

การกำจัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อด้วยกระบวนการทำงาน ร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับ

Color Removal of Pulp and Paper Mill Industry by a Hybrid Coagulation and Adsorption Process

สุธาวัลย์ ตั้งจิตเจริญกิจ (Sutawan Tangjitjaroenkit)¹* สุรพล ผดุงทน (Surapol Padungthon)**

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีและราคาต้นทุนการกำจัดสีจากน้ำเสียที่มาจากระบบบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานผลิตกระดาษและเยื่อ ด้วยกระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกำจัดสีอื่นๆ ที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่สูง เช่น กระบวนการเฟนตัน จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยกระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับพบว่ามีความมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงมากกว่า 85-90% (น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าสีต่ำกว่า 50 ADMI) โดยมีราคาต้นทุนการกำจัดสีอยู่ที่ 6.78 บาท/ลบ.ม. เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเฟนตันซึ่งมีความสามารถในการกำจัดสีของน้ำให้ต่ำกว่า 50 ADMI ได้เช่นกัน โดยราคาต้นทุนการกำจัดสีของกระบวนการเฟนตันรวมสารเคมีที่ใช้สำหรับการปรับค่าพีเอชมีราคาเท่ากับ 15 บาท/ลบ.ม. ดังนั้นกระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับจึงเหมาะสำหรับการกำจัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ ในด้านประสิทธิภาพและราคาต้นทุนการกำจัดสีที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการเฟนตัน

ABSTRACT

The aims of this research is to study the color removal efficiency of a hybrid coagulation and adsorption process for treatment of effluent from pulp and paper mill industry and to compare the operation cost with the Fenton process. The results showed the hybrid process has color removal efficiencies in range of 85-90% (color of treated water < 50 ADMI) with the operation cost of 6.78 Baht/m³. Fenton process can remove color in the effluent from pulp and paper less than 50 ADMI with the operation cost of 15 Baht/m³ (including the chemicals for pH adjustment). Therefore, the hybrid coagulation and adsorption process is the most suitable color removal process for pulp and paper mill industry in terms of color removal efficiency and operation cost.

คำสำคัญ: กระบวนการตกตะกอน กระบวนการดูดซับ กระบวนการเฟนตัน

Keywords: Coagulation process, Adsorption process, Fenton process

¹ Corresponding author: Saifarrh1994@gmail.com

*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตกระดาษเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อภาคเศรษฐกิจของประเทศ เป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องจากภาคเกษตรกรรม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังภาคอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ สิ่งพิมพ์ และการใช้ในสำนักงาน การผลิตกระดาษนั้น เป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำในปริมาณที่สูง ดังนั้นหากมีการดูแลสิ่งแวดล้อมได้ไม่ดี จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอันมาก ในปัจจุบัน ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมได้ออกประกาศเรื่อง การกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานของสีในน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ ไว้ไม่เกิน 350 ADMI ซึ่งมีผลบังคับใช้นับจากวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ.2561 [1] ซึ่งในปัจจุบันน้ำเสียจากกระบวนการผลิต ซึ่งมีอยู่ประมาณ 25,000-30,000 m³/d จะถูกบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ แบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ซึ่งสามารถลดค่า BOD ได้แต่น้ำที่บำบัดแล้วปล่อยออกยังมีค่าซีโอดี และสีอยู่ในปริมาณที่สูง ประมาณ 400-500 AMDI ซึ่งค่าซีโอดีที่ยังสูงอยู่นั้นส่วนใหญ่มาจากสีนั่นเอง ในปัจจุบันทางโรงงานจะทำการนำน้ำที่บำบัดน้ำไปใช้รดน้ำในโครงการ Project Green ซึ่งดินตามธรรมชาติมีความสามารถที่จะดูดซับสีได้จำกัด

การกำจัดสีนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ 1) การใช้วัสดุดูดซับชนิดต่างๆ เช่น ถ่านไม้ ซึ่งเป็นกากของเสียจากหม้อต้มไอน้ำภายในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) หรือวัสดุดูดซับชนิดอื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะต้องใช้ในปริมาณที่สูง และใช้ได้ครั้งเดียว [2-4] (2) การใช้สารเคมี เช่น ปูนขาว, สารตกตะกอนประเภทต่างๆ เช่น สารส้ม, เฟอริกคลอไรด์ (FeCl₃), poly aluminium chloride (PAC), polymer ต่างๆ ซึ่งสามารถกำจัดสีได้ระดับหนึ่ง ส่วนใหญ่จำเป็นต้องใช้ในปริมาณที่สูง และทำให้ค่าของแข็งละลายน้ำ TDS เพิ่มขึ้น จนบางครั้งทำให้เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (เนื่องจากน้ำเสียเดิมมีค่า TDS สูงอยู่แล้ว) [5-7] (3) การใช้เมมเบรน เช่น ultra-filtration (UF), nano filtration (NF) สามารถกำจัดสีได้ดี แต่จะประสบปัญหาการอุดตัน (Fouling) ทำให้อายุการใช้งานของเมมเบรนสั้น และการติดตั้งระบบจะมีขนาดใหญ่มาก เนื่องจากปริมาณน้ำที่สูงถึง ประมาณ 30,000 m³/d หากไม่ต้องการคุณภาพน้ำที่ดีมาก ระบบเมมเบรนถือว่าไม่เหมาะสมสำหรับเพียงเพื่อกำจัดสีเพียงอย่างเดียว [8-10] (4) การใช้วิธีออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation process: AOP) เช่นการใช้ โอโซน (O₃) เฟนตัน (Fenton) และอื่นๆ ซึ่งวิธีการนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีหากแต่มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูงในกรณีที่มีปริมาณน้ำมาก หากต้องการทำลายสีที่มีความเข้มข้นสูงแต่ปริมาณน้ำน้อยจะเป็นวิธีที่เหมาะสมมากกว่า [10-12]

จากเทคนิค และวิธีการกำจัดน้ำเสียที่ได้กล่าวมานั้น ในทางทฤษฎี และการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการสามารถกำจัดน้ำเสียได้ทั้งสิ้น แต่ละวิธีมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไป สิ่งที่เป็นสิ่งที่ท้าทายและทำให้สามารถกำจัดน้ำเสียในปริมาณที่สูงมากถึง 30,000 m³/d และมีต้นทุนก่อสร้างและเดินระบบที่ต่ำที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยมีแนวคิดในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่เรียกว่า ระบบผสมในเส้นท่อและถังปฏิกริยาตัวกลางยัดติด (Hybrid Inline mixer and Fixed-bed: HIF) โดยวิธีดูดซับลงในวัสดุเกร็ดอุตสาหกรรมแบบใช้ซ้ำได้ ล้างสีด้วยสารล้างชนิดที่ใช้ซ้ำได้ และทำลายหรือนำเอาสีที่ล้างออกมาไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ ทำให้ระบบที่พัฒนาขึ้นนั้นผลิตตะกอนออกมาน้อยและไม่มีของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม น้ำที่บำบัดได้สามารถเลือกกระดุมการกำจัดได้ว่าจะต้องการกำจัดสีไว้ที่ความเข้มข้นเท่าใด น้ำที่บำบัดแล้วสามารถเลือกที่จะทิ้งหรือนำกลับเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตได้ขึ้นอยู่กับผลการกำจัดประสิทธิภาพของระบบ ทำให้ระบบบำบัดสี มีต้นทุนที่ต่ำกว่าการใช้วิธีการเดิมสารเคมีเพียงอย่างเดียว

วิธีการดำเนินงานวิจัย

น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท ฟินิกซ์ พลัส แอนด์ เปเปอร์ จำกัด โดยได้ทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพของน้ำทิ้งเบื้องต้นดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารเฟอร์รัสซัลเฟต สารตกตะกอนVideChem™ ACX-01 10 % w/v (KEEC, Thailand) (เป็นสารตกตะกอนในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโพลิเอมีน) และวัสดุดูดซับสี VitalSorb™ TPX01 (KEEC, Thailand) (เป็นวัสดุดูดซับที่ทำจาก Polymer) การวัดค่าสีใช้เครื่องการดูดกลืนแสง (spectrophotometer, DR6000) เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter, Thermo Orion) ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. ขั้นตอนการศึกษาการกำจัดสีด้วยเฟนตัน

เป็นการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตัน โดยเริ่มจากการศึกษาอัตราส่วนระหว่าง $H_2O_2:FeSO_4$ โดยใช้ H_2O_2 ลงที่เท่ากับ 30 มก./ล. และ 60 มก./ล. จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของ $FeSO_4$ ในช่วงความเข้มข้น 400 – 900 มก./ล. โดยการใช้วิธีจาร์เทสที่ความเร็วรอบการหมุน 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที และทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 60 นาที การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยกำหนดค่าพีเอชตั้งแต่ 2 – 7 ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 60 มก./ล. และเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 300 มก./ล. โดยการใช้วิธีจาร์เทสที่ความเร็วรอบการหมุน 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที และทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 60 นาที

การศึกษหาปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยา โดยกำหนดให้ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นถูกปรับให้เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการเฟนตันแล้ว และใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 60 มก./ล. และทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟตในช่วง 100 – 600 มก./ล. โดยการใช้วิธีจาร์เทสที่ความเร็วรอบการหมุน 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที และทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 60 นาที

2. ขั้นตอนการศึกษาการกำจัดสีด้วยกระบวนการทำงานร่วมของกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับ

การศึกษาการกำจัดสีด้วยกระบวนการทำงานร่วมนี้ เริ่มจากการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารตกตะกอน โดยใช้วิธีการทำจาร์เทสสารตกตะกอนACX01 ในช่วงความเข้มข้น 50 – 500 มก./ล. ความเร็วรอบการหมุน 130 รอบต่อนาที 3 นาที หมุนต่อด้วยความช้า 30 รอบต่อนาที 30 นาที และทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที สำหรับการศึกษาในส่วนของการกำจัดสีด้วยวัสดุดูดซับจะทำในสเกลใหญ่ (pilot scale) ใช้วัสดุดูดซับ 20 ลิตร บรรจุลงในคอลัมน์อะคริลิก กำหนดอัตราการไหลของน้ำเข้าคอลัมน์ที่ 2.5 ลิตรต่อนาที (น้ำที่เข้าสู่วัสดุดูดซับเป็นน้ำหลังผ่านการเติมสารตกตะกอน) น้ำหลังผ่านการกำจัดสีด้วยกระบวนการทำงานร่วมของกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับจะนำไปวัดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (American dye manufacturers institute, ADMI)

ตารางที่ 1 แสดงคุณลักษณะของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนการบำบัด	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว
pH (พีเอช)	-	6 – 8	6.5 – 7.5
BOD (บีโอดี)	mg/L	400 – 500	6 – 8
COD (ซีโอดี)	mg/L	1,000 – 1,500	250 – 350
SS (ของแข็งแขวนลอย)	mg/L	300 – 500	20 – 25
TDS (ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด)	mg/L	2,400 – 2,800	2,400 – 2,800
สี	Pt-Co	1,000 – 1,200	800 – 1,200

การคำนวณหาราคาดำเนินการกำจัดของแต่ละกระบวนการ

กระบวนการเฟ้นต้นและกระบวนการตกตะกอนสามารถคำนวณราคาดำเนินการกำจัดได้โดยตรงจากปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้และราคาสารเคมี ซึ่งมีราคาดำเนินการของสารเคมีดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ราคาสารเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

สารเคมี*	ราคา(บาท/กิโลกรัม)
H ₂ O ₂	25
FeSO ₄ ·7H ₂ O	15
HCl	17
NaOH	49
ACX01	24

สำหรับการราคาการกำจัดด้วยวัสดุดูดซับคำนวณได้จากปริมาณน้ำที่บำบัดได้ในหน่วยเบดวอลุ่ม(BV) ซึ่งหมายถึงปริมาณเท่าของน้ำที่บำบัดได้ต่อปริมาณของวัสดุดูดซับ โดยสามารถคำนวณได้ดังความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้
ราคาดำเนินการกำจัดของกระบวนการดูดซับ มีค่าเท่ากับ:

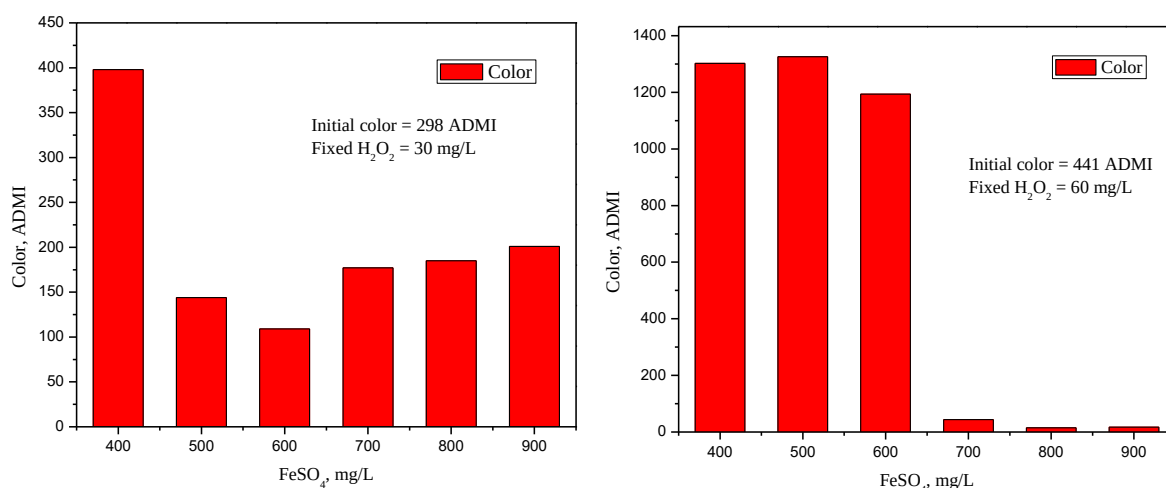
$$(\text{ปริมาณของวัสดุดูดซับที่ใช้} \times \text{ราคาวัสดุดูดซับ}) + \text{ราคาสารฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับ}$$

จำนวนเท่าของน้ำที่ผ่านวัสดุดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ $\times$ ปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้ $\times$ อายุการใช้งานของวัสดุดูดซับ

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

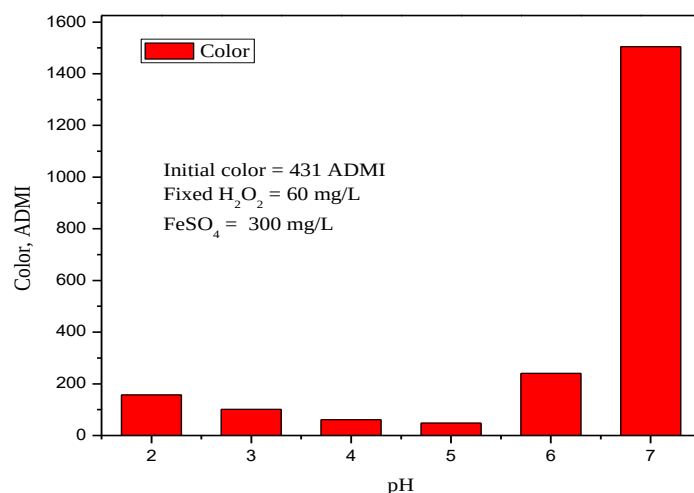
การศึกษาการกำจัดด้วยกระบวนการเฟ้นต้น

ส่วนเป็นการศึกษาปริมาณของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO₄) ที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยา น้ำทิ้งที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่าสีเริ่มต้นอยู่ในช่วง 250-450 ADMI และมีค่าพีเอชเป็นกลาง (pH=7) กำหนดปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ไว้เท่ากับ 30 มก./ล. จากภาพที่ 1ก. พบว่าปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO₄) ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 600 มก./ล. โดยมีค่าสีลดลงต่ำกว่า 100 ADMI และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) เป็น 60 มก./ล. ดังแสดงในภาพที่ 1ข. ปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO₄) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มเป็น 700 มก./ล. จะทำให้ปฏิกิริยาเฟ้นต้นเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ โดยค่าสีลดลงต่ำกว่า 50 ADMI



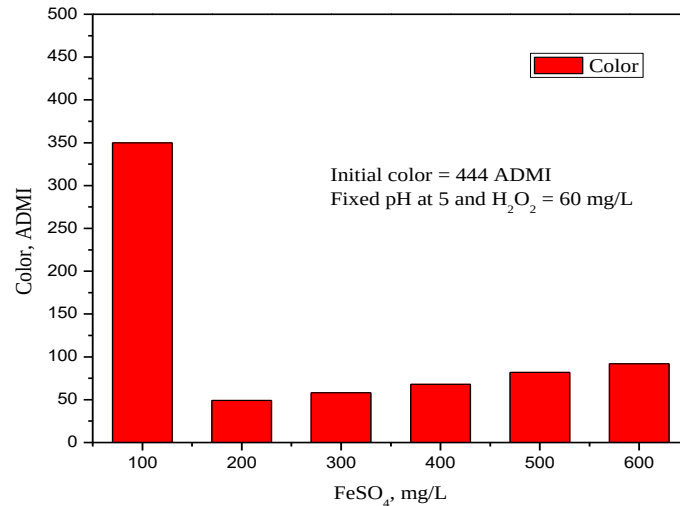
ภาพที่ 1 แสดงการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO₄) ที่ใช้สำหรับกระบวนการฟenton

จากข้อมูลที่ได้พบว่าปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO₄) ที่ใช้ในช่วงที่สูง เนื่องจากความต้องการใช้ออกซิเจนของเหล็กเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) แตกตัวเป็นหมู่ไฮดรอกซิล เพื่อใช้ออกซิไดซ์อนุภาคของสี ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นไอออนเหล็กของสารเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO₄) เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดหมู่ไฮดรอกซิลและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดสีด้วยกระบวนการฟenton ในการศึกษาทดลองนี้กำหนดปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ไว้ที่ 60 มก./ล. ปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO₄) ที่ใช้เท่ากับ 300 มก./ล. โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและค่าสีที่ลดลงพบว่าที่พีเอชเท่ากับ 5 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 2



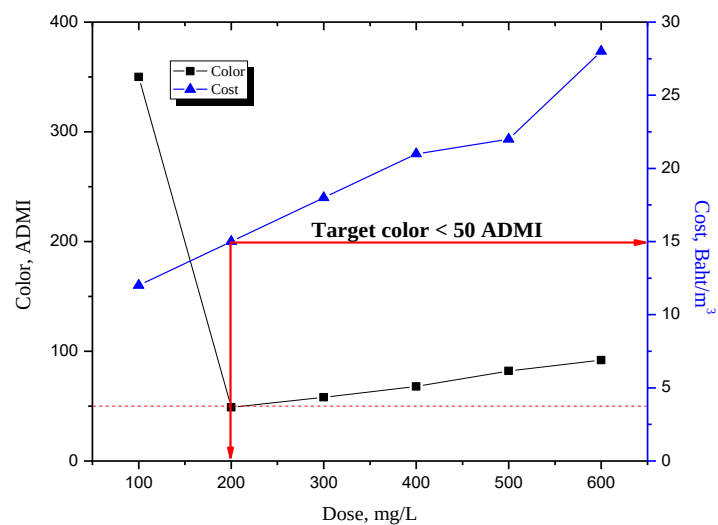
ภาพที่ 2 แสดงการศึกษาหาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีด้วยกระบวนการฟenton

ภาพที่ 3 แสดงการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ที่เหมาะสมในสภาวะที่น้ำเสียมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เท่ากับ 60 มก./ล. จากผลการทดลองพบว่าใช้เฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ลดลงจาก 700 มก./ล. เหลือเพียง 200 มก./ล. โดยมีค่าสีลดลงต่ำกว่า 50 ADMI เช่นเดิม



ภาพที่ 3 แสดงการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ในสภาวะที่น้ำเสียมีค่าพีเอชเท่ากับ 5

จากข้อมูลการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) และค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาเฟนตัน พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) เท่ากับ 200 มก./ล. และปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เท่ากับ 60 มก./ล. จากข้อมูลราคาสารเคมีในตารางที่ 2 สามารถใช้คำนวณราคาค่าต้นทุนการกำจัดด้วยกระบวนการเฟนตันตามเงื่อนไขที่เหมาะสมนี้ได้เท่ากับ 15 บาท/ลบ.ม. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี ราคาค่าต้นทุนการกำจัดและปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) แสดงในภาพที่ 4

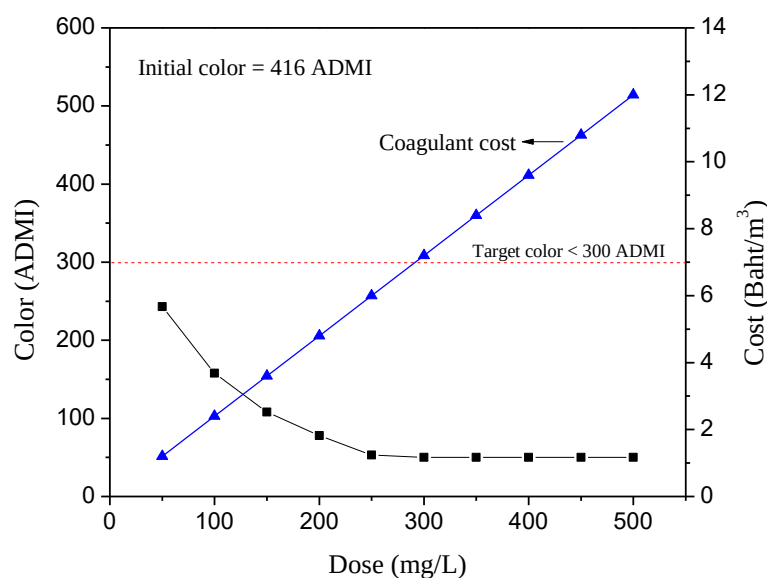


ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ต่อค่าสีที่ลดลงและราคาค่าต้นทุนสารเคมี

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยกระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับ

การศึกษาในส่วนแรกจะเริ่มจากการศึกษาหาปริมาณสารตกตะกอนที่จะนำมาใช้ โดยกำหนดให้ค่าสีหลังผ่านการเติมสารตกตะกอนต้องมีย่านต่ำกว่า 300 ADMI เพื่อเป็นการลดภาระการดูดซับสีของวัสดุดูดซับและยืดอายุการใช้งานของวัสดุดูดซับ โดยสารตกตะกอนที่เลือกใช้คือ ACX01 ซึ่งเป็นสารตกตะกอนประเภทพอลิเมอร์ มีองค์ประกอบหลักเป็นหมู่พอลิเอมีน มีคุณสมบัติในการสร้างและรวมตะกอนสูงโดยไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและจุลินทรีย์ ขั้นตอนการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นนี้จะใช้วิธีการจาร์เทส ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 5 พบว่าปริมาณความเข้มข้นของสารตกตะกอน ACX01 เพียง 50 มก./ล. ก็สามารถลดค่าสีของน้ำเสียให้ต่ำกว่า 300 ADMI ซึ่งคำนวณราคาต้นทุนของสารตกตะกอนที่ความเข้มข้น 50 มก./ล. ได้เท่ากับ 1.2 บาท/ลบ.ม. (ข้อจำกัดของกระบวนการตกตะกอนคือไม่สามารถวัดอนุภาคเฉพาะในส่วนองสีได้ เนื่องจากการตกตะกอนทั้งอนุภาคสีรวมกับอนุภาคแขวนลอยอื่น ๆ)

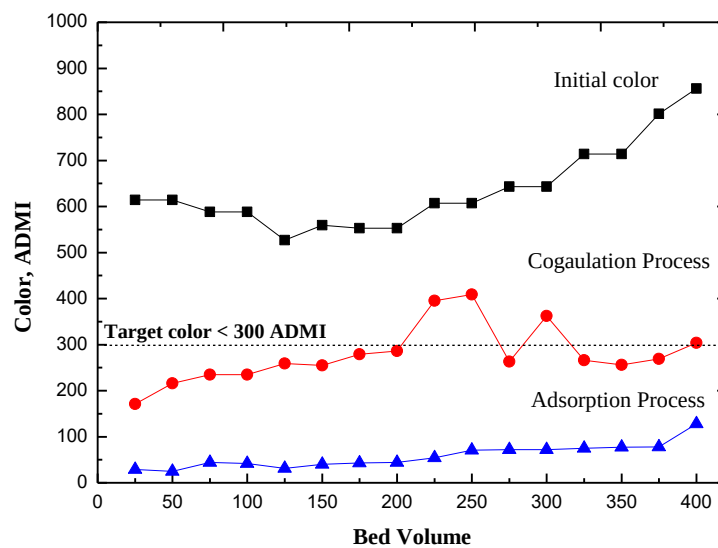
จากผลการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารตกตะกอนที่เหมาะสมในภาพที่ 5 สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์คำนวณหาปริมาณน้ำเสียที่สามารถบำบัดได้ต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Bed volume, BV) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับ ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลที่ได้นำจากการนำผลการศึกษาในส่วนองกระบวนการตกตะกอนมาคำนวณหาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับและราคาต้นทุนของระบบการทำงานร่วม เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการเลือกความสัมพันธ์ของทั้งสองกระบวนการพบว่าที่ความเข้มข้นของสารตกตะกอนเท่ากับ 100 มก./ล. จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียเริ่มต้นที่มีค่าสี 416 ADMI ให้ลดลงเหลือ 158 ADMI ทำให้ค่าสีเริ่มต้นของน้ำที่จะเข้าสู่วัสดุดูดซับมีค่าเท่ากับ 158 ADMI เมื่อนำน้ำที่ผ่านการเติมสารตกตะกอนไปกำจัดสีส่วนที่เหลือด้วยกระบวนการดูดซับ วัสดุดูดซับจะมีความสามารถในการดูดซับสีประมาณ 462 BV โดยราคาต้นทุนการกำจัดสีของกระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับมีค่าเท่ากับ 6.776 บาท/ลบ.ม. โดยผลการกำจัดสีของกระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับ ตามเงื่อนไขที่เหมาะสมที่เลือกนั้นแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 5 แสดงการศึกษาหาปริมาณสารตกตะกอน ACX01 ที่เหมาะสมเทียบกับราคาต้นทุนของสารตกตะกอน

ตารางที่ 3 แสดงเงื่อนไขของกระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับ

Coagulant process				Adsorption process		HIF cost (Baht/m ³)
Dose (mg/L)	Color (ADMI)	Efficiency (%)	Cost (Baht/m ³)	Adsorption (BV)	Cost (Baht/m ³)	
0	416	0	0	147.510	13.721	13.721
50	243	42	1.2	336.703	6.011	7.211
100	158	62	2.4	462.554	4.376	6.776
150	108	74	3.6	546.709	3.702	7.302
200	78	81	4.8	600.802	3.369	8.169
250	53	87	6	647.942	3.124	9.124
300	50	88	7.2	653.725	3.096	10.296
350	50	88	8.4	653.725	3.096	11.496
400	50	88	9.6	653.725	3.096	12.696
450	50	88	10.8	653.725	3.096	13.896
500	50	88	12	653.725	3.096	15.096



ภาพที่ 6 แสดงผลการทดสอบการเดินระบบจริงของกระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับ

สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดด้วยกระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับ เปรียบเทียบกับการใช้กระบวนการตกตะกอนในการกำจัดสี พบว่ากระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ดีเทียบเท่ากับกระบวนการเฟ้นต้น คือสามารถกำจัดสีในน้ำเสียให้มีค่าสีลดลงต่ำกว่า 50 ADMI ได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบกันในเรื่องของราคาค่าต้นทุนการกำจัดสีนั้นพบว่ากระบวนการเฟ้นต้นมีราคาค่าต้นทุนการกำจัดสีที่สูงกว่าคือ 15 บาท/ลบ.ม. เมื่อเทียบกับกระบวนการทำงานร่วม

ระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับที่มีราคาคำนวณการจัดซื้อเพียง 6.78 บาท/ลบ.ม. เท่านั้น ทั้งนี้ กระบวนการเฟ้นต้นเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะต้องปรับค่าพีเอชของน้ำให้เป็นกลางก่อน เนื่องจากปฏิกิริยาเฟ้นต้น ส่งผลให้น้ำที่ผ่านการปรับปรุงมีค่าพีเอชที่ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งดังนั้นกระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับจึงมีความเหมาะสมในการเลือกใช้ในการกำจัดสีมากกว่ากระบวนการเฟ้นต้นในด้านประสิทธิภาพการกำจัดสี, ราคาคำนวณการจัดซื้อ และความสะดวกในการดำเนินงาน เนื่องจากการกำจัดสีด้วยกระบวนการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการดูดซับให้ประสิทธิภาพที่สูง น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการนี้ควรได้รับการปรับปรุงคุณภาพให้เหมาะสมและนำกลับเข้าไปหมุนเวียนใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อลดการปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำภายนอก และยังเป็นการประหยัดทรัพยากรน้ำที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิตด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. Ministerial Notifications on the requirements on the characteristic of discharge wastewater from pulp and paper industry, 2018. 135: 13-16 p. Thai.
2. Patel H. Charcoal as an adsorbent for textile wastewater treatment. Separation Science and Technology, 2018, 53(17): 2797-2812 p.
3. GilPavas EI, Dobrosz-Gómez, Gómez-García M.-Á. Optimization and toxicity assessment of a combined electrocoagulation, H₂O₂/Fe²⁺/UV and activated carbon adsorption for textile wastewater treatment. Science of The Total Environment, 2019. 651: 551-560 p.
4. Singhal A, Jha PK, Thakur IS. Biosorption of pulp and paper mill effluent by *Emericella nidulans*: isotherms, kinetics and mechanism. Desalination and Water Treatment, 2016. 57(47): 22413-22428 p.
5. Zahrim A, Nasimah A, Hilal N. Coagulation/flocculation of lignin aqueous solution in single stage mixing tank system: modeling and optimization by response surface methodology. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015. 3(3): 2145-2154 p.
6. Yimrattanabavorn J, et al. Combination coagulation and adsorption processes for treating textile wastewater in household industry. International journal of geomate, 2018. 15(51): 16-21 p.
7. Sharma R, Kumar S, Sharma C. Influence of operational parameters on electrocoagulation process in pulp and paper mill effluent treatment. Environmental Engineering and Management Journal, 2014. 13(2): 289-296 p.
8. Jang H-H, Seo G-T, Jeong D-W. Advanced Oxidation Processes and Nanofiltration to Reduce the Color and Chemical Oxygen Demand of Waste Soy Sauce. Sustainability, 2018. 10(8).
9. Khosravi M, et al. Membrane Process Design for the Reduction of Wastewater Color of the Mazandaran Pulp-Paper Industry, Iran. Water Resources Management, 2011. 25(12): 2989-3004 p.
10. Sakurai K, et al. Post-treatment of effluent from the pulp and paper industry using microfiltration and ultrafiltration membranes combined with the Photo-Fenton process. Scientia Forestalis, 2016. 44(112): 937-945 p.
11. Grötzner M, et al. Pulp and Paper Mill Effluent Treated by Combining Coagulation-Flocculation-Sedimentation and Fenton Processes. Water, Air, & Soil Pollution, 2018. 229(11): 364 p.
12. Munir HMS, et al. Removal of colour and COD from paper and pulp industry wastewater by ozone and combined ozone/UV process. Desalination and water treatment, 2019. 137: 154-161 p.