

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตันและโซโน-เฟนตัน Treatment Of Pulp Process Wastewater Using Photo-Fenton And Sono-Fenton

ชมพูนุท ไชยรักษ์* และสุกัญญา โป่งรักษ์

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Chompoonut Chaiyaraksa* And Sukunya Pongruk

Environmental Chemistry Program, Faculty Of Science, King Mongkut's Institute Of Technology

Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520

บทคัดย่อ

กระบวนการโฟโต-เฟนตันและโซโน-เฟนตัน เป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากได้ โฟโต-เฟนตันและโซโน-เฟนตัน จะใช้รังสียูวีและคลื่นอัลตราซาวด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายให้กับกระบวนการเฟนตันโดยทั่วไป น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษประกอบด้วยลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนิน ซึ่งทำให้น้ำเสียมีค่าซีโอดีและความเข้มข้นสูง จุดมุ่งหมายในการศึกษาครั้งนี้เพื่อบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ โดยใช้กระบวนการโฟโต-เฟนตันและโซโน-เฟนตัน ค่าซีโอดีและความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย คือ ประมาณ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3,000 ADMI ตามลำดับ โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดค่าซีโอดีและความเข้มข้นด้วยกระบวนการโฟโต-เฟนตันด้วยการแปรผันค่าความเข้มแสงที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 0-500 ลักซ์ และระยะเวลาในการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 0-40 นาที ส่วนการบำบัดด้วยกระบวนการโซโน-เฟนตันนั้นแปรผันระยะเวลาในการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา 0-40 นาที ในการทดลองจะให้ค่าความเข้มข้นเพอร์สไอออน 0.03 โมล ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล และค่าความเป็นกรดต่าง 3 คงที่ โดยทำการควบคุมด้วยการใช้วาล์ว การทดลองมี 3 ซ้ำ ผลการทดลองระบุว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและสีสูงสุด เมื่อให้ค่าความเข้มแสงที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 200 ลักซ์ และระยะเวลาการฉายแสงยูวีที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 10 นาที ในกระบวนการโฟโต-เฟนตัน ส่วนกระบวนการโซโน-เฟนตันนั้นประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด เมื่อใช้ระยะเวลาการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ค่าซีโอดีและสีลดลงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อบำบัดด้วยโฟโตเฟนตัน และ 97 เปอร์เซ็นต์ เมื่อบำบัดด้วยโซโนเฟนตัน เมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสมไปบำบัดน้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ พบว่ากระบวนการโฟโต-เฟนตันมีความสามารถในการบำบัดซีโอดีและสีได้มากกว่ากระบวนการโซโน-เฟนตัน โดยกระบวนการโฟโต-เฟนตันสามารถบำบัดซีโอดีและสีได้ 95.07 และ 91.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

คำสำคัญ : กระบวนการโซโน-เฟนตัน; กระบวนการโฟโต-เฟนตัน; คลื่นความถี่เหนือเสียง; ซีโอดี; ความเข้มแสง

Abstract

Photo-Fenton and sono-Fenton process are advanced oxidation processes. The processes could decompose not easily degradable organic substances. Photo-Fenton and sono-Fenton process use ultraviolet and ultrasound to increase general Fenton oxidation efficiency. Pulp process wastewater contains high concentration of lignin and their derivatives which cause the wastewater high in COD and color intensity. The purpose of this study was treating of pulp process wastewater using photo-Fenton and sono-Fenton process. An initial COD and color of wastewater were about 2,000 mg/L and 3,000 ADML, respectively. An optimum COD and color removing condition for photo-Fenton was studied by varying the UV light intensity (0-500 Lux) and contact time (0-40 minutes). For sono-Fenton treatment process, the sonication time was varied from 0 to 40 minutes. In all experiments the concentration of ferrous ion, concentration of hydrogen peroxide and pH value were fixed at 0.03 mole, 0.06 mole and 3, respectively. The treating of deionized water was done as a control. All experiments were repeated triplicately. The results indicated that the highest COD and color treating efficiency for photo-Fenton process was found when using 200 Lux light intensity for 10 minutes. For sono-Fenton process, the treating efficiency was highest when using 30 minutes sonication time. The COD and color could be reduced more than 90 % by photo-Fenton process and 97 % by sono-Fenton process. By using the optimum condition of each process to treat wastewater from Pulp process, photo-Fenton was found giving a higher treating efficiency than sono-Fenton process. The COD and color removing efficiency of photo-Fenton process were 95.07% and 91.77%, respectively.

Keywords: sono-Fenton; photo-Fenton; ultrasonic waves; COD; light intensity

1. บทนำ

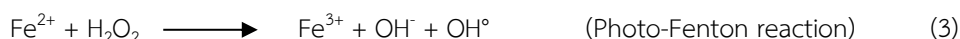
กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมีน้ำเสียเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยมีลิกนิน อนุพันธ์ของลิกนิน และโพลีเมอร์ของลิกนิน เป็นสารที่ทำให้น้ำเสียมีสีเข้ม ซึ่งน้ำเสียทั้งหมดนี้มาจากกระบวนการต้มเยื่อ ล้างเยื่อ และฟอกเยื่อ ลิกนินเหล่านี้ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ น้ำเสียที่ถูกปล่อยทิ้งยังมีสีน้ำตาลที่เข้มอยู่ มีค่าซีโอดีที่สูงและเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้คือ 120 มิลลิกรัม/ลิตร และ

ถึงแม้ว่าสีของน้ำทิ้งจะยังไม่กำหนดออกมาเป็นตัวเลขที่ชัดเจน ซึ่งกำหนดเพียงแค่ว่าสีของน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ แต่หากปล่อยน้ำทิ้งเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติจะมีผลทำให้เกิดมลพิษและเป็นอันตรายอย่างมากต่อสิ่งแวดล้อมได้ [1]

ดังนั้น จึงได้มีการนำกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation processes, AOPs) ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษโดยมีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\text{OH}^\bullet$) เป็นตัวเข้าทำ

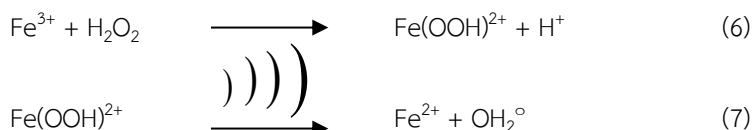
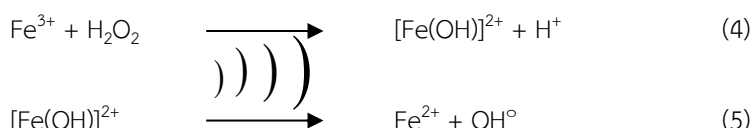
ปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษ
[2] ปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน (photo-Fenton) ถือได้ว่าเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่สูงมาก สามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก โดยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน เกิดมาจากการทำปฏิกิริยากันของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แล้วได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\text{OH}^\bullet$) ที่เป็นตัว

ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษ [3] ดังสมการที่ (1) และยังมีการฉายแสงยูวี (UV irradiation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\text{OH}^\bullet$) ที่ได้มาจากแสงยูวีเข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการที่ (2) และเหล็กรีดเข้าไปเร่งการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการที่ (3) [2]



โซโน-เฟนตัน (sono-Fenton) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากและมีความเป็นพิษในน้ำ ซึ่งจากการศึกษาผลของอัลตราซาวด์ในการออกซิไดซ์สารประกอบอะโรมาติก พบว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\text{OH}^\bullet$) เป็นสารที่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ [4] ดังสมการที่ (4)-(7)

การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้คลิ่นอัลตราโซนิกนั้น คลิ่นอัลตราโซนิกเข้าไปกระตุ้นการแตกตัวของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เร็วขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ ออกมาเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH°) ดังสมการที่ (5) [2]



งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการเยื่อกระดาดด้วยกระบวนการโฟโต-เพนตันและโซโน-เพนตันเพื่อลดค่า

ซีไอดีและสี่และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด
น้ำเสียด้วยวิธีทั้งสอง

2. อุปกรณ์และวิธีการ

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินให้ได้ซีโอดีประมาณ 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยการชั่งลิกนิน 1 กรัม จากนั้นนำไปละลายด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าสีด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตริก ตามวิธีมาตรฐาน 2120E [6] และหาซีโอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด ตามวิธีมาตรฐาน 5220C [6]

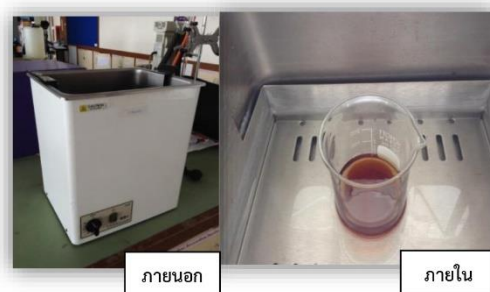
ปฏิกิริยาโฟโต-เพนตันนั้นทดลองโดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ การทดลองมีขั้นตอนดังนี้ คือ นำบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร มาเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปรับพีเอชให้เป็น 3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ นำบีกเกอร์ไปใส่ในตู้ฉายแสงยูวี แต่ยังไม่ฉายแสงยูวี จากนั้นเติมเพอร์สไอออน 0.03 โมล เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล ตั้งเวลาป่นกวน 10 นาที ปิดตู้ฉายแสงยูวี และเริ่มฉายแสงยูวีโดยใช้ค่าความเข้มแสง 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 ลักซ์ เมื่อป่นกวนครบตามเวลาแล้ว ปิดการฉายแสงยูวี แล้วนำออกมาปรับพีเอชให้เป็น 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอน 60 นาที แล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ นำส่วนของสารละลายใส่ไปวิเคราะห์หาค่า ซีโอดี และสี จากนั้นหาระยะเวลาการฉายแสงที่เหมาะสมโดยปรับพีเอชให้เป็น 3 เติมเพอร์สไอออน 0.03 โมล เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล ฉายแสงยูวีโดยใช้ค่าความเข้มแสง 200 ลักซ์ และป่นกวนเป็นเวลา 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ถึงปฏิกิริยา (รูปที่ 1)

ปฏิกิริยาโซน-เพนตัน ทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ โดยนำบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร มาเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปรับพีเอชให้เป็น 3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ นำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตรา

โซนิก จากนั้นเติมเพอร์สไอออน 0.03 โมล เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล ตั้งเวลาการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงเป็นเวลา 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที เมื่อให้คลื่นความถี่เหนือเสียงครบตามเวลาแล้วนำออกมาปรับพีเอชให้เป็น 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอน 60 นาที แล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ นำส่วนของสารละลายใส่ไปวิเคราะห์หาค่าซีโอดีและสี ถึงปฏิกิริยา (รูปที่ 2)



รูปที่ 1 ถึงปฏิกิริยาที่เป็นชุดการทดลองแบบแบทช์ของปฏิกิริยาโฟโต-เพนตัน (photo-Fenton)



รูปที่ 2 ถึงปฏิกิริยาที่เป็นชุดการทดลองแบบแบทช์ของปฏิกิริยาโซน-เพนตัน (sono-Fenton)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ปฏิกิริยาโฟโต-เพนตัน

3.1.1 การศึกษาหาค่าความเข้มแสงอัลตรา-

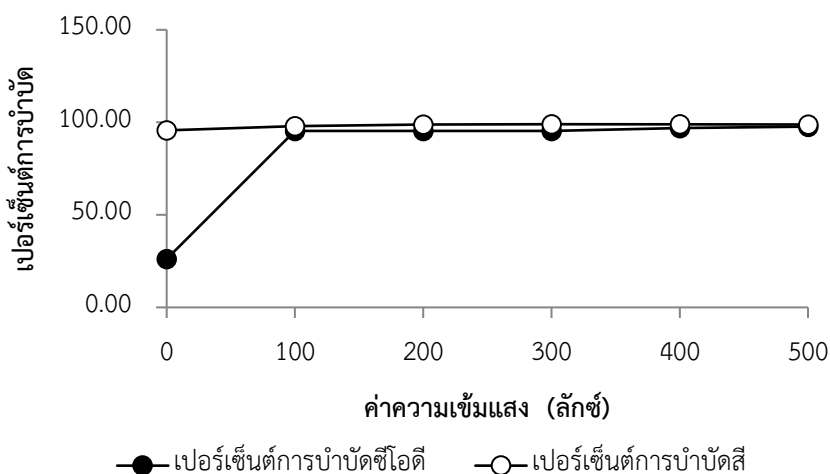
ไวโอเล็ตที่เหมาะสม

การศึกษาค่าความเข้มข้นที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ทดลองโดยแปรผันค่าความเข้มข้นนี้ คือ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 ลักซ์ ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน 0.03 โมล ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที พบว่าสามารถบำบัดซีโอทีในน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 26.15 ± 0.10 , 95.38 ± 0.20 , 95.38 ± 0.05 , 95.38 ± 0.11 , 96.92 ± 0.14 และ 97.69 ± 0.05 ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทำปฏิกิริยาโดยการฉายแสงยูวี (0 ลักซ์) โดยการนำสารไปทำปฏิกิริยาภายในตู้ที่ปิดมิดชิดจนมืดสนิท พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้น้อย เนื่องจากไม่มีแสงยูวีมาช่วยกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลให้มีปริมาณที่เพียงพอต่อการบำบัดสารอินทรีย์ เมื่อเพิ่มความเข้มแสงเป็น 100 ลักซ์ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มสูงมากขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มความเข้มแสงในช่วง 100-300 ลักซ์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ไม่ต่างกันอย่างน้อยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % และเมื่อเพิ่มความเข้มแสงมากขึ้นไปอีกเป็น 400 และ 500 ลักซ์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สูงขึ้นอีกเล็กน้อย เนื่องจากแสงยูวีที่เข้าร่วมเข้าไปด้วยกับปฏิกิริยาเพนตัน มีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของการออกซิเดชันนี้เป็นการเพิ่มขึ้นของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\text{OH}^\bullet$) ที่ได้มาจากแสงยูวีเข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเหล็กก็เข้าไปเร่งการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) [2] ส่วนการใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็น แบลงค์โดยใช้ปริมาณความ

เข้มข้นเพอร์สไอออน 0.03 โมล ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที แต่ไม่ฉายแสงยูวีลงไปในการทำปฏิกิริยา พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาน้ำกลั่นมีปริมาณ ซีโอทีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ และหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วปริมาณของซีโอทีก็ยังน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบพบได้เช่นกัน

ส่วนการศึกษากการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ทดลองโดยแปรผันค่าความเข้มข้นนี้ คือ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 ลักซ์ ตามลำดับ ทำให้สีลดลงซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 95.65 ± 0.05 , 97.87 ± 0.20 , 98.85 ± 0.03 , 98.92 ± 0.08 , 98.94 ± 0.18 และ 98.82 ± 0.49 ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเข้มแสงมากขึ้นเรื่อย ๆ ประสิทธิภาพในการบำบัดสีจะสูงเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ และเมื่อเพิ่มความเข้มแสงไปที่ช่วง 200-500 ลักซ์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ไม่ต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % ทั้งนี้เป็นไปตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น คือ แสงยูวีไปกระตุ้นปฏิกิริยาทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น [2] และการรีดิวส์เฟอริก (Fe^{3+}) ไปเป็นเฟอรัส (Fe^{2+}) ทำให้มีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น [7] ส่วนการใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลงค์โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน 0.03 โมล ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที แต่ไม่ฉายแสงยูวีลงไปในการทำปฏิกิริยา พบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วมีค่าสีอยู่ 6.63 ± 0.03 ADMI ลิตร ซึ่งถือว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดสีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อยมาก

ส่วนการศึกษากการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ทดลองโดยแปรผันค่าความเข้มข้นนี้ คือ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 ลักซ์ ตามลำดับ ทำ



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงกับเปอร์เซ็นต์การบำบัดสีไอโอดีและเปอร์เซ็นต์การบำบัดสีที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

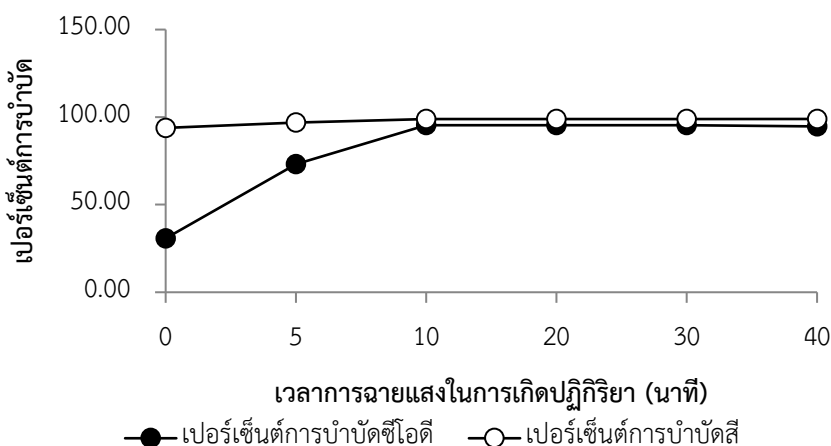
ให้สลดลงซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 95.65 ± 0.05 , 97.87 ± 0.20 , 98.85 ± 0.03 , 98.92 ± 0.08 , 98.94 ± 0.18 และ 98.82 ± 0.49 ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าความเข้มแสงมากขึ้นเรื่อย ๆ ประสิทธิภาพในการบำบัดสีจะสูงเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ และเมื่อเพิ่มค่าความเข้มแสงไปในช่วง 200-500 ลักซ์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % ทั้งนี้เป็นไปตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น คือ แสงยูวีไปกระตุ้นปฏิกิริยาทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น [2] และการรีดิวส์เฟอร์ริก (Fe^{3+}) ไปเป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ทำให้มีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น [7] ส่วนการใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบล็คโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.03 โมล ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที แต่ไม่ฉายแสงยูวีลงไปในการทำปฏิกิริยา พบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วมีค่าสีอยู่ 6.63 ± 0.03 ADMI ลิตร ซึ่งถือว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดสีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อยมาก

3.1.2 การศึกษาหาเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสม

การศึกษามลของเวลาการฉายแสงที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ทดลองโดยแปรผันเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเลตดังนี้ คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.03 โมล ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 และค่าความเข้มแสงที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.1.1 พบว่าสามารถบำบัดสีไอโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 30.77 ± 0.00 , 73.08 ± 0.20 , 95.38 ± 0.43 , 95.38 ± 0.74 , 95.38 ± 0.60 และ 94.62 ± 0.81 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 10 นาที ความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากว่ามีเวลาที่อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจับตัวแล้วทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น [8] และเมื่อระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 10-40 นาที ก็จะสามารถบำบัดสีได้เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยจนไม่เห็นการ

เปลี่ยนแปลง [9] ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % ส่วนการใช้กากล้นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลงค์โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.03 โมล ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 และค่าความเข้มแสงที่หาได้จากการ

ทดลองในข้อ 3.1.1 แต่ไม่ป่นกว่น พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาน้ำกลั่นมีปริมาณ ซีโอดีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ และหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้ว ปริมาณของซีโอดีก็ยังมีย่อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบพบได้เช่นกัน



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเลตกับเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดีและเปอร์เซ็นต์การบำบัดสีที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

สำหรับการศึกษาการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ทดลองโดยแปรผันเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ ทำให้สัลดลงซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 93.85 ± 0.08 , 96.85 ± 0.00 , 98.85 ± 0.03 , 98.92 ± 0.03 , 98.93 ± 0.03 และ 98.96 ± 0.06 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4 จากรูปพบว่าเมื่อมีการให้แสงยูวีเป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว โดยที่ไม่ป่นกว่นสารเพิ่มในการเกิดปฏิกิริยาทั้งเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็ยังสามารถในเกิดปฏิกิริยาได้เช่นกัน ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ดี โดยเมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นจาก 0 ถึง 10 นาที ก็จะมีความสามารถในการบำบัดสีเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย และเมื่อระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นมาอยู่

ในช่วง 10-40 นาที ก็จะสามารถบำบัดสีที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % ส่วนการใช้กากล้นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลงค์ ที่มีค่าสี 3.31 ± 0.00 ADMI โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.03 โมล ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 และค่าความเข้มแสงที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.1.1 แต่ไม่ป่นกว่น พบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้ว มีค่าสีอยู่ 10.42 ± 4.83 ADMI ซึ่งถือว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดสีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อย

3.2 ปฏิกิริยาไซโน-เฟนตัน

3.2.1 การศึกษาหาระยะเวลาในการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงที่เหมาะสม

การศึกษาผลของเวลาการให้คลื่นความ

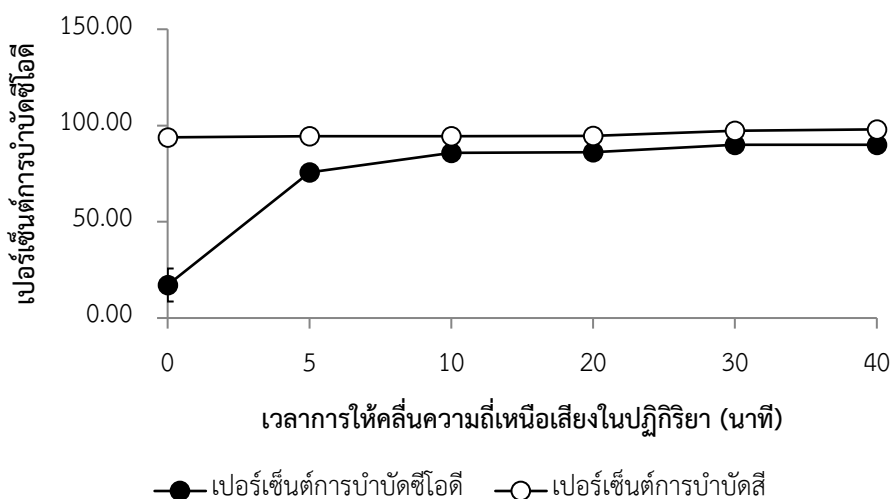
ถี่เหนือเสียงที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ทดลองโดยแปรผันเวลาการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน 0.03 โมล ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 พบว่าสามารถบำบัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 17.14 ± 8.57 , 75.71 ± 0.09 , 85.71 ± 0.60 , 85.71 ± 0.86 , 90.00 ± 0.77 และ 90.00 ± 0.83 ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงเพื่อทำปฏิกิริยาจาก 0 ถึง 10 นาที จะมีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากคลื่นความถี่เหนือเสียงที่นำมาใช้รวมกันกับกระบวนการเพนตันนั้นสามารถเร่งการแตกตัวของน้ำและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\text{OH}^\bullet$) ได้มากขึ้น [10] ทำให้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่มีมากขึ้นนั้นสามารถเข้าไปกำจัดสารอินทรีย์ได้จำนวนที่มากขึ้นและรวดเร็วขึ้น อีกทั้งเพอร์สไอออน (Fe^{3+}) ยังสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$) และ ($\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$) จากนั้นคลื่นความถี่เหนือเสียงก็จะเข้าไปสลายสารประกอบเชิงซ้อน ($[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$) และ ($\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$) ให้ได้เพอร์สไอออน (Fe^{2+}) กลับมาใช้ในปฏิกิริยาอีกครั้ง [4] และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นจาก 10 ถึง 30 นาที ก็จะสามารถบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยจนไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 40 นาที แต่จากกราฟจะเห็นได้ว่ากระบวนการโซโน-เพนตัน ไม่สามารถบำบัดซีโอดีให้ลดต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งซึ่งเท่ากับ 120 มิลลิกรัม/ลิตร อาจเนื่องมาจากเมื่อมีการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงมีผลทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการสลายตัวกลายเป็น

น้ำและออกซิเจน [11] แต่กระบวนการโซโน-เพนตันยังสามารถนำมาใช้ในการบำบัดได้เนื่องจากค่ามาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษหรือกระดาษ สามารถอนุมูลระบายน้ำทิ้งที่มีค่าซีโอดีไม่เกิน 400 มิลลิกรัม/ลิตร [12] ส่วนการใช้กากล้นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบบลงค์โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน 0.03 โมล ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 แต่ไม่ให้คลื่นความถี่เหนือเสียง พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาน้ำกลั่นมีปริมาณ ซีโอดีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้และหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วปริมาณของซีโอดีก็ยังมีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบพบได้เช่นกัน

ส่วนการศึกษาผลของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ทดลองโดยแปรผันเวลาการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงดังนี้ คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า มีผลทำให้สีลดลงซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 93.80 ± 0.05 , 94.39 ± 0.01 , 94.43 ± 0.04 , 94.55 ± 0.01 , 97.35 ± 0.10 และ 97.99 ± 0.03 ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาดังแต่ 0-20 นาที จะมีความสามารถในการบำบัดสีที่มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % และเมื่อเพิ่มเวลาในการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นมาอยู่ในช่วง 20-40 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดสีจะเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องมาจากมีเวลาที่อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจับตัวแล้วทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียนานขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ส่วนการใช้กากล้นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบบลงค์ ที่มีค่าสี 3.31 ± 0.00 ADMI โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน 0.03 โมล ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

0.06 โมล พีเอช 3 แต่ไม่ให้เกิดความถี่เหนือเสียง พบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วมีค่าสืออยู่

7.70 ± 1.07 ADMI ซึ่งถือว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อยมาก



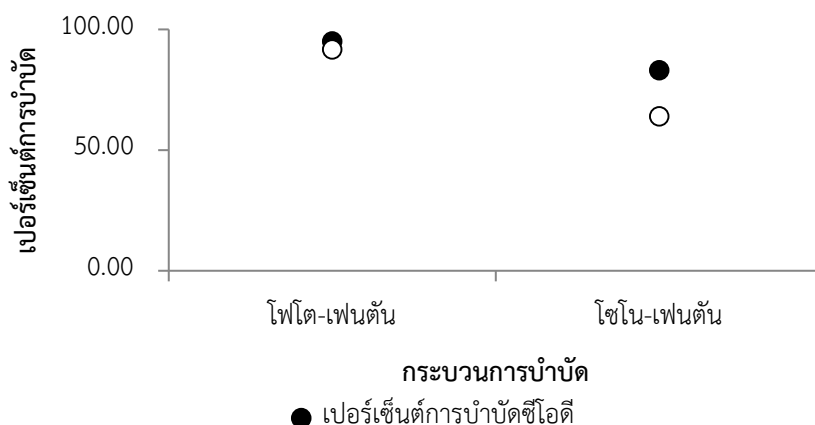
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงกับเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดีและเปอร์เซ็นต์การบำบัดสีที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

3.3 การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เพนตันและโซโน-เพนตัน

การศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโต-เพนตันที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์ออกไซด์ 0.03 โมล ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 และให้ค่าความเข้มของแสงยูวีที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.1.1 และระยะเวลาการฉายแสงยูวีในการทำปฏิกิริยาที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.1.2 ส่วนกระบวนการโซโน-เพนตัน ก็ใช้ปริมาณสารเช่นเดียวกับกระบวนการโฟโต-เพนตัน โดยมีการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงเข้ามาร่วมด้วยในกระบวนการ และระยะเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการทำปฏิกิริยาที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.2 พบว่าสามารถบำบัดซีโอดีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 95.07 ± 0.00 และ 83.19 ± 0.00 ตามลำดับ ดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า

กระบวนการโฟโต-เพนตัน มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ได้มากกว่าและสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ เพราะเมื่อบำบัดแล้วมีค่าซีโอดีไม่เกิน 120 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งตรงตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้กำหนดไว้ เนื่องมาจากกระบวนการโฟโต-เพนตัน มีแสงยูวีเข้ามาใช้ในการทำปฏิกิริยา ทำให้มีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ โดยใช้กระบวนการเพนตันโฟโต-เพนตันและโซโน-เพนตัน ทำให้สีลดลงซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 91.77 ± 1.89 และ 64.01 ± 0.19 ตามลำดับ ดังรูปที่ 6 กระบวนการโฟโต-เพนตันมีความสามารถในการกำจัดสีได้มากกว่า เนื่องจากมีแสงยูวีเข้าไปช่วยในการทำปฏิกิริยาทำให้มีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการบำบัด เปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดสีที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

4. สรุป

4.1 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน คือ เฟอร์ส ไอออน 0.03 โมล ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 ค่าความเข้มแสง 200 ลักซ์ และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 10 นาที ซึ่งสามารถบำบัดซีโอดีได้มากกว่า 95.00 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสีได้มากกว่า 98.00 เปอร์เซ็นต์

4.2 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาโซโน-เฟนตัน คือ เฟอร์ส ไอออน 0.03 โมล ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล พีเอช 3 และระยะเวลาการให้คลื่นความถี่เหนือเสียง 30 นาที ซึ่งสามารถบำบัดซีโอดีได้ 90.00 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสีได้มากกว่า 97.00 เปอร์เซ็นต์

4.3 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตันและโซโน-เฟนตัน โดยใช้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่ากระบวนการบำบัดที่ดีที่สุดในการบำบัดซีโอดีและสีของน้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ คือ ปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตันสามารถบำบัดซีโอดีได้ 95.07 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสีได้ 91.77

เปอร์เซ็นต์รองลงมา คือ ปฏิกิริยาโซโน-เฟนตันสามารถบำบัดซีโอดีได้ 83.19 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสีได้ 64.11 เปอร์เซ็นต์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และ อ.ดร.สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อ.ดร.เสาวภาค สุขตระกูลเวช อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ของงานวิจัยฉบับนี้ อันทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนในการทำวิจัยทุกด้าน และขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ความกรุณาในการประเมินและให้ข้อเสนอแนะการปรับปรุงแก้ไขให้บทความวิจัยนี้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น

6. รายการอ้างอิง

- [1] รสสุคนธ์ เกษมณี และศิวาพร ชูเรือง, 2553, การลดซีโอดีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน, โครงการงานปริญญาตรี, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [2] Haithem, B.H., Patrick, D.C., Patricia, B., Maria, E.G. and Mourad, B.Z., 2014, Fe-clay-plate as a heterogeneous catalyst in photo-Fenton oxidation of phenol as probe molecule for water treatment, App. Clay Sci. 91-92: 46-54.
- [3] Carra, I., Casas, J.L., Santos, L., Malato, S. and Sanchez, J.A, 2012, Iron dosage as a strategy to operate the photo-Fenton process at initial neutral pH, Chem. Eng. J. 224: 67-74.
- [4] Ivana, G., Ana, S. Natalija, K. and Domagoj, V., 2012, Global parameter of ultrasound exploitation (GPUE) in the reactors for wastewater treatment by sono-Fenton oxidation, Ultrasonics Sonochem. 19: 270-279.
- [5] กัญญารัตน์ หงส์ประภาวงศ์ และเกษมสันต์ ทองอยู่, 2555, การบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียยางสังเคราะห์ด้วยวิธีการเฟนตันร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก, โครงการงานปริญญาตรี, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- [6] Andrew, D., Lenore, S. and Arnold, E, 1995, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, Washington, DC.
- [7] Lisete, F., Marco, S.L., Manuel, I.M., Isabel, O. and Ana, S., 2014, Treatment of pulp mill wastewater by Cryptococcus podzolicus and solar photo-Fenton: A case study, Separat. Purificat. Technol. 132: 552-560.
- [8] วีระนุช บุญรุ่ง, 2553, การกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- [9] มณฑา ประดิษฐ์ข้า, 2550, การปรับปรุงกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีของโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์โดยเฟนตันออกซิเดชัน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [10] Emine, B. and Mustafa, K., 2014, Advanced oxidation of Reactive Blue 181 solution: A comparison between Fenton and sono-Fenton process, Ultrasonics Sonochem. 21: 1881-1885.
- [11] ธนกฤต พรหมทอง, 2552, การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเฟนตันรีเอเจนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- [12] กรมควบคุมมลพิษ, มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม, แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html, 12 มกราคม 2558.