ่านกระดาษกรอง GF/C (Glass-fiber filter) ที่ทราบน้ำหนัก แล้วนำกระดาษกรองพร้อมตะกอนที่ค้างอยู่ด้านบนไปอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่	[14]
ซีไอดี	วิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือจากการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสียภายใต้สภาวะกรดที่อุณหภูมิสูง โดยการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานเพอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ใช้เฟอร์โรนินเป็นอินดิเคเตอร์	[14]
ไอออนสังกะสี	ใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี โดยให้ไอออนสังกะสีทำปฏิกิริยากับสารซินครอน (Zincon; 2-carboxy-2'-hydroxy-5'-sulfoformazylbenzene) ในสภาวะต่าง (พีเอช 9) ได้สารประกอบเชิงซ้อนสีแดง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร	[15,16]

(6) คำนวณประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสี จากสูตร $((C_0 - C_1) / C_0) \times 100$ เมื่อ C_0 คือ ค่าที่วิเคราะห์ได้ของตัวอย่างน้ำเสียก่อนทดลอง และ C_1 คือ ค่าที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่างน้ำเสียหลังการทดลอง

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ลักษณะของน้ำเสียจากการผลิตเส้นด้าย

น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเส้นด้าย ยาง ส่วนใหญ่เกิดจากการล้างเส้นด้ายในถาดน้ำร้อน และการใช้กรดอะซิติกเพื่อให้เส้นด้ายคงรูป น้ำเสียมีสีขุ่น และมีสารเจือปนมากโดยเฉพาะ

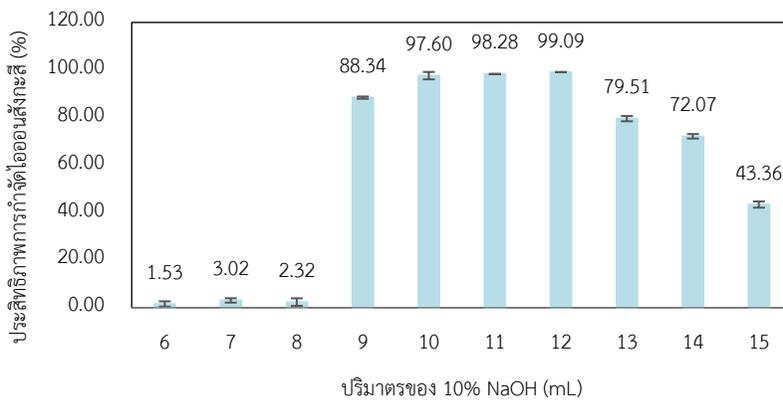
ไอออนของสังกะสี เนื่องจากในโรงงานสังเคราะห์เส้นด้ายอาจมีการเติมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ของเนื้อยางพาราที่ซัลเฟอร์เพื่อให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุลอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) ในเนื้อยาง นอกจากนี้ยังมีการเติมสารเติมแต่ง เช่น zinc-2-ercaptobenzothiazole (ZMBT) ทำให้น้ำทิ้งมีความเป็นกรดสูง โดยมีค่าเฉลี่ยพีเอชเท่ากับ 7.96 ± 0.02 และมีปริมาณไอออนสังกะสีปะปนในปริมาณสูง โดยมีปริมาณเฉลี่ยของไอออนสังกะสีเท่ากับ 909.06 ± 38.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไอออนสังกะสีในน้ำ

เสียมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเนื่องจากสังกะสีเป็นสารต้านแบคทีเรีย [17-18] จึงรบกวนระบบทางชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียทั้งแบบใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจน โดยไปยับยั้งการเจริญเติบโต หรือลดความสามารถในการทำงานของจุลินทรีย์ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ และอาจล้มเหลวได้ ดังนั้นจึงต้องมีขั้นตอนการกำจัดไอออนสังกะสีออกจากน้ำเสียก่อนที่นำน้ำเสียไปบำบัดด้วยระบบชีวภาพต่อไป

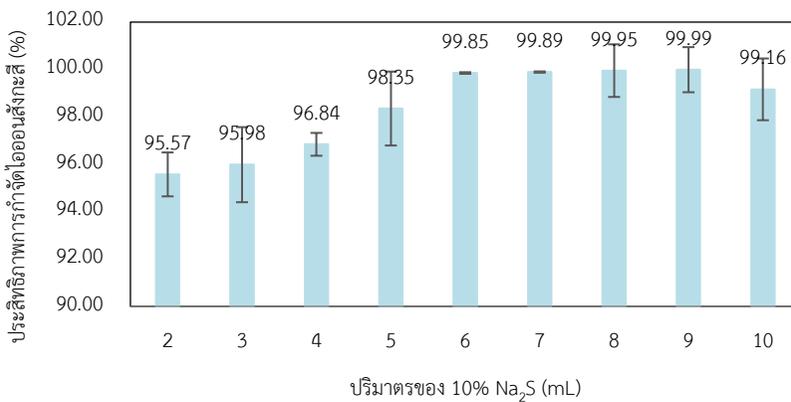
3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

3.2.1 ปริมาณที่เหมาะสมของสารตกตะกอน

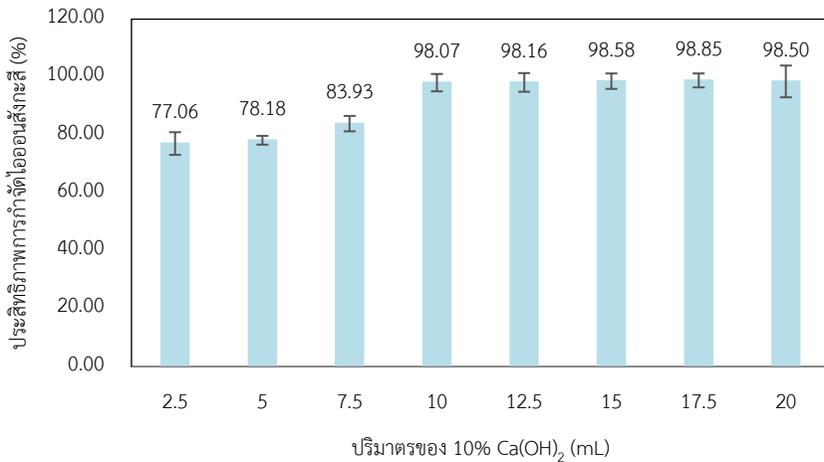
ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของสารตกตะกอนแต่ละชนิด ต่อปริมาตรน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร ได้ผลวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 1 – 3



ภาพที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ปริมาณแตกต่างกัน



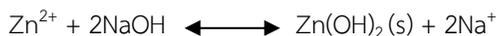
ภาพที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีด้วยโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ปริมาณแตกต่างกัน



ภาพที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตร ที่ปริมาณแตกต่างกัน

ผลการทดลองพบว่าชนิดและปริมาณของสารตกตะกอนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีในน้ำเสีย

การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นสารตกตะกอนพบว่า ปริมาณการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 มิลลิลิตร ต่อน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีสูงสุด คือร้อยละ 99.09 ± 0.03 โดยมีปริมาณไอออนสังกะสีหลังบำบัด 8.28 ± 0.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัดมีค่า 10.83 ± 0.02 ทั้งนี้ไอออนสังกะสีที่ถูกกำจัดจะอยู่ในรูปตะกอน $Zn(OH)_2$ โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการ [19]



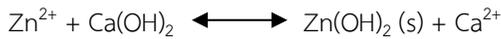
การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์มีข้อจำกัด คือโลหะไฮดรอกไซด์มีสมบัติแอมโฟเทอริก คือไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง โดย

ค่าพีเอชที่เหมาะสม สำหรับสังกะสีคือ 9.0 – 9.5 การเติมปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปทำให้โลหะไฮดรอกไซด์สามารถละลาย ถ้าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกตะกอนผลึก [7]

การใช้โซเดียมซัลไฟด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารตกตะกอน พบว่าปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 9 มิลลิลิตรต่อน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีสูงสุด คือร้อยละ 99.99 ± 0.95 โดยมีปริมาณไอออนสังกะสีหลังบำบัด 0.06 ± 0.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัดมีค่า 4.80 ± 0.02 สังกะสีที่ถูกกำจัดจะอยู่ในรูปตะกอน $ZnS(s)$ โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการ [19] และเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ถึงระดับหนึ่ง ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีจะมีแนวโน้มลดลง



การใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นสารตกตะกอน เป็นสารตกตะกอน พบว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 17.5 มิลลิลิตรต่อน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีสูงที่สุด คือร้อยละ 98.85 ± 2.41 โดยมีปริมาณไอออนสังกะสีหลังบำบัด 10.42 ± 2.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัดมีค่า 12.39 ± 0.16 ไอออนสังกะสีที่ถูกกำจัดจะอยู่ในรูปตะกอน $Zn(OH)_2$ โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการ [19]

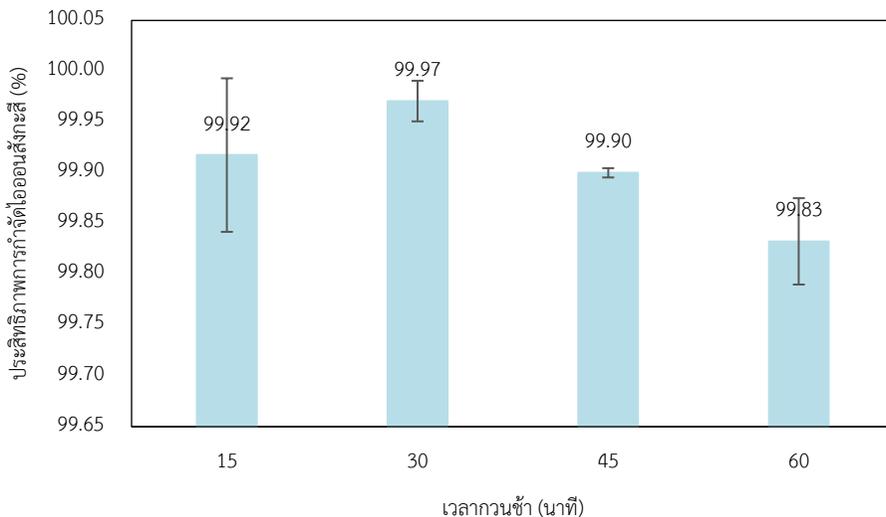


สรุปได้ว่าการใช้โซเดียมซัลไฟด์ มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดไอออนสังกะสีในน้ำเสีย รองลงมาเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลการทดลอง

ในภาพที่ 2 การใช้โซเดียมซัลไฟด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ปริมาตร 8 และ 9 มิลลิตรต่อน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีใกล้เคียงกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้สารตกตะกอนในการทดลองนี้จึงเลือกใช้โซเดียมซัลไฟด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 8 มิลลิตรต่อน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร หรือคิดเป็น 26.67 มิลลิลิตรต่อน้ำเสีย 1 ลิตร

3.2.2 ผลของเวลาการกวนซ้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี

ทดลองโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิลิตรต่อน้ำเสีย 1 ลิตร อัตราการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราการกวนช้า 30 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาการกวนซ้ำต่างกัน ปล่อยให้ตกตะกอน 60 นาที เก็บตัวอย่างส่วนใสมาวิเคราะห์หาปริมาณไอออนสังกะสีทดลองซ้ำ 4 ครั้ง ได้ผลวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4



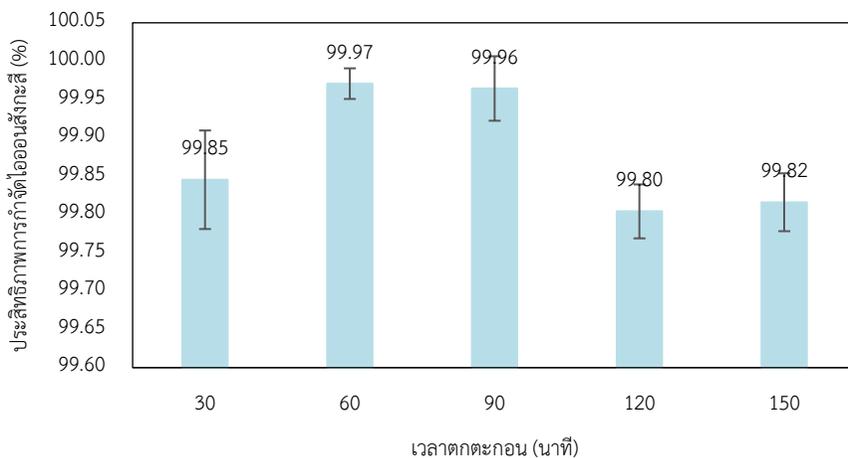
ภาพที่ 4 ปริมาณไอออนสังกะสีในน้ำเสียเส้นด้ายยางหลังบำบัดด้วยด้วยโซเดียมซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิลิตร ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ที่ระยะเวลาการกวนซ้ำต่างกัน

การกวนข้าวมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น และเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้ตะกอนมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนออกจากน้ำ [3,20] ผลการทดลองพบว่า เวลาการกวนข้าวมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีในน้ำเสีย การกวนข้าวด้วยอัตราความเร็ว 30 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีสูงที่สุด และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการกวนข้าวมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเวลาการกวนที่มากเกินไปจะส่งผลให้ตะกอน

ที่จับตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวออก [19] ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีมีค่าน้อยลง

3.2.3 ผลของเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี

ทดลองโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิลิตร ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร กวน อัตราความเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราความเร็ว 30 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที ปล่อยให้ตกตะกอนที่ระยะเวลาต่างกัน เก็บตัวอย่างส่วนใสมาวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสี ทดลองซ้ำ 4 ครั้ง ได้ผลวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ปริมาณไอออนสังกะสีในน้ำเสียเส้นด้ายยางหลังบำบัดด้วยด้วยโซเดียมซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิลิตร ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ที่ เวลาตกตะกอนต่างกัน

การตกตะกอนเป็นการแยกตะกอนที่มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนได้เองตามแรงโน้มถ่วง ทำให้ได้น้ำใส ผลการทดลองพบว่า เวลาตกตะกอนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในน้ำเสีย ที่เวลาตกตะกอน 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีสูงที่สุด คือร้อยละ 99.97 ± 0.02 และเมื่อเพิ่มระยะเวลาตกตะกอนนานมากขึ้นส่งผลให้

การกำจัดสังกะสีมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถละลายกลับมาได้อีก [7]

3.3 คุณภาพน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นด้ายยางยืดหลังการบำบัดด้วยสารเคมี

การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำก่อนและหลังบำบัดด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ได้ผลแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำเสียเส้นด้ายยางยืดก่อนและหลังบำบัดด้วยโซเดียมซัลไฟด์

พารามิเตอร์	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ค่ามาตรฐาน [21]
ปริมาณสังกะสี (ส่วนในล้านส่วน)	909.06 ± 38.56	0.13 ± 0.05	ไม่เกิน 5.0
พีเอช	4.58 ± 0.02	4.77 ± 0.01	5.5-9.0
ความนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	7.96 ± 0.02	10.55 ± 0.06	-
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	11,445.57 ± 1436.21	1,643.84 ± 91.32	ไม่เกิน 120.0
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	51.64 ± 2.38	4.50 ± 1.00	ไม่เกิน 50.0

ผลการทดลองพบว่าน้ำหลังบำบัดมีปริมาณไอออนสังกะสีลดลงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม แต่ยังมีค่าซีโอดี และค่าพีเอชของน้ำเสียที่ยังไม่เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง อย่างไรก็ตามโรงงานยังต้องนำน้ำเสียไปบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพต่อไป ซึ่งการกำจัดไอออนสังกะสีออกก่อนจะช่วยให้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3.4 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดไอออนสังกะสี ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยสารเคมีจะพิจารณาจากสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดได้แก่สารตกตะกอน และสารที่ใช้ในการปรับค่าความเป็นกรดหลังการบำบัดเพื่อให้มีค่าเท่ากับ 7 ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณต้นทุนการบำบัดน้ำ 1 หน่วย (บาทต่อลูกบาศก์เมตร) เป็นดังนี้

ต้นทุนการบำบัดน้ำ 1 หน่วย

= ค่าใช้จ่ายสารตกตะกอน 1 หน่วย +

ค่าใช้จ่ายในการปรับค่า pH 1 หน่วย

ค่าใช้จ่ายของสารตกตะกอน ได้แก่ ค่าโซเดียมซัลไฟด์ โดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิกรัมต่อ น้ำเสีย 1 ลิตร

ค่าใช้จ่ายสารรวมตะกอน

= (ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ × ราคา) /

1,000,000

ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ = 4,960 มิลลิกรัม

ต่อลิตร เมื่อความหนาแน่นของโซเดียมซัลไฟด์ = 1.86 กรัมต่อมิลลิกรัม และราคาโซเดียมซัลไฟด์ (เกรดอุตสาหกรรม) ประมาณ 18,412 บาทต่อตัน

ค่าใช้จ่ายสารตกตะกอน

= (4,960 × 18,412) / 1,000,000

= 91.32 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ในส่วนที่สองหลังการรวมตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ มีค่าใช้จ่ายในการปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าเป็นกลาง น้ำหลังการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ มีค่าพีเอชเท่ากับ 4.77 ดังนั้นสารที่ใช้ในการปรับพีเอชได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้สารที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตร ในการปรับค่าพีเอช จากสมการ

$[OH]_{\text{เริ่มต้น}} + [OH]_{\text{ที่เติม}} = [OH]_{\text{ที่ต้องการ}}$

เนื่องจาก $NaOH \longrightarrow Na^+ + OH^-$

เมื่อ $pOH = 14 - pH$ และ $pOH = -\log[OH]$

pH เริ่มต้น = 4.77

pOH เริ่มต้น = 14 - 4.77

$-\log[OH]_{\text{เริ่มต้น}} = 9.23$

$$\begin{aligned}
 [\text{OH}] \text{ เริ่มต้น} &= 10^{(-9.23)} = 5.89 \times 10^{-10} \text{ โมลต่อลิตร} &= 3.98 \times 10^{-6} \text{ g/L} \times 50\text{g}/100\text{g} \times 14.6 \text{ Bth./kg.} \times 1 \\
 \text{pH ที่ต้องการ} &= 7.00 &\text{kg}/10^3 \text{ g} \times 10^3 \text{ L}/\text{m}^3 \\
 \text{pOH ที่ต้องการ} &= 14.00 - 7.00 &= 2.91 \times 10^{-5} \text{ Bth./m}^3 \text{ (บาทต่อลูกบาศก์เมตร)} \\
 [\text{OH}] \text{ ที่ต้องการ} &= 10^{(-7.00)} = 1.00 \times 10^{-7} \text{ โมลต่อลิตร} \\
 \text{ดังนั้น } [\text{OH}] \text{ ที่เติม} &= [1.00 \times 10^{-7} - 5.89 \times 10^{-10}] &\text{ต้นทุนการบำบัดน้ำเสีย} = 91.32 + 2.91 \times 10^{-5} \\
 &= 9.94 \times 10^{-8} \text{ โมลต่อลิตร} &= 91.32 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{มวลโมลของ NaOH} &= 40 \text{ กรัมต่อโมล} \\
 \text{ปริมาณ NaOH ที่เติม} &= 40 [9.94 \times 10^{-8}] \\
 &= 3.98 \times 10^{-6} \text{ กรัมต่อลิตร}
 \end{aligned}$$

ใช้ NaOH เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ราคา 14.6 บาทต่อกิโลกรัม ในการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียค่าใช้จ่ายในการปรับพีเอช

เนื่องจากค่าใช้จ่ายของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับ พีเอชมีค่าน้อยมากจึงทำให้ผลรวมต้นทุนการบำบัดน้ำด้วยสารรวมตะกอนทางเคมี มากกว่าต้นทุนของโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีกับราคาสารเคมีได้ผลแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการกำจัดไอออนสังกะสีของสารตกตะกอนแต่ละชนิด

สารตกตะกอน	ปริมาณการใช้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ราคาสารตกตะกอน (บาทต่อตัน)	ราคาในการกำจัดไอออนสังกะสี (บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร)	ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสี (ร้อยละ)
โซเดียมซัลไฟด์	4960	18412	91.32	99.99 ± 0.95
โซเดียมไฮดรอกไซด์	8520	14562	124.07	99.09 ± 0.03
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	12890	7119	91.76	98.85 ± 2.41

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

โรงงานผลิตเส้นด้ายยางยืด ใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบในการผลิต และใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตทำให้น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเส้นด้ายยาง มีปริมาณสารอินทรีย์ และปริมาณสังกะสีในน้ำทิ้งสูง น้ำที่มีการปนเปื้อนด้วยสังกะสี เมื่อผ่านระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ จะทำให้จุลินทรีย์ในระบบบำบัดตายและไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดสังกะสีออกจากน้ำทิ้งก่อนที่จะนำน้ำไป

บำบัดต่อด้วยระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำจัดสังกะสีด้วยการตกตะกอนด้วยสารเคมี โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีคือ ชนิดและปริมาณของสารรวมตะกอน เวลาทวนซ้ำ และ เวลาตกตะกอน โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีมีข้อดีคือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีที่ละลายปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสูงมาก ประมาณร้อยละ 98.00 – 99.99 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารรวมตะกอนที่ใช้ และมีข้อเสียคือ มีค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ต้องควบคุมสภาวะในการรวมอย่าง

เหมาะสม ทั้งปริมาณสารเคมีที่เติม สภาวะในการกวนที่เหมาะสม เกิดตะกอนหลังบำบัดปริมาณมาก และตะกอนที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปสารประกอบ รวมทั้งมีสารผสมอื่นๆ เจือปน มีกลิ่นระหว่างการบำบัดและหลังการบำบัด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานประสานงานโครงการวิจัยการพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานความหลากหลายทางชีวภาพ ประจำปีงบประมาณ 2560

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ahmed Basha C, Bhadrinarayana NS, Anantharaman N, Meera Sheriffa Begum KM. Heavy metal removal from copper smelting effluent using electrochemical cylindrical flow reactor. *J Hazard Mater.* 2008 Mar 21; 152(1):71–8.
- [2] Akbal F, Camcı S. Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation. *Desalination.* 2011 Mar 15; 269(1–3):214–22.
- [3] Pohl A. Removal of heavy metal ions from water and wastewaters by sulfur-containing precipitation agents. *Water Air Soil Pollut.* 2020 Sep 28; 231(10):503.
- [4] Rodriguez-Freire L, Gonzalez-Estrella J, Li G. Technologies for fractionation of wastewater and resource recovery. In 2020. p. 329–54.
- [5] Vishali S, Kavitha E. Chapter 6 - Application of membrane-based hybrid process on paint industry wastewater treatment. In: Shah MP, Rodriguez-Couto S, editors. *Membrane-Based Hybrid Processes for Wastewater Treatment* [Internet]. Elsevier; 2021 [cited 2021 Dec 15]. p. 97–117. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128238042000161>
- [6] Ain Zainuddin N, Azwan Raja Mamat T, Imam Maarof H, Wahidah Puasa S, Rohana Mohd Yatim S. Removal of nickel, zinc and copper from plating process industrial raw effluent via hydroxide precipitation versus sulphide precipitation. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2019 Aug 1; 551(1):012122.
- [7] Ayres DM, Davis AP, Gietka PM. Removing heavy metals from wastewater University of Maryland; 1994 Aug Available from: <http://www.appliedmechtech.com/wp-content>
- [8] Veeken AHM, Akoto L, Hulshoff Pol LW, Weijma J. Control of the sulfide (S^{2-}) concentration for optimal zinc removal by sulfide precipitation in a continuously stirred tank reactor. *Water Res.* 2003 Sep; 37(15):3709–17.
- [9] U.S. EPA. Control and treatment technology for the metal finishing industry-sulfide precipitation. [Internet]. Cincinnati, Ohio: United States Environmental Protection Agency; 1980.

- Report No.: EPA 625/8-80-003. Available from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/30004EDD.TXT>
- [10] Yrjas KP, Zevenhoven CAP, Hupa MM. Hydrogen sulfide capture by limestone and dolomite at elevated pressure. 1. sorbent performance. *Ind Eng Chem Res.* 1996 Jan 1; 35(1):176–83.
- [11] Junuzovic H, Begic S, Selimović A, Djozic A, Cvrk R, Ahmetović M. Efficiency of carbonate precipitation and removal of copper and nickel ions from their mono-component and two-component aqueous solutions. *Int J Res Appl Sci Biotechnol.* 2019 Dec 13;06:11–5.
- [12] Patterson JW, Allen HE, Scala JJ. Carbonate precipitation for heavy metals pollutants. *J Water Pollut Control Fed U S* Available from: <https://www.osti.gov/biblio/5170276>
- [13] มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. 3rd ed. กรุงเทพฯ.: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2542.
- [14] American public health association, eaton AD, American water works association, water environment federation. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, D.C.: APHA-AWWA-WEF; 2005.
- [15] Platte JA, Marcy VM. Photometric Determination of Zinc with zincon. application to water containing heavy metals. *Anal Chem.* 1959 Jul 1;31(7):1226–8.
- [16] Säbel CE, Neureuther JM, Siemann S. A spectrophotometric method for the determination of zinc, copper, and cobalt ions in metalloproteins using Zincon. *Anal Biochem.* 2010 Feb 15; 397(2):218–26.
- [17] Faiz U, Butt T, Satti L, Hussain W, Hanif F. Efficacy of zinc as an antibacterial agent against enteric bacterial pathogens. *J Ayub Med Coll Abbottabad JAMC.* 2011 Jun; 23(2):18–21.
- [18] Sirelkhatim A, Mahmud S, Seeni A, Kaus NHM, Ann LC, Bakhori SKM, et al. Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Lett.* 2015 Jul 1; 7(3):219–42.
- [19] Freeman HM. Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal. 2 edition. New York: McGraw-Hill Education; 1997.
- [20] Cañizares P, Martínez F, Jiménez C, Sáez C, Rodrigo MA. Coagulation and electrocoagulation of oil-in-water emulsions. *J Hazard Mater.* 2008 Feb 28; 151(1): 44–51.
- [21] กระทรวงอุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 134 ตอนพิเศษ 153 ง 2560, 15 หน้า.