

# การเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำด้วยถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่น ที่ใช้แผ่นออริฟิซสำหรับอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชั่น

นพรัตน์ อมัตริรัตน์<sup>1</sup> ธนกฤต นนท์ชนะ<sup>2\*</sup> อิทธิพล วรพันธ์<sup>3</sup> ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์<sup>4</sup> กุลเชษฐ์ เพียรทอง<sup>5</sup>

<sup>1,3</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, นครราชสีมา, ประเทศไทย

<sup>2\*</sup>คณะบริหารและการขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, นครราชสีมา, ประเทศไทย

<sup>4,5</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี, ประเทศไทย

\*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : thanakrit.no@rmu.ac.th

รับต้นฉบับ : 25 กรกฎาคม 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 21 ตุลาคม 2567; ตอรับบทความ : 9 พฤศจิกายน 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 27 มิถุนายน 2568

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ด้วยถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่นชนิดใช้แผ่นออริฟิซเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชั่น โดยใช้ น้ำผิวดินที่มีปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำเริ่มต้นต่ำเพียง 1.5 ppm ซึ่งไม่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ได้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบแผ่นออริฟิซ 6 แบบที่มีรูปแบบแตกต่างกันเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชั่น ตัวแปรในการศึกษาได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูบนของแผ่นออริฟิซ (2 และ 4 มิลลิเมตร) จำนวนรูที่เจาะบนแผ่นออริฟิซ (3 4 และ 5 รู) และระยะเวลาในการบำบัดช่วง 5 ถึง 90 นาที โดยเก็บตัวอย่างทุก ๆ 5 นาที จากผลการทดลองพบว่าปรากฏการณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่น ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของแผ่นออริฟิซทุกแผ่นที่ทำการศึกษา สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำได้เกินกว่า 5 ppm ซึ่งเป็นระดับที่เพียงพอสำหรับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ที่ระยะเวลาบำบัด 10 นาที โดยพบว่าแผ่นออริฟิซที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 4 มิลลิเมตร จำนวน 4 รู สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำได้เร็วและสูงที่สุด กล่าวคือสามารถเพิ่มจาก 1.5 ppm เป็น 9.5 ppm ที่ระยะเวลาบำบัด 5 นาที และสูงสุด 11.5 ppm ที่ระยะเวลาดำเนินการ 25 นาที กล่าวคือปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจะเพิ่มขึ้นในช่วง 30 นาทีแรกของการทดลอง จากนั้นมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าถังปฏิกรณ์แบบแผ่นออริฟิซสามารถนำมาใช้เพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำได้ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่นแบบแผ่นออริฟิซเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ควรมีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำและระยะเวลาที่น้ำอยู่ในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำ เพื่อให้ได้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่เพียงพอ

**คำสำคัญ :** ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่น แผ่นออริฟิซ

# Increasing Dissolved Oxygen in Water Using an Orifice Cavitation-induced Hydrodynamics Cavitation Reactor

Nopparat Amattirat<sup>1</sup> Thanakrit Nonchana<sup>2\*</sup> Ittiphon Woraphun<sup>3</sup> Prachasanti Triyasuit<sup>4</sup>  
Kulachate Pianthong<sup>5</sup>

<sup>1,3</sup>Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand

<sup>2\*</sup>Faculty of Railway Systems and Transportation, Rajamangala University of Technology Isan,  
Nakhon Ratchasima, Thailand

<sup>4,5</sup>Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Ubonratchathani, Thailand

\*Corresponding Author. E-mail address: thanakrit.no@rmuti.ac.th

Received: 25 July 2024; Revised: 21 October 2024; Accepted: 9 November 2024

Published online: 27 June 2025

## Abstract

This study examines dissolved oxygen enhancement in water using a hydrodynamic cavitation reactor equipped with an orifice plate. The orifice plate is used as a device to induce cavitation. The study uses surface water with an initial dissolved oxygen level of 1.5 ppm, which is insufficient to support aquatic life. The study compares six different types of orifice plates with varying designs to induce cavitation. The variables considered include the diameter of the holes on the orifice plates 2 millimeters and 4 millimeters, the number of holes 3, 4, and 5 holes, and the treatment duration ranging from 5 to 90 minutes; samples were taken every 5 minutes. The experimental results showed that the hydrodynamic cavitation phenomenon induced by all studied orifice plates could increase the dissolved oxygen level to more than 5 ppm, which is sufficient for aquatic life, within a treatment duration of 10 minutes. It was found that the orifice plate with a 4-millimeter hole diameter and 4 holes increased the dissolved oxygen level the fastest and to the highest level, raising it from 1.5 ppm to 9.5 ppm in 5 minutes and reaching a maximum of 11.5 ppm in 25 minutes. The dissolved oxygen level increased during the first 30 minutes of the experiment, then tended to decrease due to the rising water temperature. In conclusion, controlling water temperature and residence time is crucial for effective DO enhancement using an orifice plate hydrodynamic cavitation reactor. Temperature influences the solubility of oxygen in water, and prolonged residence times beyond an optimal point may lead to decreased DO due to temperature rise.

**Keywords:** Dissolved oxygen (DO), Hydrodynamics cavitation, Orifice plate

## 1) บทนำ

ออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำ โดยทำหน้าที่เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพน้ำ ที่มีอิทธิพลในหลาย ๆ แง่มุม เช่น ความเหมาะสมในการอยู่อาศัยของสัตว์น้ำ ความหลากหลายทางชีวภาพ การหมุนเวียนสารอาหาร และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [1] โดยมีการศึกษาที่ใช้ระดับปริมาณ DO เป็นตัวชี้วัดหลักในการประเมินผลกระทบของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมและชุมชนต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ นอกจากนี้ DO ยังมีความสำคัญต่อคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำธรรมชาติ และในแง่การเป็นดัชนีบ่งชี้ความสมบูรณ์ของระบบนิเวศ โดยระดับของ DO ส่งผลโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและคุณภาพน้ำโดยรวม นอกจากนี้ DO ยังทำหน้าที่เป็นเครื่องมือวัดสุขภาพแม่น้ำ ซึ่งแสดงถึงบทบาทในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตและพืชน้ำ [2]–[4] ทั้งนี้ความพร้อมใช้งานของออกซิเจนที่ละลายในน้ำนั้น มีบทบาทอย่างมากในการทำงานที่เหมาะสมของระบบนิเวศทางน้ำ โดยความสมดุลของปริมาณออกซิเจน มีอิทธิพลต่อการผลิตขั้นต้นและพลวัตรการหายใจ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพน้ำโดยรวม [5] ความสำคัญของ DO นั้นยังครอบคลุมไปถึงการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ การสืบพันธุ์ของปลา รวมทั้งการเจริญเติบโตและสุขภาพของระบบนิเวศโดยรวม [6] ได้มีการศึกษาการนำเอาปริมาณ DO มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองโดยใช้ machine learning เพื่อใช้ในการพยากรณ์ และจัดการคุณภาพน้ำรวมถึงใช้ในการจัดการสภาพแวดล้อมทางน้ำ [5] นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ DO กับอุณหภูมิของน้ำแล้ว การย่อยเศษซากอินทรีย์ก็ส่งผลกระทบต่อระดับ DO ด้วย จึงเป็นการตอกย้ำถึงพลวัตที่ซับซ้อนของออกซิเจนละลายน้ำในแหล่งน้ำ [7] นอกจากนี้ระดับ DO ถูกนำมาใช้ในการประเมินและควบคุมสิ่งมีชีวิตในน้ำ รวมถึงระดับสุขภาพน้ำจืดในแม่น้ำ ทะเลสาบ และลำธาร [8] โดยสรุปแล้วออกซิเจนละลายน้ำเป็นตัวแปรพื้นฐานในการประเมินคุณภาพน้ำ โดยระดับของออกซิเจนทำหน้าที่เป็นตัวบ่งชี้หลัก ของสุขภาพของระบบนิเวศ และการบอกประสิทธิภาพทำงานของสภาพแวดล้อมทางน้ำ ดังนั้นการทำความเข้าใจและการตรวจวัดความเข้มข้นของ DO จึงจำเป็นอย่างยิ่งต่อการรักษาความหลากหลายทางชีวภาพ การหมุนเวียนสารอาหาร รวมทั้งคุณภาพน้ำโดยรวมในระบบน้ำจืด โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิของแหล่งน้ำที่สูงขึ้นจะทำให้ ออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยลง โดยปกติจะมีปริมาณ DO ประมาณ 5–7 ppm และน้ำที่มีคุณภาพดี

จะมีปริมาณ DO ประมาณ 5–8 ppm ในขณะที่น้ำเสียจะมีปริมาณ DO ต่ำกว่า 3 ppm [9]

คาวิเตชัน (cavitation) คือการเปลี่ยนสถานะจากของเหลว (liquid) ไปเป็นไอ (vapor) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ (isothermal) โดยการลดความดันลงจนต่ำกว่าความดันไอ (vapor pressure) โดยเฉพาะผ่านอุปกรณ์ที่ลดหน้าตัดการไหลลง เช่น แผ่นออริฟิซ (orifice plate) และหลอดเวนจูรี (venturi tube) เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน และต้นทุนต่ำจึงมีการศึกษานำมาใช้ในงานด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะประยุกต์นำเอาไฮโดรไดนามิกส์คาวิเตชัน (Hydrodynamics Cavitation: HC) มาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย [10] โดยเทคโนโลยี HC ถูกนำเอาไปใช้ในงานหลาย ๆ ประเภท เช่น การเพิ่มการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย การทำให้ไขมันบริสุทธิ์โดยการฆ่าเชื้อ การแยกสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) ของน้ำมัน และช่วยเร่งการสังเคราะห์ไบโอดีเซล HC ยังถูกศึกษาเพื่อนำมาปรับปรุงผลิตก๊าซชีวภาพ (biogas) โดยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายกากตะกอนของเสียและน้ำเสียจากโรงกลั่น [11] นอกจากนี้ยังถูกใช้เพื่อบำบัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อทำงานร่วมกับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advance oxidation) [12] จากหลาย ๆ งานวิจัยพบว่า HC เป็นเทคโนโลยีที่สามารถลดระดับความเน่าเสีย และช่วยลดระดับความเป็นพิษของน้ำเสียได้ [13]–[16] มากกว่าการปล่อยให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันตามธรรมชาติ [17] นอกจากนี้ HC ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งจากครัวเรือนซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย [15] การใช้เทคนิค HC ร่วมกับเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง ได้รับการยอมรับว่าเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการบำบัดน้ำเสีย และมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น [18] นอกจากนี้ยังพบว่า HC ยังถูกนำมาใช้ในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำ และในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ [13] ในทางกายภาพคาวิเตชันจะสามารถสร้างไมเซลล์ที่มีความหนืดสูง (highly viscoelastic micelles) ที่จะสามารถยับยั้งเชื้อโรคในน้ำเสียได้ [19]

โดยสรุปแล้ว HC มีการศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้หลากหลาย และมีแนวโน้มการนำไปใช้บำบัดน้ำเสีย เช่น การย่อยสลายมลพิษ การเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพความสามารถในการฆ่าเชื้อโรค และเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายผงซักฟอก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษานำเอาเทคนิค HC ที่เหนี่ยวนำปรากฏการณ์คาวิเตชันจากแผ่นออริฟิซ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของแผ่นออริฟิซ

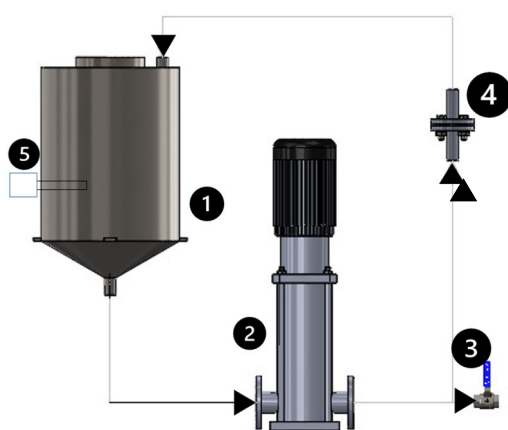
ระยะเวลาในการบำบัด และผลของอุณหภูมิของน้ำต่อปริมาณของปริมาณ DO

## 2) อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงาน

### 2.1) ชุดทดลองถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่นที่ใช้แผ่นออริฟิซเหนี่ยวนำควิเตชั่น

ชุดทดลองถึงปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 1 โดยชุดทดลองประกอบด้วยปั๊มหอยโข่งแรงดันสูง (multistage centrifugal pump) (หมายเลข 2) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับเพิ่มแรงดันให้กับของเหลวก่อนเข้าถึงปฏิกรณ์ โดยปั๊มที่ใช้เป็นแบบ vertical multistage pump รุ่น MV - 8 มีแรงดันใช้งานสูงสุด 0.8 MPa ใช้ดูดน้ำจากถังพักที่ทำจากสแตนเลส SUS304 ขนาด 50 ลิตร (หมายเลข 1) ซึ่งทำหน้าที่ในการพักน้ำก่อนเข้าปั๊ม และรองรับน้ำที่ออกมาจากถังปฏิกรณ์ภายในถังพักมีการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิล type K สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำ (หมายเลข 5) และมีจุดสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำออกมาวัดปริมาณ DO

น้ำจากถังพักจะถูกปั๊มดูดและส่งไปยังถังปฏิกรณ์ HC ชนิดแผ่นออริฟิซ (หมายเลข 4) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ควิเตชั่น โดยประกอบด้วยส่วนที่เป็นท่อที่ติดตั้งแผ่นออริฟิซและด้านท้ายของถังปฏิกรณ์มีวาล์วสำหรับควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าสู่ถังพัก ดังแผนผังอุปกรณ์และทิศทางการไหลของน้ำของเครื่อง HC ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 : ผังการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ HC แบบใช้แผ่นออริฟิซเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชั่น

สำหรับแผ่นออริฟิซที่ใช้ในการศึกษานี้มีจำนวนทั้งหมด 6 แบบ โดยแต่ละแบบมีอัตราส่วนของความยาวรวมเส้นรอบวงของรูเจาะ

บนแผ่นออริฟิซ ต่อพื้นที่การไหลรวมของรูเจาะ ( $\alpha$ ) อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดรวมของรูเจาะต่อพื้นที่การไหลของท่อ ( $\beta$ ) และเลขควิเตชั่น ( $K$ ) เนื่องจากขนาดและจำนวนรูของแผ่นออริฟิซจะส่งผลโดยตรงต่อขนาดพื้นที่หน้าตัด ซึ่งจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งความเร็วในการไหล และความดันของของไหล โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1 โดยแผ่นทำจากโลหะแผ่นวัสดุ SS400 ความหนา 3 มิลลิเมตร โดยขนาดและการวางตำแหน่งของแผ่นขอบคมดังรูปที่ 2 ในส่วนแผ่นออริฟิซจะถูกติดตั้งเข้าระหว่างหน้าแปลนขนาด DN25 – 10K ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขนาด 30 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของวงรูเจาะเท่ากับ 20 มิลลิเมตร โดยลักษณะการวางตำแหน่งของรูเจาะบนแผ่นออริฟิซ แบบ 3 รู แบบ 4 รู และแบบ 5 รู ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) รูปที่ 2 (ข) และรูปที่ 2 (ค) ตามลำดับ โดยแผ่นขอบคมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ใช้ตำแหน่งของรูเจาะเดียวกัน

ทั้งนี้ตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการศึกษาการเกิดควิเตชั่นคือ เลขควิเตชั่น (Cavitation number,  $K$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 [20] และผลของการคำนวณเลขควิเตชั่น ของแผ่นขอบคมต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1

$$K = \frac{P_u - P_d}{P_d - P_v} \quad (1)$$

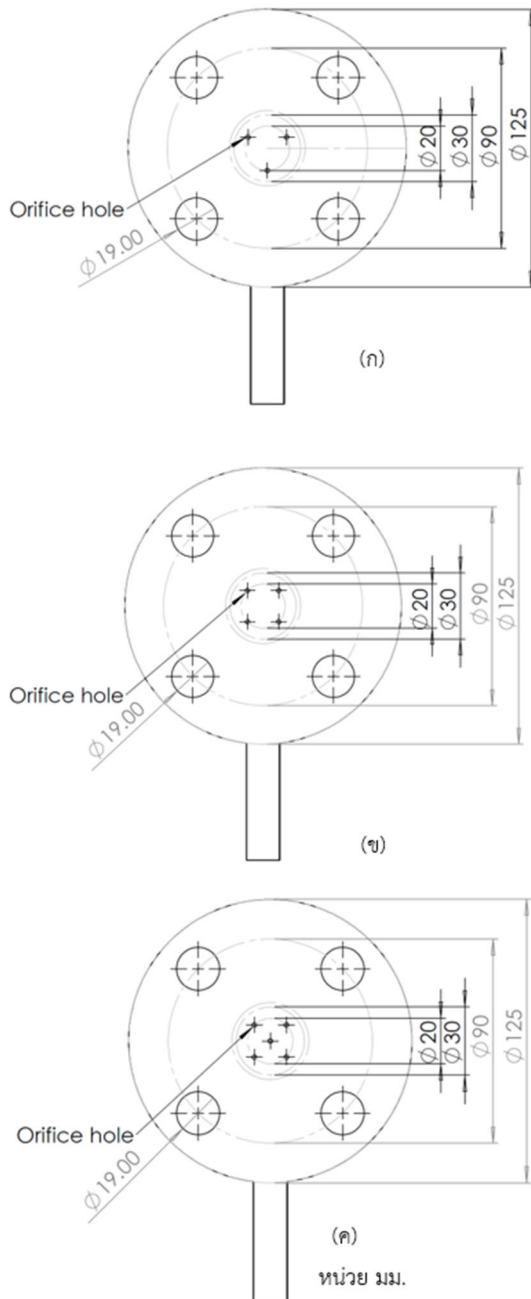
โดยที่ คือ  $K$  เลขควิเตชั่นนัมเบอร์ เป็นตัวแปรไร้มิติ,  $P_u$  คือความดันทางเข้าแผ่นของคม (Pa),  $P_d$  คือความดันทางออกจากแผ่นของคม และ  $P_v$  คือความดันไอของน้ำ

ตารางที่ 1 : ขนาดของแผ่นออริฟิซที่ใช้ในการทดลอง และผลการคำนวณเลขควิเตชั่น

| แบบแผ่นออริฟิซ | เส้นผ่านศูนย์กลางรู (มม.) | จำนวนรู (รู) | $\alpha$ (ม.¹) | $\beta$ | เลขควิเตชั่น ( $K$ ) |
|----------------|---------------------------|--------------|----------------|---------|----------------------|
| OR01           | 2                         | 3            | 0.708          | 0.017   | 6.4                  |
| OR02           | 2                         | 4            | 0.943          | 0.023   | 6.2                  |
| OR03           | 2                         | 5            | 1.179          | 0.028   | 6.0                  |
| OR04           | 4                         | 3            | 1.415          | 0.068   | 4.8                  |
| OR05           | 4                         | 4            | 1.887          | 0.090   | 4.1                  |
| OR06           | 4                         | 5            | 2.359          | 0.113   | 3.5                  |

จากตารางที่ 1 รูปแบบของแผ่นออริฟิซจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่กลุ่มของแผ่นออริฟิซที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 2 มิลลิเมตร (OR01, OR02, OR3) และกลุ่มของแผ่น

ออร์ฟิซที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 4 มิลลิเมตร (OR04, OR05, OR6)



รูปที่ 2 รูปแบบการวางตำแหน่งของรูเจาะบนแผ่นออร์ฟิซแบบ 3 รู  
(ก) แบบ 4 รู (ข) และแบบ 5 รู (ค)

## 2.2) น้ำผิวดินที่ใช้ในการทดลอง

น้ำที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นน้ำจากแหล่งน้ำผิวดิน ที่รองรับน้ำทิ้งจากโรงอาหารอาหารกลางภายใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดนครราชสีมา โดยน้ำดังกล่าวมีปริมาณ DO เริ่มต้นเท่ากับ 1.5 ppm อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 23 °C

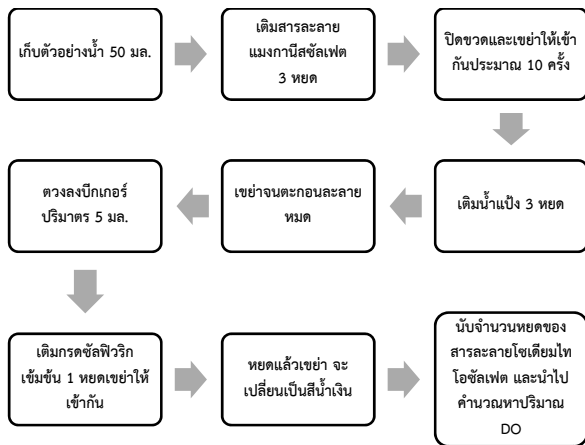
## 2.3) สารเคมีในการทดสอบปริมาณ DO

การตรวจวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณ DO (โซเดียมไทโอซัลเฟต, กรดซัลฟิวริก) ใช้ชุดทดสอบ สำเร็จรูปของ บริษัท แอ็ดวานซ์ ฟาร์มา จำกัด

## 2.4) ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

2.4.1) การทดลองเพิ่มปริมาณ DO เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ HC ดังนั้นในขั้นตอนการทดลองจะเริ่มโดยการนำน้ำเสียจำนวน 30 ลิตรที่เก็บจากแหล่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นำมาพักไว้ที่อุณหภูมิ 23 °C จากนั้นเติมลงในถังพักน้ำ จากนั้นติดตั้งแผ่นออร์ฟิซที่ต้องการศึกษา และเดินปั๊มเพื่อให้น้ำไหลผ่านถังปฏิกรณ์ HC เมื่อน้ำไหลผ่านแผ่นออร์ฟิซจะเกิดควิเตชั่น และเมื่อไหลออกจากบริเวณความดันต่ำ ฟองอากาศทั้งหมดจะควบแน่นกลับเป็นของเหลว จากนั้นน้ำจะหมุนเวียนกลับมาถึงถังพักอีกครั้ง โดยไม่มีการให้ความร้อนหรือควบคุมอุณหภูมิ เมื่อครบระยะเวลาทุก ๆ 5 นาที จะมีการวัดอุณหภูมิและเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวัดปริมาณ DO จนกระทั่งครบ 90 นาที

2.4.2) การวิเคราะห์ปริมาณค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำโดยใช้ชุดทดสอบ ในการวิเคราะห์ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการไทเทรตแบบนับหยด ทั้งนี้เป็นวิธีที่สะดวกและนิยมใช้ในการวัดค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำ เริ่มจากนำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดที่เก็บได้ในขวด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเปิดจุกขวดเพื่อเติมสารละลายแมงกานีสซัลเฟต 3 หยด ตามด้วยสารละลายอัลคาไลน์-ไอโอดีน-แอไซด์ (Alkaline-iodide-azide reagent) 3 หยด แล้วปิดขวดน้ำตัวอย่างให้สารละลายเข้ากันโดยการเขย่าประมาณ 10 ครั้ง (จะมีตะกอนเกิดขึ้น) หลังจากนั้นเติมน้ำแบ่ง 3 หยด แล้วผสมสารละลายให้เข้ากันโดยการเขย่าขวดจนกระทั่งตะกอนละลายจนหมด จากนั้นเทสารละลายจากขวดน้ำตัวอย่างลงในบีกเกอร์ จนกระทั่งได้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกแบบเข้มข้น 1 หยดลงในบีกเกอร์ เขย่าให้เข้ากัน (สารละลายจะเป็นสีน้ำเงินเข้ม) เติมสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตลงในบีกเกอร์ทีละหยด แล้วเขย่าให้เข้ากัน จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้มเป็นไม่มีสี จากนั้นนับจำนวนหยดของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยสามารถคำนวณค่า DO ได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2 ผังกระบวนการไทเทรตแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 : แผนภาพขั้นตอนการไทเทรตเพื่อหาปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ

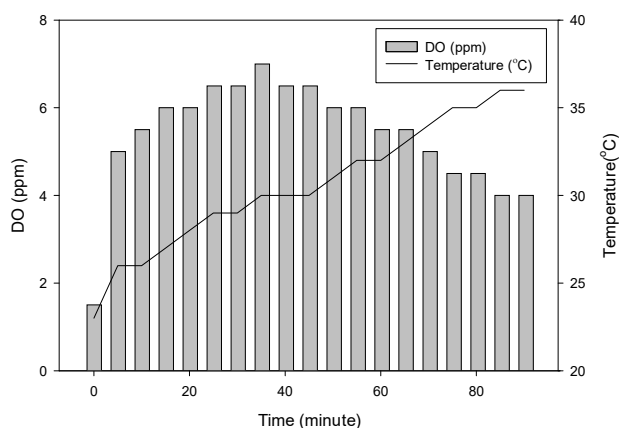
$$DO = 0.5N \quad (2)$$

โดยที่ DO คือ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (ppm) และ  $N$  คือจำนวนหยดของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

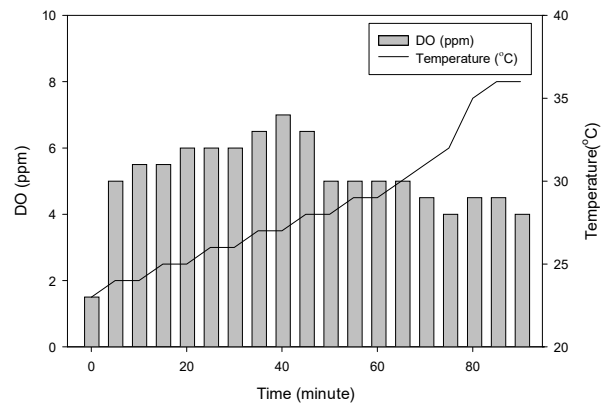
### 3) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 3.1) ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัด

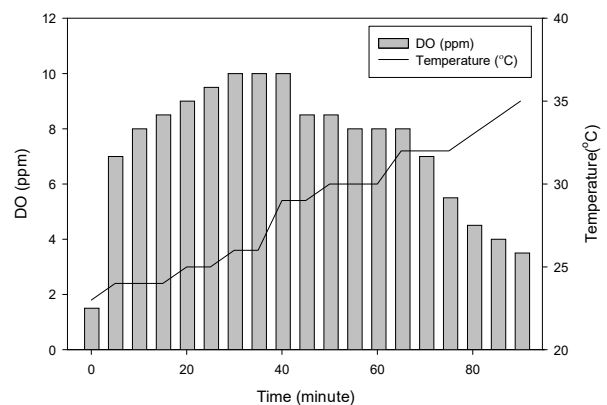
จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำผลการวิเคราะห์หาปริมาณ DO และผลการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำมาพล็อตกราฟเทียบกับระยะเวลาในการบำบัดในช่วงระยะเวลา 0-90 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 5 นาที ของแผ่นออริฟิซแบบ OR01, OR02, OR03, OR04, OR05 และ OR06 ดังรูปที่ 4-9 ตามลำดับ



รูปที่ 4 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออริฟิซแบบ OR01 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน



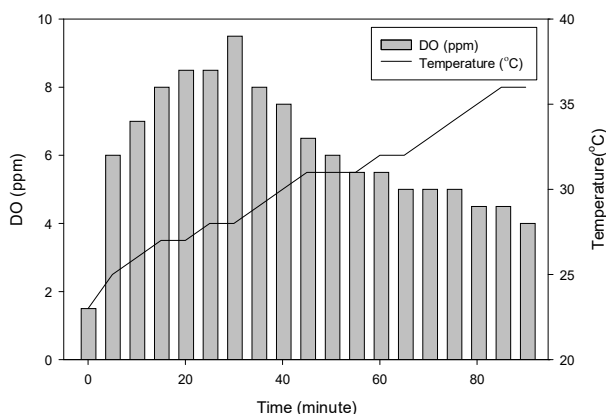
รูปที่ 5 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออริฟิซแบบ OR02 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน



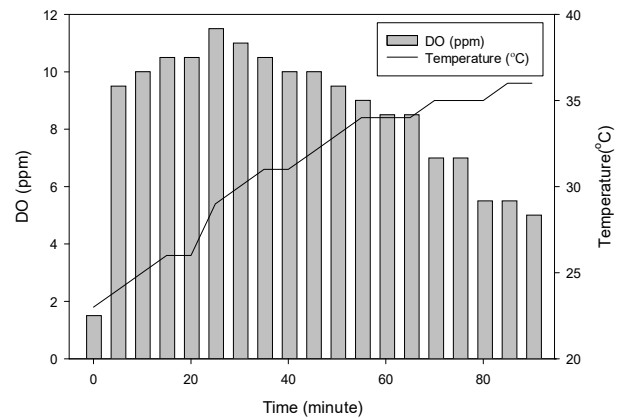
รูปที่ 6 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออริฟิซแบบ OR03 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4-6 เป็นกราฟแสดงปริมาณ DO (กราฟแท่ง) และอุณหภูมิ (กราฟเส้น) ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกสควิตเตชันในแต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกันทุก ๆ 5 นาที สำหรับแผ่นออริฟิซแบบ OR01, OR02, และ OR03 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 2 มิลลิเมตรเท่ากัน แต่มีจำนวน 3, 4, และ 5 รูตามลำดับ พบว่าปริมาณ DO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนกระทั่งมีค่าสูงสุดแล้วจึงลดลง ในขณะที่อุณหภูมิของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงการบำบัด เมื่อพิจารณาร่วมกันจะพบว่าปริมาณ DO มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของน้ำอย่างชัดเจน ดังที่ปรากฏในรูปที่ 4 โดยปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ HC ที่ติดตั้งแผ่นออริฟิซแบบ OR01 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจาก 1.5 ppm เป็น 5 ppm ในระยะเวลาเพียง 5 นาที จากนั้นปริมาณ DO จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด และมีค่าเพิ่มขึ้นจนสูงสุดที่ 7 ppm ที่ระยะเวลา 35 นาทีและอุณหภูมิของน้ำที่ 30 °C จากนั้นปริมาณ DO จะมีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลง

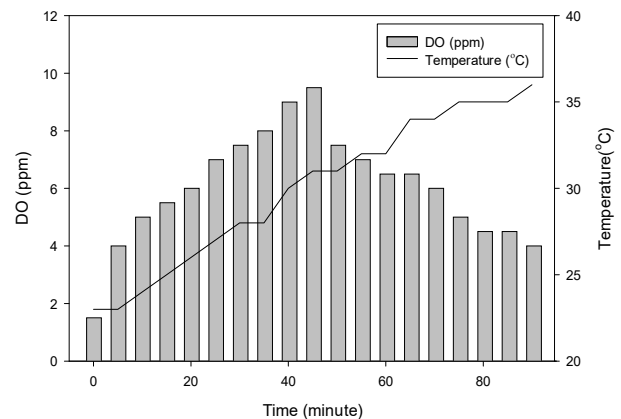
ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำ และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ปริมาณ DO ลดลงจนเท่ากับ 4 ppm นอกจากนี้เมื่อพิจารณา อุณหภูมิของน้ำ จะพบว่าตลอดระยะเวลาในการบำบัด อุณหภูมิ ของน้ำมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอันเป็นผลจากการแตกตัวของ ฟองไอ และคลื่นกระแทกที่เกิดจากการเกิดปรากฏการณ์ควิเตชัน จากรูปที่ 5 พบว่าปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถัง ปฏิกรณ์ HC ที่ติดตั้งแผ่นออร์ฟิซแบบ OR02 ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกับ รูปที่ 4 แต่ระยะเวลาที่ปริมาณ DO มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดที่ 7 ppm ต้องใช้ระยะเวลาบำบัด 40 นาที ที่อุณหภูมิของน้ำ 27 °C และค่อย ๆ ลดลงเหลือ 3.5 ppm เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นถึง 35°C นอกจากนี้ปริมาณ DO และ อุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากแผ่นออร์ฟิซ แบบ OR03 ดัง แสดงในรูปที่ 6 พบว่าถังปฏิกรณ์ HC สามารถเพิ่มปริมาณ DO ได้อย่างรวดเร็ว โดยในระยะเวลาในการบำบัด 5 นาทีแรกปริมาณ DO เพิ่มขึ้นถึง 7 ppm และเมื่อระยะเวลาบำบัดเพิ่มขึ้นปริมาณ DO ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดที่ 10 ppm ใช้ ระยะเวลาเพียง 30 นาที และจะมีค่าคงที่จนกระทั่งระยะเวลาใน การบำบัดเกิน 45 นาทีจึงค่อย ๆ ลดลง อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่า ปริมาณ DO จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ ซึ่งมีความสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Jacobsen [21] ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น ความสามารถในการเก็บกักออกซิเจนไว้ในน้ำจะลดลง นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Durlević [22] ยังพบว่าระดับของการอิ่มตัว ของออกซิเจนในน้ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และปริมาณของกระบวนการสังเคราะห์แสงที่เกิดขึ้นในน้ำบริเวณนั้น ๆ ที่เกิดจากพืชน้ำ



รูปที่ 7 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออร์ฟิซ แบบ OR04 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน



รูปที่ 8 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออร์ฟิซ แบบ OR05 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน



รูปที่ 9 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออร์ฟิซ แบบ OR06 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน

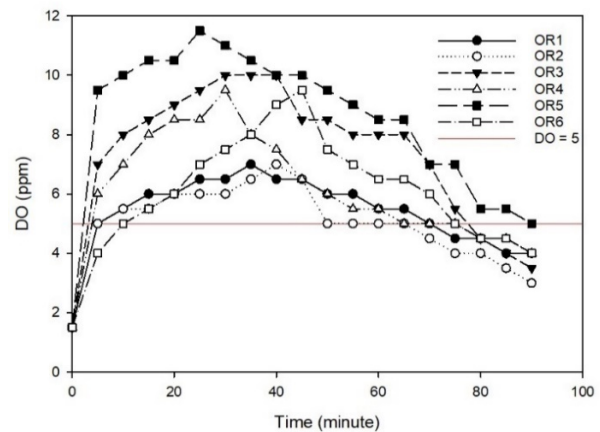
รูปที่ 7-9 เป็นกราฟแสดงปริมาณ DO และค่าอุณหภูมิของ น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ HC ในแต่ละช่วงเวลาที่ แตกต่างกัน 5 นาที โดยใช้แผ่นออร์ฟิซ OR04, OR05 และ OR06 ตามลำดับ โดยทั้ง 3 แบบเป็นแผ่นออร์ฟิซที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 4 มิลลิเมตรเท่ากัน แต่มีจำนวน 3 รู 4 รู และ 5 รู ตามลำดับ โดยจากรูปที่ 7 พบว่าปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการ บำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ HC ที่ติดตั้งแผ่นออร์ฟิซแบบ OR04 มีค่า เพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 1.5 ppm เป็น 6 ppm ในระยะเวลาใน การบำบัด 5 นาที และมีค่าเพิ่มขึ้นจนสูงสุดที่ 9.5 ppm ที่ระยะ เวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิของน้ำ 28 °C จากนั้นปริมาณ DO จะมี แนวโน้มค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำ จากรูปที่ 8 พบว่าปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถัง ปฏิกรณ์ HC ที่ติดตั้งแผ่นออร์ฟิซ แบบ OR05 ในระยะเวลา 5 นาทีปริมาณ DO พุ่งสูงขึ้นอย่างมาก โดยที่ค่าเพิ่มจาก 1.5 ppm

ไปเป็น 8.5 ppm จากนั้นปริมาณ DO ก็มีค่าสูงขึ้นและสูงสุดที่ 11.5 ppm แต่ใช้ระยะเวลาในการบำบัดเพียง 25 นาที ที่อุณหภูมิของน้ำ 29 °C และค่อย ๆ ลดลงจนเหลือ 5 ppm เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 36 °C และสุดท้ายปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากแผ่นออริฟิซ OR06 ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าปริมาณ DO มีการค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดที่ 9.5 ppm ใช้ระยะเวลาในการบำบัด 45 นาที ที่อุณหภูมิของน้ำ 31 °C จากนั้นปริมาณ DO จะค่อย ๆ ลดลง

### 3.2) เปรียบเทียบปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากแผ่นออริฟิซต่าง ๆ

เมื่อนำเอาผลของปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่น ออริฟิซทั้ง 6 แบบที่ระยะเวลาการบำบัดต่าง ๆ มาพล็อตลงบนกราฟเดียวกันจะได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงรูปที่ 10 โดยเมื่อเราใช้เกณฑ์ของปริมาณ DO ที่มีค่ามากกว่า 5 ppm เป็นน้ำที่เหมาะสมกับการอาศัยของสัตว์และสิ่งมีชีวิตในน้ำมาพิจารณาจะพบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัด 5 นาที น้ำจากการบำบัดด้วยแผ่นออริฟิซทุกแบบยกเว้น แผ่นออริฟิซ แบบ OR06 มีค่าสูงกว่า 5 ppm โดยแผ่นออริฟิซ แบบ OR05 ที่มีค่า  $\alpha$  เท่ากับ 1.887  $\beta$  เท่ากับ 0.090 และค่าเลขควาเเต้ขึ้นเท่ากับ 4.1 สามารถเพิ่มปริมาณ DO ได้สูงที่สุดถึง 9.5 ppm และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดเป็น 10 นาที จะพบว่าจากการบำบัดด้วยแผ่นออริฟิซทั้ง 6 แบบมีปริมาณ DO มากกว่า 5 ppm ทุกแบบ และเมื่อพิจารณาแนวโน้มของปริมาณ DO ที่เพิ่มขึ้นในการทดลองของทุกแผ่นจะพบว่าจะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดในช่วงระยะเวลาการบำบัด 30–45 นาที และจากนั้นจะลดลง อันเป็นผลจากอุณหภูมิค่าสูงมากกว่า 30 °C ในช่วงเวลาในการบำบัดมากกว่า 45 นาที ส่งผลให้น้ำมีความสามารถในการกักเก็บออกซิเจนลดลง

หากพิจารณาเลขควาเเต้ขึ้น จะพบว่าความรุนแรงในการเกิดควาเเต้ขึ้นไม่ใช่เพียงตัวแปรเดียวที่ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณ DO ในน้ำ โดยค่าเลขควาเเต้ขึ้นที่ลดลงบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการเกิดควาเเต้ขึ้นที่สูงขึ้น [23] ซึ่งเป็นผลมาจากการลดพื้นที่หน้าตัด ( $\beta$ ) ทำให้ความดันทางเข้าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าปริมาณพื้นที่บริเวณที่เกิดควาเเต้ขึ้นก็ส่งผลอย่างมากเช่นกัน ดังเห็นได้จากแผ่นออริฟิซแบบ OR5 ที่มีเลขควาเเต้ขึ้น 4.1 ซึ่งมีความรุนแรงของการเกิดควาเเต้ขึ้นน้อยกว่าแผ่นออริฟิซแบบ OR06 ที่มีเลขควาเเต้ขึ้น 3.5 แต่กลับสามารถเพิ่มปริมาณ DO ได้มากกว่าในทุกช่วงเวลาของการบำบัด



รูปที่ 10 : ผลการเปรียบเทียบปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออริฟิซทั้ง 6 แบบที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน

### 5) สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำสำหรับน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำ ด้วยถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควาเเต้ขึ้นที่ใช้แผ่นออริฟิซเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควาเเต้ขึ้น จากผลการทดลองพบว่าแผ่นออริฟิซทั้ง 6 แบบ ซึ่งมีค่าเลขควาเเต้ขึ้นอยู่ในช่วง 3.5–6.4 สามารถเพิ่มปริมาณ DO ในน้ำได้จนมีค่ามากกว่า 5 ppm ซึ่งเป็นระดับที่สิ่งมีชีวิตในน้ำสามารถดำรงชีวิตได้ โดยปริมาณ DO จะมีค่าสูงสุดในช่วงอุณหภูมิของน้ำ 28–31 °C หากอุณหภูมิสูงกว่าช่วงนี้ ปริมาณ DO จะลดลงอย่างต่อเนื่องจากผลของความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำซึ่งจะลดลงตามอุณหภูมิของน้ำ โดยแผ่นออริฟิซแบบ OR05 สามารถเพิ่มปริมาณ DO ได้สูงที่สุดถึง 11.5 ppm โดยใช้เวลาน้อยที่สุดเพียง 25 นาที จึงสรุปได้ว่าถังปฏิกรณ์แบบ HC ที่ใช้แผ่นออริฟิซสามารถนำมาใช้เพิ่มปริมาณ DO ในน้ำได้ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อนและราคาไม่สูง อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งาน ควรควบคุมปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการบำบัด คืออุณหภูมิของน้ำที่มีการเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาในการบำบัด เพื่อลดผลกระทบต่อความสามารถในการกักเก็บออกซิเจนในน้ำ

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินการวิจัย

## REFERENCES

- [1] S. F. Jane, J. L. Mincer, M. P. Lau, A. S. L. Lewis, J. T. Stetler, and K. C. Rose, "Longer duration of seasonal stratification contributes to widespread increases in lake hypoxia and anoxia," *Global Change Biol.*, vol. 29, no. 4, pp. 1009–1023, 2023, doi: 10.1111/gcb.16525.
- [2] P. R. Kannel, S. Lee, Y.-S. Lee, S. R. Kanel, and S. P. Khan, "Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 132, no. 1, pp. 93–110, 2007, doi: 10.1007/s10661-006-9505-1.
- [3] N. Naveedullah *et al.*, "Water quality characterization of the Siling reservoir (Zhejiang, China) using water quality index," *CLEAN – Soil, Air, Water*, vol. 44, no. 5, pp. 553–562, 2016.
- [4] O. I. Abdul-Aziz and A. K. Gebreslase, "Emergent scaling of Dissolved Oxygen (DO) in freshwater streams across contiguous USA," *Water Resour. Res.*, vol. 59, no. 2, 2023, Art. no. e2022WR032114, doi: 10.1029/2022WR032114.
- [5] A. A. M. Ahmed, S. J. J. Jui, M. A. I. Chowdhury, O. Ahmed, and A. Sutradha, "The development of dissolved oxygen forecast model using hybrid machine learning algorithm with hydro-meteorological variables," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, pp. 7851–7873, 2023, doi: 10.1007/s11356-022-22601-z.
- [6] Q. Zuo, Y. Tian, G. Ma, Z. Li, and Z. Sun, "Design of an integrated A/D converter for dissolved oxygen sensor interface in aquaculture," in *Proc. Int. Conf. Mech. and Robot. (ICMAR)*, Zhuhai, China, Feb. 2022, doi: 10.1109/ICMAR55693.2022.9856385.
- [7] A. Rajwa-Kuligiewicz, R. J. Bialik, and P. M. Rowinski, "Dissolved oxygen and water temperature dynamics in lowland rivers over various timescales," *J. Hydrol. Hydromech.*, vol. 63, no. 4, pp. 353–364, 2015.
- [8] S. Heddarn, "Intelligent data analytics approaches for predicting dissolved oxygen concentration in river: Extremely randomized tree versus random forest, MLPNN and MLR," in *Intelligent Data Analytics for Decision-Support Systems in Hazard Mitigation: Theory and Practice of Hazard Mitigation*, R. C. Deo, P. Samui, O. Kisi, and Z. M. Yaseen, Eds., Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 89–107.
- [9] X. Wang, F. Wang, and W. Wei, "Linear active disturbance rejection control of dissolved oxygen concentration based on benchmark simulation model number 1," *Math. Problems Eng.*, vol. 2015, 2015, Art. no. 178953, doi: 10.1155/2015/178953.
- [10] V. P. Sarvothaman, S. Nagarajan, and V. V. Ranade, "Treatment of solvent-contaminated water using vortex-based cavitation: Influence of operating pressure drop, temperature, aeration, and reactor scale," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 57, no. 28, pp. 9292–9304, 2018.
- [11] J. Loughrin, S. Antle, K. Sistani, and N. Lovanh, "In situ acoustic treatment of anaerobic digesters to improve biogas yields," *Environments*, vol. 7, no. 2, Feb. 2020, Art. no. 11, doi: 10.3390/environments7020011.
- [12] K. O. Badmus, N. Irakoze, O. R. Adeniyi, and L. Petrik, "Synergistic advance Fenton oxidation and hydrodynamic cavitation treatment of persistent organic dyes in textile wastewater," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 2, Apr. 2020, Art. no. 103521, doi: 10.1016/j.jece.2019.103521.
- [13] P. Jain, V. M. Bhandari, K. Balapure, J. Jena, V. V. Ranade, and D. J. Killedar, "Hydrodynamic cavitation using vortex diode: An efficient approach for elimination of pathogenic bacteria from water," *J. Environ. Manag.*, vol. 242, pp. 210–219, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.04.057.
- [14] P. B. Patil, V. M. Bhandari, and V. V. Ranade, "Improving efficiency for removal of ammoniacal nitrogen from wastewaters using hydrodynamic cavitation," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 70, 2021, Art. no. 105306, doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105306.
- [15] M. Lebioccka, "Application of hydrodynamic cavitation to improve the biodegradability of municipal wastewater," *J. Ecol. Eng.*, vol. 21, no. 6, pp. 155–160, 2020.
- [16] S. Zhang, L. Shen, and W. Gong, "Enhancing the degradation of Rhodamine B by hydrodynamic cavitation with CCl<sub>4</sub> augmentation," *Adv. Mater. Res.*, vol. 864–867, pp. 1244–1252, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.864-867.1244.
- [17] A. G. Chakinala, P. R. Gogate, A. E. Burgess, and D. H. Bremner, "Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing," *Chem. Eng. J.*, vol. 152, no. 2-3, pp. 498–502, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.cej.2009.05.018.
- [18] P. R. Gogate and P. N. Patil, "Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 25, pp. 60–69, 2015, doi: 10.1016/j.ultsonch.2014.08.016.
- [19] N. S. M. Yusof, B. Babgi, Y. Alghamdi, M. Aksu, J. Madhavan, and M. Ashokkumar, "Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 29, pp. 568–576, 2016, doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.06.013.



- [20] M. S. Plesset, "The dynamics of cavitation bubbles," *J. Appl. Mech.*, vol. 16, no. 3, pp. 277–282, 2021.
- [21] D. Jacobsen, "Low oxygen pressure as a driving factor for the altitudinal decline in taxon richness of stream macroinvertebrates," *Oecologia*, vol. 154, no. 4, pp. 795–807, 2007.
- [22] U. Durlević, "The analysis of the quality of surface water of danube in the republic of Serbia for 2018," *Zbornik Radova - Geografski Fakultet Univerziteta U Beogradu*, vol. 68, pp. 53–70, Dec. 2020, doi: 10.5937/zrgfub2068053d.
- [23] B. Balasundaram and S. T. L. Harrison, "Disruption of brewers' yeast by hydrodynamic cavitation: Process variables and their influence on selective release," *Biotechnology Bioengineering*, vol. 94, no. 2, pp. 303–311, 2006, doi: 10.1002/bit.20878.