



การพัฒนาระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีสำหรับการบำบัดน้ำ จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา Development of Ozone Venturi Injection System (OVIS) for Water Treatment from Spirulina Cultivation

ณัฐพล ไชยวงศ์ สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ* ชนวัฒน์ นิตตวิชิต และ จตุรภัทร วาฤทธิ์

Natthapon Chaivong, Somkiat Jaturonglumert*, Chanawat Nitatwichit and Jaturapatr Varith

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, 50290, Thailand

*E-mail: yaidragon@mju.ac.th

บทคัดย่อ

โอโซนถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมอาหารเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากมีสลายตัวเป็นออกซิเจนที่รวดเร็ว ไม่มีสารตกค้าง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ด้วยคุณสมบัติที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำของโอโซน แต่ด้วยเหตุผลในการใช้งานของอุตสาหกรรม ซึ่งโอโซนที่ละลายในน้ำมีระยะเวลาการสลายตัวและข้อจำกัดของการสร้างระดับความเข้มข้นที่จะนำไปใช้งานได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงพัฒนาระบบหัวฉีดเวนจูรีสำหรับผลิตน้ำโอโซนที่สามารถสร้างความเข้มข้นที่สูง และมีระยะเวลาการสลายตัวที่นานขึ้น ซึ่งเปรียบเทียบกับระบบหัวฉีดฟิวเซอร์แบบเดิม ผลการศึกษาพบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถผลิตน้ำโอโซน ได้ดีกว่าในน้ำเย็น โดยมีค่าความเข้มข้นของน้ำโอโซนเวลาที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยา เวลาที่สลายตัว และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรเป็น 2.8 mg/l 20 min 50 min และ 0.198 min⁻¹ ตามลำดับ น้ำโอโซนถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา โดยสามารถลดอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำและขจัดสีของน้ำได้ 85.65% และ 69.35% จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของการลดอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำถูกแสดงออกได้ดีในรูปแบบจำลองอันดับหนึ่ง โดยมีค่าคงที่เท่ากับ 6.50x10⁻³ min⁻¹ ด้วยการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งด้วยวิธีการดังกล่าว ทำให้สามารถนำน้ำที่บำบัดกลับมาใช้ต่อได้ โดยพบว่าเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการควบคุมการเกิดการปนเปื้อนจากการนำน้ำเก่ามาใช้ และยังช่วยลดต้นทุนการผลิตในเรื่องการใช้น้ำอีกด้วย

คำสำคัญ: ระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี; ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร; การบำบัดน้ำ

ABSTRACT

Ozone has been used for many food industries to disinfect water due to its oxidizing potential. Since it decomposes quickly into molecular oxygen, leaving no residue, it has important advantages for wastewater treatment thanks to its ability to remove organic and inorganic substances in water from ozone. This causes existing industry up-to date is still using ozone gas in several treatments due to ozone has a decompose time and the concentration is limited to several treatments. Therefore, in this study ozone venturi injection system was developed to produce ozonated water with higher concentration and longer decompose time by compared with diffuser system (conventional method). The findings showed that the ozone venturi injection system was achieved in cool water with concentration of ozonated water, reaction time, decomposition time and volumetric mass transfer coefficient were 2.8 mg/l, 20 min, 50 min and 0.198 min^{-1} respectively. Ozonated water could be applied to treat wastewater from spirulina harvesting by reduction dissolved organic carbon and appearance color of water about 85.65% and 69.35%. The kinetics reaction of dissolved organic carbon was based on first-order model and had a constant factor is $6.50 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. To improve water treatment, it is necessary to both subject the reused water to appropriate treatment to find effective way to control contaminants and reduce investment cost from water resource.

Keywords: Ozone venturi injection system; Volumetric mass transfer coefficient; Water treatment

1. บทนำ

โอโซนหรือไตรออกซิเจน (Trioxigen, O_3) ถูกพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2383 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อว่า C. F. Schonbein ต่อมา ปี พ.ศ. 2431 ได้จดลิขสิทธิ์ชื่อว่า “ก๊าซโอโซน” โดยโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความสามารถสำหรับการฆ่าเชื้อ การยับยั้งไวรัส การกำจัดกลิ่น การฟอกสี และการย่อยสลายสารอินทรีย์ [1] โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรทำให้โอโซนสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนได้ หลักการผลิตโอโซนนั้นสามารถทำได้โดยการทำลายพันธะของออกซิเจนโดยใช้พลังงานเพื่อทำให้ออกซิเจนจาก 2 อะตอม (O_2) เหลือ 1 อะตอม (O) และทำให้ออกซิเจนจับกันกับอะตอมของออกซิเจนอื่น ๆ เพื่อเป็นโอโซน (O_3) อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากกระบวนการผลิตน้ำโอโซนนี้ถูกจำกัด ด้วยความสามารถในการละลายของโอโซนที่ค่อนข้างต่ำ [2-6] นอกจากนี้ยังมีสารประกอบบางชนิดที่ไม่สามารถออกซิไดซ์ได้ง่าย ๆ เช่น แอมโมเนีย และสารกำจัดศัตรูพืช [1, 7] จึงมีการใช้ปริมาณโอโซนที่มากขึ้นเพื่อชดเชยความสามารถในการละลายของ

โอโซนในน้ำ (Ozonated water, Ow) ที่ต่ำ แต่สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า มีการใช้โอโซนไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งนำไปสู่กระบวนการผลิตน้ำโอโซนที่มีต้นทุนสูง นอกจากนี้การใช้โอโซนในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดโบรเมต ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่เป็นผลข้างเคียงที่เป็นอันตรายจากปฏิกิริยาของโอโซน

ก๊าซโอโซนสามารถละลายลงในน้ำเพื่อผลิตน้ำโอโซนโดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธี [7, 13] วิธีแรก คือ วิธีหัวดีฟิวเซอร์ (Diffuser) ซึ่งใช้อุปกรณ์ที่มีรูพรุนสำหรับทำให้ออกซิเจนแตกออกเป็นฟองเล็ก ๆ เพื่อให้ฟองค่อย ๆ ลอยขึ้นไปทางด้านบนของผิวน้ำ และละลายเป็นน้ำโอโซน วิธีที่สอง คือ วิธีหัวฉีดเวนจูรี (Venturi) ซึ่งต้องใช้ความต่างของแรงดัน เพื่อสร้างสุญญากาศ และดูดก๊าซโอโซนเข้าสู่เวนจูรี ซึ่งมีปัจจัยหลักในการผลิตน้ำโอโซนให้มีความเข้มข้นสูง ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ปริมาตรของน้ำ อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรดต่าง [1, 7]

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตน้ำโอโซนคือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ปริมาตร

ของน้ำและอุณหภูมิของน้ำในการผลิตน้ำโอโซน โดยจะทำการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ozonated water, Ow) และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร (Volumetric mass transfer coefficient, $k_L a$) เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการสร้างน้ำโอโซน รวมถึงการประยุกต์ใช้ระบบการสร้างน้ำโอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา (Arthrospira or Spirulina platensis) ซึ่งจะมีน้ำทิ้งจากการเก็บเกี่ยวนี้ในปริมาณมาก หากนำกลับมาใช้ใหม่ (Water reused) มีความจำเป็นต้องบำบัดก่อนจะนำกลับมาใช้ซ้ำ เพื่อลดของเสียจากระบบการเพาะเลี้ยง โดยในการบำบัดจะทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC) ที่ลดลง ค่าสีปรากฏของน้ำ (Appearance color of water, APW) และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา

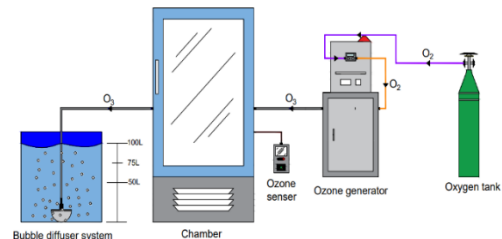
2. การวิธีการทดลอง

2.1 ขั้นตอนการทดลอง

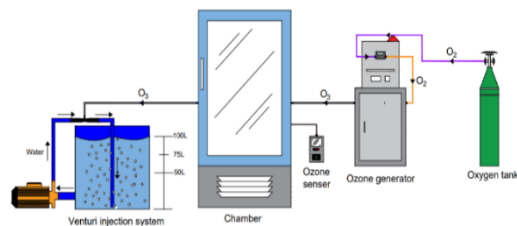
การวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาการสร้างน้ำโอโซน โดยใช้สองวิธีที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย ระบบการกระจายฟองด้วยดีฟิวเซอร์ และระบบหัวฉีดเวนจูรี ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ การดำเนินการทดลองสำหรับการสร้างน้ำโอโซนทั้ง 2 ระบบ จะใช้ปริมาตรน้ำ (Volume) 50, 75 และ 100 L เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาตรน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ การดำเนินการทดลองที่ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Ozone Concentration, Dose) 10,000, 15,000 และ 20,000 ppm สำหรับการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซโอโซนต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ และการดำเนินการสร้างน้ำโอโซนด้วย 2 วิธีดังกล่าวที่อุณหภูมิ (Temperature, Temp.) ที่แตกต่างกัน คือช่วง 27-30°C และ 15-18°C สำหรับการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ สำหรับในการทดลองใช้น้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) อยู่

ระหว่าง 8-8.5 โดยทำการศึกษาเวลาในการสร้าง และเวลาในการสลายตัวของโอโซนละลายในน้ำ รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร ดังสมการที่ (1) ทุก ๆ การทดลองจะถูกทำซ้ำสามครั้งและข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาเฉลี่ยและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

สำหรับระบบหัวดีฟิวเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 เครื่องผลิตโอโซนซึ่งใช้การแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจนเป็นไอออนโดยกระบวนการโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) เพื่อผลิตก๊าซโอโซนในอัตรา 5 g/hr หัวดีฟิวเซอร์แบบครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4” ผลิตจากไทเทเนียม ซึ่งใช้ในการละลายก๊าซโอโซนลงในน้ำ โดยหัวดีฟิวเซอร์มีอัตราการไหลที่ประมาณ 6 m³/hr.



รูปที่ 1 แผนผังการสร้างน้ำโอโซน โดยระบบหัวดีฟิวเซอร์



รูปที่ 2 แผนผังการสร้างน้ำโอโซน โดยระบบหัวฉีดเวนจูรี

ส่วนรูปที่ 2 แสดงระบบหัวฉีดเวนจูรี ส่วนประกอบหลักของระบบนี้ ได้แก่ เครื่องผลิตโอโซนซึ่งใช้การแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจนเป็นไอออนโดยกระบวนการโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) เพื่อผลิตก๊าซโอโซนในอัตรา 5 g/hr หัวฉีดเวนจูรีใช้รุ่น Mazzei Injection Venturi Model-1585X ก๊าซโอโซนที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดโอโซน

จะถูกดูดผ่านหัวฉีดเวนจูรี และกระจายลงในน้ำซึ่งจะรวมตัวเป็นน้ำโอโซน สำหรับบรรจุน้ำที่ใช้ในการกักเก็บน้ำโอโซน และปั้มน้ำ SUNNYCPM-200 อัตราการไหลสูงสุด 500 L/min ใช้เพื่อสร้างความแตกต่างของแรงดันเพื่อให้ก๊าซโอโซนผสมกับน้ำในหัวฉีดเวนจูรี

ในการวัดค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ozonated water, Ow) โดยทำการวัด 3 ซ้ำ เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) ซึ่งในการวัด Ow ทำการวัดที่เวลาใด ๆ จน Ow อิ่มตัว และค่าสีปรากฏของน้ำ ใช้เครื่อง Spectrophotometer HANNA HI801 โดยทำการวิเคราะห์ด้วย Colorimetric DPD method [14]

กระบวนการถ่ายเทโอโซนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว ซึ่งอัตราเร็วของการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโอโซนในสถานะของเหลวเข้าใกล้สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศขณะนั้น [9] โดยสามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร ($k_L a$) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$\frac{dc}{dt} = k_L a (C_s - C_i) \quad (1)$$

เมื่อ C_s คือ ความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุล หน่วยเป็น (mg/L) และ C_i คือ ความเข้มข้น ณ เวลาใด ๆ หน่วยเป็น (mg/L)

การดำเนินการประยุกต์ใช้ระบบการสร้างน้ำโอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายสไปรูลินา โดยในการบำบัดได้เลือกใช้โอโซนเข้ามาช่วยในการบำบัดน้ำทิ้งนี้ เนื่องจากคุณสมบัติในการออกซิไดซ์การอินทรีย์อินทรีย์ และยังสามารถยับยั้งกลิ่น ฟอกสี รวมถึงกำจัดจุลินทรีย์ [3-5] ในการวิจัยนี้ได้ใช้สองวิธีในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตของสาหร่ายสไปรูลินา คือระบบหัวตีฟิวเซอร์ และระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี โดยทดลองที่ระดับน้ำ 100 L อุณหภูมิมีน้ำอยู่ในช่วง 27-30°C ค่าความเป็นกรดต่างก่อนการบำบัดอยู่ในช่วง 9-10 เครื่องกำเนิดโอโซน QLA-5G-P อัตราการผลิตโอโซน 5 g/hr และอัตราการไหล 16 L/min

โดยได้กำหนดตัวแปรที่มีความสำคัญเพื่อบ่งบอกถึงความสามารถของโอโซนที่สามารถบำบัดน้ำได้ดีขึ้น โดยได้เลือกค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC) แล้วคำนวณค่า เปอร์เซนต์การลดลงของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (%DOC Removal) เพื่อบ่งบอกถึงความสามารถของโอโซนในการบำบัดน้ำหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา ได้ดังสมการที่ (2)

$$\% \text{DOC Removal} = \frac{\text{DOC}_0 - \text{DOC}_i}{\text{DOC}_0} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ DOC_0 คือ ค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำเริ่มต้น (mg/L) และ DOC_i คือ ค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำที่เวลาใด ๆ (mg/L) ซึ่งค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำตรวจวัดโดยใช้การไตเตรทตามวิธีมาตรฐาน วัดตามมาตรฐาน Standard Method 5310C ด้วยเทคนิค Ultra violet-visible spectrophotometer ในหน่วย mg/L [15]

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวที่ใช้บ่งบอกถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและการลดลงของค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ คือ จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (Kinetics, k) โดยจะใช้การวิเคราะห์ดังสมการที่ (3) แสดงจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First-order kinetics) และ(4) แสดงจลนพลศาสตร์อันดับสอง (Second-order kinetics) ตามลำดับ [11]

$$\ln \frac{\text{DOC}_0}{\text{DOC}_i} = k \cdot t \quad (3)$$

$$\frac{1}{\text{DOC}_i} - \frac{1}{\text{DOC}_0} = k \cdot t \quad (4)$$

เมื่อ t คือเวลาในการบำบัด และค่า k คือค่าคงที่อัตราจลนพลศาสตร์

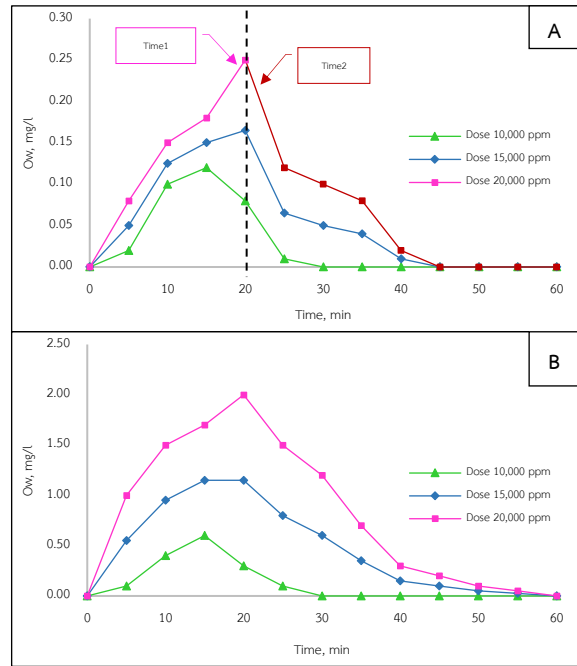
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาเพื่อสร้างน้ำโอโซนจากปัจจัยทั้งค่าความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ปริมาตรของน้ำ และอุณหภูมิของน้ำในการผลิตน้ำโอโซน มีดังนี้

3.1 การศึกษาผลความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Ozone Concentration, Dose) ต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ

เมื่อเตรียมก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 10,000, 15,000 และ 20,000 ppm ซึ่งควบคุมอุณหภูมิในช่อง 27-30°C ค่า pH เริ่มต้นในช่วง 8-8.5 และใช้ปริมาตรน้ำที่ 50 L โดยได้เปรียบเทียบการสร้างน้ำโอโซนของระบบหัวฉีดฟิวเซอร์ และระบบหัวฉีดเวนจูร์สามารถแสดงในรูปที่ 5

ซึ่งพบว่าระบบหัวฉีดเวนจูร์สามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบหัวฉีดฟิวเซอร์ โดยที่ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Ozone Concentration, Dose) 20,000 ppm มีค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ozonated water, Ow) เวลาที่ใช้ในการสร้างน้ำโอโซน (Reaction, Time1) เวลาที่สลายตัว (Decomposition, Time2) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายน้ำ (k_{La1}) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของการสลายตัวของโอโซนในน้ำ (k_{La2}) เป็น 2.0 mg/l 20 min 40 min 0.179 min^{-1} และ 0.098 min^{-1} ตามลำดับ



รูปที่ 5 ผลของค่า Dose ที่มีต่อค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำสูงสุด (A) ระบบหัวฉีดฟิวเซอร์ (B) ระบบหัวฉีด

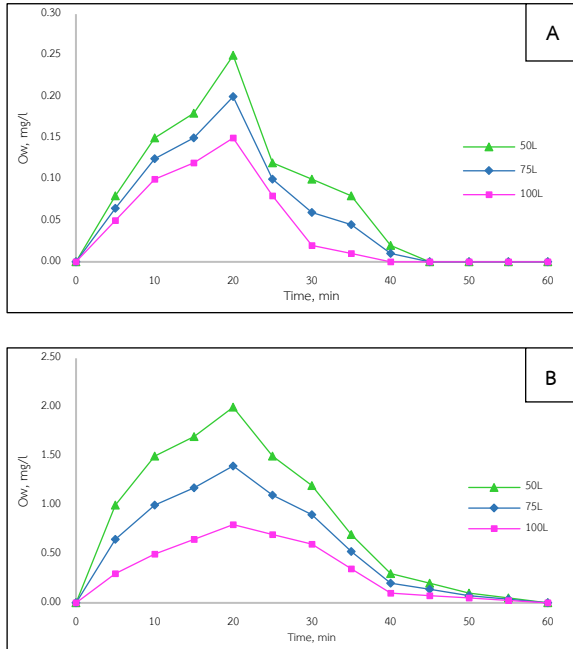
ตารางที่ 1 ผลของความเข้มข้นของก๊าซโอโซนต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ

System	Dose (ppm)	Ow (mg/l)	Time1 (min)	Time2 (min)	k_{La1} (min^{-1})	k_{La2} (min^{-1})
Diffuser	10,000	0.12±0.02	15	15	0.098	0.196
	15,000	0.15±0.01	20	25	0.111	0.134
	20,000	0.25±0.01	15	25	0.139	0.108
Venturi	10,000	0.60±0.07	15	15	0.161	0.179
	15,000	1.15±0.06	15	20	0.167	0.104
	20,000	2.00±0.08	20	40	0.179	0.098

ตารางที่ 1 แสดงผลการเปรียบเทียบของ ค่า Ow, Time1, Time2, k_{La1} และ k_{La2} สำหรับค่า Dose 20,000 ppm พบว่าระบบหัวฉีดเวนจูร์มีเปอร์เซ็นต์มากกว่าระบบหัวฉีดฟิวเซอร์เป็น 87.5, 25.0, 37.5, 22.3 และ 10.2% ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติ การนำน้ำโอโซนไปใช้ประโยชน์

ในเชิงพาณิชย์ควรมีค่าระดับความเข้มข้นอยู่ที่ 0.5 mg/l เป็นต้นไป [1]

3.2 การศึกษาผลปริมาตรน้ำ (Volume) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ



รูปที่ 6 ผลของปริมาตรน้ำที่มีต่อค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำสูงสุด (A) ระบบหัวตีฟิวเซอร์ (B) ระบบหัวฉีดเวนจูรี

เมื่อเตรียมปริมาตรน้ำ 50, 75 และ 100 L ซึ่งควบคุมอุณหภูมิในน้ำในช่วง 27-30°C ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นในช่วง 8-8.5 และใช้ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm โดยได้เปรียบเทียบการสร้างน้ำโอโซนนี้โดยระบบหัวตีฟิวเซอร์และระบบหัวฉีดเวนจูรี ดังแสดงในรูปที่ 6

ซึ่งพบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นได้สูงกว่าระบบหัวตีฟิวเซอร์ โดยมีค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำสูงสุดที่ (Ow) เวลาที่ใช้ในการสร้าง (Time1) เวลาที่สลายตัว (Time2) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายน้ำ (k_{La1}) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของการสลายตัวของโอโซนในน้ำ (k_{La2}) สำหรับปริมาตรน้ำ (Volume) 50 L เป็น 2.0 mg/l 20 min 40 min 0.179 min^{-1} และ 0.098 min^{-1} ตามลำดับ

สำหรับตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบของค่า Ow, Time1, Time2, k_{La1} และ k_{La2} สำหรับค่า Dose 20,000 ppm ระหว่างระบบหัวตีฟิวเซอร์ที่มีเปอร์เซ็นต์มากกว่าระบบหัวตีฟิวเซอร์เป็น 87.5, 25.0, 37.5, 22.3 และ 10.2% ตามลำดับ ซึ่งค่า k_{La1} ที่สูงแสดงถึงการละลายน้ำของโอโซนอย่างมีประสิทธิภาพ และ k_{La2} ที่ต่ำ บ่งบอกถึงการสลายตัวของโอโซนที่ยาวนาน

ตารางที่ 2 ผลของปริมาตรน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ

System	Volume (L)	Ow (mg/L)	Time1 (min)	Time2 (min)	$k_{La1} (\text{min}^{-1})$	$k_{La2} (\text{min}^{-1})$
Diffuser	50	0.25±0.01	15	25	0.139	0.108
	75	0.20±0.04	15	25	0.128	0.109
	100	0.15±0.01	15	20	0.124	0.125
Venturi	50	2.00±0.08	20	40	0.179	0.098
	75	1.40±0.02	20	40	0.175	0.098
	100	0.80±0.01	20	40	0.161	0.099

จากการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Dose) และปริมาตรน้ำ (Volume) ต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ พบว่ายิ่งก๊าซโอโซน Dose สูงและปริมาตรของน้ำที่น้อย จะสามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าที่ก๊าซโอโซน Dose

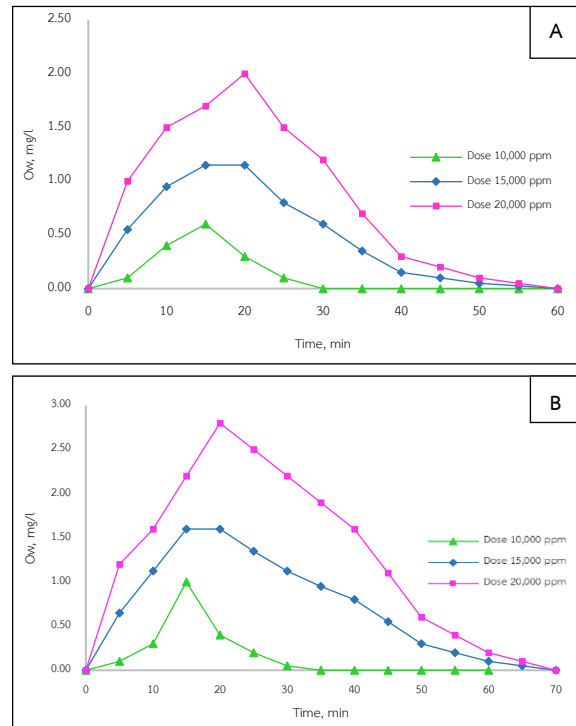
น้อยและปริมาตรน้ำมาก โดยจากการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่าระบบการสร้างน้ำโอโซนด้วยระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบหัวตีฟิวเซอร์ 8 เท่า และมีเวลาที่สลายตัวมากกว่าถึง 1.6 เท่า

3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ น้ำ (Temperature, Temp.) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ

จากการทดลองก่อนหน้าจะได้ว่าระบบหัวฉีดเวนจูรี่สามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบหัวดีฟิวเซอร์ และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ (k_{La}) สูงกว่าจากข้อมูลดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ น้ำที่ส่งผลต่อการถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ โดยจะเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำที่ปริมาตรน้ำ 50 L โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของก๊าซโอโซน (Dose) 3 ระดับคือ 10,000, 15,000 และ 20,000 ppm และเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ (Temperature, Temp.) 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ น้ำอุณหภูมิปกติ (27-30°C) และน้ำเย็น (15-18°C) และเลือกใช้ระบบสร้างน้ำโอโซนที่สามารถสร้างน้ำโอโซนได้ความเข้มข้นสูงที่สุดจากการศึกษาที่ 3.1 และ 3.2 โดยรูปที่ 7 แสดงผลของอุณหภูมิ น้ำที่มีต่อค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำสูงสุด

จากรูปที่ 7 พบว่าที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm และปริมาตรน้ำ 50 L ผลของช่วงอุณหภูมิ น้ำที่เปลี่ยนไปส่งผลต่อความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ และพบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรี่สามารถสร้างน้ำโอโซนที่น้ำอุณหภูมิปกติได้ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ow) 2.0 mg/L เวลาที่ใช้ในการสร้าง (Time1) 20 min เวลาที่สลายตัว

(Time2) 40 min และน้ำโอโซนที่อุณหภูมิ น้ำเย็น ได้ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (Ow) 2.80 mg/L เวลาที่ใช้ในการสร้าง (Time1) 20 min เวลาที่สลายตัว (Time2) 50 min



รูปที่ 7 ผลของค่า Dose ที่มีต่อค่าความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำ (A) การสร้างน้ำโอโซนในน้ำอุณหภูมิปกติ (27-30°C) และ (B) การสร้างน้ำโอโซนในอุณหภูมิ น้ำเย็น (15-18°C)

ตารางที่ 3 ผลของอุณหภูมิ น้ำต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ

Temp. (°C)	Dose (ppm)	Ow (mg/L)	Time1 (min)	Time2 (min)	k_{La1} (min ⁻¹)	k_{La2} (min ⁻¹)
27-30°C	10,000	0.60±0.07	15	15	0.161	0.179
	15,000	1.15±0.06	15	40	0.167	0.104
	20,000	2.00±0.08	20	40	0.179	0.098
15-18°C	10,000	1.00±0.09	15	20	0.193	0.148
	15,000	1.60±0.05	15	50	0.197	0.081
	20,000	2.80±0.02	20	50	0.198	0.073

ตารางที่ 3 แสดงผลของอุณหภูมิน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของโอโซนละลายในน้ำ (k_{L1}) ที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm พบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรี่ที่อุณหภูมิน้ำเย็น (15-18°C) มีค่าเท่ากับ 0.198 min^{-1} จะสูงกว่าที่อุณหภูมิน้ำปกติ (27-30°C) ที่มีค่าเพียง 0.179 min^{-1} คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่าประมาณ 9.6% นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตรของการสลายตัวของโอโซนในน้ำ (k_{L2}) ที่ก๊าซโอโซน Dose 20,000 ppm พบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรี่ที่อุณหภูมิน้ำเย็นมีค่าเท่ากับ 0.073 min^{-1} จะต่ำกว่าที่อุณหภูมิปกติที่มีค่าเพียง 0.098 min^{-1} ซึ่งที่อุณหภูมิเย็นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอาหารแช่เย็นได้ด้วย

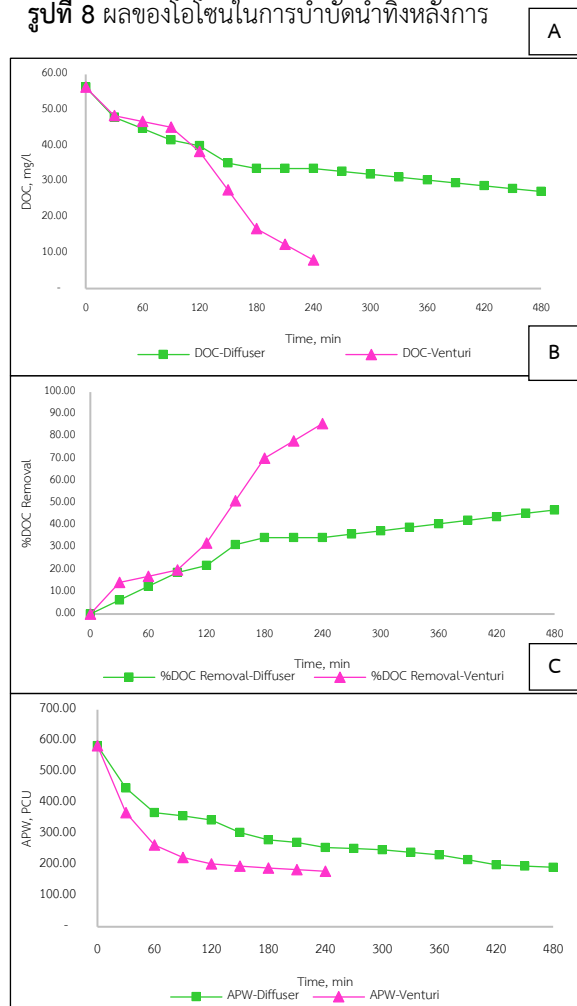
3.4 การประยุกต์ใช้ระบบการสร้างน้ำโอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายสไปรูลินา

จากการศึกษาผลกระทบด้านความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ปริมาณน้ำ และอุณหภูมิของน้ำที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของโอโซนละลายในน้ำ จึงได้มีแนวคิดในการประยุกต์ใช้ระบบการสร้างน้ำโอโซนโดยระบบหัวฉีดเวนจูรี่ และระบบหัวดีฟิวเซอร์ เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยจะใช้เครื่องกำเนิดโอโซนขนาด 5 g/hr ปริมาณน้ำ 50 L และอุณหภูมิของน้ำเป็นอุณหภูมิปกติในช่วง 27-30°C สำหรับการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตสาหร่ายสไปรูลินา โดยจะทำการตรวจสอบค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ในหน่วย mg/l และค่าสีปรากฏ (APW) ในหน่วย PCU รวมถึงจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา

รูปที่ 8 แสดงผลของโอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา โดยจากรูปที่ 8(A) พบว่าการทดลองการสร้างน้ำโอโซนก่อนหน้านั้น ที่ระบบหัวฉีดเวนจูรี่สามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบหัวดีฟิวเซอร์ และยังมีเวลาที่สลายตัว ซึ่งยาวกว่าเพื่อนำไปใช้งาน จึงส่งผลให้ระบบหัวฉีดเวนจูรี่สามารถบำบัดน้ำทิ้งจากสาหร่ายสไปรูลินาได้ดีกว่าระบบหัวดีฟิวเซอร์ โดยที่มีค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) เริ่มต้นที่ 56.4 mg/l เท่ากัน แต่ระบบหัวฉีดเวนจูรี่นั้นสามารถลด DOC ลงได้มากถึง 85.86% ในเวลา 4 ชั่วโมง แต่ระบบการกระจายฟอง

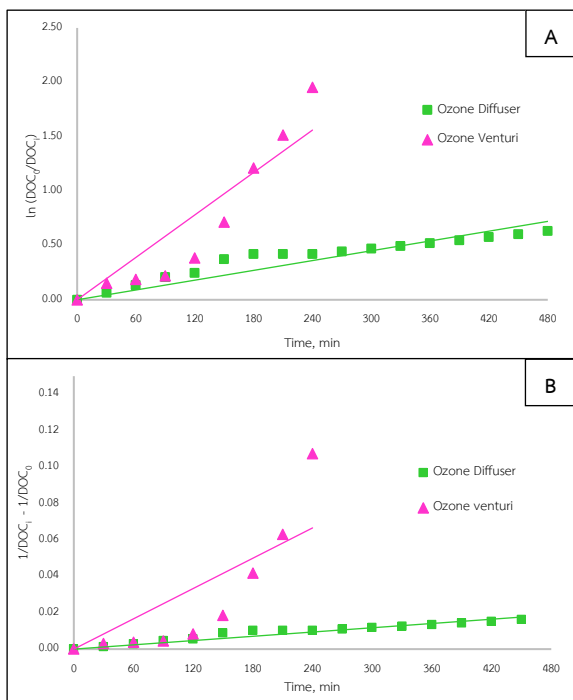
ด้วยดีฟิวเซอร์นั้นกลับใช้เวลามากกว่า 2 เท่า แต่สามารถลด DOC ได้เพียง 52% นอกจากนี้ระบบหัวฉีดเวนจูรี่ยังสามารถขจัดสีปรากฏของน้ำ (APW) 69.35% ในเวลา 4 ชั่วโมง แต่อีกระบบสามารถขจัดสีได้ 67.12% ในเวลา 8 ชั่วโมง ดังรูปที่ 8(C) ซึ่งพบว่าสามารถนำน้ำหลังการบำบัดดังกล่าวกลับไปใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาต่อได้ โดยสามารถลดการปนเปื้อนลง (Contaminate) [11]

รูปที่ 8 ผลของโอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งหลังการ



เก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินา (A) การลดลงของ DOC เทียบกับ ความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำที่เพิ่มขึ้น (B) เปอร์เซ็นต์การลดลงของ DOC (C) สีปรากฏของน้ำจากการบำบัด

จากการลดลงของ DOC การบำบัดด้วยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีและระบบหัวดีฟิวเซอร์ จะสามารถหาอัตราจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First-order kinetics) และอันดับสอง (Second-order kinetics) ได้ดังรูปที่ 9 โดยจะเห็นว่าน้ำทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสไปรูลินาที่บำบัดด้วยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี มีค่าจลนพลศาสตร์ (k) สูงกว่าการบำบัดด้วยระบบการกระจายฟองด้วยโอโซนดีฟิวเซอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับจลนพลศาสตร์ในอันดับเดียวกัน



รูปที่ 9 ผลของจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยา (A) แบบจำลองอันดับหนึ่ง (B) แบบจำลองอันดับสอง

จากตารางที่ 4 ค่าจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งของการขจัด DOC เมื่อใช้การบำบัดด้วยระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีและระบบหัวดีฟิวเซอร์ คือ 6.5×10^{-3} และ $1.5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ เมื่อใช้จลนพลศาสตร์อันดับสอง จะได้ 3.0×10^{-4} และ $4.0 \times 10^{-5} \text{ L/g-min}$ ตามลำดับ โดยค่า k ที่สูง หมายถึง การขจัด DOC ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี จึงสามารถขจัด DOC ได้ดีกว่าระบบหัวดีฟิวเซอร์

นอกจากนี้ในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและการลดลงของค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำนั้นสามารถใช้สมการจลนพลศาสตร์เพื่อทำนายค่าได้ โดยสามารถตัดสินใจเลือกได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของความเชื่อมั่น (R^2) ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรี สามารถใช้สมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งทำนายได้ดีกว่า โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8508 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [11] ส่วนระบบหัวดีฟิวเซอร์ สามารถใช้สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองทำนายได้ดีกว่า โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9169

ตารางที่ 4 อัตราจลนพลศาสตร์ของการลด DOC ตามจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งและอันดับสอง

Treatment Method	First-order kinetics		Second-order kinetics	
	R^2	$k \text{ (min}^{-1}\text{)}$	R^2	$k \text{ (L/g-min)}$
Ozone Diffuser	0.8423	1.5×10^{-3}	0.9169	4.0×10^{-5}
Ozone Venturi	0.8508	6.5×10^{-3}	0.6718	3.0×10^{-4}

4. สรุป

โดยจากการศึกษาพบว่าระบบการสร้างน้ำโอโซนด้วยหัวฉีดเวนจูรีสามารถสร้างน้ำโอโซนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าระบบหัวดีฟิวเซอร์ 8 เท่า และมีเวลาที่สลายตัวสูงกว่า

ถึง 1.6 เท่า นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร ($k_L a$) ที่ก๊าซโอโซน Dose และปริมาตรน้ำเท่ากันของระบบหัวฉีดเวนจูรีมากกว่าระบบหัวดีฟิวเซอร์ 22.3% นอกจากนี้อุณหภูมิน้ำยังมีผลต่อความเข้มข้นของโอโซน

ละลายในน้ำ โดยพบว่าระบบหัวฉีดเวนจูรีสามารถสร้างน้ำโอโซนที่ช่วงอุณหภูมิน้ำเย็น (15-18°C) ได้สูงกว่าน้ำอุณหภูมิปกติ (27-30°C) คิดเป็น 9.6% สำหรับการประยุกต์ใช้ระบบหัวฉีดโอโซนเวนจูรีไปบำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อลดค่าอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) และค่าสีปรากฏของน้ำ (APW) ลงได้ทำให้สามารถนำหลังการบำบัดดังกล่าวกลับไปใช้เพาะเลี้ยงสาหร่าย

สไปรูลินาต่อได้ ซึ่งเป็นการลดการปนเปื้อน ค่าต้นทุนในส่วน of น้ำเลี้ยง และลดการปลดปล่อยน้ำเสียสู่สิ่งแวดล้อมด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. O' Donnell, B. K. Tiwari, P. J. Cullen, and R. G. Rice, *Ozone in Food Processing*. UK: Wiley-Blackwell, 2012.
- [2] ปวีวัติ บุญมา, ชาญณรงค์ หนูอินทร์, และ ประมุข อุณหเลขกะ, “การประยุกต์ใช้ไมโครบับเบิลโอโซนร่วมกับระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีในการบำบัดน้ำในคลองพระพิมลราชา ตลาดน้ำไทรน้อย อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี,” *วารสารวิชาการ มทร.สุวรรณภูมิ*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 45-54, 2561.
- [3] ภัทรพล กล้าเสื่อ, “การบำบัดสีและกลิ่นของน้ำเสียจากห้องฟั่นสีด้วยโอโซน,” *วิทยานิพนธ์ วศ.บ., มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี*, 2560.
- [4] สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ, ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร, จตุรภัทร วาฤทธิ, และ จงกล พรหมยะ, “การเสริมอัตราการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชุดคาร์บอนเตอรส์สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินา.” ในการประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ครั้งที่ 18, 2562, หน้า 53-59.
- [5] สุพิชฌาย์ วิจารณ์รงค์, “ผลของโอโซนต่อประสิทธิภาพการขจัดสี,” *สารนิพนธ์ วศ.บ., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ*, 2550.
- [6] อานอบ คันทะชา, “การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากคลองสำโรงโดยโอโซน,” *สงขลา: มหาวิทยาลัยทักษิณ*, 2545.
- [7] A. A. Gonçalves and C. Pereira Kechinski, “Ozone technology in the food industry.” In “*Food Engineering*.” B. C. Siegler, Eds., New York: Nova Science Publisher, 2011. pp. 85–146.
- [8] B. A. Schunacher, “Methods for the Determination of Total Organic Carbon (TOC) In Soils and Sediments,” *Environmental Protection Agency, Washington, DC*, 2002.
- [9] E. F. Karamah, S. Bismo, L. Annasari, and W. W. Purwanto, “Mass Transfer Study On Micro-Bubbles Ozonation In A Bubble Column,” *International Journal of Chemical Engineering Research*, vol. 2, no. 2, pp. 243–252, 2010.
- [10] H. Ikeura, F. Kobayashi, and M. Tamaki, “Removal Of Residual Pesticides In Vegetables Using Ozone Microbubbles,” *Journal of Hazardous Material*, vol. 186, no. 1, pp. 956–959, 2011.
- [11] H. Hadiyanto, M. Christwardana, D. I. Pratiwi, S. Silviana, M. Syarifudin, and A. Khoironi, “Rubber wastewater treatment using UV, ozone, and UV/ozone and its effluent potency for microalgae *Spirulina platensis* cultivation medium,” *Cogent Engineering*, vol. 186, pp. 1-11. 2019.

- [12] M. C. Galdeano, A. E. Wilhelm, I. B. Goulart, R. V. Tonon, O. Freitas-Silva, R. Germani, and D. W. H. Chávez, “Effect of water temperature and pH on the concentration and time of ozone saturation,” *Brazilian Journal of Food Technology*, vol. 21, pp. 1-7, 2018.
- [13] N. S. Zainuddin, F. P. Chee, J. H. W. Chang, C. F. Pien, and J. Dayou, “Development and Operational Implementation of a Novel Method for Production of Ozonated Water,” *Transactions on Science and Technology*, vol.4, no. 3, pp. 218-223, 2017.
- [14] L. S. Clesceri, A. E. Greenberg, and A. D. Eaton, *Standard Methods for the Examination of water and wastewater*. 20th ed. APHA American Public Health Association, 1998.
- [15] พรรณธิพา ไชยมงคล, ธัญศิภรณ์ จันทรหอม, และ สุรพงษ์ วัฒนะจีระ, “การสำรวจลักษณะสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปาอ่างแก้ว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,” ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, 2551, หน้า 14-19.