



**การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล
(รุ่น Chan Shrimp Model I) กับระบบเติมอากาศแบบจานจ่ายอากาศ
และแบบแอร์ลิฟท์ ในบ่อเลี้ยงปลานิลแดงแบบหนาแน่นในโรงเรือน**
**Efficiency Comparison of Micro-Nanobubble (Chan shrimp model I) with Air Disc
and Airlift Aeration Systems in Intensive Indoor Red Tilapia Culture Ponds**

สุภาวดี โกยดุลย์^{1*}, เจษฎา อิสหาะ¹, อินทรา จันทร์หอม¹, จันทร์สว่าง งามผ่องใส²,

วีระ ศรีสาม³, วินิจ ต้นสกุล⁴ และ วราห์ เทพาหุดี⁵

Supavadee Koydon^{1*}, Jesada Is-haak¹, Inthira Janhom¹, Chansawang Ngamphongsai²,

Vera Srisam³, Vinij Tansakul⁴ and Wara Taparhudee⁵

¹ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ประเทศไทย

² ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย

³ ฟาร์มมารีน (ธรรมชาติ) ประเทศไทย, ⁴ บริษัท อควาติก อินโนเวชั่น คอนซัลแตนท์ จำกัด, ประเทศไทย

⁵ ภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประเทศไทย

¹ Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry,

Rajamangala University of Technology, Suvarnabhumi, Thailand

² National Center for Genetic Engineering and Biotechnology,

National Science and Technology Development Agency, Thailand Science Park, Thailand

³ Marine farm (Thammachat), Thailand, ⁴ Aquatic Innovation Consultant Co., Ltd., Thailand

⁵ Department of Aquaculture, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Thailand

Received : 5 August 2024, Received in revised form : 9 November 2024, Accepted : 2 December 2024

Available online : 6 December 2024

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา : ปัจจุบันการเลี้ยงปลานิลแดงนิยมเลี้ยงแบบหนาแน่นในโรงเรือน จำเป็นต้องใช้ระบบเติมอากาศเพื่อเพิ่มออกซิเจนที่ละลายน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลา ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลรุ่น Chan shrimp model I กับระบบเติมอากาศแบบจานจ่ายอากาศ และ แอร์ลิฟท์ ทั้งในสภาวะมาตรฐานและในบ่อเลี้ยงปลานิลแดงแบบหนาแน่นในโรงเรือน

วิธีดำเนินการวิจัย : วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (randomized complete block design) ประกอบด้วย 3 ชุดการทดลองได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1 ระบบเติมอากาศแบบจานจ่ายอากาศ ชุดการทดลองที่ 2 ระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ และชุดการทดลองที่ 3 ระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศ 99 เปอร์เซ็นต์ กำหนดให้บล็อกคือรอบของการทดลองหรือวันที่ทดลอง การทดลองได้ดำเนินการชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ (3 วัน) โดยทดลองในบ่อผ้าใบทรงกลม 3 บ่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เมตร เติมน้ำลึก 70 เซนติเมตร ปริมาตรน้ำ 4.95 ลูกบาศก์เมตร ทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศภายใต้สองสภาวะ ได้แก่ สภาวะมาตรฐานซึ่งใช้น้ำสะอาด (น้ำประปา) และในน้ำจากบ่อเลี้ยงปลานิลแดง รวมทั้งทดสอบในบ่อเลี้ยงปลานิลแดงที่ปล่อยปลานิลแดง

ที่มีน้ำหนักเฉลี่ย($\pm$ SD) อยู่ในช่วง 244.92 ± 0.21 - 245.46 ± 0.15 กรัม และความยาวเฉลี่ย($\pm$ SD) อยู่ในช่วง 21.16 ± 0.42 - 21.27 ± 0.23 เซนติเมตร จำนวน 500 ตัว/บ่อ ซึ่งมีอัตราความหนาแน่นเท่ากับ 70.77 ตัว/ตารางเมตร หรือ 24.74 ± 0.02 - 24.81 ± 0.03 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำและออกซิเจนที่ละลายในน้ำจนถึงจุดอิ่มตัว เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศ รวมทั้งข้อมูลต้นทุนของระบบเติมอากาศ และข้อมูลต้นทุนค่าไฟฟ้า

ผลการวิจัย : พบว่าในน้ำสะอาด ค่ามาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (SOTR; $\text{kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$) และค่าประสิทธิภาพมาตรฐานการให้อากาศ (SAE; $\text{kgO}_2 \cdot \text{KW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$) ของระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล มีประสิทธิภาพดีที่สุด และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) รองลงมา คือ ระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ และจานจ่ายอากาศ ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับ ในน้ำจากบ่อเลี้ยงปลา พบว่า ค่ามาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (SOTR; $\text{kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$) และค่าประสิทธิภาพมาตรฐานการให้อากาศ (SAE; $\text{kgO}_2 \cdot \text{KW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$) ของระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล มีประสิทธิภาพดีที่สุด และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) รองลงมา คือ ระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ และจานจ่ายอากาศ ตามลำดับ ระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลมีเปอร์เซ็นต์ต้นทุนรวม($\pm$ SD) ของระบบเติมอากาศต่ำที่สุด (28.69 ± 3.81 เปอร์เซ็นต์) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์และแบบจานจ่ายอากาศ นอกจากนี้ระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลสามารถลดต้นทุน($\pm$ SD) ได้สูงสุด (71.31 ± 3.81 เปอร์เซ็นต์) รองลงมาคือระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ และจานจ่ายอากาศ ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศในบ่อเลี้ยงปลานิลแดงพบว่า อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาพการเลี้ยงจริง (OTR; $\text{kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$) ค่าประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศ (AE_r ; $\text{kgO}_2 \cdot \text{KW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$) ค่าความต้องการพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเปิดระบบเติมอากาศของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (P_R ; W) ของระบบเติมอากาศไมโครนาโนบับเบิลมีประสิทธิผลสูงกว่าและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ และจานจ่ายอากาศ ตามลำดับ

สรุปผลการวิจัย : ระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลรุ่น Chan Shrimp Model I มีประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจนลงในน้ำดีที่สุดในบ่อเลี้ยงปลา สามารถลดต้นทุน($\pm$ SD) ด้านพลังงานสูงถึง 57.09 ± 1.41 เปอร์เซ็นต์และ 14.22 ± 2.40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับระบบเติมอากาศแบบจานจ่าย และระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ ตามลำดับ

คำสำคัญ : ระบบเติมอากาศ ; จานจ่ายอากาศ; แอร์ลิฟท์ ; ไมโครนาโนบับเบิล ; ปลานิลแดง

Abstract

Background and Objectives: Currently, the intensive farming of red tilapia is commonly practiced in indoor facilities, requiring an aeration system to provide dissolved oxygen levels suitable for the fish growth. Therefore, the objective of this study is to compare the efficiency of the micro-nanobubble aeration system, the Chan shrimp model I, with an air disc aeration system and an airlift aeration system under standard conditions and in intensive culture ponds of red tilapia in indoor facilities.

Methodology: A randomized complete block design was applied with three treatments: T1) the air disc system, T2) the airlift aeration system, and T3) the micro-nanobubble aeration system with 99% oxygen concentration

in the air. The block is designated as the experimental rounds or the day of experiment. The experiments were carried out in triplicate (3 days) and established using 3 round canvas tanks with a diameter of 3 m and filled with water to a depth of 70 cm to gain a total water volume of 4.95 m³. The efficiency of the three aeration systems was measured under two environments: standard condition using clean tap water, and culture water from the red tilapia canvas tank. Including the efficiency test in the Red tilapia culture ponds, where the fish with an average weight($\pm$ SD) of 244.92 $\pm$ 0.21 - 245.46 $\pm$ 0.15 g and an average length($\pm$ SD) of 21.16 $\pm$ 0.42 - 21.27 $\pm$ 0.23 cm were stocked at 500 fish/pond equivalent to 70.77 fish/m² or 24.74 $\pm$ 0.02 – 24.81 $\pm$ 0.03 kg/m³. Temperature and dissolved oxygen changes were recorded and subsequently used to calculate the efficiency of the three aeration systems, as well as aeration system cost and energy cost.

Main Results: Under standard environment of clean tap water, the standard oxygen transfer rate (SOTR; kgO₂.hr⁻¹) and standard aeration efficiency (SAE; kgO₂.kW⁻¹.hr⁻¹) of the micro-nanobubble aeration system showed the highest efficiency with significant difference($p<0.05$), followed by the airlift aeration system and the air disc system, respectively. Similarly, under the culture water environment, the micro-nanobubble aeration system had the significantly highest($p<0.05$) standard oxygen transfer rate (SOTR, kgO₂.hr⁻¹) and standard aeration efficiency (SAE, kgO₂.kW⁻¹.hr⁻¹). The airlift aeration system ranked second and followed by air disc aeration systems, respectively. The micro-nanobubble aeration system had the significantly lowest($p<0.05$) total aeration cost percentage($\pm$ SD) (28.69 $\pm$ 3.81%) compared to the airlift and air disc aeration systems, respectively. Additionally, the micro-nanobubble aeration system did deliver the highest cost saving($\pm$ SD) (71.31 $\pm$ 3.81%) followed by the airlift aeration system and the air disc system, respectively. Furthermore, in the red tilapia pond, the micro-nanobubble aeration system demonstrated a significantly higher ($p<0.05$) field oxygen transfer rate (OTR_f, kgO₂.hr⁻¹), aeration efficiency (AE_f, kgO₂.kW⁻¹.hr⁻¹), and power requirement (P_R; W) than those of the airlift and air disc aeration systems, respectively.

Conclusions: The micro-nanobubble aeration system, Chan shrimp model I, demonstrated the highest efficiency in increasing dissolved oxygen in water. Additionally, it reduced energy cost($\pm$ SD) as much as 57.09 $\pm$ 1.41% and 14.22 $\pm$ 2.40% compared to those of the air disc and airlift aeration systems, respectively.

Keywords : aeration system; air disc; airlift; micro-nanobubble; red tilapia

*Corresponding author. E-mail : supavadee.k@rmutsb.ac.th

บทนำ

ปลานิลแดงและปลานิลเป็นปลาน้ำจืดที่มีผลผลิตเป็นอันดับหนึ่งของประเทศไทยเป็นระยะเวลามากกว่าสิบปี โดยมีสัดส่วนของผลผลิตประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตปลาน้ำจืดทั้งหมด ในปี 2558 มีผลผลิตจากการเพาะเลี้ยงสูงเป็นอันดับหนึ่ง มีปริมาณ 205,896 ตัน (Sampantamit *et al.*, 2020) รูปแบบการเลี้ยงที่ผ่านมา ส่วนใหญ่เป็นการเลี้ยงใน

กระชังในแม่น้ำ แต่ประสบปัญหาต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม การจัดการสภาพแวดล้อมในระหว่าง การเลี้ยงทำได้ยาก การแย่งชิงทรัพยากรน้ำเพื่อการเกษตรที่เพิ่มสูงขึ้น และการเก็บภาษีการใช้น้ำจากหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น เกษตรกรจึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนรูปแบบการเลี้ยง หนึ่งในระบบที่นิยมใช้คือ การเลี้ยงปลาในกระชังในบ่อผ้าใบในโรงเรือนด้วยอัตราความหนาแน่นสูงเพิ่มมากขึ้น (Nugroho *et al.*, 2024) เนื่องจาก ผลผลิตที่ได้สูง มีการเปลี่ยนน้ำบ่อย และง่ายต่อการจัดการ ภายใต้สภาวะการเลี้ยงแบบหนาแน่น ปริมาณออกซิเจนที่ ละลายในน้ำมีผลกระทบต่อ พฤติกรรมการกินอาหาร การเจริญเติบโต และการตอบสนองด้านต่างๆ ของสัตว์น้ำ (metabolic responses) ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีระบบเติมอากาศที่มีประสิทธิภาพเพื่อรักษาและเพิ่มระดับออกซิเจน ที่ละลายในน้ำ ซึ่งเป็นดัชนีคุณภาพน้ำที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และ สุขภาพสัตว์น้ำ (Roy *et al.*, 2021) โดยค่าที่เหมาะสมควรมีค่ามากกว่า 5 มิลลิกรัม/ลิตร (Abdel-Tawwab *et al.*, 2015)

ปัจจุบันระบบเติมอากาศในบ่อเลี้ยงปลาในโรงเรือนที่นิยมใช้ได้แก่ ระบบเติมอากาศแบบ โบลเวอร์ (blower) ร่วมกับการใช้หัวทราย (air stone) หรือจานจ่ายอากาศ (air disc) และระบบเติมอากาศแบบ แอร์ลิฟท์ (airlift) (Boyd, 1998) โดยระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์จะช่วยเพิ่มระดับออกซิเจนละลายในน้ำ อย่างต่อเนื่องและทำให้มีการหมุนเวียน ของน้ำ ทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเติมอากาศแบบดั้งเดิมเช่น หัวทรายและ ปั๊มน้ำหยอชิง (centrifugal pump) รวมทั้งยังลดการใช้พลังงาน แต่ในปัจจุบันมีการพัฒนาระบบการเติมอากาศด้วย เทคโนโลยีสมัยใหม่คือ ระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล (micro-nanobubbles) ซึ่งในต่างประเทศมีการใช้อย่าง แพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การรักษาโรคผิวหนัง การฆ่าเชื้อโรคในผักและอาหาร เป็นต้น สำหรับการเลี้ยงปลาแบบ หนาแน่นด้วยอัตราการปล่อย 100-300 ตัว/ตารางเมตร (Green *et al.*, 2024) ระบบเติมอากาศนาโนบับเบิลเป็นเทคโนโลยี สามารถช่วยรักษาระดับออกซิเจนละลายในน้ำให้คงที่ กระตุ้นให้เกิดจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ เพิ่มการเจริญเติบโตของสัตว์ น้ำ และลดปริมาณแบคทีเรียที่ก่อโรค ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงต่อโรคระบาดในสัตว์น้ำ (Mahasri *et al.*, 2018) เนื่องจาก คุณสมบัติของระบบเติมอากาศสามารถเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำได้สูงและใช้พลังงานน้อย (Wu *et al.*, 2022) แต่การ นำมาใช้ประโยชน์ในวงการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของประเทศไทย โดยเฉพาะการเลี้ยงปลาแบบหนาแน่นยังมีน้อย ทั้งที่ระบบ เติมอากาศแบบนี้สามารถเพิ่มออกซิเจนที่ละลายในน้ำได้ดี ปล่อยฟองอากาศขนาดเล็ก แขนงลอยอยู่ในน้ำได้นาน นอกจากนี้ฟองอากาศขนาดเล็กนี้สามารถจะฆ่าหรือลดแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ ส่งผลให้ลดการใช้ยาปฏิชีวนะ เพิ่มอัตราการเจริญโต เพิ่มผลผลิตของสัตว์น้ำ และเป็นระบบการเลี้ยงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Yaparathne *et al.*, 2024) แต่ขาดข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศชนิดนี้ และนำไปเปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิม (หัวทราย หรือ จานจ่าย) เครื่องไมโครนาโนบับเบิล "Chan Shrimp Model I" ได้พัฒนาประดิษฐ์ โดย นายวีระ ศรีสาม เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้ง และกรรมการชมรมผู้เลี้ยงกุ้งจันทบุรี เพื่อนำมาใช้ในฟาร์มของสมาชิกชมรมผู้เลี้ยงกุ้งฯ และทดสอบประสิทธิภาพใน ห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบการใช้เครื่องไมโครนาโนบับเบิล รุ่น Chan Shrimp Model I ร่วมกับการใช้ความเข้มข้นของ ออกซิเจนในอากาศ 99 % พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการละลายได้ของออกซิเจนในน้ำเพิ่มสูงขึ้นถึง 400 เปอร์เซ็นต์ และยังผลิตฟองออกซิเจนขนาดไมโครและนาโนที่มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร

งานวิจัยที่มีการประเมินประสิทธิภาพระบบเติมอากาศชนิดต่างๆ มักจะใช้ค่าดังต่อไปนี้ในการประเมิน ได้แก่ ค่ามาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (standard oxygen transfer rate; SOTR) และ ค่าประสิทธิภาพของเครื่องให้อากาศ (standard aeration efficiency; SAE) เป็นตัวชี้วัด ซึ่งค่า SAE จะเป็นตัวชี้วัดที่ดีกว่า เนื่องจากเป็น ค่า SOTR ต่อ

หน่วยพลังงาน โดย SOTR หมายถึง มวลของออกซิเจนที่ระบบเติมอากาศเติมลงในมวลน้ำต่อหน่วยเวลาในสภาวะมาตรฐาน (Dayoğlu, 2022) ส่วนค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลา (field oxygen transfer rate; OTR_f) และค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องให้อากาศ (aeration efficiency; AE_f) จะเป็นประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศในสภาวะการเลี้ยงจริง และ ค่าความต้องการพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเปิดเครื่องให้อากาศของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (power requirement; P_R) ที่จะใช้ในการเปิดเครื่องให้อากาศตามความต้องการของบ่อ (Roy *et al.*, 2022)

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศไมโครนาโนบับเบิลรุ่น Chan shrimp model I เปรียบเทียบกับระบบเติมอากาศแบบจานจ่ายอากาศ และ แอร์ลิฟท์ ในบ่อเลี้ยงปลานิลแดงแบบหนาแน่นในโรงเรือน ในรูปของค่า SOTR, SAE, OTR_f , AE_f และ P_R เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกใช้ระบบเติมอากาศที่เหมาะสม

วิธีดำเนินการวิจัย

ปัจจัยที่ศึกษา

วางแผนแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (randomized complete block design; RCBD) โดย block ของการศึกษานี้คือ รอบของการทดลองหรือวันที่ทดลอง ประกอบด้วย 3 ชุดการทดลอง (treatment) คือ ชุดการทดลองที่ 1 ระบบเติมอากาศแบบจานจ่ายอากาศ ชุดการทดลองที่ 2 ระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ และ ชุดการทดลองที่ 3 ระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล รุ่น Chan shrimp model I ที่ใช้ความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศ 99 % แต่ละชุดการทดลองมีจำนวน 3 ซ้ำ (3 วัน)

การเตรียมบ่อทดลอง

บ่อผ้าใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร สูง 1 เมตร จำนวน 3 บ่อ เติมน้ำลึก 0.7 เมตร ปริมาตรน้ำ 4.95 ลูกบาศก์เมตร ตรวจวัดค่าคุณภาพน้ำเริ่มต้น พบว่ามีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเฉลี่ย ($\pm$ SD) 7.25 ± 0.01 แอมโมเนียรวมทั้งหมดเฉลี่ย ($\pm$ SD) 0.03 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร และออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ย ($\pm$ SD) 5.26 ± 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร

การเตรียมระบบเติมอากาศ

- ระบบเติมอากาศแบบจานจ่ายอากาศ ประกอบด้วยเครื่องผลิตอากาศแบบโบลเวอร์ ที่มีกำลังไฟ 0.75 kW ผลิตอากาศ 1,500 ลิตร/นาที จ่ายอากาศด้วยอัตรา 100 ลิตร/นาที ผ่านจานจ่ายอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 เซนติเมตร จำนวน 2 จาน/บ่อ (Figure 1a)

- ระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ ประกอบด้วยเครื่องผลิตอากาศแบบโบลเวอร์ ที่มีกำลังไฟ 0.75 kW ผลิตอากาศ 1,500 ลิตร/นาที จ่ายอากาศด้วยอัตราด้วยอัตรา 100 ลิตร/นาที ผ่านท่ออากาศ (air tube) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.63 นิ้ว ที่มีความยาว 56 เซนติเมตร จำนวน 5 เส้น ติดตั้งอยู่ในโครงรูปทรงสามเหลี่ยมที่ทำจากท่อพีวีซี ที่มีแผ่นพลาสติกเพื่อควบคุมทิศทางลม (Figure 1b) สามารถหมุนเวียนน้ำในอัตรา 325.3 ± 4.76 ลิตร/นาที

- ระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลรุ่น Chan Shrimp model I ประกอบด้วย ปั๊มน้ำยี่ห้อ Dayuan รุ่น HM 4-5 ที่มีกำลังไฟ 1.0 kW อัตราการไหลของน้ำผ่านปั๊ม 100 ลิตร/นาที สูบน้ำผสมกับอากาศที่มีความเข้มข้นของออกซิเจน 99 % และปรับแรงดันอากาศให้อยู่ในระดับที่ไม่เกิน 0.5 ปอนด์/ตารางนิ้ว โดยจ่ายอากาศผ่านช่องจ่ายขนาด 1 มิลลิเมตร ผสมกับน้ำที่สูบน้ำด้วยปั๊มแรงดันสูงอัดผ่านชุดอุปกรณ์ที่ผลิตไมโครนาโนบับเบิลที่ผลิตจากท่อพีวีซี (PVC) ขนาด 2 นิ้ว

ในสภาพปิด ลดขนาดปลายท่อที่น้ำผสมอากาศออกเหลือ 0.5 นิ้ว ส่งผลให้เกิดการหมุนเวียนผสมกันระหว่างน้ำกับฟองอากาศ เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมโครนาโน (Figure 1c)

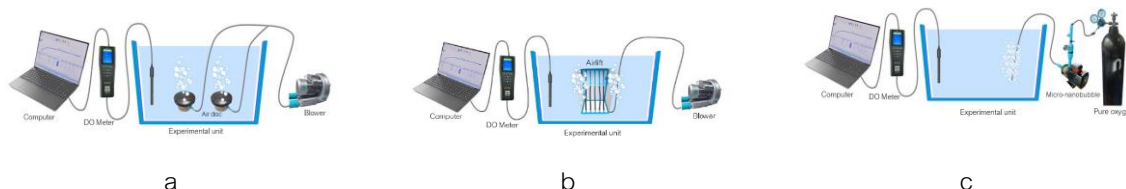


Figure 1 Schematic of experimental unit of aeration systems, a) air disc, b) airlift and c) micro-nanobubble.

การเตรียมปลาทดลอง

ปลานิลแดงที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นปลาจากฟาร์มในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์การประมง คัดปลาที่มีขนาดใกล้เคียงกัน จำนวน 4,500 ตัว ทำการพักปลาไว้ 7 วันในบ่อผ้าใบ เพื่อให้ปลานิลแดงปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อม ก่อนนำมาใช้ในการทดลอง ปลอยลูกปลานิลแดงจำนวน 500 ตัวต่อบ่อ และสุ่มปลาจำนวน 50 ตัวต่อบ่อ เพื่อวัดความยาวด้วยเครื่องวัดความยาวเวอร์เนียดิจิทัล (digital vernier caliper) และชั่งน้ำหนักปลาด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง นำข้อมูลปลาที่ชั่งวัดของแต่ละชุดการทดลองไปคำนวณพบว่า ปลามีน้ำหนักเฉลี่ย ($\pm$ SD) อยู่ในช่วง 244.92 ± 0.21 - 245.46 ± 0.15 กรัม และมีความยาวเฉลี่ย ($\pm$ SD) อยู่ในช่วง 21.16 ± 0.42 - 21.27 ± 0.23 เซนติเมตร ตามลำดับ (อัตราความหนาแน่น 70.77 ตัว/ตารางเมตร; 24.74 ± 0.02 - 24.81 ± 0.03 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

การทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้จะมีการเก็บข้อมูล 2 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) เก็บข้อมูลหาค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศของระบบเติมอากาศในน้ำสะอาด

เติมน้ำสะอาด (น้ำประปา) ลงไปในบ่อทดลอง เติมน้ำโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) ลงไปเพื่อปรับให้ออกซิเจนที่ละลายในน้ำเป็นศูนย์มิลลิกรัมต่อลิตร เปิดระบบเติมอากาศตามที่กำหนดไว้แต่ละชุดการทดลอง คือ 1) ระบบเติมอากาศแบบจานจ่ายอากาศ 2) ระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ และ 3) ระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศ 99 % จดบันทึกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำทุก 1 นาที และสิ้นสุดการทดลองเมื่อค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำถึงจุดอิ่มตัว เก็บข้อมูลทั้งสองพารามิเตอร์ด้วยเครื่องวัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำรุ่น Prosolo (YSI) วัดจำนวน 2 จุดต่อบ่อ โดยห่างจากจุดปล่อยฟองอากาศ 1.5 เมตร และ 3.0 เมตร นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยและนำข้อมูลไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศดังสมการ (1)-(4) ต่อไป

2) เก็บข้อมูลหาค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศในบ่อเลี้ยงปลานิลแดง

2.1 เก็บข้อมูลหาความต้องการออกซิเจนของน้ำจากบ่อเลี้ยงปลานิลแดง โดยนำน้ำที่ผ่านการเลี้ยงปลานิลแดงใส่ในบ่อทดลอง (ไม่มีปลา) เปิดระบบเติมอากาศตามที่กำหนดไว้แต่ละชุดการทดลอง จดบันทึกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำทุก 1 นาที และสิ้นสุดการทดลองเมื่อค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำถึงจุดอิ่มตัว เก็บข้อมูลทั้งสองพารามิเตอร์ด้วยเครื่องวัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำรุ่น Prosolo (YSI) วัดจำนวน 2 จุดต่อบ่อ

โดยห่างจากจุดปล่อยฟองอากาศ 1.5 เมตร และ 3.0 เมตร นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยและนำข้อมูลไปคำนวณหา α และค่าความต้องการออกซิเจนรวมในน้ำของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (ไม่มีปลา)

2.2 ปลอยปลานิลแดงที่มีน้ำหนักเฉลี่ย($\pm$ SD) อยู่ในช่วง 244.92 ± 0.21 - 245.46 ± 0.15 กรัม และมีความยาวเฉลี่ย($\pm$ SD) อยู่ในช่วง 21.16 ± 0.42 - 21.27 ± 0.23 เซนติเมตร ตามลำดับ ลงในบ่อทดลอง จำนวน 500 ตัว/บ่อ และเปิดระบบเติมอากาศตามที่กำหนดไว้แต่ละชุดการทดลอง (Figure 2) จัดบันทึกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำทุก 1 นาที และสิ้นสุดการทดลองเมื่อค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำถึงจุดอิ่มตัว เก็บข้อมูลทั้งสองพารามิเตอร์ด้วยเครื่องวัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำรุ่น ProSolo (YSI) วัดจำนวน 2 จุดต่อบ่อ ห่างจากจุดปล่อยฟองอากาศ 1.5 เมตร และ 3.0 เมตร นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยและนำข้อมูลไปคำนวณหา ประสิทธิภาพของอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลา ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของระบบเติมอากาศ และความต้องการพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเปิดเครื่องให้อากาศของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังสมการ (5)-(7)

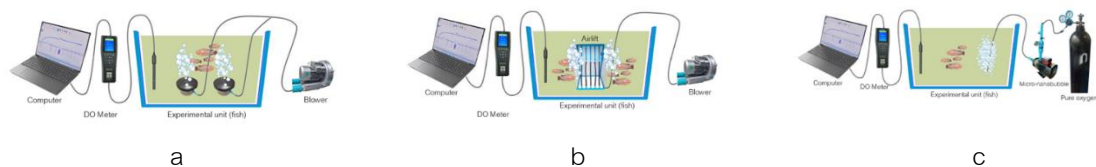


Figure 2 Schematic of experimental unit of aeration systems with fish, a) air disc, b) airlift and c) micro-nanobubble.

การเก็บข้อมูลและการคำนวณข้อมูล

เก็บข้อมูลของอุณหภูมิ และค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำทุก 1 นาที จนค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำถึงจุดอิ่มตัว จะนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณดังสมการที่ 1-7

1) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$; hr^{-1})

$$K_L a = \ln D_2 - \ln D_1 / (t_2 - t_1) \quad (\text{Boyd, 2019}) \quad (1)$$

D_1 = ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ 20 % ของจุดอิ่มตัว ณ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง

D_2 = ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ 80 % ของจุดอิ่มตัว ณ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง

T_1 = ระยะเวลา (นาที) ที่ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นได้ 20 % ของจุดอิ่มตัว

T_2 = ระยะเวลา (นาที) ที่ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นได้ 80 % ของจุดอิ่มตัว

ค่า $K_L a$ ที่คำนวณได้จากสูตรจะนำไปหารด้วย 60 นาทีเพื่อเทียบระยะเวลาให้เป็นชั่วโมง

2) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิของน้ำ 20 องศาเซลเซียส ($K_L a_{20}$; hr^{-1}) ซึ่งเป็นสภาวะมาตรฐาน

$$K_L a_{20} = K_L a / 1.024^{(20-T)} \quad (\text{Dayioglu, 2022}) \quad (2)$$



$K_L a_{20}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะอุณหภูมิมาตรฐาน (hr^{-1})

$K_L a$ = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะที่ทำการทดลอง (hr^{-1})

T = อุณหภูมิที่ทำการทดลอง ($^{\circ}C$)

3) ค่ามาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (standard oxygen transfer rate; SOTR; $kgO_2 \cdot hr^{-1}$)

$$SOTR = K_L a_{20} \times a \times V \times 10^{-3} \quad (\text{Dayioglu, 2022}) \quad (3)$$

a = ปริมาณออกซิเจนที่อิ่มตัวในน้ำจืดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งในน้ำจืดมีค่าเท่ากับ 9.09 มิลลิกรัมต่อลิตร (APHA, AWWA & WEF, 2017)

V = ปริมาณน้ำที่บรรจุในบ่อ (ลูกบาศก์เมตร)

4) ค่าประสิทธิภาพของเครื่องให้อากาศ (standard aeration efficiency; SAE; $kgO_2 \cdot kW^{-1} \cdot hr^{-1}$)

$$SAE = SOTR / P \quad (\text{Dayioglu, 2022}) \quad (4)$$

P = กำลังไฟฟ้าของระบบเติมอากาศ (kW)

5) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลา (field oxygen transfer rate; OTR_f ; $kgO_2 \cdot hr^{-1}$)

$$OTR_f = [SOTR \times \alpha \times 1.024^{T-20} (\beta C_s - C_p)] / 9.07 \quad (\text{Roy et al., 2022}) \quad (5)$$

C_s = ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 100 % ณ อุณหภูมิที่ทดลองในสภาพบ่อเลี้ยงปลา ($mg \cdot L^{-1}$)

C_p = ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่ตรวจวัดในสภาพบ่อเลี้ยงปลา ($mg \cdot L^{-1}$)

T = อุณหภูมิในบ่อทดลอง (องศาเซลเซียส)

α = $K_L a_{20}$ ของน้ำในบ่อเลี้ยงปลา / $K_L a_{20}$ ของน้ำสะอาด

$K_L a_{20}$ ของน้ำในบ่อเลี้ยงปลา = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สภาพการเลี้ยงปลา

$K_L a_{20}$ ของน้ำสะอาด = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน

β = ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำของบ่อเลี้ยงปลา ณ จุดอิ่มตัว / ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสะอาด ณ จุดอิ่มตัว

6) ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของระบบเติมอากาศ (aeration efficiency; AE_f ; $kgO_2 \cdot kW^{-1} \cdot hr^{-1}$) ในสภาพบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

$$AE_f = [SAE \{ \alpha \times 1.024^{(T-20)} (\beta C_s - C_p) \} / 9.07] \quad (\text{Roy et al., 2022}) \quad (6)$$

$$\alpha = K_L a_{20} \text{ pond water} / K_L a_{20} \text{ clean water}$$

β = ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำของบ่อเลี้ยงปลา ณ จุดอิมิตว / ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำสะอาด ณ จุดอิมิตว

C_s = ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ 100 % ณ อุณหภูมิที่ทดลองในสภาพบ่อเลี้ยงปลา (mg.L^{-1})

C_p = ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่ตรวจวัดในสภาพบ่อเลี้ยงปลา (mg.L^{-1})

7) ค่าความต้องการพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเปิดระบบเติมอากาศของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (power requirement; P_R ; W) ที่จะใช้ในการเปิดเครื่องให้อากาศตามความต้องการของบ่อ

$$P_R = (\text{TOD}/A E_f) \times 1000 \quad (\text{Roy et al., 2022}) \quad (7)$$

$A E_f$ = ประสิทธิภาพของเครื่องให้อากาศ ($\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$)

TOD = ค่าความต้องการออกซิเจนรวมทั้งหมดของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ($\text{kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$)

8) ข้อมูลต้นทุนของระบบเติมอากาศ

ในการศึกษานี้ เก็บข้อมูลต้นทุนของระบบเติมอากาศทั้ง 3 ระบบ (อุปกรณ์จ่ายอากาศ บั๊มลม บั๊มสูบน้ำ และถังออกซิเจน) ต้นทุนค่าไฟฟ้า (กำลังไฟและค่าไฟฟ้า) เพื่อนำมาคำนวณหาต้นทุนรวมของระบบเติมอากาศ ต้นทุนค่าไฟฟ้า เปอร์เซ็นต์ต้นทุนรวมของระบบเติมอากาศ และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การลดต้นทุนรวมของระบบเติมอากาศ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ค่ามาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ค่าประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศของน้ำสะอาด ค่าเปอร์เซ็นต์ต้นทุนรวมของระบบเติมอากาศ ค่าเปอร์เซ็นต์การลดต้นทุนรวมของระบบเติมอากาศ ค่าประสิทธิภาพของอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลา ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของระบบเติมอากาศ ความต้องการพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเปิดระบบเติมอากาศของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำของทั้งสามชุดการทดลอง มาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) แบบ one way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

สถานที่และช่วงระยะเวลาทำการทดลอง

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ระหว่างเดือน กุมภาพันธ์ ถึง เดือน มีนาคม พ.ศ. 2567

ผลการวิจัย

ประสิทธิภาพการเติมอากาศของระบบเติมอากาศในน้ำสะอาด

ค่ามาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (SOTR) ของระบบเติมอากาศทั้ง 3 ระบบ พบว่าค่า SOTR ($\pm$ SD) ของระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล ($0.153 \pm 0.007 \text{ kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$) มีค่ามากที่สุด ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมี

นัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ ($0.064 \pm 0.005 \text{ kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$) และระบบเติมอากาศแบบจวนจ่ายอากาศ ($0.030 \pm 0.001 \text{ kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$) ดัง Table 1

ค่ามาตรฐานของประสิทธิภาพการให้อากาศ (SAE) ของระบบเติมอากาศทั้ง 3 ระบบ พบว่าค่า SAE ($\pm \text{SD}$) ของระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล ($0.153 \pm 0.007 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$) มีค่ามากที่สุด ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ ($0.084 \pm 0.006 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$) และระบบเติมอากาศแบบจวนจ่ายอากาศ ($0.040 \pm 0.001 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$) ดัง Table 1

ระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มออกซิเจนที่ละลายในน้ำจาก 20 เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของจุดอิ่มตัวของระบบเติมอากาศทั้ง 3 ระบบ พบว่า ระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล ใช้เวลาน้อยที่สุดเฉลี่ย ($\pm \text{SD}$) ในการเพิ่มออกซิเจนที่ละลายในน้ำ เท่ากับ 35.21 ± 5.48 นาที ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ (69.14 ± 3.87 นาที) และระบบเติมอากาศแบบจวนจ่ายอากาศ (161.03 ± 3.71 นาที) ดัง Table 1

Table 1 Oxygen transfer coefficient ($K_L a$), oxygen transfer coefficient at 20°C ($K_L a_{20}$), standard oxygen transfer rate (SOTR) and standard aeration efficiency (SAE) in clean water.

clean water	aeration systems			F	p-value
	blower + air disc	blower + airlift	micro- nanobubbles		
$K_L a \text{ (hr}^{-1}\text{)}$	0.517 ± 0.013	1.069 ± 0.073	2.640 ± 0.122		
$K_L a_{20} \text{ (hr}^{-1}\text{)}$	0.674 ± 0.021	1.412 ± 0.095	3.363 ± 0.156		
Duration time, $\text{DO}_{20\%} - \text{DO}_{80\%} \text{ (min)}$	161.03 ± 3.71	69.14 ± 3.87	35.21 ± 5.48		
SOTR ($\text{kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$)	0.030 ± 0.001^c	0.064 ± 0.005^b	0.153 ± 0.007^a	517.028	0.000
SAE ($\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$)	0.040 ± 0.010^c	0.084 ± 0.006^b	0.153 ± 0.007^a	363.788	0.00

Note : The data presented were means $\pm$ SD, the superscript letters within the same row indicate significantly difference ($p < 0.05$) among treatments.

ความชันของสมการเส้นตรงของกราฟระหว่าง $\ln \text{DO}$ กับระยะเวลาที่ใช้ ($20 \rightarrow 80\% \text{ sat}$) พบว่า ค่าความชันของสมการของ ระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลมีค่ามากที่สุด (0.0406) ในขณะที่ระบบเติมอากาศแบบ แอร์ลิฟท์ มีค่า 0.0208 และระบบเติมอากาศแบบจวนจ่ายอากาศ มีค่า 0.0082 ดัง Figure 3

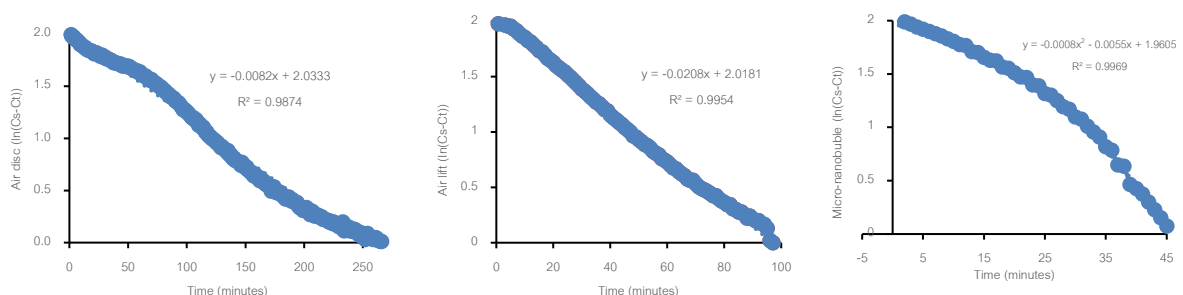


Figure 3 Overall oxygen transfer coefficient ($K_L a; \text{hr}^{-1}$) for performance calculation of 3 different aeration systems: (a) air disc, (b) airlift, and (c) micro-nanobubble.

การเปรียบเทียบต้นทุนของระบบเดิมอากาศ

การคำนวณต้นทุนวัสดุอุปกรณ์ของระบบเดิมอากาศทั้งสามระบบ พบว่าเมื่อคำนวณค่าเสื่อมสภาพแล้ว (Table 2) ต้นทุนวัสดุอุปกรณ์ของระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลมีค่าสูงสุด (11.81 บาท/วัน) รองลงมาคือ ระบบเดิมอากาศแบบแอริลฟท์ (9.51 บาท/วัน) และระบบเดิมอากาศแบบจาง่ายอากาศ (9.30 บาท/วัน) การคำนวณต้นทุนค่าไฟฟ้าของระบบเดิมอากาศทั้งสามระบบ พบว่าต้นทุนของระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลมีค่าสูงสุด (4.10 บาท/ชั่วโมง) รองลงมาคือ ระบบเดิมอากาศแบบจาง่ายอากาศ (3.09 บาท/ชั่วโมง) และระบบเดิมอากาศแบบแอริลฟท์ (3.09 บาท/ชั่วโมง) (Table 2) ส่วนการคำนวณต้นทุนรวม (ต้นทุนวัสดุอุปกรณ์และต้นทุนค่าไฟฟ้า) ของทั้งสามระบบเดิมอากาศ เพื่อเพิ่มออกซิเจนที่ละลายในน้ำจาก 20 เปอร์เซ็นต์ไปเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ต้นทุนรวมเฉลี่ยของระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลมีค่าต่ำที่สุด (2.69 บาท) รองลงมาคือระบบเดิมอากาศแบบแอริลฟท์ (4.02 บาท) และระบบเดิมอากาศแบบ จาง่ายอากาศ (9.36 บาท) (Table 2) เมื่อนำข้อมูลเปอร์เซ็นต์ต้นทุนรวมเฉลี่ยของระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลและ แบบแอริลฟท์ เพื่อเพิ่มออกซิเจนที่ละลายในน้ำจาก 20 เปอร์เซ็นต์ไปเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ไปเปรียบเทียบกับต้นทุนรวมของระบบเดิมอากาศแบบจาง่าย และนำไปวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า ระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลมีเปอร์เซ็นต์ต้นทุนรวมของระบบเดิมอากาศต่ำที่สุด มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับระบบเดิมอากาศแบบแอริลฟท์และแบบจาง่ายอากาศ มีค่าเปอร์เซ็นต์ต้นทุนรวม($\pm$ SD) 28.69 ± 3.81 และ 42.91 ± 1.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Table 2) เมื่อนำข้อมูลเปอร์เซ็นต์การลดต้นทุนรวมของระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลและ แอริลฟท์ เพื่อเพิ่มออกซิเจนที่ละลายในน้ำจาก 20 เปอร์เซ็นต์ไปเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ไปเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การลดต้นทุนรวม($\pm$ SD)ของระบบเดิมอากาศแบบจาง่ายอากาศ พบว่า ระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลลดต้นทุนได้สูงถึง 71.31 ± 3.81 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ระบบเดิมอากาศแบบแอริลฟท์ ลดต้นทุนได้ 57.09 ± 1.41 เปอร์เซ็นต์ (Table 2) และเมื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า เปอร์เซ็นต์การลดต้นทุนรวมของระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)กับระบบเดิมอากาศแบบแอริลฟท์และระบบเดิมอากาศแบบจาง่ายอากาศ (Table 2)

ประสิทธิภาพการเดิมอากาศของระบบเดิมอากาศในน้ำภายในบ่อเลี้ยงปลาจริง

การประเมินอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาพการเลี้ยงจริงที่มีปลานิลแดง น้ำหนักเฉลี่ย($\pm$ SD) 245.46 ± 0.05 กรัม จำนวน 500 ตัว/บ่อ ทำการศึกษา 4 ระดับ คือ ค่า OTR_t ในระดับที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ระดับที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ระดับที่ 70 เปอร์เซ็นต์ และระดับที่ 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีค่าดังต่อไปนี้

ค่าแอลฟา (α)($\pm$ SD) ของเครื่องให้อากาศ (AE_p) ของระบบเดิมอากาศทั้ง 3 ระบบ พบว่าค่าแอลฟาของระบบเดิมอากาศแบบจาง่ายอากาศมีค่ามากที่สุด (1.060 ± 0.032) ตามด้วยระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล (1.008 ± 0.046) และระบบเดิมอากาศแบบ แอริลฟท์ (0.887 ± 0.060) ตามลำดับ ดัง Table 3

ค่าเบตา (β)($\pm$ SD) ของเครื่องให้อากาศ (AE_p) ของระบบเดิมอากาศทั้ง 3 ระบบ พบว่าค่าเบตาของระบบเดิมอากาศแบบจาง่ายอากาศมีค่ามากที่สุด (1.028 ± 0.005) ตามด้วยระบบเดิมอากาศแบบแอริลฟท์ (1.027 ± 0.000) และระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล (1.005 ± 0.001) ตามลำดับ ดัง Table 3

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลา (OTR_p) ของระบบเดิมอากาศทั้ง 3 ระบบ ในระดับออกซิเจนละลายในน้ำอิ่มตัว 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่า OTR_p ($\pm$ SD) ของระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลมีค่ามากที่สุด(0.033 ± 0.000)

$\text{kgO}_2\cdot\text{hr}^{-1}$) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับระบบเติมอากาศแบบ แอร์ลิฟท์ (0.010 ± 0.000 $\text{kgO}_2\cdot\text{hr}^{-1}$) และระบบเติมอากาศแบบจวนจ่ายอากาศ (0.005 ± 0.001 $\text{kgO}_2\cdot\text{hr}^{-1}$) ดัง Table 3

ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องให้อากาศ (AE_r) ของระบบเติมอากาศทั้ง 3 ระบบ พบว่าค่า AE_r ($\pm\text{SD}$) ของระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลมีค่ามากที่สุด (0.033 ± 0.000 $\text{kgO}_2\cdot\text{KW}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับระบบเติมอากาศแบบ แอร์ลิฟท์ (0.013 ± 0.000 $\text{kgO}_2\cdot\text{KW}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$) และระบบเติมอากาศแบบจวนจ่ายอากาศ (0.006 ± 0.001 $\text{kgO}_2\cdot\text{KW}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$) ดัง Table 3

ค่าความต้องการพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเปิดระบบเติมอากาศของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (P_R) ในการทดลองครั้งนี้ เป็นการเลี้ยงปลานิลแดงที่มีอัตราความหนาแน่นเท่ากับ 24.79 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ค่าความต้องการพลังงานทั้งหมดของระบบเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 ระบบ ในระดับที่ 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่า P_R ($\pm\text{SD}$) ของระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลมีความต้องการใช้พลังงานน้อยที่สุด (43.25 ± 0.01 W) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ระบบเติมอากาศแบบ แอร์ลิฟท์ (83.17 ± 0.00 W) และระบบเติมอากาศแบบจวนจ่ายอากาศ (218.61 ± 2.46 W) ดัง Table 3

Table 2 Aeration system cost, energy cost and total aeration cost of 3 aeration systems.

aeration cost	aeration systems		
	blower+ air disc	blower+ airlift	micro- nanobubble
1) aeration system cost (THB.day ⁻¹)	9.30	9.51	11.81
• aeration apparatuses (1 year service life; THB/day)	0.69	0.90	1.53
• oxygen tank (5 years service life; THB/day)	0	0	2.22
• blower (5 years service life; THB/day)	8.61	8.61	0
• submersible pump (5 years service life; THB/day)	0	0	8.06
2) energy cost (THB/h)	3.09	3.09	4.10
• System power (kW.hr ⁻¹)	0.74	0.74	0.98
• Electricity cost per unit (THB)	4.18	4.18	4.18
3) average total aeration cost (THB)	9.36	4.02	2.69
• average duration time ($\pm\text{SD}$), $\text{DO}_{20\%}$ - $\text{DO}_{80\%}$ (min)	161.03 $\pm$ 3.71 ^c	69.14 $\pm$ 3.87 ^b	35.21 $\pm$ 5.48 ^a
• average total aeration cost (%)	100.00 $\pm$ 0.00 ^c	42.91 $\pm$ 1.41 ^b	28.69 $\pm$ 3.81 ^a
• cost saving (%)	0.00 $\pm$ 0.00 ^c	57.09 $\pm$ 1.41 ^b	71.31 $\pm$ 3.81 ^a

Note : The data presented were means $\pm$ SD, the superscript letters within the same row indicate significantly difference ($p<0.05$) among treatments.

Table 3 Oxygen transfer rate (OTR_f), aeration efficiency (AE_f) and power requirement (P_R) in fish pond.

in fish pond	aeration systems		
	blower + air disc	blower + airlift	micro-nanobubbles
Alpha (α)	1.060±0.032	0.887±0.060	1.008±0.046
Beta (β)	1.028±0.005	1.027±0.000	1.005±0.001
OTR_f 80%sat ($kgO_2 \cdot hr^{-1}$)	0.009±0.001 ^c	0.017±0.001 ^b	0.032±0.001 ^a
AE_f ($kgO_2 \cdot kW^{-1} \cdot hr^{-1}$)	0.009±0.001 ^c	0.017±0.001 ^b	0.032±0.001 ^a
P_R (W)	327.92±3.69 ^c	108.76±0.01 ^b	44.61±0.01 ^a

Note: The data presented were means±SD, the superscript letters within the same row indicate significantly difference ($p<0.05$) among treatments. %sat= percentage of saturation of dissolved oxygen.

วิจารณ์ผลการวิจัย

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศที่แตกต่างกัน 3 ระบบในบ่อเลี้ยงปลานิลแดงแบบหนาแน่นในโรงเรือนพบว่า

ในน้ำสะอาดระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลรุ่น Chan Shrimp Model I มีค่ามาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ($SOTR$; $kgO_2 \cdot hr^{-1}$) และค่ามาตรฐานของประสิทธิภาพการให้อากาศ (SAE ; $kgO_2 \cdot kW^{-1} \cdot hr^{-1}$) ดีที่สุด และระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มออกซิเจนที่ละลายในน้ำอิ่มตัวจาก 20 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์สั้นที่สุด มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับระบบเติมอากาศแบบจายอากาศ และระบบเติมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ เนื่องจากระบบไมโครนาโนบับเบิลผลิตฟองอากาศขนาดเล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดไมโครเมตรและนาโนเมตร ส่งผลให้ฟองอากาศเหล่านี้สามารถแขวนลอยอยู่ในมวลน้ำได้นาน ทำให้มวลน้ำมีลักษณะเป็นสีนํ้านมขาวขุ่น (Khan *et al.*, 2020) ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กเหล่านี้ ทำให้ระยะเวลาของฟองอากาศแขวนลอยอยู่ในน้ำ (contact time) นานขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวและก๊าซเพิ่มขึ้นและฟองอากาศขนาดเล็กเหล่านี้มีพื้นที่ผิวมาก จึงเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนออกซิเจนจากฟองอากาศสู่น้ำได้ดีขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Navisa *et al.* (2014) รายงานว่า เครื่องเติมอากาศที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเลี้ยงปลา ต้องเป็นเครื่องเติมอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดเล็ก ที่สามารถแพร่กระจายในน้ำได้ดี และมีการสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำเป็นเวลานาน

นอกเหนือจากคุณสมบัติของเครื่องเติมอากาศพบว่า ปัจจัยสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลอง กำลังไฟฟ้า (Dayioglu, 2022) ความลึกของน้ำ ระยะเวลาของฟองอากาศแขวนลอยอยู่ในน้ำ และ ความเค็มของน้ำ เป็นต้น (Boyd, 1998)

Boyd (1998) รายงานว่าความลึกของน้ำส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเติมอากาศ ถ้าปล่อยฟองอากาศในน้ำที่ตื้น ฟองอากาศจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวน้ำได้เร็วขึ้น ทำให้ระยะเวลาของฟองอากาศที่แขวนลอยอยู่ในน้ำสั้นลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการเติมอากาศลดลง แต่ในการศึกษครั้งนี้ระบบเติมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลปล่อยฟองอากาศในน้ำระดับความลึกประมาณ 40 เซนติเมตรจากผิวน้ำ ซึ่งดีกว่าระบบเติมอากาศแบบจายอากาศ และแบบแอร์ลิฟท์ที่ปล่อยฟองอากาศบริเวณพื้นก้นบ่อทดลอง (ความลึก 70 เซนติเมตร) แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ประสิทธิภาพของระบบเติม

อากาศไมโครนาโนบับเบิลสูงกว่าระบบเดิมอากาศแบบแอโรลิฟท์และจานจ่ายอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากฟองอากาศที่มีขนาดเล็กมากเหล่านี้ ส่งผลให้สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้นาน เคลื่อนที่ขึ้นสู่อากาศช้ามาก ประกอบด้วยแหล่งของออกซิเจนที่เข้ามาจากออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถแลกเปลี่ยนและเพิ่มออกซิเจนที่ละลายในน้ำได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นเหตุผลที่อธิบายได้ว่า ระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล ใช้ระยะเวลาในการเพิ่มออกซิเจนที่ละลายในน้ำจาก 20 เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของจุดอิ่มตัวน้อยที่สุด

ค่ามาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (SOTR) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบเดิมอากาศโดยวัดในรูปของอัตราการแลกเปลี่ยนออกซิเจนจากอากาศสู่น้ำ และค่ามาตรฐานของประสิทธิภาพการให้อากาศ (SAE) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกประสิทธิภาพของระบบเดิมอากาศหรือเครื่องเดิมอากาศ ผลจากการศึกษาครั้งนี้พบว่า ระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิลที่มีกำลังไฟ 1 กิโลวัตต์ (kW) มีค่า SOTR เท่ากับ $0.153 \pm 0.007 \text{ kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$ และ ค่า SAE เท่ากับ $0.153 \pm 0.007 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ซึ่งค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Taukhid *et al.* (2021) ที่ทำการศึกษาศักยภาพเครื่องนาโนบับเบิลสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้กำลังไฟฟ้า 160 W ด้วยอัตราการไหลของอากาศ 0.5-2.5 ลิตร/นาที พบว่า มีค่า SOTR อยู่ในช่วง $0.006\text{-}0.020 \text{ kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$ และมีค่า SAE อยู่ในช่วง $0.04\text{-}0.13 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ใช้ความเข้มข้นออกซิเจน (อากาศ) 99 เปอร์เซ็นต์ไปผลิตฟองอากาศ ถึงแม้ว่าใช้อัตราการไหลของอากาศที่ต่ำกว่า แต่มีประสิทธิภาพที่สูง

ระบบเดิมอากาศแบบแอโรลิฟท์ของการศึกษาครั้งนี้ มีกำลังไฟ 0.75 kW มีค่ามาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (SOTR)($\pm$ SD) คือ $0.064 \pm 0.005 \text{ kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$ และค่ามาตรฐานของประสิทธิภาพการให้อากาศ (SAE)($\pm$ SD) มีค่า $0.084 \pm 0.006 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Loyless & Malone (1998) ที่ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องแอโรลิฟท์ที่มีกำลังไฟ 1.2-1.9 กิโลวัตต์ มีค่า SOTR อยู่ระหว่าง $0.0014\text{-}0.0017 \text{ kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$ และค่า SAE อยู่ระหว่าง $1.4 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ในทางกลับกันพบว่า ค่า SOTR และ ค่า SAE ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าต่ำกว่า การศึกษาของ Barrut *et al.* (2012) ที่ทำการศึกษาศักยภาพของเครื่อง vacuum airlift ที่มีกำลังไฟ 0.74 kW พบว่ามีค่า SOTR เท่ากับ $2.76 \times 10^{-4} \text{ kgO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ และค่า SAE เท่ากับ $1.13 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ เนื่องจากระบบการทำงาน เช่น อัตราการไหล แตกต่างกัน

ระบบเดิมอากาศแบบจานจ่ายอากาศที่มีกำลังไฟ 0.75 kW ในการศึกษาครั้งนี้มีค่ามาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (SOTR) ($\pm$ SD) เท่ากับ $0.030 \pm 0.001 \text{ kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$ และค่ามาตรฐานของประสิทธิภาพการให้อากาศ (SAE) ($\pm$ SD) เท่ากับ $0.040 \pm 0.010 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการศึกษาของ Zhang *et al.* (2007) ที่ทำการศึกษาศักยภาพเดิมอากาศแบบ impeller mixing and diffused air ที่มีกำลังไฟ 2.2-4.8 kW พบว่ามีค่า SOTR อยู่ในช่วง $0.210\text{-}2.930 \text{ kgO}_2 \cdot \text{hr}^{-1}$ และมีค่า SAE อยู่ในช่วง $0.100\text{-}0.680 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ และมีค่าต่ำกว่าการศึกษา Park *et al.* (2022) ที่ทำการศึกษาศักยภาพของเครื่องเดิมอากาศระบบ vortex และเครื่องเดิมอากาศระบบ diffuser พบว่ามีค่า SOTR เท่ากับ $0.21\text{-}0.67$ กรัม/นาที (อากาศที่เดิมผ่านเครื่องเดิมอากาศมีปริมาณออกซิเจน 90 เปอร์เซ็นต์) และเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Boyd & Moore (1993) ด้วยเครื่องเดิมอากาศแบบ air diffuser ที่มีอัตราการไหลของอากาศต่างกัน ในน้ำที่มีความลึก 1-2 เมตร พบว่ามีค่า SAE อยู่ในช่วง $2\text{-}2.5 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าการทดลองในครั้งนี้ เนื่องจากระบบการทำงานเช่น อัตราการไหล แตกต่างกัน

การประเมินประสิทธิภาพของระบบเดิมอากาศในบ่อเลี้ยงปลานิลแดงจริง พบว่า ระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล มีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลา (OTR_p) และค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่อง

ให้อากาศในบ่อเลี้ยงปลา (AE_f) สูงที่สุดและ มีค่าความต้องการพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเปิดเครื่องให้อากาศของบ่อเลี้ยงปลา (power requirement; P_R ; W) ต่ำสุด มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบเดิมอากาศแบบแอร์ลิฟท์และระบบเดิมอากาศแบบจวนจ่ายอากาศ

ค่า OTR_f และค่า AE_f เป็นข้อมูลสำคัญที่แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบเดิมอากาศในสภาพบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจริงในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองในบ่อผ้าใบในโรงเรือน ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีการบริโภคออกซิเจนของแพลงก์ตอนพืช จุลินทรีย์ในดิน และสัตว์หน้าดิน มีเพียงแต่การบริโภคออกซิเจนของจุลินทรีย์ในน้ำ และสัตว์น้ำ ถ้าเลือกใช้ระบบเดิมอากาศในบ่อดินกลางแจ้ง จะต้องทดสอบประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมจริง เนื่องจากปัจจัยสภาพแวดล้อมของระบบการเลี้ยงนั้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องเดิมอากาศ ได้แก่ อัตราความหนาแน่น ชนิดและความต้องการออกซิเจนของสัตว์น้ำ ปริมาณน้ำในบ่อ และคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง เช่น อุณหภูมิ และค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำเริ่มต้น (Roy *et al.*, 2022)

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบเดิมอากาศ คือ อัตราความหนาแน่นของสัตว์น้ำต่อมวลน้ำที่สูงขึ้น (Roy *et al.*, 2021) ชนิดและความต้องการออกซิเจนของสัตว์น้ำ พบว่า ปลากินเนื้อ (carnivorous fish) มีอัตราการบริโภคออกซิเจนที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับปลากินพืช (herbivorous fish) (Pelster *et al.*, 2015) ปริมาณของน้ำในบ่อมาก (Bahri & Anwar; 2019) และ อุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้น (Boyd, 2019 ; Dayioğlu, 2022) และค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำเริ่มต้นที่มีค่าต่ำ (Tekile *et al.*, 2016) ส่งผลให้อัตราการการเพิ่มออกซิเจนที่ละลายในน้ำไปถึงจุดอิ่มตัวนานมากขึ้น และประเภทของบ่อเลี้ยง เช่น บ่อดินกลางแจ้ง มีความต้องการใช้ออกซิเจนของแพลงก์ตอนพืชและสัตว์ จุลินทรีย์ สัตว์หน้าดิน และสัตว์น้ำ (Ali *et al.*, 2023) ซึ่งมากกว่าบ่อปูฟ็อกกลางแจ้ง ที่มีความต้องการใช้ออกซิเจนของแพลงก์ตอนพืชและสัตว์ จุลินทรีย์ในน้ำ และสัตว์น้ำ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับบ่อผ้าใบในโรงเรือน พบว่าความต้องการใช้ออกซิเจนในน้ำ มีเพียงจุลินทรีย์ในน้ำและสัตว์น้ำ (Zhao *et al.*, 2022)

จากข้อมูล Table 2 แสดงให้เห็นว่าระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเบิล ใช้พลังงานในการเพิ่มออกซิเจนที่ละลายในน้ำจาก 20 เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของจุดอิ่มตัวต่ำที่สุด โดยใช้พลังงานต่ำกว่าระบบเดิมอากาศแบบจวนจ่ายเท่ากับ 71.31 ± 3.81 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือระบบเดิมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ที่ใช้พลังงานต่ำกว่าระบบเดิมอากาศแบบจวนจ่ายเท่ากับ 57.09 ± 1.41 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับการศึกษาของ Levitsky *et al.* (2022) ที่รายงานว่าระบบไมโครนาโนบับเบิล ใช้พลังงานต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของระบบนี้สูงกว่าระบบเดิมอากาศอื่นและเมื่อพิจารณาข้อมูลความต้องการพลังงานทั้งหมดที่ใช้ (P_R , Table 3) จะเห็นได้ว่าทั้งสามระบบเดิมอากาศที่ใช้ในบ่อเลี้ยงปลานิลแดงจริงมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอต่อการเลี้ยงปลา สามารถเพิ่มอัตราความหนาแน่นของปลาได้ หรือสามารถนำระบบเดิมอากาศไปใช้ในบ่อที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ระบบเดิมไมโครนาโนบับเบิลสามารถเพิ่มอัตราความหนาแน่นของปลาได้สูงถึง 1,000 - 1,200 ตัว/บ่อ

ระบบเดิมอากาศมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และผลผลิตของสัตว์น้ำ แต่ควรจะต้องเลือกใช้ ชนิด ขนาดหรือจำนวนเครื่องเดิมอากาศที่สัมพันธ์กับอัตราความหนาแน่น ชนิดของสัตว์น้ำ ปริมาณน้ำ และคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง เช่น อุณหภูมิ และค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำเริ่มต้น (Roy *et al.*, 2022) ดังนั้นการเลือกใช้ระบบเดิมอากาศที่มีประสิทธิภาพต่ำ อาจส่งผลกระทบต่อทั้งการเจริญเติบโต และผลผลิต หรือการเลือกใช้ระบบเดิมอากาศที่เกินความต้องการของบ่อเลี้ยง ถึงแม้ว่าส่งผลดีต่อสัตว์น้ำ และส่งผลให้คุณภาพน้ำในบ่อ โดยเฉพาะปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้น

แต่จะทำให้ต้นทุนค่าพลังงานสูงขึ้นตามไปด้วย Kumar *et al.* (2013) รายงานว่า ในการเลี้ยงกุ้ง ต้นทุนค่าพลังงานของระบบเดิมอากาศ สูงเป็นลำดับที่ 2 คิดเป็น 15-20 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนการเลี้ยง รองมาจากต้นทุนค่าอาหาร

สรุปผลการวิจัย

ค่ามาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (SOTR) และค่ามาตรฐานของประสิทธิภาพการให้อากาศ (SAE) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาพการเลี้ยงจริง (OTR_r) ค่าประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศ (AE_r) และค่าความต้องการพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเปิดเครื่องให้อากาศของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (P_R) ของระบบเดิมอากาศแบบไมโครนาโนบับเป็ลรุ่น Chan Shrimp Model I มีประสิทธิภาพดีที่สุด สามารถลดต้นทุน(±SD) ด้านพลังงานสูงถึง 57.09±1.41 เปอร์เซ็นต์และ 14.22±2.40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมอากาศแบบจานจ่าย และระบบเดิมอากาศแบบแอร์ลิฟท์ ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

เอกสารอ้างอิง

- Abdel-Tawwab, M., Hagra, A. E., Elbaghdady, H. A. M., & Monier, M. N. (2015). Effects of dissolved oxygen and fish size on Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.): growth performance, whole-body composition, and innate immunity. *Aquaculture International*, 23, 1261-1274.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10499-015-9882-y>.
- Ali, S. A., Raju, H. M., & Kassab, G. (2023). Seasonal species diversity and dominance of phytoplankton in different types of tropical domestic sewage oxidation ponds. *Ecology, Environment and Conservation*. DOI: 10.53550/EEC.2023.v29i01s.0515.
- Bahri, S., & Anwar, H. (2019, June). The ineffectiveness of water splash on paddlewheel aerator. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 268, No. 1, p. 012162). IOP Publishing.
DOI: 10.1088/1755-1315/268/1/012162.
- Barrut, B., Blancheton, J. P., Champagne, J. Y., & Grasmick, A. (2012). Mass transfer efficiency of a vacuum airlift application to water recycling in aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 46, 18-26. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2011.10.004
- Boyd, C. E., & Moore, J. M. (1993). Factors affecting the performance of diffused-air aeration systems for aquaculture. *Journal of Applied Aquaculture*, 2 (2), 1–12. DOI: 10.1300/J028v02n02_01.



Boyd, C. E., (1998). Pond water aeration systems. *Aquacultural engineering*, 18 (1), 9-40.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(98\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(98)00019-3)

Boyd, C. E. (2019). *Water quality: An introduction*. 2nd ed., Springer International Publishing. New York. 357 pp. DOI: 10.1007/978-3-319-17446-4.

Dayioglu, M. A., (2022). Experimental study on design and operational performance of solar-powered venturi aeration system developed for aquaculture–A semi-floating prototype. *Aquacultural Engineering*, 98, 102255. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2022.102255.

Green , B. W., Rawles, S. D., Ray, C. L. & McEntire, M. E. (2024). Relationship between stocking rate and production of stocker hybrid tilapia and water quality in a mixotrophic biofloc system. *Journal of The World Aquaculture Society*, 55 (5) e13087. DOI: 10.1111/jwas.13087.

Khan, P., Zhu, W., Huang, F., Gao, W., & Khan, N. A. (2020). Micro–nanobubble technology and water-related application. *Water Supply*, 20(6), 2021-2035. DOI: 10.2166/ws.2020.121.

Kumar, A., Moulick, S., & Mal, B. C. (2013). Selection of aerators for intensive aquacultural pond. *Aquacultural engineering*, 56, 71-78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.05.003>.

Levitsky, I., Tavor, D., & Gitis, V. (2022). Micro and nanobubbles in water and wastewater treatment: A state-of-the-art review. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102688>.

Loyless, J. C., & Malone, R. F. (1998). Evaluation of air-lift pump capabilities for water delivery, aeration, and degasification for application to recirculating aquaculture systems. *Aquacultural engineering*, 18 (2), 117-133. DOI: 10.1016/S0144-8609(98)00025-9.

Mahasri, G., Saskia, A., Apandi, P.S., Dewi, N.N. Rozi & Usman. N.M. (2018). Development of an aquaculture system using nanobubble technology for the optimation of dissolved oxygen in culture media for nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 137 (1), 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/137/1/012046.

Navisa, J., Sravya, T., Swetha, M., & Venkatesan, M. (2014). Effect of bubble size on aeration process. *Asian Journal of Scientific Research*, 7 (4), 482. DOI: 10.3923/ajsr.2014.482.487.



- Nugroho, K. C., Rizky, P. N., Harijono, T., Halim, A. M., Nasuki, L., & Ritonga, BR. (2024). Comparative study of growth performance of three Tilapia strain in intensive culture system. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1328, 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/1328/1/012011.
- Park, S. H., Batchelor, B., & Ghosh, A. (2022). Gas transfer model for a multistage vortex aerator: A novel oxygen transfer system for dissolved oxygen improvement. *Journal of Environmental Management*, 319, 115704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115704>.
- Pelster, B., Wood., C. M., Speers-Roesch, B., Driedzic, W. R., Almeida-Val, V., & Val, A. (2015). Gut transport characteristics in herbivorous and carnivorous serrasalmid fish from ion-poor Rio Negro water. *Journal of Comparative Physiology B*, 185, 225-241. DOI: 10.1007/s00360-014-0879-z.
- Roy, S. M., P., J., Machavaram, R., Pareek, C. M., & Mal, B. C. (2021). Diversified aeration facilities for effective aquaculture systems-a comprehensive review. *Aquaculture International*, 29, 1181-1217. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00685-7>.
- Roy, S. M., Machavaram, R., Moulick, S., & Mukherjee, C. K. (2022). Economic feasibility study of aerators in aquaculture using life cycle costing (LCC) approach. *Journal of Environmental Management*, 302, 114037. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114037. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00685-7>.
- Sampantamit, T., Ho, L., Lachat, C., Sutummawong, N., Sorgeloos, P., & Goethals, P. (2020). Aquaculture production and its environmental sustainability in Thailand: Challenges and potential solutions. *Sustainability*, 12(5), 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12052010>.
- Taukhid, I., Trijuno, D. D., Karim, M. Y., Syah, R., & Makmur, M. (2021). Effect of power pump and nozzle diameter microbubble generator to increase oxygen concentration in aquaculture. *The Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 73, 1547608. DOI: <https://doi.org/10.46989/001c.31093>.
- Tekile, A., Kim, I., & Lee, J. Y. (2016). Extent and persistence of dissolved oxygen enhancement using nanobubbles. *Environmental Engineering Research*, 21(4), 427-435. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2016.028>.
- Wu, M., Yuan, S., Song, H., & Li, X. (2022). Micro-nano bubbles production using a swirling-type venturi bubble generator. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 170, 108697. DOI: 10.1016/j.cep.2021.108697.



Yaparatne, S., Morón-López, J., Bouchard, D., B., Garcia-Segura, S., & Apul, O. G. (2024). Nanobubble applications in aquaculture industry for improving harvest yield, wastewater treatment, and disease control. *Science of The Total Environment*, 172687-172687. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172687.

Zhang, R., Sun, H., Kamthunzi, W. M., Collar, C. A., & Mitloehner, F. M. (2007). Aerator performance for wastewater lagoon application. In *International Symposium on Air Quality and Waste Management for Agriculture, 16-19 September 2007, Broomfield, Colorado* (p. 13). American Society of Agricultural and Biological Engineers. DOI: 10.13031/2013.23832.

Zhao, S., He, W., He, P., & Li, K. (2022). Comparison of planktonic bacterial communities indoor and outdoor of aquaculture greenhouses. *Journal of Applied Microbiology*, 132(4), 2605-2612. DOI: 10.1111/jam.15414.