



## การประยุกต์ใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน ในการควบคุมคุณภาพน้ำในระบบ เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม

### Application of Ozone-Based Advanced Oxidation Processes for Water Quality Control in a Marine Aquaculture System

ทิฆัมพร กรรเจียก<sup>1</sup>, นวพร สาธารณพร<sup>2</sup>, ธณู จารุเหตารักษ์<sup>3</sup> และ วิเชียร ศิริพรหม<sup>4\*</sup>

Tikumporn Kunjiek<sup>1</sup>, Navaporn Sataranaporn<sup>2</sup>, Thathanhu Charhuhaetharucks<sup>3</sup> and  
Wichian Siriprom<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> นักวิจัยชำนาญการ, สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล, มหาวิทยาลัยบูรพา

<sup>1</sup> Senior Researcher, Institute of Marine Science, Burapha University.

<sup>2</sup> นักศึกษาระดับปริญญาตรี, ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

<sup>2</sup> Undergraduate Student, Department of Aquatic Science, Faculty of Science, Burapha University.

<sup>3</sup> ผู้อำนวยการฝ่ายพัฒนาธุรกิจ, บริษัท ไวทัล เวล จำกัด

<sup>3</sup> Business Development Director, Vital Well Co., Ltd.

<sup>4</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
วิทยาเขตศรีราชา

<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Basic Science and Physical Education, Faculty of Science at Si Racha,  
Kasetsart University Sriracha Campus.

\*Corresponding author, E-mail: w.siriprom@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน (Ozone-Based AOPs) ในการปรับปรุงและควบคุมคุณภาพน้ำเค็มจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล โดยทำการบำบัดน้ำเค็มบางส่วนจากระบบด้วยก๊าซโอโซน ที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดโอโซนแบบไดอิเล็กทริก แบรีเออร์ดีสชาร์จ โดยใช้ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นก๊าซปฏิกิริยา (Reactive gas) จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการบำบัดในสัดส่วน 25% ผสมกลับเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล สำหรับการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ คุณภาพน้ำระหว่างชุดควบคุม กับชุดการบำบัดด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน (Ozone-Based AOPs) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs โดยมีพารามิเตอร์ คุณภาพน้ำที่สำคัญ ได้แก่ ค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความเค็ม (Salinity) และสารประกอบไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย ( $NH_3 / NH_4^+$ ) ไนไตรท์ ( $NO_2^-$ ) และไนเตรท ( $NO_3^-$ ) จากผลการทดลองพบว่า การบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs ส่งผลให้ค่า ORP และค่า DO เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสะท้อนถึงสถานะออกซิไดซ์ ที่เหมาะสมต่อการสลายสารอินทรีย์และการควบคุมคุณภาพน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังพบว่ากระบวนการ Ozone-Based AOPs มีส่วนช่วยเสริมประสิทธิภาพของการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ภายใต้อุณหภูมิที่ค่า DO และค่า ORP อยู่ในระดับที่สูงส่งผลต่อการลดลงของไนไตรท์ควบคู่กับการเพิ่มขึ้นของไนเตรทอย่างชัดเจน และที่สำคัญ คือ กระบวนการ Ozone-Based AOPs ไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบไอออนหลักของน้ำทะเล โดยสังเกตได้จากค่าความเค็มที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นข้อ



ได้เปรียบที่สำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเลให้มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

**คำสำคัญ:** กระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน, กระบวนการไนตริฟิเคชัน, ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล

## Abstract

This study aimed to evaluate the efficiency of ozone-based advanced oxidation processes (Ozone-Based AOPs) for improving and controlling seawater quality in a marine aquaculture system. A portion of seawater from the system was treated with ozone gas generated by a dielectric barrier discharge (DBD) ozone generator using oxygen ( $O_2$ ) as the reactive gas. The treated seawater, accounting for 25% of the system volume, was subsequently mixed back into the marine aquaculture system. Water quality parameters were compared between a control system and the system treated with Ozone-Based AOPs to assess treatment performance.

The evaluation of Ozone-Based AOPs was conducted using key water quality parameters, including oxidation–reduction potential (ORP), dissolved oxygen (DO), pH, salinity, and nitrogen compounds in the forms of ammonia, nitrite, and nitrate. The experimental results demonstrated that ozone-based treatment significantly increased ORP and DO values, indicating the establishment of oxidative conditions favorable for efficient organic matter degradation and water quality control. Furthermore, Ozone-Based AOPs were found to enhance nitrification processes under conditions of elevated dissolved oxygen and oxidation–reduction potential, as evidenced by a pronounced decrease in nitrite concentration accompanied by a clear increase in nitrate concentration. Importantly, ozone-based treatment did not affect the major ionic composition of seawater, as revealed by the absence of significant changes in salinity. This characteristic represents a critical advantage for application in marine aquaculture systems, indicating that Ozone-Based AOPs constitute an efficient, safe, and environmentally friendly technology for the management, control, and improvement of seawater quality, thus supporting sustainable marine aquaculture operations..

**Keywords:** Ozone-based oxidation process (Ozone-Based AOPs), Nitrification process, Marine aquaculture system

## บทนำ

ประเทศไทยมีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสวยงาม เพื่อนันทนาการภายในประเทศและการส่งออกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีความได้เปรียบด้านสภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ รวมถึงมีชนิดพันธุ์สัตว์น้ำสวยงามที่หลากหลาย จากข้อมูลทะเบียนเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ทบ.1) ของกรมประมงพบว่าจำนวนเกษตรกรที่ขึ้นทะเบียนเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสวยงามเพิ่มขึ้นจาก 1,625 ราย ในปี พ.ศ.2562



เป็น 1,919 ราย ในปี พ.ศ.2563 และเพิ่มเป็น 2,442 ราย ในปี พ.ศ.2564 อย่างไรก็ตามสัดส่วนของสัตว์น้ำสวยงามที่เพาะเลี้ยงส่วนใหญ่ยังคงเป็นปลาน้ำจืดถึงร้อยละ 90 ขณะที่ปลาทะเลมีเพียงร้อยละ 9.9 และปลาน้ำกร่อยร้อยละ 0.1 (สุปติ และ สาริต, 2020) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการเพาะเลี้ยงปลาทะเลยังมีสัดส่วนค่อนข้างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การเพาะเลี้ยงปลาน้ำจืด ภายใต้สถานการณ์ดังกล่าว ปัจจัยหนึ่งที่เป็นข้อจำกัด คือ เทคโนโลยีของการเพาะเลี้ยงปลาทะเล เนื่องจากการเพาะเลี้ยงปลาน้ำจืดมีระบบการผลิตที่พัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากดั้งเดิมที่มีการเพาะเลี้ยงแบบระบบกึ่งปิด (semi-closed system) จนปัจจุบันมีการพัฒนาไปสู่การเพาะเลี้ยงแบบปิด หรือระบบหมุนเวียนน้ำ (Closed / Recirculating Aquaculture System: RAS) เนื่องจากระบบ RAS มีจุดเด่นที่สามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้ดีกว่า ใช้น้ำในปริมาณที่น้อยกว่า และที่สำคัญลดการปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก อย่างไรก็ตามแม้ระบบ RAS จะมีข้อได้เปรียบหลายประการ แต่ยังคงเกิดปัญหาการสะสมของของเสียจากการขับถ่ายของปลา เศษอาหารที่ตกค้าง และกิจกรรมของจุลินทรีย์ภายในระบบ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนีย ( $NH_3 / NH_4^+$ ) ไนไตรต์ ( $NO_2^-$ ) และไนเตรต ( $NO_3^-$ ) รวมถึงการสะสมของสารอินทรีย์และเชื้อก่อโรค เช่น *Vibrio* spp. เชื้อรา และปรสิต (Summerfelt & Penne, 2007; Timmons & Ebeling, 2010) แต่สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล มีข้อจำกัดที่สำคัญคือสัตว์น้ำทะเลมีความไวต่อความผันผวน และการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำเช่น ความเค็ม อุณหภูมิ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ และสมดุลของสารประกอบไนโตรเจน ทำให้การควบคุมสภาวะการเพาะเลี้ยงทำได้ยากกว่าการเพาะเลี้ยงในระบบน้ำจืด นอกจากนี้ สัตว์น้ำทะเลยังมีความไวต่อการระบาดของโรค โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรียในกลุ่ม *Vibrio* spp. ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับภาระสารอินทรีย์และเสถียรภาพของคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยง และเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการขยายการผลิตในเชิงพาณิชย์ (Badiola et al., 2012)

ด้วยพิพิธภัณฑสถานสัตว์น้ำและสถานเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (Bangsaen Aquarium & Museum :BIMS) มีการใช้ระบบเพาะเลี้ยงแบบหมุนเวียนน้ำ (Recirculating Aquaculture System: RAS) เพื่อรองรับการจัดแสดงและการเลี้ยงสัตว์น้ำทะเลภายใต้สภาวะควบคุม โดยได้มีการออกแบบให้มีการหมุนเวียนน้ำร่วมกับระบบบำบัดน้ำหลายขั้นตอน ได้แก่ การกรองเชิงกล การกรองชีวภาพ ระบบเติมอากาศ และระบบควบคุมคุณภาพน้ำอย่างต่อเนื่อง รวมถึงแนวทางการจัดการคุณภาพน้ำด้วยการเปลี่ยนถ่ายน้ำ แม้จะช่วยแก้ปัญหาเสถียรภาพของคุณภาพน้ำในพิพิธภัณฑสถานสัตว์น้ำ (BIMS) ได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังคงมีข้อจำกัดด้านต้นทุนรวมถึงการรบกวนเสถียรภาพของระบบชีวภาพจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำบ่อยครั้ง และความเสี่ยงต่อการเกิดสารตกค้างและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำเชิงกายภาพ-เคมี

ด้วยเหตุนี้ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs) โดยใช้โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์หลัก จึงเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยก๊าซโอโซน ( $O_3$ ) ซึ่งอยู่ในรูปสารออกซิไดซ์ที่มีศักยภาพสูง (ศักย์ออกซิเดชัน 2.08 โวลต์) และเหนือกว่าคลอรีนถึง 51% เป็นองค์ประกอบหลักในการออกซิเดชันโดยก๊าซโอโซนจะทำปฏิกิริยากับน้ำ และก่อให้เกิดอนุมูลออกซิเจนที่มีความไวต่อปฏิกิริยาสูงหรือ Reactive Oxygen Species (ROS) เช่น อนุมูลไฮดรอกซิล ( $\bullet OH$ ) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ และปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Summerfelt, 2003; Gunten, 2003) ประกอบกับก๊าซโอโซนมีข้อได้เปรียบที่สำคัญ ได้แก่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วไม่ก่อให้เกิดผลพลอยได้จากปฏิกิริยาที่เป็นอันตรายในระยะยาว และมีออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยา ซึ่งเอื้อต่อการเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำและเสถียรภาพของคุณภาพน้ำ ทำ



ให้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบ RAS ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล (Guntent, 2003; Summerfelt & Hochheimer, 1997)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้กระบวนการ AOPs ด้วยก๊าซโอโซนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล โดยมุ่งเน้นการประเมินผลของก๊าซโอโซนต่อพารามิเตอร์คุณภาพน้ำทะเล และศักยภาพของการลดสารอินทรีย์ ทั้งนี้ คาดว่าผลการศึกษาที่ได้จะเป็นแนวทางในการออกแบบและจัดการระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเลแบบไม่ใช้สารเคมีที่มีความปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีความยั่งยืนในเชิงสิ่งแวดล้อมและเชิงพาณิชย์ต่อไป

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) ด้วยโอโซน ( $O_3$ ) ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) ด้วยโอโซน ( $O_3$ ) สำหรับควบคุมคุณภาพน้ำในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล

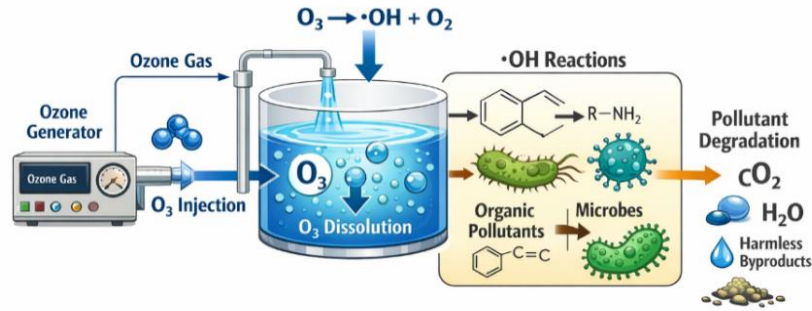
### แนวคิด ทฤษฎี กรอบแนวคิด

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs) เป็นกระบวนการที่อาศัยการสร้างสารออกซิไดซ์ที่มีศักยภาพออกซิเดชันสูง เพื่อทำปฏิกิริยากับสารมลพิษต่าง ๆ รวมถึงจุลินทรีย์ โดยขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการ AOPs คือ การผลิตอนุมูลอิสระที่มีความไวต่อปฏิกิริยาสูง โดยเฉพาะอนุมูลไฮดรอกซิล ( $\bullet OH$ ) ซึ่งมีค่าศักย์ออกซิเดชัน สูงประมาณ 2.7–2.8 โวลต์ และสามารถออกซิไดซ์สารมลพิษต่าง ๆ ได้อย่างไม่จำเพาะ (non-selective oxidation) จนเกิดการแตกตัวเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก หรือถูกแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด

โดยทั่วไปกระบวนการ AOPs สามารถจำแนกได้เป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่

(1) กระบวนการเชิงโฟโตเคมี (Photochemical processes) ซึ่งอาศัยพลังงานจากแสง เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) เพื่อกระตุ้นการสร้างอนุมูลอิสระ

(2) กระบวนการเชิงเคมี (Chemical processes) ซึ่งอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี โดยตรงระหว่างสารตั้งต้นเพื่อสร้างอนุมูลออกซิแดนท์ (Oxidant) ซึ่งในทางปฏิบัติ กระบวนการเชิงเคมีได้รับความนิยมแพร่หลายกว่า เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน สามารถควบคุมสภาวะปฏิกิริยาได้ง่าย และไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดพลังงานแสง โดยสารตั้งต้นที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ โอโซน ( $O_3$ ) หรือที่เรียกว่ากระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน (Ozone-Based AOPs) ซึ่งสามารถก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ( $\bullet OH$ ) ผ่านปฏิกิริยาการสลายตัวในน้ำ (ทศพล, 2562; Guntent, 2003)



ภาพที่ 1 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs) ด้วยก๊าซโอโซน ( $O_3$ )  
ที่มา: ดัดแปลงจาก Gunten (2003) และ Andreozzi et al. (1999)

### วิธีดำเนินการวิจัย

กระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน (Ozone-Based AOPs) จะใช้ก๊าซโอโซนที่ถูกผลิตขึ้นด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharges; DBD) โดยมีก๊าซออกซิเจน เป็นก๊าซปฏิกิริยา (Reactive gas) ภายใต้สภาวะจำเพาะ คือ มีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 10 ลิตรต่อนาที ตามงานวิจัยของ Chamchoi et al (2022) จากนั้น จำลองกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเลด้วยการแบ่งน้ำเค็มตัวอย่างที่เก็บมาจากระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล ออกเป็น 2 ถัง ถังแรกจะเรียกว่า “ถังน้ำเค็มตัวอย่าง” ใช้สำหรับการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs และ ถังที่สอง จะเรียกว่า “ชุดควบคุม (Control)” ดังภาพที่ 2 (ข) สำหรับถังแรกที่ใช้ในการบำบัดด้วย Ozone-Based AOPs จะปล่อยก๊าซโอโซนผ่านอุปกรณ์สร้างฟอง (porous diffuser) เป็นระยะเวลา 60 นาที ดังภาพที่ 2(ก)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 2 แผนผังแสดงระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำเค็มจากระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล ด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs (ก) การใช้เครื่องกำเนิดโอโซนเป็นแหล่งผลิตก๊าซโอโซน และกระจายก๊าซโอโซนลงสู่น้ำผ่านอุปกรณ์สร้างฟอง (Porous diffuser) และ (ข) ขั้นตอนการบำบัดน้ำเค็มที่แบ่งออกมาในสัดส่วนร้อยละ 25 จากนั้นนำน้ำเค็มที่ผ่านการบำบัดผสมกลับเข้าสู่ถังแรกซึ่งเป็นถังสำหรับการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs



การเก็บตัวอย่างน้ำจะทำที่เวลาเริ่มต้น (0 ชั่วโมง) ก่อนเริ่มกระบวนการ Ozone-Based AOPs และหลังจากปรับปรุงคุณภาพน้ำเค็ม ด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs โดยจะเริ่มต้นด้วยการแบ่งน้ำเค็มจาก “ถังน้ำเค็มตัวอย่าง” (ถัง AOPs) ซึ่งมีปริมาณ 20 ลิตร ออกมาในสัดส่วนร้อยละ 25 (5 ลิตร) เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำ และนำน้ำเค็มที่ผ่านการบำบัดผสมกลับคืนไปใน “ถังน้ำเค็มตัวอย่าง” (ถัง AOPs) ดังภาพที่ 2 (ข) จากนั้นจะทำซ้ำกระบวนการเดิมเมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง และ 96 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยตัวอย่างน้ำเค็มสำหรับการวิเคราะห์จะถูกเก็บจาก “ถังน้ำเค็มตัวอย่าง” ซึ่งเป็นถังน้ำเค็มที่มีการใช้กระบวนการ Ozone-Based AOPs และ “ชุดควบคุม” ซึ่งเป็นถังน้ำเค็มที่ไม่มีการใช้ กระบวนการ Ozone-Based AOPs เพื่อเปรียบเทียบพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ โดยตัวอย่างน้ำเค็มถูกวิเคราะห์ที่อุณหภูมิตั้ง (25 องศาเซลเซียส) โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 1. การตรวจวัดคุณภาพน้ำภาคสนาม (In-situ Water Quality Measurement)

ดำเนินการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่มีความแปรผันสูงโดยตรง ณ จุดเก็บตัวอย่างเพื่อให้ได้ค่าที่สะท้อนสถานะจริงในขณะที่เก็บตัวอย่าง ดังนี้:

#### 1.1 ค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential: ORP):

ตรวจวัดโดยใช้เครื่อง ORP Pen Meter รุ่น ExStik ORP Meter 169E เพื่อประเมินสถานะทางเคมีไฟฟ้า (Redox state) ของแหล่งน้ำ มีหน่วยวัดเป็นมิลลิโวลต์ (mV)

#### 1.2 ค่าออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen: DO):

ตรวจวัดโดยใช้เครื่องวัดคุณภาพน้ำแบบพกพา (Handheld Multimeter) รุ่น YSI PRO2030 เพื่อประเมินปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มีหน่วยวัดเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

#### 1.3 ค่าความเค็ม (Salinity):

ตรวจวัดโดยใช้เครื่อง YSI PRO2030 ซึ่งเป็นเครื่องวัดแบบพกพาที่มีความแม่นยำสูง แสดงผลในหน่วยส่วนในพันส่วน (parts per thousand: ppt)

### 2. การวิเคราะห์สารอาหารในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Analysis)

ตัวอย่างน้ำถูกเก็บรักษาและลำเลียงภายใต้สถานะควบคุมอุณหภูมิ เพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบไนโตรเจน ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีมาตรฐานทางสเปกโทรโฟโตเมตรี (Spectrophotometry) ดังนี้:

#### 2.1 แอมโมเนียรวม (Total Ammonia: $NH_3 / NH_4^+$ ):

วิเคราะห์ด้วยวิธี Phenol-hypochlorite method ตามแนวทางของ Grasshoff et al. (1983) โดยอาศัยหลักการทำปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียกับฟีนอลและไฮโปคลอไรต์ในสถานะต่าง จนเกิดสารประกอบสีน้ำเงิน (Indophenol blue)

#### 2.2 ไนโตรท-ไนโตรเจน ( $NO_2^- - N$ ):

วิเคราะห์ด้วยวิธี Diazotization ตามแนวทางของ Strickland and Parsons (1972) โดยการทำให้ปฏิกิริยากับ Sulfanilamide และ N-(1-naphthyl)-ethylenediamine dihydrochloride เพื่อให้เกิดสีอ้อมเอโซ (Azo dye) สีชมพูเข้ม

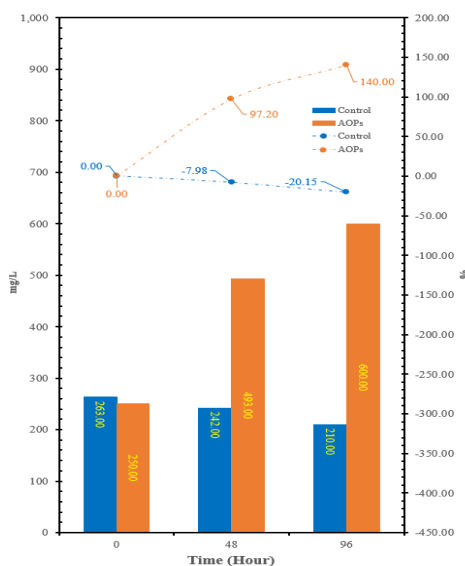
#### 2.3 ไนเตรท-ไนโตรเจน ( $NO_3^- - N$ ):

วิเคราะห์ด้วยวิธี Cadmium Reduction ตามแนวทางของ Strickland and Parsons (1972) โดยการรีดิวซ์ไนเตรทให้เป็นไนโตรทผ่านคอลัมน์แคดเมียม (Copper-coated Cadmium granules) ก่อนนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรทที่เกิดขึ้นตามวิธี Diazotization

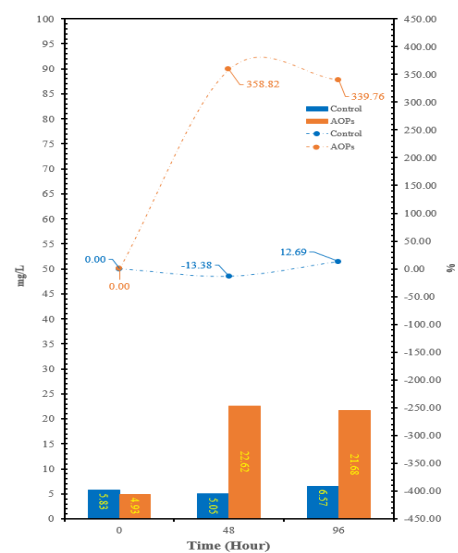
## ผลการวิจัย

การปรับปรุงคุณภาพน้ำเค็มจากระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล ด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs เมื่อพิจารณาค่า ORP ซึ่งสามารถสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของสมดุลทางเคมีของน้ำเค็มที่อยู่ในสภาวะออกซิไดซ์ (oxidizing condition) โดย ณ เวลาเริ่มต้น (0 ชั่วโมง) พบว่าค่า ORP ใน “ถังน้ำเค็มตัวอย่าง” และ “ชุดควบคุม” มีค่าใกล้เคียงกัน คือ “ชุดควบคุม” มีค่า ORP เริ่มต้นที่ 263 mV ส่วน “ถังน้ำเค็มตัวอย่าง” มีค่า ORP เริ่มต้นที่ 250 mV ภายหลังจากทำการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs โดยมีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา พบว่าค่า ORP มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าสูงขึ้นไปอยู่ในช่วง 493 และ 630 mV ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 97.20 และ 140 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3 ประกอบกับก๊าซโอโซนมีจุดเด่นที่สามารถสลายตัวและได้ก๊าซออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยา ซึ่งเป็นข้อดีและประโยชน์สำหรับการเพิ่มค่า DO ในน้ำ ดังนั้นเมื่อทำการศึกษาค่า DO ที่สัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลในรูปโมเลกุล จากผลการทดลองพบว่าค่า DO หลังจากทำการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs โดยมีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา มีค่าที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.93 mg/L (“ถังน้ำเค็มตัวอย่าง” ที่เวลาเริ่มต้น (0 ชั่วโมง) ) ไปอยู่ในช่วง 22.62 และ 21.68 mg/L ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเป็นสภาวะของน้ำเค็มที่มีออกซิเจนละลายสูง ส่วนค่า DO ของ “ชุดควบคุม” นั้นมีค่าที่ค่อนข้างต่ำโดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.05–6.57 mg/L ดังแสดงได้ดังภาพที่ 4

สำหรับคุณภาพน้ำทางเคมี ได้ทำการตรวจวัด แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) ไนไตรท์ ( $NO_2^-$ ) และไนเตรท ( $NO_3^-$ ) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความเค็ม (Salinity) ที่เป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการบริหารจัดการน้ำ



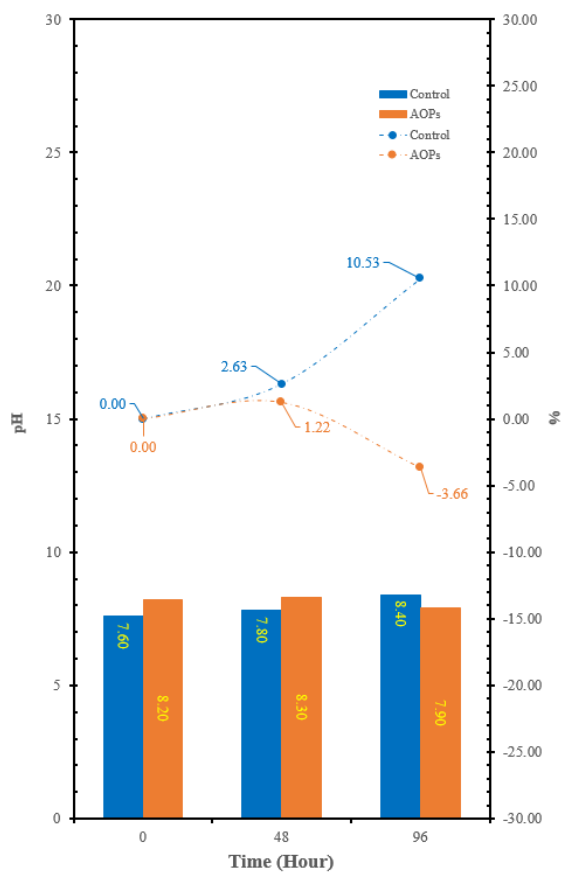
ภาพที่ 3 ค่าโพเทนเชียลออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential : ORP) ของ “ชุดควบคุม” และชุดก่อนและหลังบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs เมื่อใช้ออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นก๊าซปฏิกิริยา



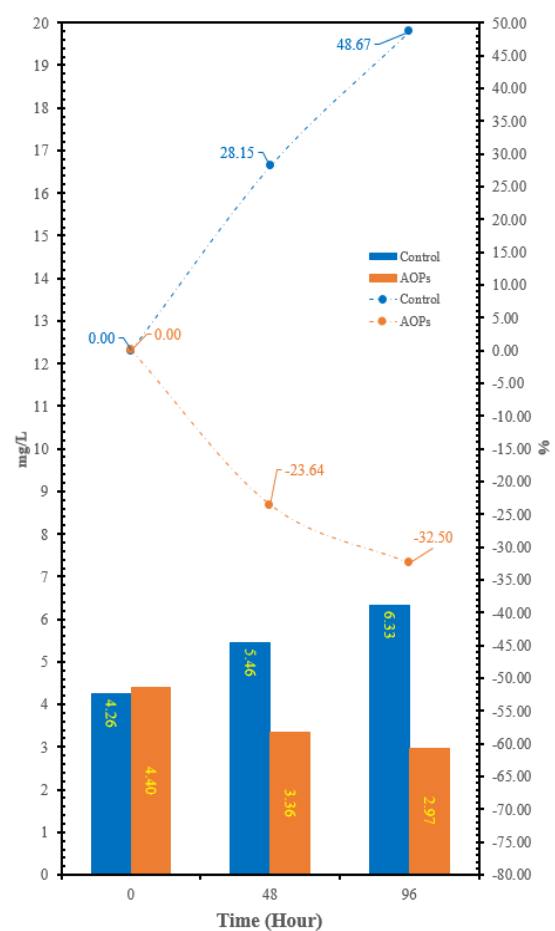
ภาพที่ 4 ค่าออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen; DO) ของ “ชุดควบคุม” และชุดก่อนและหลังบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs เมื่อใช้ออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นก๊าซปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาค่า pH พบว่า ค่า pH ของ “ชุดควบคุม” มีค่าอยู่ในช่วง 7.6–8.4 ขณะที่ “ถึงน้ำเค็มตัวอย่าง” มีค่า pH ที่ระดับ 8.20 แต่ภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs โดยมีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา พบว่าค่า pH มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยมีค่าลดลงจากระดับ 8.30 เป็นระดับ 7.90 ดังแสดงในภาพที่ 5

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของแอมโมเนีย ( $NH_3 / NH_4^+$ ) พบว่า ค่าแอมโมเนียของ “ชุดควบคุม” มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.26 mg/L เป็น 5.46 mg/L และ 6.33 mg/L ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 28.15 และ 48.67 ในขณะที่ค่าแอมโมเนียภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs โดยมีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา กลับพบว่า มีค่าเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงข้าม คือมีค่าลดลงจาก 4.40 mg/L เป็น 3.36 mg/L และ 2.97 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ -23.64 และ -32.50 ดังแสดงในภาพที่ 6

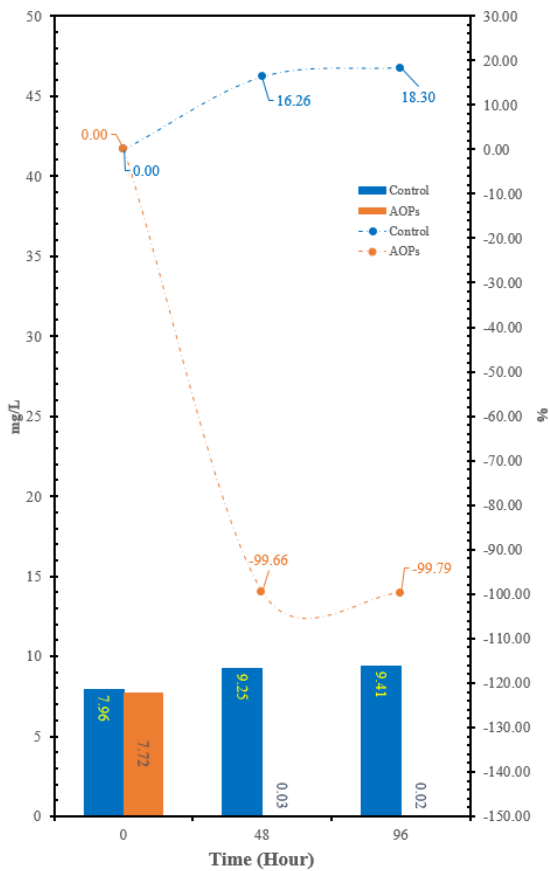


ภาพที่ 5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของ “ชุดควบคุม” และชุดก่อนและหลังบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs เมื่อใช้ ออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นก๊าซปฏิกิริยา

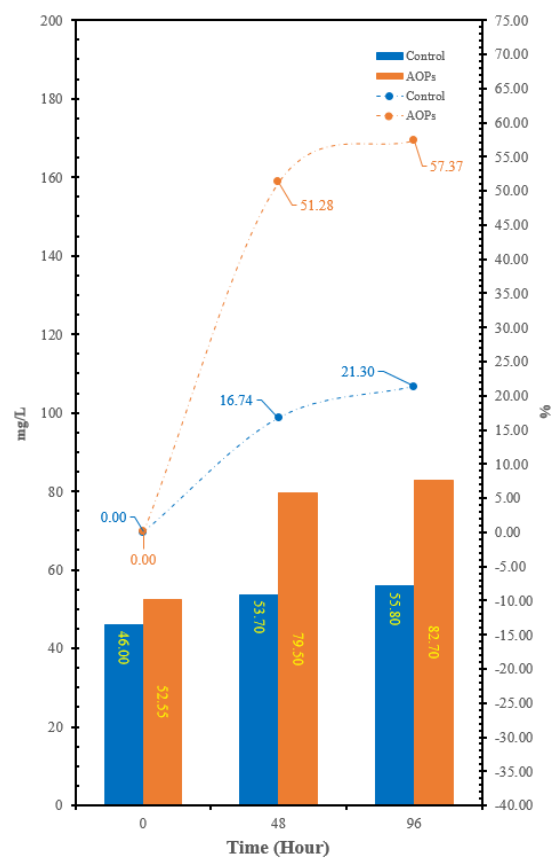


ภาพที่ 6 ค่าแอมโมเนีย ( $NH_3 / NH_4^+$ ) ของ “ชุดควบคุม” และ ชุดก่อนและหลังบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นก๊าซปฏิกิริยา

เมื่อทำการศึกษาถึงปริมาณไนไตรท์ ( $NO_2^-$ ) จากผลการทดลองพบว่า ในส่วนของไนไตรท์มีค่าลดลงอย่างชัดเจนภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยจะเห็นว่าค่าไนไตรท์เริ่มต้นของ “ชุดควบคุม” มีค่า 7.96 mg/L และ “ถึงน้ำเค็มตัวอย่าง” ที่เวลาเริ่มต้น (0 ชั่วโมง) มีค่า 7.72 mg/L แต่ภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs โดยมีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา พบว่าค่าไนไตรท์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเหลือเพียง 0.02–0.03 mg/L คิดเป็นร้อยละ -99.66 และ -99.79 ตามลำดับ ดังนั้นจากการลดลงของไนไตรท์น่าจะเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันเชิงเคมี (Chemical nitrification) ทำให้แอมโมเนียออกไซด์เปลี่ยนแปลงไปเป็นไนไตรท์และไนเตรท ดังนั้น เพื่อยืนยันว่าเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันเชิงเคมีจึงได้พิจารณาถึงค่าไนเตรทด้วย



ภาพที่ 7 ค่าไนไตรท์ ( $NO_2^-$ ) ของ “ชุดควบคุม” และ ชุดก่อนและหลังบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นก๊าซปฏิกิริยา



ภาพที่ 8 ค่าไนเตรท ( $NO_3^-$ ) ของ “ชุดควบคุม” และ ชุดก่อนและหลังบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นก๊าซปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาค่าเริ่มต้นของไนเตรท ( $NO_3^-$ ) ใน “ชุดควบคุม” พบว่ามีค่า 46.00 mg/L ขณะที่ “ถึงน้ำเค็มตัวอย่าง” ที่เวลาเริ่มต้น (0 ชั่วโมง) มีค่าไนเตรท 52.55 mg/L ภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs โดยมีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา พบว่าค่าไนเตรทมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีค่า 79.50 mg/L และ 82.70 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 51.28 และ 87.37 ดังแสดงในภาพที่ 8



สำหรับค่าความเค็ม (Salinity) ที่เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์พื้นฐานที่ส่งผลต่อการอยู่รอดและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำเค็ม โดยค่าที่เหมาะสมสำหรับสัตว์น้ำเค็มคือ 30-35 ppt จากผลการศึกษาพบว่า ค่าความเค็มไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบ “ชุดควบคุม” ที่มีค่าความเค็มเริ่มต้นที่ 31.9 ppt กับ “ถังน้ำเค็มตัวอย่าง” ที่เวลาเริ่มต้น (0 ชั่วโมง) มีค่าความเค็ม 32.0 ppt และภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs โดยมีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยา พบว่าค่าความเค็มมีค่า 31.7 ppt ซึ่งยังคงมีค่าใกล้เคียงกับ “ชุดควบคุม” และ “ถังน้ำเค็มตัวอย่าง” ที่เวลาเริ่มต้น (0 ชั่วโมง)

## สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการ Ozone-Based AOPs ในการบำบัดน้ำเค็มในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล จากผลการทดลองพบว่าการประยุกต์ใช้กระบวนการ Ozone-Based AOPs สามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในเชิงกายภาพและเคมี โดยเฉพาะสภาวะทางเคมีของน้ำ กระบวนการ Ozone-Based AOPs สามารถปรับปรุงสภาวะทางเคมีของน้ำให้เข้าสู่สภาวะออกซิไดซ์ตามหลักการของกระบวนการ AOPs ด้วยการเพิ่มค่า ORP จากการสร้างอนุมูลอิสระ (free radical) ที่มีศักยภาพสูง เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน (Superoxide Anion:  $O_2^-$ ) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide:  $H_2O_2$ ) อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical:  $\bullet OH$ ) ซิงเกิลออกซิเจน (Singlet Oxygen:  $^1O_2$ ) อนุมูลอิสระพอรอกซิล (Peroxyl radical:  $ROO\bullet$ ) และไฮโดรเปอร์ออกซิล (Hydroperoxyl Radical:  $HOO\bullet$ ) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Li et al. (2019) ที่ได้รายงานถึงการใช้ออกซิเจนในกระบวนการบำบัดน้ำจะสามารถเพิ่มค่า ORP ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า ORP หลังการบำบัดจะมีค่าอยู่ในช่วง 500–700 mV ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมต่อการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ สารโลหะหนักบางชนิดและยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค เช่น *Vibrio* spp. หรือ *Aeromonas* spp. อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนั้น ด้วยลักษณะเฉพาะของไอโซนที่เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการ AOPs และมีจุดเด่นที่สำคัญ คือ สามารถสลายตัวให้ก๊าซออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย จึงส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่า DO สอดคล้องกับการทดลองของ Krumins et al. (2001) ที่พบว่า จากการทดลองให้ไอโซนในระบบการเลี้ยงปลาแบบหมุนเวียนน้ำ พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในชุดการทดลองที่ให้ไอโซนสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากจุดเด่นของไอโซน ที่ว่าเมื่อไอโซน ถูกเติมลงในน้ำจะไม่คงตัวและจะสลายตัวเป็นก๊าซออกซิเจน และสร้างอนุมูลอิสระ ROS ประกอบกับการใช้อุปกรณ์สร้างฟอง (porous diffuser) ในการปล่อยก๊าซไอโซนลงในน้ำทำให้ก๊าซออกซิเจนจากการสลายตัวของก๊าซไอโซนสามารถอยู่ในน้ำได้นานขึ้น ส่งผลให้อัตราการละลายของก๊าซออกซิเจนลงในน้ำเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่า DO สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (23.28–24.24 mg/L) ซึ่งเป็นระดับที่สูงเกินกว่าค่าความอิ่มตัวของออกซิเจนในสภาวะปกติที่อุณหภูมิระหว่าง 20–30°C (ประมาณ 7.5–9.5 mg/L) ถึงร้อยละ 358.82 และ 339.76 ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นว่าน้ำเค็มที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs จะอยู่ในภาวะออกซิเจนอิ่มตัวยิ่งยวด (oxygen supersaturation) แต่อย่างไรก็ตาม ระดับ DO ที่สูงมากไม่ได้อยู่ในสภาวะเสถียร โดยค่า DO จะมีค่าลดลงเมื่อทิ้งไว้สักช่วงระยะเวลาหนึ่ง เนื่องจากน้ำเค็มจะพยายามคืนสู่สภาวะสมดุลกับความดันบรรยากาศ ฟองก๊าซออกซิเจนที่สะสมอยู่ในน้ำเค็มจะค่อย ๆ ลอยขึ้นสู่ผิวและปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ ส่งผลให้ค่า DO ลดต่ำลงเรื่อย ๆ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ J. Manthey, M. Guesmi, H. Mehdipour, S. Unz, M. Beckmann (2006) ที่ระบุว่าระดับ DO ที่มากกว่าสภาพอิ่มตัว (เช่น >



20 mg/L) สามารถคืนสู่ค่าความอิ่มตัวในสภาวะสมดุลด้วยกลไกการ ปลดปล่อยก๊าซ (degassing) จนเข้าสู่สภาวะสมดุลทางฟิสิกส์ภายในช่วงเวลาที่ยาวนานกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความปั่นป่วน การไหล และลักษณะบริเวณผิวน้ำ ดังนั้นในสภาวะที่ค่า DO สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ประกอบกับค่า ORP ที่สูงมาก จึงเป็นสภาวะที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งเป็นการไนตริฟิเคชันที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี โดยจะสังเกตได้จากการออกซิไดซ์แอมโมเนีย และไนโตรที่ ไปเป็นไนเตรท ด้วยอนุมูลอิสระ ROS ซึ่งจะทำให้ไนเตรทเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดและไนโตรที่ลดลงรวดเร็ว ในขณะที่ “ชุดควบคุม” มีแอมโมเนียและไนโตรที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ip et al. (2001) ที่ได้รายงานว่าการขับถ่ายของสารประกอบไนโตรเจนส่วนใหญ่ (ประมาณ 90%) เกิดขึ้นโดยผ่านทางเหงือกในรูปของแอมโมเนียไม่แตกตัว ( $NH_3$ ) และแอมโมเนียบางส่วนได้จากการขับถ่าย ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย (Hargreaves, 1998) รวมถึงแอมโมเนียจากอาหารเหลือตกค้าง เมื่อถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย จะได้แอมโมเนียเช่นกัน (Funge-Smith and Briggs, 1998) ดังนั้นถ้าในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มมีแอมโมเนียสูงมาก ๆ อาจส่งผลให้สัตว์น้ำทะเลตายโดยทันที เนื่องจากสัตว์น้ำทะเลขับถ่ายแอมโมเนียได้น้อย จึงทำให้ระดับแอมโมเนียในเลือดและเนื้อเยื่อเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้พีเอชของเลือดเพิ่มขึ้น (ภาวะต่าง – alkalosis) (Lawson, 1995) แต่จะเห็นได้ว่าหลังการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs โดยมีก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซปฏิกิริยาค่าแอมโมเนียมีค่าลดลงตามลำดับ สอดคล้องกับสภาวะที่มีค่า ORP สูง แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) และเกิดแอมโมเนียมไอออน (ionized ammonium หรือ ammonium ion,  $NH_4^+$ ) มากขึ้นจึงทำให้ค่าแอมโมเนียมีค่าลดลง และคาดว่ายังอาจเกิดจากสภาวะไม่สมดุลของแอมโมเนียเนื่องจากสภาวะสมดุลจะควบคุมโดยค่า pH เมื่อค่า pH ลดลง สมดุลจะเปลี่ยนไปทางขวาของปฏิกิริยาสมดุลตามสมการ



ซึ่งจะเห็นได้จากค่า pH ที่เพิ่มขึ้นสมดุลจะเปลี่ยนไปทางซ้ายของปฏิกิริยาสมดุล ส่งผลให้ค่าแอมโมเนียเพิ่มขึ้น (“ชุดควบคุม”) ส่วนในกรณีที่มีค่าแอมโมเนียมีค่าลดลง สอดคล้องกับค่า pH ที่ลดลงเช่นกัน (ภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการ Ozone-Based AOPs)

ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของไนเตรท ( $NO_3^-$ ) จึงสอดคล้องกับการลดลงของแอมโมเนียและไนโตรที่ แสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากสภาวะที่มีค่า DO และค่า ORP ที่สูง จึงไปช่วยเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการไนตริฟิเคชันเชิงเคมี ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอมโมเนียที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้แอมโมเนียและไนโตรที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นไนเตรทได้สมบูรณ์มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ กัญญาจิต (2543) ที่พบว่าการให้ออกซิเจน 2 ชั่วโมงต่อวันส่งผลให้ปริมาณไนเตรทสูงกว่าคุณภาพน้ำเริ่มต้นถึง 62.04 % นอกจากนี้ผลการทดลองยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. (2020) และ Liu et al. (2023) ที่ได้รายงานว่าการใช้ก๊าซออกซิเจนในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจะสามารถกระตุ้นการเกิดออกซิเดชันของแอมโมเนียให้เป็นไนเตรทได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การเพิ่มขึ้นของไนเตรทที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำกว่า 100 mg/L นั้นไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในระบบเพาะเลี้ยง แต่จะไปช่วยการเจริญของสาหร่ายหรือแพลงก์ตอนพืช นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการ Ozone-Based AOPs ไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบไอออนหลักของน้ำทะเล จึงทำให้ค่าความเค็มไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญภายหลังการบำบัด ดังนั้นผลจากการทดลองได้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ Ozone-Based



AOPs ไม่เพียงแต่เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีเท่านั้น ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการชีวภาพโดยเฉพาะกระบวนการไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้ผลการศึกษายังได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำกระบวนการ Ozone-Based AOPs ไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางการจัดการคุณภาพน้ำที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเลอย่างยั่งยืนในเชิงพาณิชย์ต่อไป

### ข้อเสนอแนะ

ควรนำกระบวนการ Ozone-Based AOPs ไปทดลองใช้ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเลเชิงพาณิชย์ เพื่อทำการประเมินด้านต้นทุน พลังงาน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

### เอกสารอ้างอิง

- กัญญาจิต โลภิญโญศิริ. (2543). การใช้โอโซนในการควบคุมคุณภาพน้ำเลี้ยงกุ้งกุลาดำ [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทศพล พิมพ์รัตน์. (2562). การเพิ่มความปลอดภัยและรักษาคุณภาพของไควาเร (Raphanus sativus L.) โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับโอโซน (UV-Ozone) [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ]. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ณสมนตร์ มีแก้ว, ภักรมย์ สุวรรณกิจ, อนุรักษ์ สุขดารา และ วาสนา อากรรัตน์. (2564). ผลของระดับความเค็มต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและอัตราการกินอาหารต่อวันของปูทะเล (Scylla paramamosain). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 23(2), 58-64.
- สุปติ ศิริขอนแก่น และ สาธิต อติโต. (2020). ปัจจัยที่มีผลต่อการดำเนินธุรกิจร้านค้าปลาสวยงามในจังหวัดขอนแก่น. วารสารเกษตรพระวรุณ, 17(1), 137-146.
- Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A., & Marotta, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*, 53(1), 51-59.
- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, 51, 26-35.
- Chamchoi, N., Siriprom, W., Teanchai, K., & Jitchot, N. (2022). The comparison of ozone production with oxygen concentration and feed gas flow rate at atmospheric pressure. *Materials Today Proceedings*, 65(7), 2336-2339.
- Funge-Smith, S.J., & Briggs, M.R. (1998). Nutrient budgets in intensive shrimp ponds: implications for sustainability. *Aquaculture*, 164(1-4), 117-133.
- Grasshoff, K., Ehrhardt, M., & Kremling, K. (1983). *Methods of seawater analysis* (2nd ed.). Verlag Chemie.
- Gunten, U.V. (2003). Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research*, 37, 1443-1467.
- Hargreaves, J.A. (1998). Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture*,



- 166, 181-212.
- Ip, Y.K., Chew, S.F., & Randall, D.J. (2001). Ammonia toxicity, tolerance, and excretion. *Fish physiology*, 20, 109-148.
- Krumins, V., Ebeling, J.M., & Wheaton, F. (2001). Ozone's effects on power-law particle size distribution in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 25(1), 13-24.
- Lawson, T. B. 1995. *Fundamentals of aquaculture engineering*. Chapman & Hall, New York. 355 pp.
- Li, H., Bai, J., Li, Y., Zhang, X., Ma, J., Yang, Z., & Yu, W. (2019). Characteristics of ORP variation in subsurface wastewater infiltration system (SWIS) under hydraulic loading rate (HLR) fluctuation. *Desalination and Water Treatment*, 138, 49-56.
- Liu, M., Ye, Y., Xu, L., Gao, T., Zhong, A., & Song, Z. (2023). Recent advances in nanoscale zero-valent iron (nZVI)-based advanced oxidation processes (AOPs): Applications, mechanisms, and future prospects. *Nanomaterials*, 13(21), 2830.
- Manthey, J., Guesmi, M., Mehdipour, H., Unz, S., & Beckmann, M. (2026). Experimental investigation of supersaturation decay induced by bubble evolution in a pipe flow. *Chemical Engineering Science*, 325, 123435.
- Strickland, J.D.H., & Parsons, T.R. (1972). *A practical handbook of seawater analysis* (2nd ed.). Fisheries Research Board of Canada.
- Summerfelt, S.T., & Hochheimer, J.N. (1997). Review of ozone processes and applications as an oxidizing agent in aquaculture. *The progressive fish-culturist*, 59(2), 94-105.
- Summerfelt, S.T. (2003). Ozonation and UV irradiation an introduction and examples of current applications. *Aquacultural Engineering*, 28, 21-36.
- Summerfelt, R.C., & Penne, C.R. (2007). Nutrient retention by fish in a multispecies recirculating aquaculture facility. *International Journal of Recirculating Aquaculture*, 8, 43-64.
- Timmons, M.B., & Ebeling, J.M. (2010). *Recirculating aquaculture*. Ithaca, NY, USA: Cayuga Aqua Ventures.
- Wang, X., Brigante, M., Dong, W., Wu, Z., & Mailhot, G. (2020). Degradation of Acetaminophen via UVA-induced advanced oxidation processes (AOPs). Involvement of different radical species: HO, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> and HO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub><sup>-</sup>. *Chemosphere*, 258, 127268.