



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำตาลด้วยกระบวนการยูวีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และยูวีเปอร์ซัลเฟตเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

Removal of organic matter of treated wastewater effluent from sugar mill factory using UV-H₂O₂ and UV-persulfate processes for water reuse

ศุภรามาส ทากู ธัญลักษณ์ ราษฎร์ภักดี*

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

Suthamas Thaku Thunyalux Ratpukdi*

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, and Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

* Corresponding author.

E-mail: thunyalux@kku.ac.th; Telephone: 080 469 2440

วันที่รับบทความ 27 ตุลาคม 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 16 พฤศจิกายน 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 8 ธันวาคม 2563;

วันที่ตอบรับบทความ 11 มกราคม 2564

บทคัดย่อ

น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำตาลยังคงมีสารอินทรีย์หลงเหลืออยู่สูงทำให้เกิดสี กลิ่นและรส นอกจากนั้นยังทำให้เกิดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (Microbial regrowth) ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ต่อการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำตาลด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation processes, AOPs) 2 ชนิดคือ กระบวนการยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-H₂O₂) และยูวีร่วมกับเปอร์ซัลเฟต (UV-PS) ต่อการกำจัดสารอินทรีย์ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของสารออกซิแดนท์ (H₂O₂ หรือ PS) ที่อัตราส่วนความเข้มข้นคาร์บอนอินทรีย์ละลาย (Dissolved organic carbon, DOC) ต่อ H₂O₂ หรือ PS 1:1, 1:3, และ 1:5 ต่อการกำจัด UV absorbance at 254 nm (UV₂₅₄), DOC และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) /DOC) จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของ H₂O₂ และ PS ที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด UV₂₅₄ และ DOC เพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วน DOC:H₂O₂ หรือ DOC:PS 1:5 พบว่ากระบวนการ UV-H₂O₂ และ UV-PS มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุด โดยสามารถกำจัด UV₂₅₄ ร้อยละ 58 และ 62 ตามลำดับ การกำจัด DOC ได้ร้อยละ 13 และ 16 ตามลำดับ ในขณะที่กระบวนการ UV-H₂O₂ และ UV-PS ที่อัตราส่วน DOC: H₂O₂ หรือ DOC:PS 1:1 ทำให้ค่า BDOC/DOC สูงที่สุดเท่ากับ 0.48 และ 0.60 ตามลำดับ (เพิ่มขึ้นจาก 0.29) ค่า BDOC/DOC ที่เพิ่มขึ้นของน้ำหลังจากผ่านกระบวนการ UV-H₂O₂ หรือ UV-PS บ่งชี้ถึงความจำเป็นในการใช้กระบวนการทางชีวภาพต่อจาก AOPs ในการบำบัดสารอินทรีย์

คำสำคัญ

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ยูวีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ยูวีเปอร์ซัลเฟต ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ น้ำทิ้งโรงงานน้ำตาล

Abstract

Treated effluent from the sugar mill factory has high organic matter, causing color, taste odor, and microbial regrowth. These properties make the water objectional for water reuse. This research investigated the removal of organic matter of treated effluent from of a sugar mill factory using two advanced oxidation processes (AOPs) including Ultraviolet (UV)-H₂O₂ (UV-H₂O₂) and UV-persulfate (UV-PS). The effect of oxidants concentration (H₂O₂ or PS) at the ratio of dissolved organic carbon (DOC) concentrations to H₂O₂ or PS 1:1, 1:3, and 1:5 to DOC and UV absorbance at 254 nm (UV₂₅₄) removal, and biodegradability (biodegradable dissolved organic carbon (BDOC)/DOC) was studied. The result showed that an increase in the concentration of H₂O₂ or PS enhanced the efficiency of DOC and UV₂₅₄ removals. At the ratio of DOC:H₂O₂ or DOC:PS 1:5, UV-H₂O₂ and UV-PS provided the highest organic removal efficiencies by 58% and 62% of UV₂₅₄ removal, respectively, and 13% and 16% of DOC removal, respectively. UV-H₂O₂ and UV-PS processes at DOC:H₂O₂ or DOC:PS 1:1 resulted in the highest BDOC/DOC of 0.48 and 0.60, respectively (increased from 0.29). The increased BDOC/DOC value of water after UV-H₂O₂ or UV-PS processes indicated the need for biological treatment after AOPs to remove organic matter.

Keywords

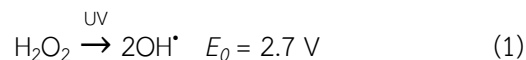
advance oxidation process; UV-hydrogen peroxide; UV-persulfate; biodegradability; sugar mill effluent

1. บทนำ

ลักษณะของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำตาลแล้วยังมีกลิ่นและสีที่เกิดจากสารอินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่ในน้ำ นอกจากนั้นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ (Biodegradable organic matter, BOM) และอาจทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารและพลังงานสำหรับเชื้อจุลินทรีย์ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (Microbial regrowth) และส่งผลต่อการเกิดสารพลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อ (Disinfection byproducts, DBPs) [1]ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ต่อการนำน้ำดังกล่าวมาผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่

การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ วิธีบำบัดทางกายภาพ เช่น กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ด้วยถ่านกัมมันต์ การกรองผ่านเยื่อ (Membrane filtration) เป็นต้น [2] นอกจากนี้วิธีทางเคมีเป็นวิธีหนึ่งที่มีความนิยมเนื่องจากสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การสร้างตะกอน (Coagulation) โดยทั่วไปจะนิยมใช้ไอออนเกลืออะลูมิเนียม และไอออนเกลือของเหล็กเป็นสารสร้างตะกอน (Coagulants) เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟต (Al₂(SO₄)₃) หรือสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl₃) เป็นต้น โดยสาร Coagulant ทั้ง 2 นี้ช่วยกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ที่ปิดกั้นการกระจายของแสง ส่งผลให้ร้อยละการส่องผ่านแสง (%UV transmission, %UVT) เพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 40 และ 50 ตามลำดับ (3)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation processes, AOPs) เป็นกระบวนการที่นิยมนำมาใช้บำบัดน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์ที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ (Refractory compounds) เช่น น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานน้ำตาล เป็นต้น โดยหลักการของกระบวนการ AOPs จะมีทั้งการทำปฏิกิริยาโดยตรง เช่น กระบวนการโอโซน (Ozonation process) และกระบวนการที่ใช้ความร้อน หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมสารออกซิแดนต์ โดยสารออกซิแดนต์ที่ได้รับความนิยมได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-H₂O₂) โดย UV จะทำหน้าที่แตกพันธะของสารออกซิแดนต์แล้วเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free radicals) ไปสลายโมเลกุลของสารที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Complex molecular structure) ให้มีโมเลกุลขนาดเล็กลง และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) ทำให้ลดระยะเวลาจากการใช้ UV โดยตรง และไม่เกิดเป็นสารพลอยได้ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม(4) ดังสมการที่ 1

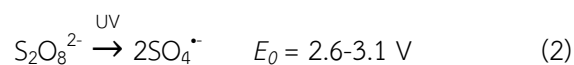


จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการกำจัดสี และสารอินทรีย์จากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำตาลด้วยกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl₃) เป็น Coagulant ร่วมกับกระบวนการยูวีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-H₂O₂) พบว่าภายในระยะเวลาการทำ

ปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ร้อยละ 90 โดยประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ส่วนหนึ่งมาจากกระบวนการ Coagulation ส่งผลให้เพิ่มโอกาสที่ H_2O_2 ดูดซับรังสี UV แล้วเกิดเป็น $OH^\cdot$ ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (วัดโดยค่า Dissolved organic carbon, DOC) ได้ดียิ่งขึ้น [5] และทำให้เพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (คำนวณจากสัดส่วนค่า Biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) ต่อ DOC (BDOC/DOC)) โดยพบว่ากระบวนการ UV- H_2O_2 ส่งผลให้ค่า BDOC/DOC ของน้ำ RO concentrate จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเพิ่มขึ้นจาก 0.13 เป็น 0.29 ในขณะที่กระบวนการ UV ไม่ทำให้ค่า BDOC/DOC เปลี่ยนแปลง [6] ดังนั้นกระบวนการ AOPs มักจะตามด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพเสมอ เช่น Biological activated carbon filtration เป็นต้น เพื่อกำจัด DOC และลดโอกาสในการเกิด Microbial regrowth นอกจากนี้พบว่าการใช้กระบวนการ Coagulation ร่วมกับ กระบวนการ UV- H_2O_2 ในน้ำทิ้งชุมชนที่ผ่านการบำบัดแล้ว ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยาเท่ากัน (120 min) กระบวนการดังกล่าวสามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้เป็น 2 เท่าของการใช้ UV เพียงอย่างเดียว [3,6,7]

ถึงแม้ว่ากระบวนการ UV- H_2O_2 ถูกนำไปใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์หรือสารพิษปนเปื้อนที่ยากต่อการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพอย่างแพร่หลาย เช่น น้ำทิ้งชุมชน น้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี น้ำเสียที่ปนเปื้อนสารตั้งต้นในการผลิตยาฆ่าแมลง น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตยา และเวชภัณฑ์ เป็นต้น [6,8–10] กระบวนการ UV- H_2O_2 ยังมีข้อจำกัด คือ H_2O_2 เป็นสารที่ดูดซับรังสี UV ได้ต่ำ มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสี UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm 18.6 L/M.cm ซึ่งส่งผลให้ต้องเติม H_2O_2 ในปริมาณมาก [11,12]

ในปัจจุบันเปอร์ซัลเฟต ($S_2O_8^{2-}$, PS) (UV-PS) เป็นกระบวนการ AOPs ใหม่อีกรูปแบบหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้บำบัดน้ำเสียในลักษณะเดียวกัน โดยกระบวนการ UV-PS จะสร้างอนุมูลเปอร์ซัลเฟต (Sulfate radical, $SO_4^{\cdot-}$) ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้สูง ($E^0 = 2.6-3.1$ V) มีความเจาะจงในการทำปฏิกิริยา [13] ดังสมการที่ 2



โดยค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยาระดับสองกับสารชีวโมเลกุลเท่ากับ $k_{SO_4^{\cdot-}} = 10^5 - 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ และ $OH^\cdot$ เท่ากับ $k_{OH^\cdot} = 10^7 - 10^{10} \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ อีกทั้งครึ่งชีวิต (Half-life time) ของ $SO_4^{\cdot-}$ (30-40 μs) ยาวนานกว่า $OH^\cdot$ (20 ns) [13,14] จึงเพิ่มโอกาสให้ $SO_4^{\cdot-}$ กำจัดสารอินทรีย์ได้ดีกว่า จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ UV-PS และ UV- H_2O_2 สามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพในน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของ TBP (2,4,6-tribromophenol) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตยาฆ่าแมลง และน้ำยารักษาเนื้อไม้ ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 90 min ที่ความเข้มข้นสารออกซิแดนท์เท่ากัน ทั้ง 2 กระบวนการสามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ถึง 10 และ 7 เท่า ตามลำดับ เมื่อเทียบกับน้ำเสียก่อนบำบัด [15]

อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาการใช้กระบวนการ Coagulation ร่วมกับ UV-PS ในการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานน้ำตาล ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำตาลด้วยกระบวนการ Coagulation ด้วย $FeCl_3$ ร่วมกับกระบวนการ AOPs ได้แก่กระบวนการ UV- H_2O_2 และ UV-PS โดยศึกษาความเข้มข้น H_2O_2 และ PS ต่อการกำจัดสารอินทรีย์และเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability)

2. วิธีการวิจัย

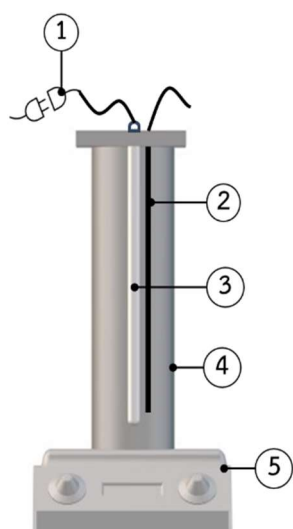
2.1 การบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการ Coagulation

เตรียมน้ำตัวอย่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานน้ำตาลเพื่อทำการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) โดยวิธีการตกตะกอน (Coagulation) ด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) ที่ความเข้มข้นประมาณ 600 mg/L [5] และปรับ pH น้ำตัวอย่างให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 N และนำไปตกตะกอนด้วยเครื่อง Jar Test ทำการกวนผสม โดยเริ่มด้วยการกวนเร็วที่ความเร็ว

รอบ 150 rpm เป็นเวลา 1 min จากนั้นกวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm เป็นเวลา 20 min และทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำหลังจากตกตะกอนแล้วเพื่อนำไปใช้ในการทดลองลำดับต่อไป

2.2 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ UV

การทดลองใช้หลอด UV ขนาด 30 W (GPH383T5L/HO/4C/CELL, Universal Light Source, USA) และหลอด VUV ขนาด 30W (GPH383T5VH/HO/4C/CELL, Universal Light Source, USA) ต่อเข้ากับกระบอกตวงปริมาตร 2000 mL ขนาด Ø 85 mm สูง 500 mm และใช้หลอดแก้วสำหรับนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ และทดลองลำดับต่อไป (ดังรูปที่ 1)



รูปที่ 1 การติดตั้งปฏิกรณ์ UV ประกอบด้วย 1. ปลั๊กไฟ 2. Sampling tube 3. หลอด UV 4. Cylinder และ 5. Magnetic stirrer

2.3 การออกแบบ และขั้นตอนการทดลอง

2.3.1 การศึกษาปริมาณหัวเชื้อ (Seed size) ที่เหมาะสม

ในการศึกษาปริมาณหัวเชื้อ (Seed size) ที่เหมาะสมสำหรับ BDOC ทำตามวิธีของ Khan et al. [16] โดยชุดการทดลองประกอบด้วย ปริมาตรหัวเชื้อ (Seed) ที่ 2.5 และ 10 mL จากนั้น 1) นำน้ำตัวอย่างที่กรองผ่าน Glass Microfiber filter Ø 0.7 µm (GF/F, Whatman) ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำ DI ปริมาตร 300 mL (เพื่อชะ DOC ที่อยู่ในเยื่อกรองออก) น้ำ

ตัวอย่างที่ผ่านการกรองจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TOC (Total organic carbon analyzer, TOC/TN Analytik Jena multi N/C 2100s) และบันทึกผลเป็นค่า DOC (รูปที่ 2) 2) การเตรียมอัตราส่วนเจือจาง (Dilution factor, F) เตรียมโดยนำน้ำตัวอย่างข้างต้นเจือจางด้วยน้ำ DI ในสัดส่วนที่ทำให้ค่าออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen (DO)) ในวันที่ 5 (DO_5) ≥ 1.0 mg/L และให้มีปริมาตรอย่างน้อย 320 mL เพื่อใช้ 20 mL สำหรับการวิเคราะห์ค่า DOC_i 3) นำตัวอย่าง 300 mL จาก 2) เทลงในขวดบ่ม BOD ขนาด 300 mL ที่ประกอบไปด้วยหัวเชื้อ (Seed) ปริมาตร 2.5, 5, และ 10 mL ในแต่ละชุดการทดลอง จากนั้นนำไปบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 20°C และเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่า DOC_f หลังที่บ่มเป็นระยะเวลา 5 วัน สำหรับ Blank ทำในลักษณะเช่นเดียวกับชุดการทดลอง แต่ใช้น้ำ DI แทนน้ำตัวอย่าง และบันทึกผลเป็น DOC_{bi} , DOC_{bf} ตามลำดับ (ดังรูปที่ 2) และสามารถคำนวณค่า BDOC (ดังสมการที่ 3) [1,16]

$$BDOC = [(DOC_i - DOC_f) - (DOC_{bi} - DOC_{bf})]F \quad (3)$$

ค่า BDOC สามารถนำไปคำนวณสัดส่วน BDOC/DOC ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น ค่า $BDOC/DOC = 0.2$ หมายความว่า มี DOC ร้อยละ 20 จาก DOC ทั้งหมดที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ การวิเคราะห์ค่า BDOC มีหลักการวิเคราะห์ที่คล้ายคลึงกับการวิเคราะห์ค่า Biochemical oxygen demand (BOD) แต่วัดค่าการเปลี่ยนแปลง DOC แทนค่า (DO)

2.3.2 การกำจัดสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการ UV-H₂O₂ และ UV-PS

ในขั้นตอนนี้ชุดการทดลองประกอบด้วย 1) UV-H₂O₂ และ 2) UV-PS โดยจะทำการทดลองในชุดถึงปฏิกรณ์ (รูปที่ 1) ปริมาตร 2000 mL โดยที่ชุดการทดลอง UV-H₂O₂ และ UV-PS จะเติมสารออกซิแดนท์ทำปฏิกิริยาร่วมกับ UV โดยเตรียมความเข้มข้นคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างค่า DOC ต่อสารออกซิแดนท์ ($DOC:H_2O_2$ หรือ PS) เท่ากับ 1:1, 1:3 และ 1:5 ในการทำปฏิกิริยาเก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ 100 mL ในช่วงเวลา 0, 5, 10, 20 และ 30 min และตัวอย่างที่วัด DOC จะเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 N จำนวน 0.1 mL เพื่อยับยั้งการ

เจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ที่อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า DOC ของตัวอย่าง โดยการทดลองแต่ละชุดทำซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง

2.4 วิธีวิเคราะห์

การวิเคราะห์ค่าความขุ่นในหน่วย NTU ด้วยเครื่อง Turbidimeter (HACH2100P) การวิเคราะห์ค่าสีในหน่วย ADMI ด้วยวิธี Spectrophotometry โดยใช้ sample cell ขนาด 1 inch และการวิเคราะห์ค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 nm (UV_{254}) (Standard Methods, 5910) โดยใช้ quartz sample cell ขนาด 10 mm ด้วย Spectrophotometer, HACHDR6000 การวิเคราะห์ค่า DOC ด้วยวิธี Non-purgeable organic carbon (NPOC) (Standard Methods, 5310) [17] ด้วยเครื่อง TOC/TN ยี่ห้อ Analytik Jena รุ่น multi N/C 2100s



รูปที่ 2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ BDOC

3. ผลการทดลอง และการอภิปรายผล

3.1 การบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการ Coagulation ด้วย $FeCl_3$

จากตารางที่ 1 แสดงผลของการนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานน้ำตาลเข้าสู่กระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) โดยกระบวนการ Coagulation ด้วย $FeCl_3$ ส่งผลประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งโดยกำจัด DOC และ UV_{254} ได้ร้อยละ 70 และ 66 ตามลำดับ และค่าการส่งผ่านของแสงเพิ่มขึ้น (UV transmission, %UVT) เนื่องจากกระบวนการ Coagulation ช่วยกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ ทำให้โอกาสในการสัมผัสระหว่างแสง UV กับสารออกซิแดนท์ เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำต่อไปในขั้นตอนต่อไปได้ดีขึ้น

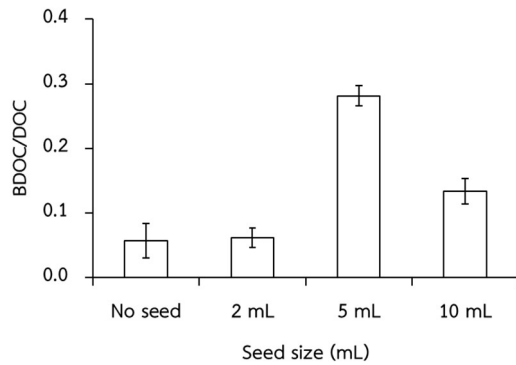
ตารางที่ 1 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดก่อนและหลัง Pretreatment ด้วย $FeCl_3$

Parameter	Untreated	$FeCl_3$	unit
pH	8.22	6.33	
EC	5.76	6.22	ms/cm
Alkalinity	564	180	mg/L as $CaCO_3$
Turbidity	24.5	7	NTU
TSS	54	44	mg/L
TDS	3603	3167	mg/L
TOC	39.8	13.97 ± 0.7	mg/L
DOC	32.2	9.1 ± 0.8	mg/L
UV_{254}	0.737	0.245 ± 0.5	cm^{-1}
Color	129	18	ADMI
%UVT	18.32	60.67	%UVT

3.2 ปริมาณหัวเชื้อ (Seed size) ที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

จากรูปที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (BDOC/DOC) ของน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำตาลที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วย $FeCl_3$ โดยใช้ปริมาณหัวเชื้อ (Seed) ที่ 2, 5 และ 10 mL และเมื่อทำการบ่มเป็นระยะเวลา 5 วัน พบว่า ค่า BDOC/DOC เท่ากับ 0.06, 0.29 และ 0.13 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า BDOC/DOC เริ่มต้นอยู่ที่ 0.06 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณหัวเชื้อไปที่ 10 mL กลับทำให้ค่า BDOC/DOC ลดลง เนื่องจากปริมาณหัวเชื้อที่มากเกินไป

จะส่งผลให้เพิ่มปริมาณ DOC เริ่มต้น ทั้งนี้หากมีความจำเป็นต้องใช้หัวเชื้อในปริมาณมากเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี อาจจะต้องลดระยะเวลาบ่มให้สั้นลง [1] โดยปริมาณหัวเชื้อที่เหมาะสมจะถูกนำไปทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว



รูปที่ 3 ผลของปริมาณหัวเชื้อต่อความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (BDOC/DOC) ระยะเวลาบ่มที่ 5 วัน

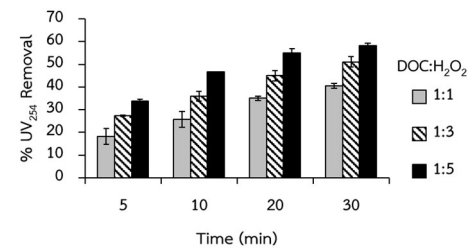
นอกจากนี้ค่า BDOC/DOC แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าน้ำชนิดนั้นมีความยากต่อระบบบำบัดทางชีวภาพหรือไม่ หากมีความจำเป็นสำหรับปรับปรุงคุณภาพน้ำอาจต้องใช้กระบวนการบำบัดทางเคมีเข้ามาช่วย เพื่อป้องกันการเกิดการปนเปื้อนในการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์

3.3 ประสิทธิภาพการกำจัด UV₂₅₄

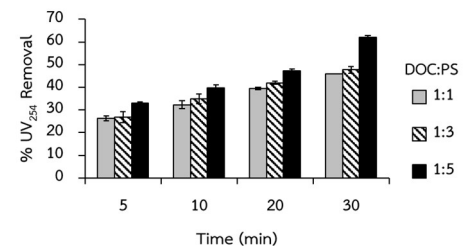
ประสิทธิภาพการกำจัด UV₂₅₄ แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเพิ่มขึ้นตามเวลา ที่เวลา 30 min ความเข้มข้นระหว่าง DOC ต่อสารออกซิแดนท์ (DOC : Oxidant) ทั้ง 3 ได้แก่ 1:1, 1:3 และ 1:5 กระบวนการ UV-H₂O₂ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด UV₂₅₄ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นร้อยละ 40.60, 51.60, 51 และ 58.31 ตามลำดับ ในขณะที่กระบวนการ UV-PS ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด UV₂₅₄ อยู่ที่ร้อยละ 46, 47.67 และ 62 ตามลำดับ UV₂₅₄ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ตรวจวัดสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างแบบ Aromatic หรือมีองค์ประกอบของพันธะคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว ทำให้น้ำมีสีและหากมีในปริมาณมากเกินไปอาจส่งผลต่อการเกิดสารพลอยได้ในกระบวนการฆ่าเชื้อได้ (Disinfection by product, DBP) [9] โดยสารอินทรีย์ดังกล่าวจะถูกกลืนแสง และแปรผลเป็นค่า

ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนได้ (cm⁻¹) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารออกซิแดนท์ช่วยสลายโครงสร้างเชิงซ้อนของสารอินทรีย์ และช่วยลดการเกิดสีรวมถึงลดโอกาสการเกิด DBP ได้ ดังนั้น UV₂₅₄ จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ตรวจวัดสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างแบบ Aromatic หรือมีองค์ประกอบของพันธะคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว หากมีในปริมาณมากเกินไปอาจส่งผลต่อการเกิดสารพลอยได้ในกระบวนการฆ่าเชื้อได้ (Disinfection by product, DBP) โดยสารอินทรีย์ดังกล่าวจะถูกกลืนแสง และแปรผลเป็นค่าปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนได้ (cm⁻¹) ดังนั้น UV₂₅₄ จึงมีความสำคัญในการตรวจวัดสารอินทรีย์ในลักษณะดังกล่าวในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว และมีความต้องการที่จะนำกลับมาใช้ใหม่

(a) UV-H₂O₂



(a) UV-PS



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัด UV₂₅₄ ด้วยกระบวนการ UV-H₂O₂ (a) และ UV-PS (b) (UV₂₅₄ เริ่มต้น = 0.245±0.5 cm⁻¹)

3.4 ประสิทธิภาพการกำจัด DOC

ประสิทธิภาพการกำจัด DOC ระหว่างกระบวนการ UV-H₂O₂ และ UV-PS โดยใช้เวลาทำปฏิกิริยา 0 5 10 20 และ 30 min แสดงในรูปที่ 5 จากการทดลองพบว่า ที่เวลาทำปฏิกิริยา 30 min ที่ความเข้มข้น 1:1, 1:3 และ 1:5 กระบวนการ UV-H₂O₂ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ในน้ำลักษณะดังกล่าวเท่ากับร้อยละ 6.98, 10.83 และ 13 ตามลำดับ ในขณะที่กระบวนการ UV-PS คิดเป็นร้อยละ 7.18 11.10 และ 15.66 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ของกระบวนการ UV-H₂O₂ และ UV-PS ค่อนข้างต่ำแต่เมื่อเปรียบเทียบกับ

งานวิจัยในอดีตพบว่า มีผลไปในทิศทางใกล้เคียงกันโดยงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาการบำบัดขั้นต้นน้ำ RO concentrate จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยกระบวนการ Coagulation ด้วย Alum, Fe_2SO_4 และ FeCl_3 เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่การกระบวนการ UV- H_2O_2 ที่เวลาทำปฏิกิริยา 30 min สามารถกำจัด DOC ได้ในช่วงร้อยละ 7-16 [6]

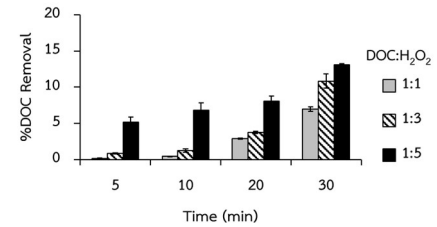
อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นที่อัตราส่วน 1:5 เท่ากัน กระบวนการ UV-PS มีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ได้ดีกว่า ทั้งนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้อธิบายคุณสมบัติของ PS ว่าสารออกซิแดนต์ดังกล่าวมีระยะเวลาครึ่งชีวิต (Half-life) ที่ยาวนานกว่า (30-40 μs) H_2O_2 (20 ns) อีกทั้งมีความยาวพันธะ (O-O bond length) ที่ยาวกว่า (1.497 Å) ทำให้ UV สลายพันธะ และเกิดเป็น $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ได้ง่าย และรวดเร็วในการกำจัดสารกลุ่มเป้าหมายกว่า H_2O_2 (1.453 Å) [13]

3.5 Biodegradability (BDOC/DOC) โดย UV- H_2O_2 และ UV-PS

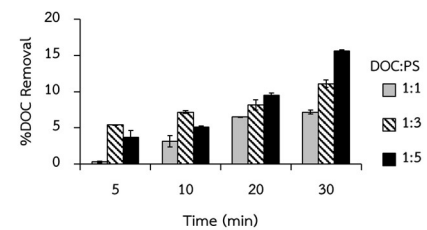
รูปที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (BDOC/DOC) ของน้ำที่ผ่านการบำบัดระหว่างกระบวนการ UV- H_2O_2 และ UV-PS พบว่าที่ความเข้มข้น 1:1, 1:3 และ 1:5 ที่เวลา 30 min กระบวนการ UV- H_2O_2 มีค่า BDOC/DOC เท่ากับ 0.48, 0.34 และ 0.37 ตามลำดับ ในขณะที่กระบวนการ UV-PS ความเข้มข้นที่อัตราส่วน 1:1 ในระยะเวลาทำปฏิกิริยา 5, 10, 20 และ 30 min มีค่า BDOC/DOC เท่ากับ 0.49, 0.53, 0.60 และ 0.46 ตามลำดับ โดยกระบวนการ UV-PS (1:1)

เมื่อเทียบกับกระบวนการ UV- H_2O_2 ที่ความเข้มข้นเดียวกันกระบวนการ UV- H_2O_2 มีค่า BDOC/DOC เพียง 0.39 จะเห็นได้ว่ากระบวนการ UV-PS ใช้เวลาในการดำเนินการที่สั้นกว่าแต่ช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้สูงกว่า จากการศึกษาในอดีตที่ผ่านมาพบว่าความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) ที่สามารถบ่งบอกการย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Biodegradable) ควรมีค่า >0.3 [18]

(a) UV- H_2O_2

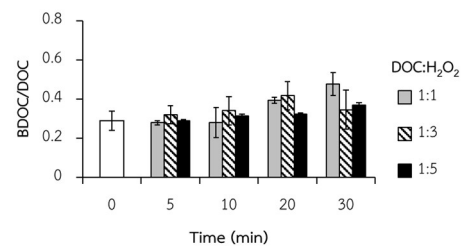


(a) UV-PS

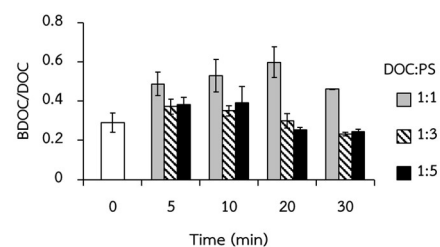


รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการกำจัด DOC ด้วยกระบวนการ UV- H_2O_2 (a) และ UV-PS (b) เมื่อ DOC เริ่มต้น = 9.1 ± 0.8 mg/L

(a) UV- H_2O_2



(a) UV-PS



รูปที่ 6 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ BDOC/DOC ที่ระยะเวลา 5 วัน ด้วยกระบวนการ UV- H_2O_2 (a) และ UV-PS (b) (BDOC/DOC เริ่มต้น = 0.29)

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารออกซิแดนต์ และระยะเวลาในการการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น ส่งผลให้ค่า BDOC/DOC ลดลง อันเนื่องมาจากสารอินทรีย์ส่วนหนึ่งถูกกำจัดไป (Mineralization) [19] สังเกตได้จากประสิทธิภาพการกำจัด DOC ข้างต้น ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มทั้งความเข้มข้นของ H_2O_2 หรือ PS และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้เหลือส่วนที่ย่อยสลายทางชีวภาพลดลง

4. สรุปผลการทดลอง

การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานน้ำตาลด้วยกระบวนการ UV-H₂O₂ และ UV-PS โดยผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วย FeCl₃ พบว่าการบำบัดขั้นต้นด้วย FeCl₃ ช่วยกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่องผ่านของ UV ต่อสารกลุ่มเป้าหมายเพิ่มขึ้นเป็น 60 %UVT และช่วยเพิ่มโอกาสที่ UV จะทำปฏิกิริยากระตุ้นสารออกซิแดนท์ และเกิดเป็นอนุมูลอิสระง่ายขึ้น โดยทั้งกระบวนการ UV-H₂O₂ และ UV-PS มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุดอยู่ที่ความเข้มข้นของ DOC:H₂O₂ เท่ากับ 1:5 ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 30 min มีประสิทธิภาพการกำจัด UV₂₅₄ ร้อยละ 58.31 และ 62 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกำจัด DOC ร้อยละ 13 และ 15 ตามลำดับ สำหรับการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งค่า BDOC/DOC สูงสุดหลังจากผ่านกระบวนการ UV-H₂O₂ (DOC:H₂O₂ = 1:1) ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 30 min จะมีค่า BDOC/DOC เท่ากับ 0.48 สำหรับกระบวนการ UV-PS (DOC:PS = 1:1) ใช้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาเพียง 20 min ส่งผลให้เพิ่มค่า BDOC/DOC สูงถึง 0.6 .ในขณะที่กระบวนการ UV-H₂O₂, 20 min มีค่า BDOC/DOC = 0.39 จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น และระยะเวลาทำปฏิกิริยาเดียวกันกระบวนการ UV-PS สามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้สูงกว่ากระบวนการ UV-H₂O₂ ทั้งนี้หากเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ H₂O₂ หรือ PS และระยะเวลาทำปฏิกิริยา จะส่งผลให้สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งได้ถูกกำจัดไป (Mineralization) ส่งผลให้ค่าความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (BDOC/DOC) ลดลง การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของน้ำทิ้งบ่งชี้ถึงความจำเป็นในการใช้กระบวนการชีวภาพ (Biological treatment) เช่น กระบวนการกรองชีวภาพ (Biological filtration) ต่อท้ายเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ผ่านการออกซิไดซ์ มารองรับต่อจากกระบวนการ AOPs เพื่อง่ายต่อการกำจัดสารอินทรีย์ ถึงแม้การเติมสารออกซิแดนท์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ อย่างไรก็ตามควรมีการพิจารณาถึงปริมาณของแข็งละลายที่เพิ่มขึ้น ที่อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการชีวภาพที่ต่อจาก AOPs และคุณภาพน้ำที่ผ่านกระบวนการนี้ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้านี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัย จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์วิจัยเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) ผ่านโปรแกรมวิจัยการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการจัดการมลพิษจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ น้ำตาล และสีฟอกย้อมในระดับอุตสาหกรรมและชุมชน เพื่อการจัดการที่ยั่งยืน โครงการวิจัยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูงร่วมกับระบบกรองชีวภาพสำหรับการกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำตาลเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] Khan E, King S, Babcock RW, Stenstrom MK. Factors influencing biodegradable dissolved organic carbon measurement. *Journal of Environmental Engineering*. 1999;125(6):514–21.
- [2] วนิดา ชูอักษร. เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. *Burapha Science Journal*. 2012;17(1):181–91.
- [3] Umar M, Roddick F, Fan L. Impact of coagulation as a pre-treatment for UVC/ H₂O₂- biological activated carbon treatment of a municipal wastewater reverse osmosis concentrate. *Water Research*. 2016;88:12–9.
- [4] Wang JL, Xu LJ. Advanced oxidation processes for wastewater treatment□: formation of hydroxyl radical and application advanced oxidation processes for wastewater treatment□: formation of hydroxyl radical. *Critical Review in Environmental Science and Technology*. 2012;42(3):251–325.
- [5] นพคุณ เพ็ชรมากร. การกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานน้ำตาล โดยวิธีการโคเอกซัลชันร่วมกับ VUV/UV+H₂O₂ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2560.
- [6] Umar M, Roddick F, Fan L. Comparison of

- coagulation efficiency of aluminium and ferric-based coagulants as pre-treatment for UVC/ H₂O₂ treatment of wastewater RO concentrate. *Chemical Engineering Journal*. 2016;284:841–9.
- [7] Ahn Y, Lee D, Kwon M, Choi I, Nam S, Kang J. Characteristics and fate of natural organic matter during UV oxidation processes. *Chemosphere*. 2017;184:960–8.
- [8] Puspita P, Roddick FA, Porter NA. Decolourisation of secondary effluent by UV-mediated processes. *Chemical Engineering Journal*. 2011;171(2):464–73.
- [9] Rehman F, Sayed M, Khan JA, Shah NS, Khan HM, Dionysiou DD. Oxidative removal of brilliant green by UV/S₂O₈²⁻, UV/HSO₅⁻ and UV/H₂O₂ processes in aqueous media: A comparative study. *Journal of Hazardous Materials*. 2018;357:506–14.
- [10] Zhang Y, Xiao Y, Zhong Y, Lim TT. Comparison of amoxicillin photodegradation in the UV/H₂O₂ and UV/persulfate systems: Reaction kinetics, degradation pathways, and antibacterial activity. *Chemical Engineering Journal*. 2019;372:420–8.
- [11] Miklos DB, Wang W, Linden KG, Drewes JE, Hübner U. Comparison of UV-AOPs (UV/H₂O₂, UV/PDS and UV/Chlorine) for TOC removal from municipal wastewater effluent and optical surrogate model evaluation. *Chemical Engineering Journal*. 2019;362:537–47.
- [12] Tchobanoglous G, David Stensel H, Tsuchihashi R, Burton F. *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. 5 th. United State: McGraw-Hill Higher Education; 2013. 207–235 p.
- [13] Babaei AA, Ghanbari F. COD removal from petrochemical wastewater by UV/ hydrogen peroxide, UV/persulfate and UV/percarbonate: biodegradability improvement and cost evaluation. *Journal of Water Reuse and Desalination*. 2016;6(4):484–94.
- [14] Wacławek S, Lutze H V., Grübel K, Padil VVT, Černík M, Dionysiou DD. Chemistry of persulfates in water and wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2017;330(June):44–62.
- [15] Gu Y, Chen Y, Sun X, Liu Y. Comparison on mineralization of 2,4,6-tribromophenol by UV-based advanced oxidation processes: UV/ Na₂S₂O₈ and UV/ H₂O₂. *Research on Chemical Intermediates*. 2017;43(5):3095–110.
- [16] Khan E, Babcock RW, Suffet IH, Stenstrom MK. Method development for measuring biodegradable organic carbon in reclaimed and treated wastewaters. *Water Environment Research*. 2006;70(5):1025–32.
- [17] APHA (American Public Health Association) . *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd ed. Washington, D. C: APHA; 2017.
- [18] Wacławek S, Lutze H V., Grübel K, Padil VVT, Černík M, Dionysiou DD. Chemistry of persulfates in water and wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2017;330:44–62.
- [19] Buchanan W, Roddick F, Porter N, Drikas M. Enhanced biodegradability of UV and VUV pre-treated natural organic matter. *Water Science and Technology: Water Supply*. 2004;4(4):103–11.