

ระบบอะควาโปนิคส์แบบบูรณาการเพื่อการเลี้ยงปลานิลอย่างมีประสิทธิภาพ ร่วมกับการเพาะเลี้ยงไข่มฝ้า

Integrated Aquaponics System for Efficient Nile Tilapia (*Oreochromis Niloticus*) Farming With Watermeal (*Wolffia* spp.) Cultivation

เหล็กไพล จันทะบุตร^{1*}, วุฒิพล ฉัตรจรัสกุล², กิรติ ทองเนตร³, กุลริศา คำสิงห์⁴, จุฑารัตน์ แก่นจันทร์⁵,
กฤตภาค ยุทธอาจ⁶, วุฒิธี วรเสริม⁷ และ วันเพ็ญ แสตสิกกลาง⁸

Leklai Chanthabut^{1*}, Vuttipol Chatjaraskul², Keerati Thongnet³,

Kulrissa Khumsing⁴, Chutarat Kaenchan⁵, Krittaphak Yuthart⁶,

Wutthimethi Worasoem⁷ and Wanpen Sadsikang⁸

คณะเทคโนโลยีการเกษตร^{1*,5,6}, คณะวิทยาการจัดการ^{2,4,7}

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี³, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

Faculty of Agricultural Technology^{1*,5,6}, Faculty of Management Science^{2,4,7},

Faculty of Science and Technology³, Rajabhat Maha Sarakham University

Email : Chantabut@hotmail.com^{1*}

(Received : February 22, 2026; Revised : June 11, 2026; Accepted : May 31, 2026)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบอะควาโปนิคส์แบบบูรณาการเพื่อการเลี้ยงปลานิล (*Oreochromis niloticus*) ร่วมกับการเพาะเลี้ยงไข่มฝ้า (*Wolffia* spp.) เพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโตของปลานิลและคุณภาพน้ำในระบบหมุนเวียน (Recirculating Aquaculture System: RAS) รวมถึงเพื่อประเมินผลผลิตของไข่มฝ้าภายใต้สภาวะการเลี้ยง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design ; CRD) มี 3 ชุดการทดลอง (อัตราความหนาแน่นปลา 3 ระดับ 30, 40 และ 50 ตัวต่อตารางเมตร) ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ เก็บบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย คุณภาพน้ำและผลผลิตไข่มฝ้า ตลอดระยะเวลาการทดลอง 60 วัน การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป spss

ผลการวิจัยพบว่า 1) ความหนาแน่นมีผลต่อการเจริญเติบโตของปลานิลอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) พบว่า ความหนาแน่น 30 ตัวต่อตารางเมตร ให้ผลดีที่สุด ทั้งด้านน้ำหนัก ความยาว อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอดตาย 2) การศึกษาผลการทดลองใช้ความหนาแน่นต่อคุณภาพน้ำ พบว่า ค่าอุณหภูมิและ pH ไม่แตกต่างกัน แต่ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยความหนาแน่น 30 ตัวต่อตารางเมตรมีค่าเฉลี่ยสูงสุด และ 3) ผลการศึกษาด้านผลผลิตไข่มฝ้า พบว่า ความหนาแน่น 50 ตัวต่อตารางเมตร ให้ผลผลิตไข่มฝ้ามากที่สุด อย่างไรก็ตามในภาพรวมความหนาแน่น 30 ตัวต่อตารางเมตร เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากสร้างสมดุลระหว่างปลาและการรักษาสภาพแวดล้อมน้ำได้ดีที่สุด

คำสำคัญ : อะควาโปนิคส์, ปลานิล, ไข่มฝ้า, อัตราความหนาแน่น, ระบบน้ำหมุนเวียน (RAS)

ABSTRACT

This research aimed to develop an integrated aquaponics system for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) farming combined with watermeal (*Wolffia* spp.) cultivation, to investigate the effects of different stocking densities on the growth of Nile tilapia and water quality in a Recirculating Aquaculture System (RAS), and to evaluate watermeal biomass yield under the culture conditions. The experiment was arranged in a Completely Randomized Design (CRD) with three

treatments, namely stocking densities of 30, 40, and 50 fish per square meter, with three replications per treatment. Data on growth, survival rate, water quality, and watermeal biomass yield were recorded throughout the 60-day experimental period. Statistical analysis was performed using the SPSS software package.

The research findings revealed that: 1) stocking density significantly affected the growth of Nile tilapia ($p < 0.05$). The density of 30 fish per square meter produced the best results in terms of weight, length, specific growth rate, and survival rate; 2) the study of the effects of stocking density on water quality showed that temperature and pH did not differ among treatments, whereas dissolved oxygen (DO) differed significantly ($p < 0.05$), with the density of 30 fish per square meter having the highest average value; and 3) the study of watermeal biomass yield showed that the density of 50 fish per square meter produced the highest watermeal biomass yield. Overall, the density of 30 fish per square meter was the most appropriate level, as it provided the best balance between fish production and maintenance of the aquatic environment.

Keywords : Aquaponics, Nile Tilapia, Watermeal, Stocking Density, Recirculating Aquaculture System (RAS)

บทนำ

ปัจจุบันประชากรโลกเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความต้องการแหล่งโปรตีนเพิ่มสูงขึ้น นำไปสู่การขยายตัวของภาคการประมงและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตาม การเพาะเลี้ยงในระบบความหนาแน่นสูงมักส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการสะสมของของเสียที่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงจากการให้อาหารเกินความจำเป็น ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมดุลระบบนิเวศและเป็นการสูญเสียทรัพยากรอาหารที่มีคุณค่า [1] ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาแนวทางการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ยั่งยืนผ่านการบริหารจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญยิ่ง

ระบบบ่อควาโปนิคส์ (Aquaponics) เป็นเทคโนโลยีที่บูรณาการการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับการปลูกพืชในระบบน้ำหมุนเวียน (Recirculating Aquaculture System: RAS) โดยใช้พืชทำหน้าที่เป็นตัวกรองชีวภาพ (Biofilter) เพื่อดูดซับสารอาหารส่วนเกินจากน้ำเสียและเปลี่ยนเป็นแหล่งอาหารสำหรับพืช [2] ทั้งนี้ ในระบบบ่อควาโปนิคส์ดั้งเดิมมักพบข้อจำกัดในการจัดการกากตะกอนปลา (Fish Sludge) ซึ่ง [3] ได้พัฒนานวัตกรรมการบูรณาการระบบย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Onsite Anaerobic Digestion: AD) เข้ามาร่วมบำบัดกากตะกอน ซึ่งสามารถยกระดับประสิทธิภาพการดึงกลับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้สูงถึงร้อยละ 41 และ 36 ตามลำดับ ส่งผลให้พืชนำธาตุอาหารไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

ปลานิล (*Oreochromis Niloticus*) เป็นสายพันธุ์ที่นิยมอย่างแพร่หลายในระบบบ่อควาโปนิคส์ เนื่องจากมีความทนทานและมีอัตราการเจริญเติบโตที่รวดเร็วกว่าความหนาแน่นสูง [4] อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จของระบบขึ้นอยู่กับการรักษาสมดุลที่เหมาะสมระหว่างความหนาแน่นของสัตว์น้ำและมวลชีวภาพของพืชบำบัด เพื่อคงคุณภาพน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อสวัสดิภาพสัตว์น้ำ [11], [12] งานวิจัยนี้นำเสนอนวัตกรรมโดยบูรณาการการเพาะเลี้ยงไผ่ดำ (*Wolffia Globosa*) มาทำหน้าที่เป็นตัวกรองชีวภาพ (Phytoremediation Agent) ซึ่ง [5] ยืนยันว่าไผ่ดำมีศักยภาพสูงในการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งเพื่อแปรเปลี่ยนเป็นมวลชีวภาพมูลค่าสูง ยิ่งไปกว่านั้น ในมิติของวิทยาศาสตร์อาหาร [6] ได้ระบุว่าไผ่ดำเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกสายพันธุ์ใหม่ (Emerging Plant-Based Protein) ที่มีสัดส่วนกรดอะมิโนที่สมบูรณ์และมีสารเปปไทด์ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive Peptides) สนับสนุนโดย [7] ส่งผลให้ไผ่ดำมีมูลค่าสูงในตลาดอาหารเพื่อสุขภาพยุคใหม่

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นประเมินผลกระทบจากความหนาแน่นของปลานิลที่ต่างกัน (30, 40 และ 50 ตัวต่อตารางเมตร) ต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำของไข่มฝ้ายภายใต้ระบบน้ำหมุนเวียน เพื่อค้นหาระดับความหนาแน่นที่เหมาะสมที่สุด อันจะเป็นการยกระดับความสามารถในการผลิตอาหารอย่างยั่งยืน และตอบสนองต่อนโยบายเศรษฐกิจชีวภาพ-เศรษฐกิจหมุนเวียน-เศรษฐกิจสีเขียว (BCG Model) ต่อไป

1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1 เพื่อพัฒนาระบบบ่อควาโปนิคส์แบบบูรณาการสำหรับการเลี้ยงปลานิลร่วมกับการเพาะเลี้ยงไข่มฝ้าย
- 1.2 เพื่อศึกษาความหนาแน่นที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลานิลและคุณภาพน้ำในระบบหมุนเวียน
- 1.3 เพื่อศึกษาผลผลิตของไข่มฝ้ายภายใต้สภาวะการเลี้ยงปลานิลในระบบบ่อควาโปนิคส์

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดเกี่ยวกับระบบบ่อควาโปนิคส์และเศรษฐกิจหมุนเวียน

ระบบบ่อควาโปนิคส์เป็นวิธีการเกษตรที่บูรณาการการพึ่งพาอาศัยกันระหว่างปลา แบคทีเรีย และพืชในระบบปิด ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) โดยการแปรรูปสารอาหารจากของเสียในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำให้กลายเป็นธาตุอาหารที่พืชสามารถดูดซึมได้ [3] กระบวนการนี้อาศัยแบคทีเรียกลุ่ม Nitrifying Bacteria ในการเปลี่ยนแอมโมเนียที่เกิดจากสิ่งขับถ่ายของปลาให้เป็นไนเตรตที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ส่งผลให้การปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อมลดลง [2] นอกจากนี้ การบูรณาการระบบย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดึงกลับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ส่งเสริมการบริหารจัดการทรัพยากรแบบครบวงจรตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน [3],[8]

ในปัจจุบันแนวคิดเรื่องความมั่นคงทางอาหารและความยั่งยืนได้ผลักดันให้ระบบบ่อควาโปนิคส์กลายเป็นนวัตกรรมสำคัญในการแก้ปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรน้ำและที่ดิน [1] ระบบนี้สามารถลดการใช้น้ำได้มากกว่า 90% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเกษตรแบบดั้งเดิม เนื่องจากน้ำจะสูญหายเพียงจากการระเหยและการคายน้ำของพืชเท่านั้น [3] นอกจากนี้ การบูรณาการระบบย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) เข้ากับระบบบ่อควาโปนิคส์ ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดึงกลับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ส่งเสริมการบริหารจัดการทรัพยากรแบบครบวงจรตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน [3],[8]

2.2 ทฤษฎีการจัดการความหนาแน่นและสรีรวิทยาของปลานิล

ความหนาแน่นของประชากรมีผลโดยตรงต่อระดับความเครียดและอัตราการเจริญเติบโตของปลานิล [4] ในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดความหนาแน่นที่เหมาะสมเพื่อรักษาระดับออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ให้เพียงพอต่อความต้องการ [10], [11] หากความหนาแน่นสูงเกินไป จะทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียและไนเตรต ซึ่งเป็นสารพิษต่อสัตว์น้ำ [4] ในเชิงสรีรวิทยา ความเครียดเรื้อรังจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมจะกระตุ้นการทำงานของแกน HPI-axis ทำให้ระดับฮอร์โมนคอร์ติซอลเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยอาหารและภูมิคุ้มกันลดลง [12] การควบคุมคุณภาพน้ำที่คงที่ผ่านการจัดการความหนาแน่นที่เหมาะสม จึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการลดโอกาสการเกิดโรคและลดความจำเป็นในการใช้ยาปฏิชีวนะ [11], [12] นอกจากนี้ การควบคุมความหนาแน่นที่สมดุลยังช่วยให้จุลินทรีย์ในระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด [6, 7]

นอกจากนี้ ทฤษฎีการจัดการคุณภาพน้ำในระบบบ่อควาโปนิคส์ยังเน้นความสัมพันธ์ระหว่างมวลปลาและอัตราการไหลของน้ำ [6] พบว่าการควบคุมความหนาแน่นในระดับที่เหมาะสมช่วยให้ระบบสามารถรักษาคุณภาพน้ำให้มีความเสถียร ส่งผลให้สัตว์น้ำมีสภาวะสุขภาพที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นการลดโอกาสการเกิดโรคจากแบคทีเรียได้โดยไม่ต้องพึ่งพายาปฏิชีวนะ ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับแนวคิดของ Kettongruang, Morikawa, and . Boonmak [7] ที่รายงาน

ว่าการจัดการความหลากหลายของจุลินทรีย์ในระบบการเพาะเลี้ยงที่สมดุล เป็นหัวใจสำคัญของการสร้างระบบหมุนเวียนน้ำที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2.3 หลักการบำบัดทางชีวภาพโดยใช้ไผ่

ไผ่ (*Wolffia Globosa*) ได้รับการยกย่องให้เป็น 'อาหารของอนาคต' เนื่องจากเป็นพืชที่สามารถเพิ่มมวลชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว โดยมีอัตราการทวีคูณของมวลชีวภาพสูงภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ซึ่ง Kettongruang, Morikawa, and . Boonmak [7] ได้ศึกษาถึงบทบาทของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับไผ่ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตและการผลิตมวลชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ ไผ่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีสัดส่วนโปรตีนที่เทียบเคียงได้กับถั่วเหลือง และอุดมไปด้วยกรดอะมิโนจำเป็นรวมถึงวิตามินบี 12 [6] ระบุว่าเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือก (Plant-Based Protein) ที่มีศักยภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและสารเภสัชโภชนาภัณฑ์ การบูรณาการไผ่เข้าสู่ระบบบ่อควาโปนิคส์จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจนอกเหนือไปจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพียงอย่างเดียว [1], [13]

ไผ่ทำหน้าที่เป็นตัวกรองชีวภาพ (Phytoremediation Agent) [5] สามารถดูดซับสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อแปรเปลี่ยนเป็นมวลชีวภาพได้อย่างดีเยี่ยม ซึ่งเป็นการจัดการธาตุอาหารในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) ที่ช่วยลดภาระของระบบบำบัดน้ำเสีย สอดคล้องกับการศึกษาของ Goddek et al. [2] ที่ระบุว่าการใช้พืชขนาดเล็กในวงศ์ Lemnaceae สามารถดึงไนเตรตและฟอสเฟตไปใช้ในการสร้างมวลชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้คุณภาพน้ำอยู่ในระดับมาตรฐานที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำ

นอกจากนี้ การจัดการความหนาแน่นในการปล่อยสัตว์น้ำถือเป็นตัวแปรวิกฤตที่ต้องได้รับการควบคุม โดย [1] ได้ชี้ให้เห็นว่าหัวใจสำคัญของความสำเร็จในระบบบ่อควาโปนิคส์เชิงพาณิชย์คือการจัดสมดุลระหว่าง "อัตราการปล่อยสัตว์น้ำ" (Stocking Density) และ "พื้นที่ผิวของพืชบำบัด" เพื่อให้มั่นใจว่าพืชได้รับสารอาหารเพียงพอต่อการเจริญเติบโต ซึ่งจะส่งผลให้คุณภาพน้ำมีความเสถียรและลดการสะสมของแอมโมเนียและไนไตรต์ที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ [9], [10] การบริหารจัดการดังกล่าวไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต แต่ยังเป็น การปฏิบัติตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่ยั่งยืนสำหรับภาคการประมงในอนาคต [3], [8]

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เครื่องมือการวิจัย

1.1 เครื่องมือวัดคุณภาพน้ำ ได้แก่ เครื่องวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO Meter), เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter)

1.2 แบบบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำและพืช เพื่อเก็บข้อมูลน้ำหนัก อัตราการรอดตาย และมวลชีวภาพของไผ่

1.3 โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์สถิติ SPSS

2. กลุ่มประชากรและจริยธรรมการวิจัย

2.1 ประชากร ได้แก่ ลูกปลานิล (*Oreochromis Niloticus*) ขนาดเฉลี่ย 6.00 ± 0.25 จากฟาร์มเพาะเลี้ยงมาตรฐาน และไผ่ (*Wolffia* spp.) ที่รวบรวมจากแหล่งน้ำธรรมชาติในจังหวัดมหาสารคาม

2.2 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ ปลานิลจำนวน 360 ตัว แบ่งเป็น 3 ชุดการทดลองตามระดับความหนาแน่น 30, 40 และ 50 ตัวต่อตารางเมตร (ชุดละ 3 ซ้ำ) และไผ่น้ำหนักเริ่มต้น 2 กรัมต่อภาดการทดลอง

2.3 งานวิจัยนี้ดำเนินการโดยยึดหลัก 3Rs ได้แก่ Replacement (การลดจำนวนการใช้สัตว์ให้เหมาะสมตามสถิติ), Reduction (การออกแบบการทดลองที่ใช้จำนวนปลาในระดับที่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือ), และ Refinement (การปรับปรุงสภาพแวดล้อมโดยการควบคุมคุณภาพน้ำ (DO, pH) เพื่อลดความเครียดของสัตว์)

3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งระบบอะควาโปนิคส์แบบหมุนเวียน (Recirculating Aquaponics System: RAS) ณ สถานที่ทดลอง โดยมีองค์ประกอบหลักดังนี้ ภาพที่ 1 และภาพที่ 2

3.1 ระบบบ่อเลี้ยงปลา ใช้บ่อซีเมนต์ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.90 เมตร จำนวน 9 บ่อ

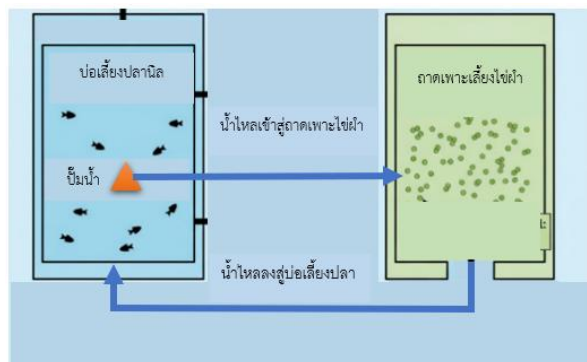
3.2 ระบบถาดเพาะเลี้ยงไข่ปลา ติดตั้งถาดเพาะเลี้ยงขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ลึก 10 เซนติเมตร (คิดเป็นพื้นที่ผิว 0.045 ตารางเมตรต่อถาด) จำนวน 9 ถาด โดยติดตั้งถาดในระดับที่สูงกว่าบ่อเลี้ยงปลาเพื่อใช้แรงโน้มถ่วงในการหมุนเวียนน้ำกลับ

3.3 ระบบขับเคลื่อนน้ำ ติดตั้งปั้มน้ำไฟฟ้า ขนาด 600 ลิตรต่อชั่วโมงเพื่อส่งน้ำจากบ่อเลี้ยงปลาขึ้นสู่ถาดเพาะเลี้ยงไข่ปลา

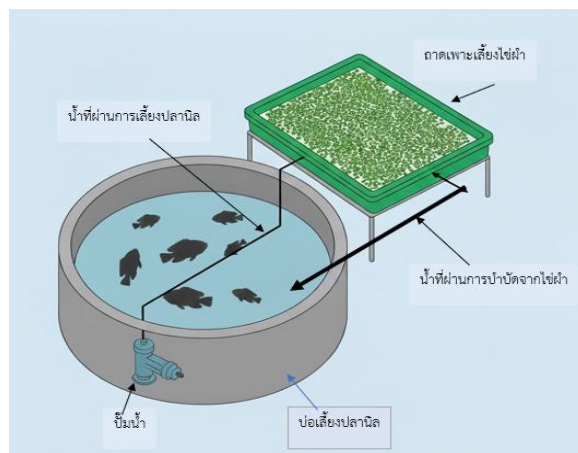
3.4 ระบบควบคุมอัตราการไหล กำหนดอัตราการไหลของน้ำให้เท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที ตัวปั้มน้ำจะมีระบบควบคุมความแรงของน้ำใช้ในการปรับการไหลของน้ำ เพื่อให้เหมาะสมการหมุนเวียนของน้ำในถาดของไข่ปลา ป้องกันไม่ให้ไข่ปลาหลุดรอดออกนอกระบบ และเพื่อให้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

3.5 ระบบกรองน้ำ งานวิจัยนี้เลือกใช้ไข่ปลา (*Wolffia* spp.) เป็นตัวกรองชีวภาพ (Biological Filter) แทนการใช้ถังกรองทางกายภาพแบบดั้งเดิม

3.6 การเพิ่มออกซิเจนในน้ำ ระบบไม่มีการติดตั้งเครื่องให้อากาศ (Aeration) เพิ่มเติม แต่ใช้ "การไหลเวียนของน้ำ" (Water Recirculation) กลับลงสู่บ่อเลี้ยงปลา ซึ่งช่วยเพิ่มค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO) ได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการของปลานิล



ภาพที่ 1 ระบบอะควาโปนิคส์การเลี้ยงปลานิลร่วมกับไข่ปลา



ภาพที่ 2 โครงสร้างอะควาโปนิคส์การเลี้ยงปลานิลร่วมกับไข่ปลา

3.2 การดำเนินการทดลอง ทำการวัดความยาว และชั่งน้ำหนัก ก่อนเริ่มการทดลอง และปล่อยปลานิลตามระดับความหนาแน่นที่กำหนด และเริ่มเพาะเลี้ยงไข่ปลาในส่วนของ การบำบัดน้ำ

3.3 การให้อาหารปลา ให้ปลาได้รับอาหารเม็ดสำเร็จรูป เปอร์เซ็นต์โปรตีนที่ 40 โดยให้อาหารแบบกินจนอิ่ม ให้วันละ 2 ครั้ง เข้า เวลา 08.30-9.00 น. และ เย็น 16.30 -17.00 น.

3.4 การเก็บข้อมูล วัดการเจริญเติบโต ด้านน้ำหนัก ความยาว ของปลาทุก 15 วัน และตรวจวัดคุณภาพน้ำสัปดาห์ละ 1 ครั้ง เป็นระยะ 60 วัน บันทึกอัตราการรอดตาย และผลผลิตไข่ปลาหลังสิ้นสุดการทดลอง [11] โดยใช้การคำนวณตัวแปร มีดังนี้

$$\begin{aligned} &\text{อัตราการรอด (Survival Rate) หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์} \\ &= \frac{\text{จำนวนปลานิลเมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}{\text{จำนวนปลานิลเมื่อเริ่มต้นการทดลอง}} \times 100 \end{aligned}$$

อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ

$$SGR(\%/day) = \frac{\ln(W_t) - \ln(W_i)}{t} \times 100$$

W_i = น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ยของปลานิล (กรัม)

W_t = น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ยของปลานิล ณ สิ้นสุดการทดลอง (กรัม)

$\ln$ = ลอการิทึมธรรมชาติ (Natural Logarithm)

t = ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง (วัน)

น้ำหนักเพิ่มต่อวัน (Average Daily Growth)

$$= \frac{\text{น้ำหนักปลานิลเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง} - \text{น้ำหนักปลานิลเริ่มต้น}}{\text{จำนวนวันที่เลี้ยง}}$$

$$\text{อัตราการเปลี่ยนอาหาร (FCR)} = \frac{\text{ปริมาณอาหารทั้งหมดที่ให้}}{\text{น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น}}$$

ผลผลิตของไข่ปลา (Production)

$$= \text{น้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง} - \text{น้ำหนักเมื่อเริ่มต้นการทดลอง}$$

4. สถิติที่ใช้ในการวิจัย

สถิติที่ใช้ประกอบด้วย ค่าร้อยละ (Percentage), ค่าเฉลี่ย (Mean), ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชุดการทดลอง หากพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ใช้โปรแกรม SPSS [11]

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาระบบบ่อควาโปนิกส์แบบบูรณาการสำหรับการเลี้ยงปลานิลร่วมกับการเพาะเลี้ยงไข่มุ้า

จากการติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพของระบบบ่อควาโปนิกส์แบบหมุนเวียน พบว่า กระบวนการทำงานของระบบบ่อควาโปนิกส์แบบหมุนเวียน น้ำเสียจากบ่อซีเมนต์ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.90 เมตร ซึ่งเป็นจุดสะสมของสารอินทรีย์และเศษของเสียจากการเลี้ยงปลานิล โดยใช้ปั้มน้ำไฟฟ้าขนาด 600 ลิตรต่อชั่วโมง ส่งน้ำเสียขึ้นสู่ถาดเพาะเลี้ยงไข่มุ้าที่ติดตั้งไว้ในระดับที่สูงกว่าบ่อเลี้ยงปลา น้ำที่ผ่านการกรองและบำบัดแล้วจะไหลเวียนกลับลงสู่บ่อเลี้ยงปลานิลและปล่อยให้ไหลกลับลงสู่บ่อเลี้ยงปลานิล เป็นการหมุนเวียนน้ำในลักษณะระบบปิด

ระบบปั้มน้ำและควบคุมอัตราการไหล ทำหน้าที่ควบคุมและรักษาความแรงของน้ำให้อยู่ในอัตราการไหลคงที่ 10 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นระดับความเร็วที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมการหมุนเวียนน้ำในถาดเพาะเลี้ยงไข่มุ้าช่วยป้องกันไม่ให้อาหารหลุดรอดออกนอกกระบถาดเพาะเลี้ยง และเอื้อให้เกิดการบำบัดสารอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ

ถาดเพาะเลี้ยงไข่มุ้า (พื้นที่ผิว 0.045 ตารางเมตรต่อถาด) ทำหน้าที่เป็นหน่วยกรองชีวภาพ (Biological Filter) หลักของระบบแทนการใช้ถังกรองทางกายภาพแบบดั้งเดิม โดยดูดซับสารอาหารส่วนเกินจากน้ำเสียของปลาแปรเปลี่ยนเป็นปุ๋ยหรือธาตุอาหารที่จำเป็นต่อไข่มุ้า

กลไกการหมุนเวียนน้ำกลับ ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO) ให้กับบ่อเลี้ยงปลานิลโดยตรง ผ่านกระบวนการไหลของน้ำจากถาดไข่มุ้าสู่บ่อปลานิลเลี้ยงปลานิล ส่งผลให้ระบบไม่มีความจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องให้อากาศ เพิ่มเติม

ระบบบ่อควาโปนิกส์ที่พัฒนาขึ้นสอดคล้องกับอัตราความหนาแน่นในการเลี้ยงปลานิลและรักษาคุณภาพน้ำให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงปลานิลได้ตลอด 60 วัน โดยโครงสร้างกลไกนี้สามารถเพิ่มค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำ (DO) ได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการของปลานิล (โดยเฉพาะในกลุ่มความหนาแน่น 30 ตัวต่อตารางเมตร ที่ให้ค่าเฉลี่ย DO สูงสุดและเสถียรที่สุดที่ 5.1 ± 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สะท้อนถึงประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานจากการลดการใช้เครื่องให้อากาศ และความสำเร็จในการพึ่งพาพิ้นน้ำบำบัดของเสียเชิงนิเวศวิทยาได้อย่างสมบูรณ์

2. ผลการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของปลานิล

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ตัวแปรด้านการเจริญเติบโต ได้แก่ น้ำหนักสุดท้าย ความยาวสุดท้าย อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) น้ำหนักเพิ่มต่อวัน (ADG) และอัตราการแลกเนื้อ (FCR) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระหว่างชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองที่ความหนาแน่น 30 ตัวต่อตารางเมตร ให้ผลการเจริญเติบโตดีที่สุด โดยมีน้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย 11.91 ± 0.17 กรัม ความยาวสุดท้ายเฉลี่ย 8.95 ± 0.15 เซนติเมตร อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ 1.13 ± 0.06 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน น้ำหนักเพิ่มต่อวัน 0.10 ± 0.004 กรัม และอัตราการแลกเนื้อเท่ากับ 1.99 ± 0.36 ซึ่งแตกต่างจากชุดการทดลองที่ความหนาแน่น 40 และ 50 ตัวต่อตารางเมตรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

สำหรับอัตราการรอดตาย พบว่าชุดการทดลองที่ความหนาแน่น 30 ตัวต่อตารางเมตร มีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ 86.67 ± 2.01 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลกระทบของอัตราความหนาแน่นต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของปลานิล (60 วัน)

ตัวแปร	ชุดการทดลอง		
	30 ตัวต่อตารางเมตร	40 ตัวต่อตารางเมตร	50 ตัวต่อตารางเมตร
น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (กรัม/ตัว)	5.63 ± 0.15	5.67 ± 0.06	5.93 ± 0.41
น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย (กรัม/ตัว)	11.91 ± 0.17 ^a	9.24 ± 0.73 ^b	8.63 ± 0.44 ^b
ความยาวเฉลี่ยเริ่มต้น (เซนติเมตร)	6.90 ± 0.16	6.60 ± 0.10	6.70 ± 0.17
ความยาวเฉลี่ยสุดท้าย (เซนติเมตร)	8.95 ± 0.15 ^a	8.10 ± 0.20 ^b	7.85 ± 0.10 ^b
อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (เปอร์เซ็นต์ / วัน)	1.13 ± 0.06 ^a	0.82 ± 0.06 ^b	0.71 ± 0.09 ^c
น้ำหนักเพิ่มต่อวัน (ADG) (กรัม/วัน)	0.10 ± 0.004 ^a	0.06 ± 0.01 ^b	0.04 ± 0.01 ^b
อัตราการแลกเนื้อ (FCR)	1.99 ± 0.36 ^c	2.67 ± 0.58 ^b	5.19 ± 4.13 ^a
อัตราการรอดตาย (%)	86.67 ± 2.01 ^a	85.80 ± 1.55 ^a	42.92 ± 6.80 ^b

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน (a, b, c) แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

3. ผลผลิตไข่ฝำ

ผลผลิตไข่ฝำเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลอง 60 วัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยชุดการทดลองที่ความหนาแน่นปลานิล 50 ตัวต่อตารางเมตร ให้ผลผลิตไข่ฝำเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 110.67 ± 10.26 กรัม ขณะที่ชุดการทดลองความหนาแน่น 30 และ 40 ตัวต่อตารางเมตร ให้ผลผลิตไข่ฝำเฉลี่ยเท่ากับ 98.47 ± 2.75 กรัม และ 94.67 ± 2.31 กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลผลิตไข่ฝำเฉลี่ยเมื่อเลี้ยงร่วมกับปลานิลในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน

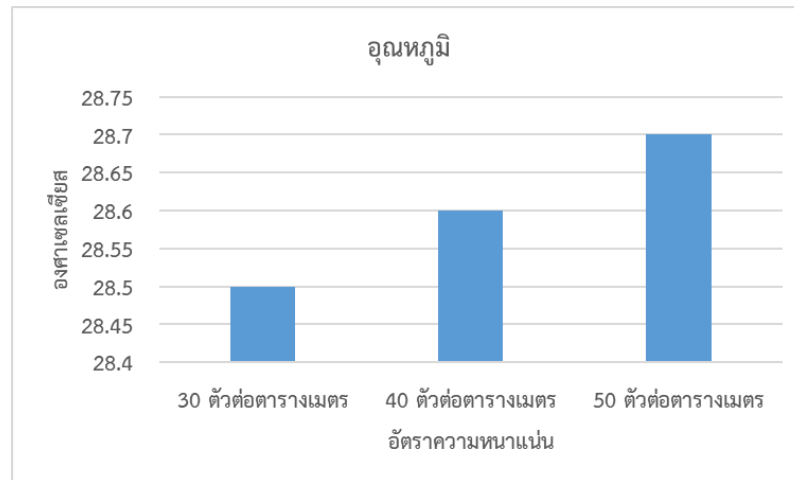
ผลผลิตไข่ฝำ (เฉลี่ย)	ชุดการทดลอง		
	30 ตัวต่อตารางเมตร	40 ตัวต่อตารางเมตร	50 ตัวต่อตารางเมตร
ผลผลิตไข่ฝำเฉลี่ย (กรัม)	98.46 ± 2.75 ^b	94.66 ± 2.31 ^b	110.66 ± 10.26 ^a

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน (a, b, c) แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

4. ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำ

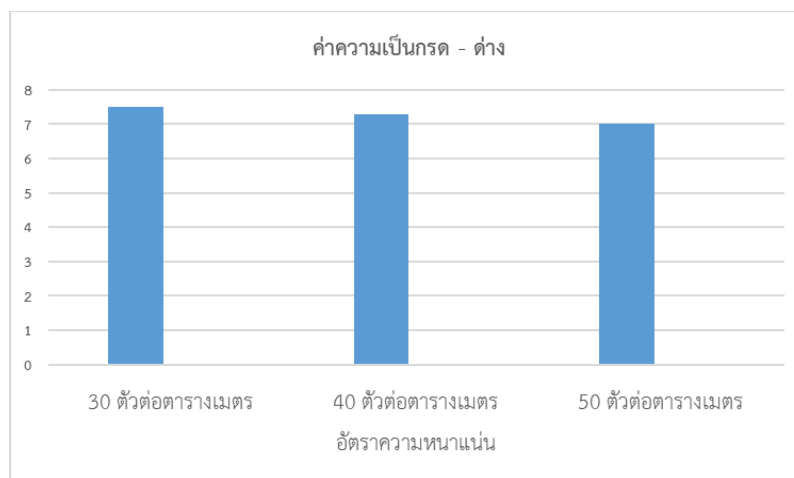
จากการตรวจวัดคุณภาพน้ำเริ่มต้นก่อนเริ่มการทดลอง พบว่าค่าเฉลี่ยของคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงปลานิลและไข่ฝำ โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 7.60 ± 0.10 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) เท่ากับ 5.50 ± 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 27.67 ± 1.53 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ในแต่ละชุดการทดลอง ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย เท่ากับ 28.5 ± 0.2 , 28.6 ± 0.3 และ 28.7 ± 0.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ตารางที่ 3 และภาพที่ 3



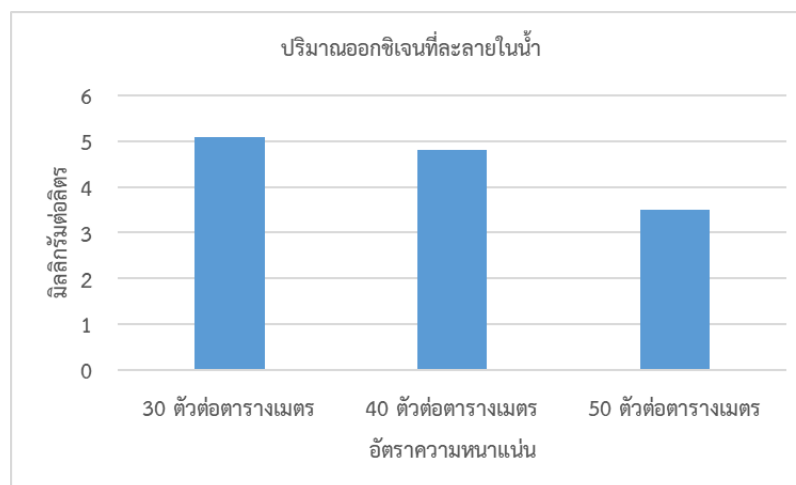
ภาพที่ 3 อุณหภูมิในแต่ละชุดการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 60 วัน

ค่าความเป็นกรด-ด่าง พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ในแต่ละชุดการทดลอง มีค่าเฉลี่ย pH เท่ากับ 7.5 ± 0.1 , 7.3 ± 0.2 และ 7.0 ± 0.1 ตามลำดับ ตารางที่ 3 และภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 60 วัน

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ในชุดการทดลองที่ความหนาแน่น 50 ตัวต่อตารางเมตร มีค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำต่ำที่สุด มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 3.5 ± 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐาน > 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า มีความแตกต่างจากชุดการทดลองที่อัตราความหนาแน่นที่ 30 และ 40 ตัวต่อตารางเมตรอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) แสดงใน ตารางที่ 3 และภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 60 วัน

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์คุณภาพน้ำในหน่วยเลี้ยงปลาชนิด

ตัวแปร	ชุดการทดลอง			
	30 ตัวต่อตารางเมตร	40 ตัวต่อตารางเมตร	50 ตัวต่อตารางเมตร	ค่ามาตรฐาน
อุณหภูมิ (°C)	28.5± 0.2	28.6± 0.3	28.7 ± 0.2	25-30
ความเป็นกรด-ด่าง	7.5± 0.1	7.3± 0.2	7.0± 0.1	6.5-9.0
ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.1± 0.3 ^a	4.8± 0.4 ^b	3.5± 0.5 ^c	>4.0

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน (a, b, c) แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

อภิปรายผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาระบบบะควาโปนิคส์แบบบูรณาการสำหรับการเลี้ยงปลานิลร่วมกับการเพาะเลี้ยงไข่มุก

การพัฒนาระบบบะควาโปนิคส์หมุนเวียนน้ำกึ่งปิด (Recirculating Aquaponics System: RAS) ในงานวิจัยนี้ สะท้อนให้เห็นถึงขีดความสามารถในการควบคุมเสถียรภาพของปัจจัยแวดล้อมทางน้ำและการเกื้อกูลกันตามหลักนิเวศวิทยาอย่างเป็นระบบ การหมุนเวียนน้ำทั้งจากบ่อเลี้ยงปลาผ่านปั้มน้ำเข้าสู่ชุดกรองชีวภาพที่เป็นถาดเพาะเลี้ยงไข่มุก (พื้นที่ผิว 0.045 ตารางเมตรต่อหน่วย) ด้วยปริมาณการไหลของน้ำที่ 10 ลิตรต่อหน่วย ซึ่งเป็นอัตราที่เหมาะสมต่อระบบกรองชีวภาพไข่มุก (*Wolffia* spp.) ทำให้ไข่มุกสามารถดูดซับสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในรูปของสารอินทรีย์จากเศษอาหารและสิ่งขับถ่ายของปลามาใช้ในการสังเคราะห์มวลชีวภาพได้อย่างเต็มศักยภาพ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นไปตามวัฏจักรไนโตรเจนเพื่อนำสารอาหารกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในระบบบำบัดน้ำเสียทางการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำตามที่ Huang et al. [9] ได้ศึกษาไว้

ลักษณะการทำงานของระบบนี้มีความสอดคล้องกับ [4] ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพการผลิตปลานิลร่วมกับการปลูกพืชในระบบหมุนเวียนน้ำ โดยพบว่า ระบบน้ำหมุนเวียนที่ดีจะส่งเสริมให้พืชทำหน้าที่เป็นหน่วยกรองชีวภาพ (Biofilter) บำบัดสารมลพิษได้อย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับ Zhu et al. [5] และ Kettongruang, Morikawa and .Boonmak [7] ที่ระบุว่าพืชในวงศ์ Lemnaceae และแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องมีศักยภาพสูงในการกำจัดสารประกอบไนโตรเจน การนำระบบกรองพืช (Phytoremediation Filter) มาประยุกต์ใช้ลักษณะนี้ จึงสามารถ

ทดแทนชุดกรองทางกายภาพ (Physical filter) รูปแบบเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประหยัดต้นทุน และส่งเสริมความยั่งยืนภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนตามรายงานของ Zhu et al. [3] และ Aich et al. [10]

นอกจากนี้ กลไกการหมุนเวียนน้ำกลับจากถาดไข่ฝาลงสู่บ่อเลี้ยงปลา เป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO) โดยกระบวนการหมุนเวียนของน้ำทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างน้ำและอากาศ ส่งผลให้ระบบรักษาเสถียรภาพของค่า DO ตลอดระยะเวลา 60 วัน ให้อยู่ในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของปลานิล โดยเฉพาะในชุดทดลองที่มีความหนาแน่น 30 ตัวต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าเฉลี่ย DO สูงสุดและเสถียรที่ 5.1 ± 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำ (> 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ให้อากาศเชิงกล (Mechanical aeration) เพิ่มเติม ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับแนวทางการจัดการระบบหมุนเวียนน้ำของ Goda et al. [11] ที่ระบุว่าการออกแบบทิศทางและกลไกการไหลของน้ำตามธรรมชาติสามารถเพิ่มออกซิเจนและลดความเครียดสะสมของสัตว์น้ำได้ และยังสอดคล้องกับแนวคิดของ Kurniawan et al. [8], Zahrani et al. [12] ที่อธิบายว่าการรักษาระดับคุณภาพน้ำและออกซิเจนให้คงที่ภายใต้ความหนาแน่นที่เหมาะสมเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตของปลานิล ยิ่งไปกว่านั้น [6] ได้ยืนยันถึงมูลค่าทางโภชนาการของไข่ฝานในระบบนี้ โครงสร้างระบบปิดที่พัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้จึงถือเป็นนวัตกรรมการเกษตรยั่งยืนที่ประหยัดพลังงานไฟฟ้า และตอบสนองต่อแนวคิดการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง ตามที่ Motlagh et al. [13] และ Kibria et al. [1], [2] ได้เสนอแนวทางไว้ในการสร้างระบบการผลิตอาหารแบบหมุนเวียนที่ยั่งยืน

2. ผลของความหนาแน่นต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตาย

ผลการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่น 50 ตัวต่อตารางเมตร ส่งผลให้อัตราการรอดตายลดลงเหลือร้อยละ 42.92 เกิดจากภาวะเครียดทางสรีรวิทยา (Physiological Stress) ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ เหล็กไหล จันทะบุตร และคณะ [4] ที่ระบุว่าการจัดการความหนาแน่นที่ไม่เหมาะสมในระบบหมุนเวียนน้ำ (RAS) ส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาตรน้ำต่อตัวปลา (Reduced Water Volume Per Fish) นำไปสู่การแย่งชิงพื้นที่และพื้นที่หาอาหาร อีกทั้งความหนาแน่นที่สูงเกินขีดความสามารถในการรองรับ (Carrying Capacity) ยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนก๊าซผ่านเหงือก (Impaired Gill Gas Exchange Efficiency) เนื่องจากระดับออกซิเจนละลายน้ำถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วและมีการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในเชิงสรีรวิทยา ความเครียดที่เกิดจากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมนี้ กระตุ้นให้ปลานิลตอบสนองผ่านแกน HPI-axis (Hypothalamic-Pituitary-Interrenal axis) ซึ่งเป็นกลไกหลักในการจัดการความเครียด [10] ภาวะดังกล่าวส่งผลให้ร่างกายต้องมีการปรับเปลี่ยนการใช้พลังงาน (Energy Reallocation) จากกระบวนการเจริญเติบโตไปสู่การซ่อมแซมร่างกายและการรักษาดุลยภาพแทน ส่งผลให้ปลานิลในกลุ่มทดลองที่มีความหนาแน่นสูงมีอัตราการเติบโตต่ำกว่ากลุ่มที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 30 ตัวต่อตารางเมตรอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การตอบสนองต่อความเครียดที่ยืดเยื้อยังส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของความสามารถในการต้านทานโรคและประสิทธิภาพการย่อยอาหาร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zahrani et al. [12] ที่ระบุว่าการจัดการความหนาแน่นที่เหมาะสมเป็นกลยุทธ์สำคัญในการส่งเสริมสวัสดิภาพสัตว์น้ำในระบบ RAS นอกจากนี้ การสะสมของสารประกอบไนโตรเจนที่สูงขึ้นในระบบที่มีความหนาแน่นไม่เหมาะสม ยังเป็นปัจจัยวิกฤตที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของคุณภาพน้ำสอดคล้องกับ Huanget al. [9] ได้วิเคราะห์ไว้ว่าความเป็นพิษของแอมโมเนียและไนไตรต์ที่สูงเกินระดับมาตรฐานเป็นตัวแปรสำคัญที่ลดอัตราการรอดตายของสัตว์น้ำ ทั้งนี้ Huanget et al. [9] และ Zhu et al. [3] ยืนยันตรงกันว่าการควบคุมความหนาแน่นในระดับที่เหมาะสม ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโต แต่ยังช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคจากแบคทีเรียและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้อาหารจากของเสียตามแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียนอีกด้วย ซึ่งปัจจัยด้านการจัดการนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของระบบการผลิตอาหารแบบหมุนเวียน [1], [10]

3. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและพลวัตของคุณภาพน้ำ

การที่ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ลดลงต่ำกว่าระดับ 3.5 ± 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า pH ลดลงเหลือ 7.0 ในกลุ่มที่มีความหนาแน่นสูงที่สุดนั้น เป็นผลโดยตรงจากการที่สัตว์น้ำใช้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของประชากร ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการจัดการระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำหนาแน่นสูงที่กล่าวถึงโดย Nama, Biswal, and Paul et al. [10] ในส่วนของค่า pH ที่ลดลงนั้น สอดคล้องกับกลไกทางเคมีของกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ตามที่ Huang et al. [9] ได้อธิบายไว้ว่า เมื่อปริมาณสารอินทรีย์และสารประกอบไนโตรเจนสูงเกินกว่าที่แบคทีเรียกลุ่ม Nitrifying Bacteria และพืชในระบบจะดูดซับได้ทัน กระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรตจะมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออนออกมาในระบบ ทำให้สภาวะแวดล้อมมีความเป็นกรดมากขึ้น

การวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่า ระบบกรองชีวภาพ (Biofilter) ในชุดทดลองที่มีความหนาแน่นสูงที่สุดไม่สามารถรองรับภาระสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate) ที่เพิ่มขึ้นได้อย่างเพียงพอ ส่งผลให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียและไนเตรตซึ่งเป็นสารพิษต่อสัตว์น้ำ ยิ่งไปกว่านั้น [9] ยังระบุว่าความไม่สมดุลดังกล่าวส่งผลเสียโดยตรงต่อสุขภาพของปลาและประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัด ส่งผลให้คุณภาพน้ำโดยรวมลดลง ซึ่งประเด็นนี้สะท้อนถึงขีดจำกัดของระบบกรองชีวภาพภายใต้ความหนาแน่นที่เกินสมดุล ซึ่งสอดคล้องกับรายงานความท้าทายในระบบบ่อควาโปนิคส์เชิงพาณิชย์ของ Goddek et al. [2] และ Zahrani et al. [12] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เหล็กไหล จันทะบุตร, และคณะ [4] ที่ยืนยันว่าการควบคุมความหนาแน่นให้สัมพันธ์กับความสามารถในการบำบัดของระบบกรองชีวภาพ เป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาเสถียรภาพของคุณภาพน้ำในระบบบ่อควาโปนิคส์อย่างยั่งยืน

4. ความสมดุลระบบนำหมุนเวียนระหว่างการผลิตสัตว์น้ำและการใช้ประโยชน์จากไข่มฝ้า

ผลผลิตไข่มฝ้าสูงสุดที่ 110.67 กรัม ในกลุ่มที่อัตราความหนาแน่นสูงที่สุด (50 ตัวต่อตารางเมตร) แสดงให้เห็นว่าพืชได้รับสารอาหาร (Nutrient Loading Rate) ในปริมาณที่สูงเกินความต้องการปกติ ซึ่งกระตุ้นการเจริญเติบโตของมวลชีวภาพได้ดีในระยะสั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ร่วมกับอัตราการรอดตายของปลานิล พบว่าสภาวะดังกล่าวเป็น "ความสมดุลที่ไม่ยั่งยืน" (Unsustainable Equilibrium) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ Motlagh et al. [13] ที่ระบุว่าการใช้ไข่มฝ้า (*Wolffia* spp.) เป็นพืชบำบัดน้ำเสียจำเป็นต้องคำนึงถึงอัตราการใช้อาหารที่เหมาะสม เนื่องจากพืชอาจเจริญเติบโตได้ดีในระยะเริ่มแรก แต่จะนำไปสู่การเสื่อมสภาพของคุณภาพน้ำอย่างรวดเร็วหากระบบกรองชีวภาพไม่สามารถกำจัดสารพิษได้ทัน

ในทางกลับกัน ชุดทดลองที่มีความหนาแน่น 30 ตัวต่อตารางเมตร แสดงให้เห็นถึง "จุดสมดุล" ของระบบน้ำหมุนเวียน ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ เหล็กไหล จันทะบุตร และคณะ [4] ที่ชี้ให้เห็นว่าความยั่งยืนของระบบบ่อควาโปนิคส์ขึ้นอยู่กับจัดการปริมาณของเสียจากปลาให้สัมพันธ์กับอัตราการดูดซับธาตุอาหารของพืชอย่างสมดุล การรักษาความหนาแน่นในระดับที่เหมาะสมนี้ไม่เพียงแต่ช่วยคงอัตราการรอดตายของสัตว์น้ำ แต่ยังช่วยให้ระบบสามารถดำเนินไปได้อย่างมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำหรือใช้สารเคมีในการบำบัดคุณภาพน้ำ ซึ่งเป็นการตอบโจทย์การทำเกษตรแบบพึ่งพาตนเองและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนที่แท้จริง [1], [2]

ข้อเสนอแนะ

การนำผลการวิจัยไปใช้งาน ควรคำนึงถึงการเลือกใช้ความหนาแน่นที่ 30 ตัวต่อตารางเมตร เพราะเป็นระดับที่ดีที่สุดในการให้ปลานิลมีการเจริญเติบโตและอัตราการรอดชีวิตสูงที่สุด นอกจากนี้ยังช่วยรักษาสมดุลของค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรลดความเสี่ยงต่อการสูญเสียผลผลิตและ

เพิ่มความสามารถในการจัดการคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การใช้ไข่ฝำเป็นส่วนหนึ่งของระบบกรองชีวภาพจะช่วยลดการสะสมของสารประกอบไนโตรเจน และเพิ่มผลผลิตผลพลอยได้ที่เป็นแหล่งโปรตีนเสริม

การวิจัยในครั้งต่อไปควรเน้นไปที่การนำไข่ฝำจากระบบบะควาโปนิคส์มาประยุกต์ใช้ในการทำอาหารปลาเพื่อลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากพบว่าระบบนี้สามารถให้ผลผลิตไข่ฝำได้ในปริมาณมาก จึงแนะนำให้มีการศึกษาในครั้งถัดไปเพื่อพัฒนาสู่ระบบการเกษตรหมุนเวียนที่สมบูรณ์และลดการพึ่งพาอาหารเม็ดจากภายนอก

ควรมีการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับ ไนไตรท์ (Nitrite) และไนเตรต (Nitrate) ในระบบให้มากขึ้น เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้เป็นผลผลิตต่อเนื่องจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งหากมีการสะสมสูงเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพปลา การวิจัยในอนาคตควรหา "อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด" (Optimal Loading Ratio) ระหว่างอัตราการผลิตของเสียของปลากับการดูดซับสารอาหารของไข่ฝำ เพื่อรักษาเสถียรภาพของสารไนโตรเจนทุกรูปแบบให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตลอดระยะเวลาการเลี้ยง

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Kibria, M. Nuggeoda, S. S. S. Sarma, A. Joyce, and B. Kotzen, "The role of aquaponics in achieving circular economy goals in food production," *Circular Economy and Sustainability*, vol. 2, no. 3, pp. 1187–1205, 2022.
- [2] S. Goddek, B. Delaide, U. Mankasingh, K. V. Ragnarsdottir, H. Jijakli, and R. Thorarinsdottir, "Challenges of sustainable and commercial aquaponics," *Sustainability*, vol. 7, no. 4, pp. 4199–4224, 2015.
- [3] Z. Zhu, U. Yogev, K. J. Keesman, and A. Gross, "Promoting circular economy: Comparison of novel coupled aquaponics with anaerobic digestion and conventional aquaponic systems on nutrient dynamics and sustainability," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 208, p. 107716, 2024.
- [4] L. Jantabood, C. Kanchan, B. Sawasdee, P. Imjai, and C. Thowanna, "Suitable Stocking Density of Nile Tilapia in the Recirculation Aquaponic System," *Prawarun Agr. J.*, vol. 14, no. 2, pp. 225–230, 2017. (in Thai)
- [5] Z. Zhu, S. Wu, K. J. Keesman, A. Gross, and Z. Fan, "Evaluating the potential of *Wolffia arrhiza* for phytoremediation of aquaculture wastewater and its high-value biomass production," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 204, p. 107482, 2024.
- [6] K. Venkatachalam, S. Phongthai, R. Puttha, J. Wongsu, and N. Charoenphun, "*Wolffia globosa* as an Emerging Plant-Based Protein Source for Functional and Nutraceuticals," *Foods*, vol. 15, no. 3, p. 543, 2026.
- [7] S. Kettongruang, M. Morikawa, and C. Boonmak, "Diversity and Plant Growth-Promoting Potential of Duckweed-Associated Bacteria on *Wolffia globosa* Biomass Production," *Environmental Microbiology Reports*, vol. 18, no. 2, p. e70312, 2026.
- [8] S. B. Kurniawan, A. Ahmad, M. F. Imron, S. R. S. Abdullah, A. R. Othman, and H. A. Hasan, "Achieving a Biocircular Economy in the Aquaculture Sector Through Waste Valorization," *Toxics*, vol. 13, no. 2, p. 131, 2025.
- [9] Y. Huang, L. Li, R. Li, B. Li, Q. Wang, and K. Song, "Nitrogen cycling and resource recovery from aquaculture wastewater treatment systems: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 22, pp. 2467–2482, 2024..
- [10] N. Aich, S. Nama, A. Biswal, and T. Paul, "A Review on Recirculating Aquaculture Systems: Challenges and Opportunities for Sustainable Aquaculture," *International Journal of Chemical Studies*, vol. 8, no. 2, pp. 2404–2409, 2020.
- [11] A. M. A.-S. Goda, A. M. Aboseif, M. K. S. Taha, E. Y. Mohammady, N. M. Aboushabana, H. M. Nazmi, M. M. Zaher, H. A. Aly, M. A. S. El-Okaby, N. Ibáñez Otazua, and M. Ashour, "Optimizing nutrient utilization, hydraulic loading rate, and feed conversion ratios through freshwater IMTA-aquaponic and hydroponic systems as an environmentally sustainable aquaculture concept," *Scientific Reports*, vol. 14, Art. no. 14878, 2024.

- [12] M. S. Al-Zahrani, H. A. Hassanien, F. W. Alsaade, and H. A. M. Wahsheh, “Sustainability of Growth Performance, Water Quality, and Productivity of Nile Tilapia-Spinach Affected by Feeding and Fasting Regimes in Nutrient Film Technique-Based Aquaponics,” *Sustainability*, vol. 16, no. 2, p. 625, 2024
- [13] S. R. Motlagh, B. Chalermthai, R. Khezri, M. Etesami, C. Y. Chee, and K. Nootong, “Process Simulation and Techno-Economic Analysis of Wolffia-Integrated Recirculating Aquaculture Systems for Nutrient Recovery and CO₂ Utilization,” *Sustainability*, vol. 18, no. 8, p. 4104, 2026