ประสิทธิภาพการบำบัดสารซีโอดีของน้ำเสียจากโรงล้างขยะถุงพลาสติกโดยการเติมโอโซน

ชุติมา นามวิเศษ ณัชชา วงค์สรรพ สิทธิชัย ใจขาน* และสุภาณี จันทร์ศิริ

สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190
*E-mail: sitthichai.c@ubu.ac.th

รับบทความ: 27 ตุลาคม 2564 แก้ไขบทความ: 7 มีนาคม 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 22 มีนาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยเชิงทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (chemical oxygen demand) ของน้ำเสียจากโรงล้างขยะถุงพลาสติกด้วยการเติมโอโซนในถังปฏิกิริยาปริมาตร 2 L บรรจุน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีเริ่มต้น 170.88 mg/L การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด (ชุดละ 3 ซ้ำ) ได้แก่ น้ำเสียที่ไม่มีการเติมโอโซน (ชุดควบคุม) และน้ำเสียที่มีการเติมโอโซน 33.33 mg/h (ชุดทดลอง) โดยใช้ระยะเวลาการบำบัดนำเสีย ได้แก่ 2 h 4 h และ 8 h วิเคราะห์ค่าซีโอดีด้วยวิธีการกลั่นแบบปิด (closed reflux method) โดยการไทเทรตชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ผลการศึกษาพบว่า ค่าซีโอดีของน้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด โดยระยะเวลา 8 h เป็นระยะเวลาที่ลดค่าซีโอดีได้มากที่สุด หลังการบำบัดด้วยโอโซนเป็นเวลา 8 h พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีมีค่าร้อยละ 46.42 – 50.55 (ร้อยละ 48.07 ± 2.19) สำหรับการบำบัดความขุ่น สี ออกซิเจนละลายน้ำ และของแข็งละลายน้ำด้วยกระบวนการเติมโอโซนเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการบำบัดซีโอดี ดังนั้นการนำโอโซนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้นสูงจะต้องมีกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีของการบำบัดด้วยโอโซนให้มากขึ้น

คำสำคัญ: การเติมโอโซน การบำบัดน้ำเสีย โรงงานล้างขยะถุงพลาสติก

The COD Removal Efficiency of Wastewater from Plastic Bag Washing Plant by Ozonation

Chutima Namwiset, Nutcha Wongsup, Sitthichai Chaikhan* and Supanee Junsiri

Lecturer of Environmental health sciences, College of Medicine and Public Health,
Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190, Thailand
*E-mail: sitthichai.c@ubu.ac.th

Received: 27 October 2021 Revised: 7 March 2022 Accepted: 22 March 2022

Abstract

This experimental research aimed to study the efficiency of COD (Chemical Oxygen Demand) treatment of wastewater from plastic bag washing plants with the ozonation. The reaction tank has a capacity of 2 L containing wastewater with the initial value of COD 170.88 mg/L. The experiment included wastewater (control set) and wastewater at ozone constant 33.33 mgO_3/h (experimental set). The duration of treatment is 2 h, 4 h and 8 h. The COD analysis method is the closed reflux method by titration (3 repetitions each set). The study results found that The COD of wastewater varies with the duration of treatment. The 8–h period is the period that gave the highest reduction of COD. The efficiency of COD treatment at 8 hours was 46.42% – 50.55% (48.07 ± 2.19%). Treatment of turbidity, color, dissolved oxygen, and dissolved solids with the ozone addition process is the same as COD treatment. Therefore, the ozone addition in high concentration wastewater treatment requires a pre–treatment process to optimize the COD reduction of ozonation.

Keywords: Ozonation, Wastewater treatment, Plastic bag washing plant

บทนำ

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยมีขยะประเภทพลาสติกเกิดขึ้นในประเทศทั้งสิ้น ร้อยละ 12 ของปริมาณขยะทั้งหมด หรือประมาณปีละ 2 ล้านตัน นำกลับมาใช้ประโยชน์ ปีละ 0.5 ล้านตัน (ร้อยละ 25) (Pollution Control Department, 2017) ปริมาณการใช้ถุงพลาสติกหูหิ้วมีจำนวนมากถึง 45,000 ล้านใบต่อปี โดยเป็นการใช้ในตลาดสดเทศบาลและเอกชนมากถึง 18,000 ล้านใบ หรือคิดเป็นร้อยละ 40 ของปริมาณการใช้ถุงพลาสติกทั่วประเทศ (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2009) ขยะถุงพลาสติกเหล่านี้สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ จึงทำให้เกิดธุรกิจการล้างขยะถุงพลาสติกเพื่อนำไปจำหน่ายแก่โรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติก

การศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียที่เกิดจาก

กระบวนการล้างขยะถุงพลาสติก พบว่ามีค่าเกินมาตรฐานในหลายพารามิเตอร์ เช่น บีโอดี (biochemical oxygen demand) 187.00 mg/L ของแข็งแขวนลอย (total suspended solid) 167.00 mg/L ความขุ่น (turbidity) 89.40 NTU และยังพบปริมาณค่าตะกั่ว 2.40 mg/L (Songlod, 2012) การบำบัดน้ำเสียโดยใช้วิธีทางธรรมชาติด้วยบ่อดินยังไม่มีประสิทธิภาพที่เพียงพอในการบำบัดน้ำเสียก่อนจากสถานประกอบการเหล่านี้ปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะในหลายพารามิเตอร์ เช่น ซีโอดี (chemical oxygen demand) ของแข็งละลายน้ำ บีโอดี (Chaikhan, 2019) น้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนในพารามิเตอร์เหล่านี้ต้องมีการควบคุมและติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 การปล่อยน้ำเสียเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่มีระบบการบำบัดที่ดี จะทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดน้อยลง ซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สต่าง ๆ จากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในน้ำเสีย เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ มีเทน แอมโมเนีย แก๊สเหล่านี้สามารถทำให้เกิดกลิ่นเหม็นและสีของน้ำที่เปลี่ยนไป (Pollution Control Department, 2018) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งในน้ำและบริเวณใกล้เคียง สามารถทำให้เสียความสมดุลทางธรรมชาติ เกิดเป็นน้ำเสียและก่อให้เกิดความเสียหายทางด้านการเกษตร มีผลทั้งต่อการเพาะปลูกและการเลี้ยงสัตว์ และหากจัดการอย่างไม่ถูกต้องจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ได้

การบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซนเริ่มมีการศึกษาที่มากขึ้น พบว่า โอโซนเป็นสารประกอบที่มีความสามารถออกซิไดซ์ (รับอิเล็กตรอน) ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแน่นอนสูง (Kanyalaers, 1997) โอโซนมีค่าศักย์ไฟฟ้า (oxidation potential) 2.07 โวล์ท ซึ่งสูงกว่าแก๊สคลอรีน 1.52 เท่า โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้เกือบทุกชนิด ทำให้มีความเป็นพิษลดลงและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (Kreethachad, 2019) มีการนำโอโซนไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ปรับสภาพอากาศในสถานที่ทำงานและห้องโดยสารยานพาหนะ การบำบัดน้ำเสียและการผลิตน้ำดื่ม การฆ่าเชื้อก่อโรคในฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การอบฆ่าเชื้อในห้องผ่าตัดและโรงงานผลิตยา การฟอกผ้าขาว ป้องกันการเกิดตะกรันในระบบลำเลียงน้ำในเส้นท่อ (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2012) ผลการศึกษาเกี่ยวกับการนำโอโซนมาบำบัดน้ำเสียและความเป็นไปได้ในการใช้โอโซนบำบัดน้ำเสียให้ผ่านมาตรฐาน พบว่า การเติมโอโซนสามารถช่วยบำบัดน้ำเสียให้มีความสกปรกลดลงจนผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งได้ในพารามิเตอร์ เช่น สี กลิ่น พีเอช ของแข็งละลายน้ำ ของแข็งแขวนลอย บีโอดี (Khamsua *et al*., 2018) แม้การบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซนเป็นวิธีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่มีข้อควรระวังในการใช้งาน คือ อากาศต้องสะอาด โดยปราศจากฝุ่น ความชื้นและละอองน้ำมัน ควรเป็นน้ำที่สะอาดไม่มีฝุ่นผง ตะกอน หรือโคลน (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2012) หากจะให้โอโซนทำปฏิกิริยากับสารใด ๆ ต้องกระจายโอโซนให้กับน้ำอย่างทั่วถึงโดยเร็วที่สุด (Kanyalaers, 1997) เพราะโอโซนมีความไม่เสถียรเมื่ออยู่ในรูปแก๊ส จึงสลายตัวได้ง่ายและรวดเร็ว (ครึ่งชีวิตเพียง 20–100 ชั่วโมง) (Sirikananpaiboon, 2009) การใช้

โอโซนในการบำบัดน้ำเสียหากมีความเข้มข้นสูงถึง 240 g/m^3 อาจทำให้เกิดการระเบิดได้ (แต่ไม่เป็นอันตรายหากใช้อัตราการเติม 50–200 g/m^3) อย่างไรก็ตามแก๊สโอโซนยังคงเป็นอันตรายต่อสุขภาพ เมื่อได้รับการสัมผัสเป็นระยะเวลานานโดยไม่มีการสวมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Environmental Protection Agency, 1999)

การศึกษาเบื้องต้นพบว่าโรงงานล้างขยะถุงพลาสติกแห่งนี้ได้รับซื้อขยะถุงพลาสติกที่ใช้งานแล้วมาจากโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์และถุงพลาสติกที่มาจากการคัดแยกจากขยะประเภทอื่นของพนักงานเก็บขนขยะ กระบวนการผลิตของโรงงานมีการล้างทำความสะอาดถุง พลาสติกเหล่านี้ด้วยน้ำบาดาลร่วมกับสารเคมีทำความสะอาด คือ โซเดียม ลอริล อีเทอร์ ซัลเฟต (sodium lauryl ether sulfate, SLES) หรือ N–70 เป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบที่มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดได้ดี เพื่อทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากพื้นผิวถุงพลาสติกออกไปกับน้ำล้างในกระบวนการผลิต น้ำทิ้งโรงงานจึงมีลักษณะไม่พึงประสงค์ การวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีโดยการเติมวิธีการโอโซนในการบำบัดน้ำเสียของโรงล้างขยะถุงพลาสติก เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้เครื่องโอโซนบำบัดน้ำเสียร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียอื่น ๆ ให้แก่ผู้ที่สนใจในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งนี้ใช้วิธีการเก็บแบบจ้วง (grab sampling) จากบ่อพักน้ำเสียของกระบวนการล้างขยะถุงพลาสติกของโรงงานล้างขยะถุงพลาสติก

วิธีการทดลอง

เก็บตัวอย่างน้ำปริมาตร 40 ลิตร โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อพักน้ำเสียในครั้งเดียวเพื่อนำมาทดลองในถังปฏิกิริยาซึ่งมีขนาดถังละ 2 ลิตร โดยมีความเข้มข้นของซีโอดีก่อนเริ่มทำการทดลองเท่ากันทั้งหมด คือ 170.88 mg/L การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ 1) ชุดควบคม (ไม่มีการเติมโอโซน) และ 2) ชุดทดลองที่มีการเติมโอโซนอัตรา 33.33 mg/h (คำนวณจาก อัตราการผลิตโอโซนขนาด 300 mg/h ที่มีท่อกระจายโอโซนไปยังถังปฏิกิริยาของชุดการทดลอง จำนวน 3 ถัง × 3 ซ้ำ เท่ากับ 9 ถังต่อเครื่องกำเนิดโอโซน 1 ชุด) เพื่อบำบัดน้ำเสียในระยะเวลาแตกต่างกัน ได้แก่ 2h 4h และ 8h โดยเป็นการศึกษาในถังปฏิกิริยารวมทั้งหมด 18 ถัง (ใช้ปริมาณเสียรวม 38 ลิตรจากการเก็บตัวอย่างปริมาณ 40 ลิตร) ภายใต้อุณหภูมิห้องปฏิบัติการไม่เกิน 25 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 1)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องผลิตโอโซน รุ่น Ozone Generator Oz 3020 ที่ผลิตโอโซนได้ปริมาณ 300 mg/h และสามารถตั้งเวลาในการทำงานได้ตั้งแต่ 10 min ขึ้นไปจนถึง 99 h (ภาพที่ 2)

การวิเคราะห์ค่าซีโอดี

เก็บตัวอย่างน้ำเสียในภาชนะที่ทำด้วยแก้วหรือพลาสติก (ปริมาณน้อยที่สุดที่ต้องเก็บ 100 mL) วิเคราะห์ทันทีหรือรักษาสภาพของตัวอย่างโดยเติม H_2SO_4 จน pH น้อยกว่า 2 แช่เย็นที่ไม่เกิน 6ºC ในที่มืด และเก็บตัวอย่างไว้ไม่เกิน 28 วัน โดยนำตัวอย่างไปทดสอบด้วยวิธีการ

กลั่นแบบปิด (closed reflux method) (American Public Health Association, 2005) ดังในภาพที่ 3 และคำนวณค่าซีโอดีตามสมการที่ (1) (Department of Industrial Works, 2016)

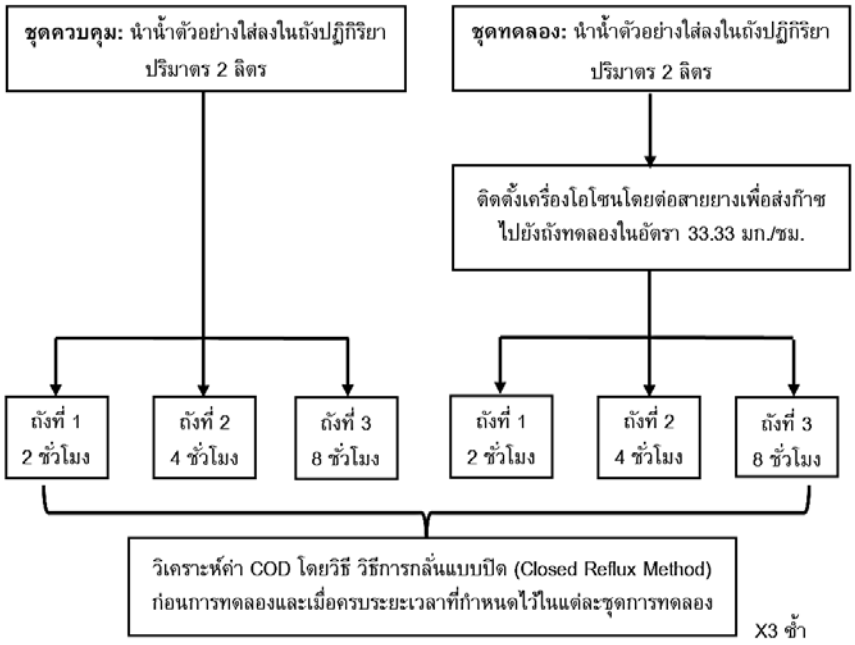
$$\text{ซีโอดี (mg/L)} = \frac{(B - S) \times N \times 8{,}000}{\text{Volume}} \quad \text{- - - (1)}$$

เมื่อ B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไตเตรทสำหรับ Blank (mg)

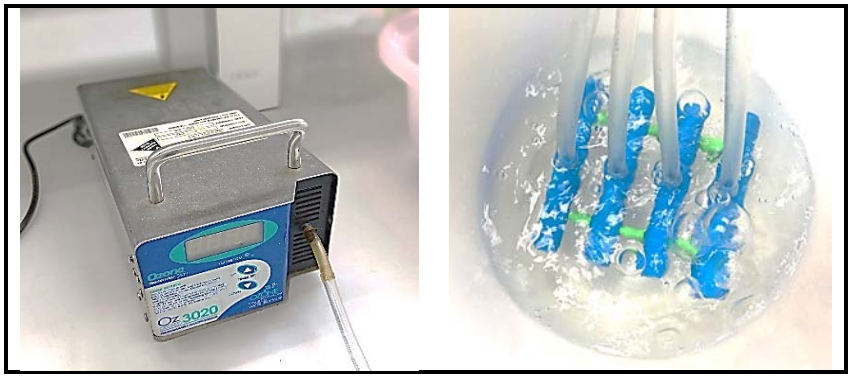
S = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไตเตรทสำหรับตัวอย่าง (mg)

N = ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)

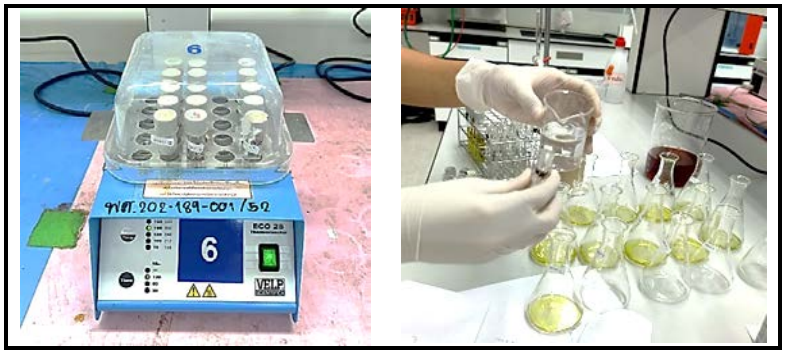
8,000 = น้ำหนักกรัมสมมูลของออกซิเจน 8 คูณ 1,000 mL/L



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง



ภาพที่ 2 เครื่องผลิตโอโซน และการเติมโอโซนเพื่อบำบัดน้ำ



ภาพที่ 3 เครื่อง COD Reactor และ วิธีการกลั่นแบบปิด

วิธีการควบคุมผลการทดลอง

การทวนสอบ

การทวนสอบเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นควบคู่ไปกับการดำเนินการหรือดำเนินกิจกรรมใด ๆ ตลอดเวลา เพื่อเป็นการตรวจสอบ ตรวจทานหรือยืนยันให้มั่นใจว่าสิ่งต่าง ๆ ที่ได้ดำเนินไปมีความถูกต้องเหมาะสมในแต่ละขั้นตอนของการทดลอง

การวิเคราะห์ซ้ำในตัวอย่างเดียวกัน (duplicate analysis pair)

การวิเคราะห์ซ้ำในตัวอย่างเดียวกันหมายถึง การวิเคราะห์ตัวอย่างเดียวกันจากการทดลองซ้ำ ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ทดลองซ้ำ จำนวน 3 ซ้ำในทุกชุดการทดลอง เพื่อทดสอบความแม่นยำของผู้ที่ทำการทดสอบหลังจากนั้นนำผลการทดสอบมาคำนวณหาร้อยละความแตกต่างสัมพัทธ์ (relative percent difference: RPD) ของการตรวจสอบซ้ำที่ได้ควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ 20 (Pollution Control Department, 2001) ซึ่งการนำเสนอผลการวิเคราะห์ซ้ำในตัวอย่างเดียวกันทุกค่าพารามิเตอร์ การวิจัยครั้งนี้มีค่าเฉลี่ยของการทดสอบมาคำนวณหาร้อยละความแตกต่างสัมพัทธ์ร้อยละ 7.47

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของซีโอดีก่อนและหลังการเติมโอโซนเพื่อบำบัดน้ำ นำเสนอข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics) ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และร้อยละ การคำนวณ หาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยการเติมโอโซน ใช้สูตรหาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและคิดเป็นร้อยละจากสมการที่ (2)

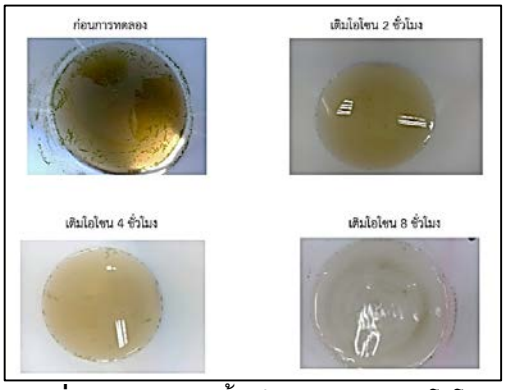
$$\text{Treatment efficiency (\%)} = \frac{\text{COD difference}}{\text{Initial COD}} \times 100 \quad \text{- - - (2)}$$

เมื่อ Treatment efficiency = ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (ร้อยละ) COD difference = ผลต่างของค่าซีโอดีระหว่างก่อนกับหลังการบำบัด (mg/L) และ Initial COD = ค่าซีโอดีก่อนการบำบัด (mg/L)

ผลการวิจัย

ผลการบำบัดซีโอดีโดยการเติมโอโซนเพื่อบำบัดน้ำเสียของโรงล้างขยะถุงขยะพลาสติกโดยการเติมโอโซนที่ปริมาณ 33.33 mg/h/ถังปฏิกิริยา ระยะเวลา 2–8 h พบว่า ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียก่อนการทดลองมีความขุ่น มีตะกอนแขวนลอย และน้ำมีสีเข้ม เมื่อมีการเติมโอโซนตามระยะเวลาที่ผ่านไปทำให้สีและความ

ขุ่นของน้ำเปลี่ยนไปในทางที่ดีขึ้น (ภาพที่ 4) เมื่อทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียที่ทำการทดลองด้วยวิธีทางห้องปฏิบัติการ พบว่า ชุดควบคุมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ดีขึ้น (ตาราง 1) ขณะที่ชุดทดลองมีผลการทดสอบคุณลักษณะของน้ำที่ดีขึ้นในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าสี ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และค่าซีโอดี (ตาราง 2)



ภาพที่ 4 ลักษณะของน้ำเสียหลังบำบัดด้วยโอโซนที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

ตาราง 1 ผลทดสอบของชุดควบคุมที่ระยะเวลา 2–8 h

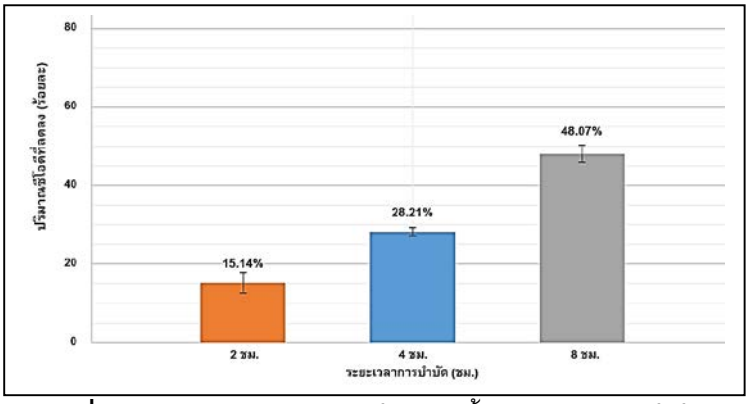
พารามิเตอร์	หน่วย	ชุดควบคุม (ไม่มีการบำบัด)			
		0 h	2 h	4 h	8 h
พีเอช (pH)	–	7.82±0.02	7.98 ± 0.03	8.07 ± 0.02	8.16 ± 0.05
อุณหภูมิ (temperature)	°C	20.00 ± 0.15	22.00 ± 0.12	23.00 ± 0.12	23.00 ± 0.15
สี (color)	Pt-Co	519.33 ± 11.23	399.33 ± 12.02	390.33 ± 10.41	378.33 ± 11.36
ความขุ่น (turbidity)	NTU	26.37 ± 2.04	19.33 ± 3.20	21.27 ± 2.46	20.90 ± 2.84
ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen)	mg/L	3.76 ± 0.35	4.28 ± 0.48	3.60 ± 0.42	3.07 ± 0.38
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (total dissolved solids)	mg/L	5.36 ± 0.31	5.65 ± 0.38	5.31 ± 0.40	5.28 ± 0.32
ซีโอดี (chemical oxygen demand)	mg/L	170.88 ± 5.41	184.86 ± 4.33	209.18 ± 6.63	226.97 ± 5.27

ตาราง 2 ผลทดสอบการเติมโอโซนของชุดทดลองที่ระยะเวลา 2–8 h

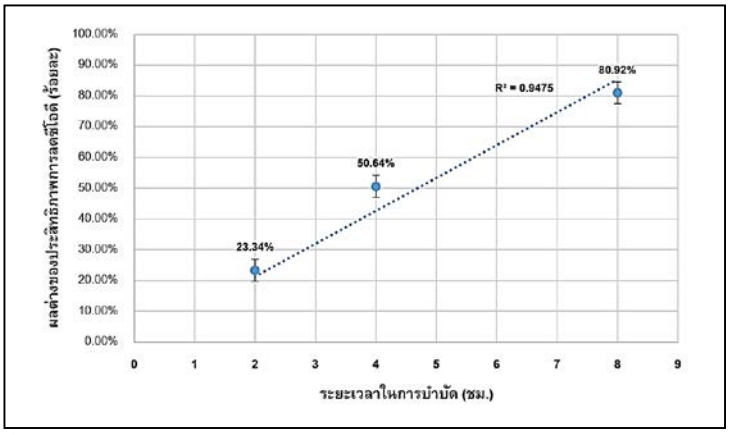
พารามิเตอร์	หน่วย	ชุดทดลอง (บำบัดด้วยโอโซน)			
		0 h	2 h	4 h	8 h
พีเอช	–	7.82 ± 0.01	9.24 ± 0.03	9.32 ± 0.02	9.40 ± 0.02
อุณหภูมิ	°C	20.00 ± 0.12	22.00 ± 0.15	23.00 ± 0.15	23.00 ± 0.20
สี	Pt-Co	519.33 ± 11.23	414.00 ± 13.78	298.00 ± 12.24	233.33 ± 10.52
ความขุ่น	NTU	26.37 ± 2.04	18.80 ± 2.32	15.24 ± 1.86	10.27 ± 2.44
ออกซิเจนละลายน้ำ	mg/L	3.76 ± 0.35	8.48 ± 0.54	8.58 ± 0.60	8.55 ± 4.52
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด	mg/L	5.36 ± 0.31	5.39 ± 0.40	4.90 ± 0.38	4.74 ± 0.34
ซีโอดี	mg/L	170.88 ± 5.41	145.10 ± 8.72	122.71 ± 5.55	88.81 ± 6.46

ความเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีของชุดควบคุมในระยะเวลาทั้งหมด 18 h (ตาราง 1) พบว่า ชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยของซีโอดีที่เพิ่มขึ้นจาก 170.88 ± 5.41 mg/L เป็น 226.97 ± 5.27 mg/L และความขุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยค่าสีและปริมาณของแข็งละลายน้ำลดลงเล็กน้อย แต่ความขุ่นของน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนความเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีของชุดทดลองในระยะเวลาทั้งหมด 8 h (ตาราง 2) พบว่า ชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยของซีโอดีที่ลดลงจาก 170.88 ± 5.41 mg/L เหลือ 88.81 ± 6.46 mg/L ในชั่วโมงที่ 8 ของการทดลอง รวมถึงค่าสี ความขุ่น และของแข็งละลายน้ำมีค่าที่ลดลง

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีเฉลี่ยของชุดทดลองที่ระยะเวลา 2 h 4 h และ 8 h เท่ากับร้อยละ 15.14 ± 2.64 28.21 ± 0.98 และ 48.07 ± 2.19 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการเติมโอโซน (ภาพที่ 5) พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ผลต่างของการลดปริมาณซีโอดีเฉลี่ยแตกต่างกันมากขึ้นตามระยะเวลาที่เปลี่ยนไป เท่ากับ ร้อยละ 23.34 ± 3.71 50.64 ± 3.20 และ 80.92 ± 3.56 ตามลำดับ โดยสามารถแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้นตรงได้ (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียด้วยการเติมโอโซน



ภาพที่ 6 ผลต่างของประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีระหว่างชุดทดลองกับชุดควบคุม

การศึกษาครั้งนี้ (ตาราง 3) พบว่าอัตราส่วนการบำบัดซีโอดีของการศึกษาครั้งนี้อยู่ระหว่าง 0.31–0.39 mg COD/ mg ozone โดยมีค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัดเท่ากับ 0.31 ± 0.005 mg COD/ mg ozone ในระยะเวลา 8 h เมื่อทดสอบความแตกต่างสำหรับการทดลองในชุดควบคุมและชุดทดลองด้วยการทดสอบของแมน-วิทนีย์ ยู (Mann–Whitney U test) พบว่า ปริมาณซีโอดีหลังการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของชุดควบคุมและชุดทดลองในการวิจัยครั้งนี้มีความแตกต่างกัน ($p < 0.01$)

ตาราง 3 อัตราส่วนการบำบัดซีโอดี (ปริมาณซีโอดีต่อปริมาณโอโซน)

ระยะเวลา (h)	ปริมาณโอโซน (mg) (ระยะเวลา×อัตราการผลิตโอโซน)	ปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (mg) (ค่าซีโอดีก่อนบำบัด–หลังบำบัด)	อัตราส่วนการบำบัด (mg COD / mg ozone)
2	66.66	25.78 ± 3.74	0.39 ± 0.056
4	133.32	48.16 ± 0.37	0.36 ± 0.003
8	266.64	82.06 ± 1.32	0.31 ± 0.005

สรุปผลการศึกษา

ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียจากโรงล้างขยะถุงพลาสติกโดยการเติมโอโซนที่อัตรา 33.33 mg/h พบว่า การบำบัดซีโอดีหลังจากการเติมโอโซนของชุดทดลองมีประสิทธิภาพมากกว่าชุดควบคุม ผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีที่ระยะเวลา 2 h เท่ากับร้อยละ 15.14 ± 2.64 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ 4 h เท่ากับร้อยละ 28.21 ± 0.98 และประสิทธิภาพการบำบัดที่ 8 h เท่ากับร้อยละ 48.07 ± 2.19 ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุดที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 8 h ซึ่งทำให้ค่าซีโอดีเฉลี่ยลดลงจาก 170.88 mg/L เหลือ 88.81 mg/L จึงทำให้ผลการบำบัดค่าซีโอดีผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ที่กำหนดค่ามาตรฐานการปนเปื้อนซีโอดีไว้ไม่เกิน 120 mg/L

อภิปรายผลการศึกษา

ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียจากโรงล้างขยะถุงพลาสติกโดยการเติมโอโซน พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียจากโรงล้างขยะถุงพลาสติกโดยการเติมโอโซนที่ให้อัตราการผลิต 300 mg/h เมื่อมีการติดตั้งท่อกระจายโอโซนไปยังชุดทดลอง ชุดละ 3 ถัง (ถังละ 3 ซ้ำ) จำนวนถังปฏิกิริยารวม 9 ถัง จึงทำให้อัตราการเติมโอโซนเพื่อบำบัดซีโอดีเท่ากับ 33.33 mg/h ผลการบำบัดที่ระยะเวลา 8 h ทำให้ค่าซีโอดีเฉลี่ยลดลงจาก 170.88 mg/L เหลือ 88.81 mg/L มีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับร้อยละ 48.07 ± 2.19 ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีใกล้เคียงกับผลการศึกษาเรื่อง ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจากห้องพ่นสีกล่องไม้เคลือบเงาซึ่งมีการใช้น้ำเสียที่มีค่าซีโอดีมากถึง 7,840 mg/L ได้มีการเพิ่มอัตราการเติมโอโซนเพื่อบำบัดน้ำเสียเป็น 1,000 mg/L ในถังปฏิกิริยาขนาด 20 L โดยใช้ระยะเวลาการบำบัดน้ำ 8 h ผลการศึกษาพบว่าสามารถลดค่าซีโอดีลงเหลือ

5,980 mg/L โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 47.44 (Khamsua *et al*., 2018) ในขณะที่การศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดซีโอดีจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกล่องกระดาษลูกฟูกด้วยกระบวนการโอโซเนชั่นโดยใช้เครื่องผลิตโอโซนที่มีอัตราการเติมโอโซน 24.50 mg/h ในการบำบัดค่าซีโอดีเริ่มต้น 200.0 mg/L ให้ลดลงเหลือ 71.20 mg/L ในถังปฏิกิริยาขนาด 2 L (เช่นเดียวกันกับขนาดถังปฏิกิริยาในการวิจัยครั้งนี้) มีประสิทธิภาพในการบำบัดเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 64.40 (Sangpitak *et al*., 2013) เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลด้านคุณลักษณะทางกายภาพจากการศึกษาของผู้วิจัยในครั้งนี้กับผลการวิจัยทั้งสองที่กล่าวมา พบว่า น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนซีโอดีเริ่มต้นที่มากกว่ามีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ลดลง ปัจจัยที่เกี่ยวกับความสามารถในการบำบัดค่าซีโอดีในน้ำโดยการเติมโอโซนหรือโอโซเนชั่น ได้แก่ ความขุ่น ค่าสี และของแข็งละลายน้ำ สอดคล้องตามหลักวิชาการของสำนักกำกับและอนุรักษ์พลังงาน กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงอุตสาหกรรมได้มีการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยและกรณีศึกษาหลายแห่ง โดยสามารถสรุปได้ว่า โอโซนมีความสามารถในการนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการบำบัดมลพิษได้ทั้งทางอากาศและทางน้ำ แต่มีข้อควรระวังในการใช้งาน คือ อากาศที่นำมาผลิตเป็นโอโซนต้องสะอาด โดยปราศจากฝุ่น ความชื้นและละอองน้ำมัน การนำโอโซนไปประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดน้ำควรเป็นการบำบัดน้ำที่สะอาดไม่มีฝุ่นผง ตะกอน หรือโคลน และการปนเปื้อนสารประกอบซัลเฟตมีค่าได้ไม่เกิน 100 mg/L ความกระด้างจำพวก $CaCO_3$ มีค่าไม่เกิน 500 mg/L ในสภาวะอุณหภูมิในการใช้งานที่ไม่ควรสูงเกิน 43ºC (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2012) ผลจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียมีความแปรผกผันกับค่าความสกปรกเริ่มต้นของน้ำ หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียต้องใช้อัตราการเติมโอโซนที่มากขึ้นและมีระยะเวลาในการบำบัดน้ำที่ยาวนานขึ้น

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดน้ำของระบบบำบัดน้ำเสียที่ดี สภาวิศวกรรมแห่งชาติได้กำหนดเกณฑ์การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพการบำบัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 (National Association of Environmental Engineers, 2004) การที่งานวิจัยครั้งนี้มีผลประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีไม่ถึงตามเกณฑ์การออกแบบนั้นเกี่ยวข้องกับข้อจำกัดของการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากโอโซนสารประกอบมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ต่าง ๆ ได้ดี เมื่อนำไปบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการล้างขยะถุงพลาสติกที่มีการใช้สารประกอบซัลเฟต คือ โซเดียม ลอริล อีเทอร์ ซัลเฟต (SLES) หรือ N–70 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบ มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดได้ดี ทำให้เกิดฟองได้เร็ว จึงนิยมใช้สำหรับทำสารทำความสะอาดหลายชนิด สารประกอบซัลเฟตใน N–70 จึงมีส่วนรบกวนการทำปฏิกิริยาของโอโซน ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไม่ดีเท่าที่ควร นอกจากประโยชน์ในการบำบัดซีโอดีแล้วโอโซนยังมีความสามารถในการช่วยให้คุณภาพน้ำในพารามิเตอร์อื่น คือ ความขุ่น ค่าสี ของแข็งละลายน้ำ และออกซิเจนละลายน้ำดีขึ้นได้ ซึ่งเมื่อโอโซนเกิดการสลายตัวเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์จะมีผลให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น (Sirianan paiboon, 2009) แต่ค่าพีเอชและอุณหภูมิไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติกับค่าซีโอดี (Osode and Okoh, 2009) สำหรับผลการเปลี่ยนแปลงของซีโอดีในชุดควบคุมที่มีค่าเพิ่มขึ้นอาจเกิดขึ้นได้จากการไม่ได้รับปัจจัยในการบำบัดน้ำและการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในน้ำเสียที่มีการใช้ออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านไป ปริมาณสารอินทรีย์ที่คงเหลือจึงมากเกินกว่าจะออกซิไดซ์ได้หมด

การศึกษาครั้งนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการแบบเติมโอโซนนั้นยังไม่เพียงพอที่จะใช้งานสำหรับบำบัดน้ำเสียเพียงกระบวนการเดียว เนื่องจากความไม่คงตัวของโอโซนในการบำบัดน้ำ จึงควรใช้งานร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียประเภทอื่นในการบำบัด (Pollution Control Department, 2017) ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอื่น ๆ ร่วมกับการเติมโอโซนในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น (pre–treatment) หรือการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้าย (post–treatment) สำหรับกำจัดสิ่งรบกวนทางกายภาพ เช่น ความขุ่น ตะกอน ของแข็งในน้ำ และเพื่อเป็นแนวทางที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมและสามารถทำให้มีการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ข้อจำกัดของงานวิจัยครั้งนี้และหลายผลการศึกษาที่ผ่านมา คือ ยังไม่มีการผลศึกษาการปนเปื้อนสิ่งรบกวนทางเคมีต่อการทำปฏิกิริยาของโอโซนก่อนเริ่มทำการทดลอง ได้แก่ สารประกอบซัลเฟต และความกระด้างจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งตามคำแนะนำในการการบำบัดและปรับสภาพน้ำด้วยโอโซนของ Department of Alternative Energy Development and Efficiency (2012) ได้ระบุความเข้มข้นไว้ไม่เกิน 100 mg/L และไม่เกิน 500 mg/L ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ: 1) ควรศึกษาความเหมาะสมในการนำโอโซนไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียระหว่างการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นกับการบำบัดน้ำเสียในขั้นสุดท้าย และ 2) ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบจากการปนเปื้อนสารประกอบซัลเฟต และความกระด้างจาก $CaCO_3$ สารเคมีทั้งสองชนิดต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำด้วยโอโซน

เอกสารอ้างอิง

American Public Health Association (2005). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st ed. American Public Health Association: Washington, DC.

Chaikhan, S. (2019). **Wastewater Management Efficiency of the Plastic Bag Washing Plant around the Landfill Dumping Warin Chamrap Municipality Garbage Ubon Ratchathani Province.** Ubon Ratchathani University: Ubon Ratchathani University. (in Thai)

Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2009). **Ozone Water Treatment and Conditioning Technology**. Bangkok: Ministry of Energy. (in Thai)

Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2012). **Treatment and pretreatment of water with ozone.** Bangkok: Ministry of Energy. (in Thai)

Department of Industrial Works. (2016). **Standard for Water Pollution Analysis Methods**. 3rd ed. Bangkok: Ministry of Industry. (in Thai)

Environmental Protection Agency. (1999). **Wastewater Technology Fact Sheet Ozone Disinfection.** Retrieved from https://www3.epa.gov/npdes/pubs/ozon.pdf?fbclid=IwAR3gXhSxBq64mlQQXrSKKUpYgjb, September 11, 2021.

Kanyalaers, V. (1997). **Treatment of Wastewater from Dyeing Plants with Ozone.** Bangkok: Mahidol University. (in Thai)

Khamsua, P., Saikhwan, P., and Yaeed, S. (2018). Wastewater treatment from paint spray room by ozone. **The 9th National & International Conference** (pp. 1042–1052). Bangkok: Suansunandha Rajabhat University. (in Thai)

Kreethachad, T. (2019). **Wastewater Treatment and Wastewater Treatment by Ozone Processing**. Retrieved from http://www.seen.up.ac.th/leaflet/assets/pp-รศ.ดร.ต่อพงศ์.pdf?fbclid=IwAR2f5WkspwzgHNOmd FJx8iLwDZlGLmUJ1nkXVuwWP0tlKxCFnbmgOfXhQAU, September 11, 2021. (in Thai)

National Association of Environmental Engineers. (2004). **Wastewater Analysis Manual**. Retrieved from http://www2.diw.go.th/Research/2-Sampling-w.pdf, September 11, 2021. (in Thai)

Osode, N. A., and Okoh, I. A. (2009). Impact of discharged wastewater final effluent on the physicochemical qualities of a receiving watershed in a suburban community of the Eastern Cape Province. **Clean Journal** 37(12): 938–944.

Pollution Control Department. (2001). **Quality Control of Test Results for Laboratories.** Retrieved from http://pcd.go.th/count/waterdl.cfm?FileName=control_sea.pdf, July 7, 2021. (in Thai)

Pollution Control Department. (2017). **Plastic Waste Management**. Retrieved from http://infofile.pcd.go.th/law/DraftWastePlan6064.pdf?CFID=2125902&CFTOKEN=5540, July 7, 2021. (in Thai)

Pollution Control Department. (2018). **Wastewater Treatment.** Retrieved from http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html, July 7, 2021. (in Thai)

Sangpitak, R., Kaewkam, H., and Saichon, P. (2013). **Removal of Color and COD in Ozonation Process Treating Corrugated Boxes Manufactory Wastewater**. Bachelor of Science Thesis (Environmental Science and Natural Resources). Bangkok: Rajamangala University of Technology Krungthep. (in Thai)

Sirianan paiboon, S. (2009). **Wastewater Treatment System.** Bangkok: Phim Luk. (in Thai)

Songlod, S. (2012). **Monitoring of Water Quality from Plastic Waste Washing Plant: A Case Study of Wanghin District, Sisaket.** Master of Engineering Thesis (Environmental Engineering). Ubon Ratchathani University. (in Thai)