วารสารแก่นเกษตร THAIJO

Content List Available at ThaiJo

Khon Kaen Agriculture Journal

Journal Home Page : https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj



ผลของระดับความหนาแน่นต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสมในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนอัจฉริยะโดยใช้หนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่น

Effects of stocking density on growth performance of hybrid catfish (*Clarias macrocephalus x C. gariepinus*) in a smart recirculating aquaculture system using black soldier fly larvae as fishmeal replacement

โดม อดุลย์สุข[1]*, เทพพิทักษ์ บุญทา[1], จอมสุดา ดวงวงษา[1], ประเสริฐ ประสงค์ผล[1] และ ดารชาต์ เทียมเมือง[1]

Dome Adoonsook[1]*, Teppitag Boonta [1], Jomsuda Duangwongsa[1], Prasert Prasongphol[1] and Daracha Thiammueang[1]

[1] *คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้*
[1] *Faculty of Fisheries Technology and Aquatic Resources Maejo University*

บทคัดย่อ: การศึกษาผลของระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกันในการเลี้ยงปลาดุกลูกผสม (*Clarias macrocephalus x C. gariepinus*) ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนอัจฉริยะโดยใช้หนอนแมลงวันลาย (*Hermetia illucens*) ทดแทนปลาป่นในอัตรา 75% แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลองที่ระดับความหนาแน่น 50, 100 และ 150 ตัว/ตร.ม. ในระบบที่มีบ่อเลี้ยงขนาด 5 ลบ.ม. พร้อมกรองกายภาพ (Drum filter) กรองชีวภาพ (MBBR) และกรอง UV โดยควบคุมระบบผ่าน PLC ร่วมกับ IoT ผลการทดลองพบว่าปลาดุกที่ความหนาแน่น 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. มีน้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย (325.56±9.75 และ 322.98±12.63 ก./ตัว) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (4.78±0.03 %/วัน) ไม่ต่างกัน (P>0.05) แต่สูงกว่ากลุ่ม 150 ตัว/ตร.ม. (282.49±4.29 ก./ตัว และ 4.66±0.01%/วัน) อย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) อัตรารอดที่ระดับความหนาแน่น 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. อยู่ที่ 91.56±3.36% และ 88.33±3.93% ตามลำดับ สูงกว่ากลุ่ม 150 ตัว/ตร.ม. (75.26±6.80%) อย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) โดยตลอดการเลี้ยงของทั้งสามชุดการทดลอง ระบบสามารถควบคุมค่า DO ได้ในช่วง 3.72–4.27 มก./ล., pH 7.11–7.56 และ TAN 0.36–0.45 มก./ล. อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากอัตราผลตอบแทนการลงทุน (ROI) พบว่าการเลี้ยงปลาที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ตร.ม. ให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูงที่สุด โดยมีกำไรสุทธิและอัตราผลตอบแทนการลงทุน (ROI) สูงสุดที่ 53.55% สรุปได้ว่าการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบ RAS ที่ใช้หนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่น 75% เหมาะสมที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ตร.ม. เนื่องจากมีผลผลิตสูง คุณภาพน้ำเหมาะสม ประสิทธิภาพการใช้อาหารดีที่สุด และให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูงสุด

คำสำคัญ: ปลาดุกลูกผสม; ระบบน้ำหมุนเวียนอัจฉริยะ; หนอนแมลงวันลาย; ระดับความหนาแน่น; คุณภาพน้ำ

ABSTRACT: This study investigated the effects of different stocking densities on the growth performance of hybrid catfish (*Clarias macrocephalus x C. gariepinus*) in a smart recirculating aquaculture system (Smart RAS), using black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) as a 75% replacement for fishmeal. The experiment was conducted with three stocking densities of 50, 100, and 150 fish/m² in a 5 m³ culture tank equipped with physical filtration (Drum filter), biological filtration (MBBR), and UV sterilization, controlled by a PLC integrated with IoT technology. Results indicated

* Corresponding author: dome_fb@hotmail.com

Received: date; March 25, 2025 Revised: date; July 1, 2025

Accepted: date; July 7, 2025 Published: date; December 18, 2025

that final average weights (325.56±9.75 and 322.98±12.63 g/fish) and specific growth rates (4.78±0.03%/day) of catfish stocked at 50 and 100 fish/m² were not significantly different (P>0.05), but were significantly higher than those stocked at 150 fish/m² (282.49±4.29 g/fish and 4.66±0.01%/day, respectively; P<0.05). Survival rates at densities of 50 and 100 fish/m² (91.56±3.36% and 88.33±3.93%, respectively) were significantly higher (P<0.05) compared to the 150 fish/m² group (75.26±6.80%). Throughout the study period, the automated control system effectively maintained water quality parameters, with dissolved oxygen (DO) between 3.72–4.27 mg/L, pH between 7.11–7.56, and total ammonia nitrogen (TAN) between 0.36–0.45 mg/L. Economic analysis revealed that the stocking density of 100 fish/m² provided the highest return on investment (ROI) at 53.55%. Thus, stocking hybrid catfish at 100 fish/m² in a smart RAS using black soldier fly larvae to replace 75% of fishmeal is recommended, as it maximizes production, maintains optimal water quality, achieves the best feed utilization efficiency, and offers the highest economic returns.

Keywords: hybrid catfish; recirculating aquaculture system (RAS); black soldier fly larvae; stocking density; water quality

บทนำ

อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการผลิตอาหารเพื่อตอบสนองความต้องการแหล่งโปรตีนของประชากรโลกที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง Garlock et al. (2022) และ Naylor et al. (2021) รายงานว่า การบริโภคสัตว์น้ำต่อคนของประชากรโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นในอนาคต อย่างไรก็ตาม การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบดั้งเดิมมักเผชิญกับความท้าทายต่างๆ เช่น ต้นทุนอาหารที่สูงขึ้น การระบาดของโรค และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น มลภาวะทางน้ำและการใช้ทรัพยากรอย่างไม่ยั่งยืน (Ahmed and Turchini, 2021; Engle et al., 2020)

ดังนั้น การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงที่มีประสิทธิภาพ ยั่งยืน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงเป็นสิ่งจำเป็น ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนน้ำ (Recirculating Aquaculture System: RAS) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถลดการใช้น้ำและลดการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมโดยการนำน้ำเสียกลับมาบำบัดและใช้ใหม่ (Ahmed and Turchini, 2021) นอกจากนี้ RAS ยังช่วยควบคุมสภาพแวดล้อมในการเลี้ยงสัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดความเครียดและความเสี่ยงต่อโรค ส่งผลให้อัตรารอดและอัตราการเจริญเติบโตดีขึ้น (Engle et al., 2020)

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การผลิตและการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในประเทศไทยขยายตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความก้าวหน้าในการผลิตลูกพันธุ์ปลาดุกในโรงเพาะฟักและคุณสมบัติที่โดดเด่นของปลาดุกลูกผสม (*Clarias macrocephalus x C. gariepinus*) ซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว ทนทานต่อโรค และมีคุณภาพเนื้อดี (Poapolathep et al., 2024) ส่งผลให้ปัจจุบันปลาดุกลูกผสมมีสัดส่วนมากกว่า 90% ของผลผลิตปลาดุกที่เพาะเลี้ยงในประเทศไทย (Lisachov et al., 2023) โดยในปี ค.ศ.2020 ประเทศไทยมีปริมาณการผลิตปลาดุกประมาณ 100,000 ตัน คิดเป็นมูลค่าการตลาดกว่า 150 ล้านเหรียญสหรัฐ (Phetsang et al., 2021)

ความหนาแน่นในการเลี้ยงปลา (stocking density) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโต อัตรารอด และสุขภาพของปลาดุกในระบบเพาะเลี้ยง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อผลผลิตและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของฟาร์ม (Oké and Goosen, 2019) ระบบ RAS ช่วยให้สามารถเลี้ยงปลาดุกได้ที่ความหนาแน่นสูงกว่าระบบดั้งเดิม เนื่องจากสามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้ดี ทำให้ปลาดุกเติบโตและมีอัตรารอดสูงกว่า 90% (Pasch and Palm, 2021) อย่างไรก็ตาม การเลี้ยงที่ความหนาแน่นสูงเกินไปอาจเพิ่มความเครียดและความเสี่ยงต่อคุณภาพน้ำที่ลดลง ส่งผลให้อัตราการตายเพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพการใช้อาหารลดลง (Pasch and Palm, 2021) เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเปิดอย่างการเลี้ยงบ่อดินที่ไม่ใช้ RAS แม้จะมีต้นทุนเริ่มต้นและการใช้พลังงานต่ำกว่า แต่ต้องใช้พื้นที่และน้ำมากกว่า และไม่สามารถรองรับความหนาแน่นของปลาได้สูงเท่ากับ RAS ในขณะที่ RAS แม้จะช่วยลดการใช้น้ำและพื้นที่ต่อผลผลิต แต่มีค่าใช้จ่ายด้านการลงทุนและพลังงานสูงกว่า (Engle et al., 2020)

จากมูลค่าทางเศรษฐกิจและปริมาณการผลิตดังกล่าว ตลาดภายในประเทศจึงเป็นช่องทางหลักในการจัดจำหน่ายปลาดุกลูกผสม โดยนิยมบริโภคในรูปแบบสดและผลิตภัณฑ์แปรรูปหลากหลายชนิด ทำให้ปลาดุกลูกผสมกลายเป็นแหล่งโปรตีนราคาย่อมเยาที่สำคัญต่อโภชนาการของผู้บริโภคไทย (Phetsang et al., 2021) อย่างไรก็ตาม แนวโน้มเศรษฐกิจของการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมยังขึ้นอยู่กับต้นทุนการผลิต โดยเฉพาะต้นทุนอาหารซึ่งมีสัดส่วนสูงถึง 50–70% ของต้นทุนทั้งหมด (Engle et al., 2020) หนอนแมลงวัน

ลาย (Black Soldier Fly Larvae: BSFL) เป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการใช้ทดแทนปลาป่นในอาหารสัตว์น้ำ โดยไม่ส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโต สุขภาพ และคุณภาพของปลา (Bartucz et al., 2023; Nogales-Mérida et al., 2019) อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนค่าอาหาร ส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน และลดปริมาณขยะอินทรีย์ (Alfiko et al., 2022)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระดับความหนาแน่นที่แตกต่าง (50, 100 และ 150 ตัว/ตร.ม. ซึ่งค่าดังกล่าวอิงจากช่วงความหนาแน่นที่ใช้จริงในอุตสาหกรรมการเลี้ยงปลาดุก ตั้งแต่ระดับมาตรฐานถึงเข้มข้น และสอดคล้องกับขีดจำกัดที่ระบบ RAS สามารถรองรับได้) กันต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพน้ำ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนอัจฉริยะที่ใช้หนอนแมลงวันลาย (*Hermetia illucens*) ทดแทนปลาป่นในอัตรา 75% เพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบ RAS อย่างยั่งยืนสำหรับเกษตรกรต่อไป

วิธีการศึกษา

การเตรียมสัตว์ทดลอง

การทดลองโดยใช้สถานที่ของคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ เตรียมปลาทดลองที่ได้มาจากการเพาะและอนุบาลของคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยทำการคัดขนาดลูกปลาดุกลูกผสม (*Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*) ขนาด 13–15 ก./ตัว มาพักไว้ในบ่อซีเมนต์ เติมอากาศ และให้อาหารวันละ 4 ครั้งเป็นเวลา 7 วัน ในระหว่างการพักปลา ควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในเกณฑ์เหมาะสม โดยค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ (DO) อยู่ระหว่าง 4.5–5.2 มก./ล., ค่าแอมโมเนีย (NH_3-N) ต่ำกว่า 0.3 มก./ล., ไนไตรต์ (NO_2^-) ต่ำกว่า 0.05 มก./ล. และค่า pH อยู่ในช่วง 6.5–8.0 จากนั้นแยกใส่ในชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 จำนวน 350, 700 และ 1,050 ตัว ตามลำดับ

การเตรียมอาหารทดลอง

1. การเตรียมหนอนแมลงวันลายป่นทำโดยรวบรวมหนอนแมลงวันลายระยะก่อนเข้าดักแด้ จากถังน้ำหมักเศษผลไม้ และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 10 °ซ จนได้ปริมาณ 10 กก. แล้วนำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °ซ นาน 2 วัน จากนั้นนำไปบดละเอียดด้วยเครื่องบดแห้ง และนำมาวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาคุณค่าทางโภชสาร (proximate analysis) ได้แก่ โปรตีน เยื่อใย ไขมัน เถ้า คาร์โบไฮเดรต และความชื้น ตามวิธีของ AOAC (1990) โดยผลการวิเคราะห์เป็นไปตาม **Table 1**

Table 1 Chemical nutritional of *H. illucens* larvae meal and fish meal

No.	Proximate analysis (%)	Amount	
		Fishmeal	*H. illucens*
1	Protein	52.5	47.41
2	Moisture	8.11	5.14
3	Ash	29.06	12.18
4	Fat	8.57	7.65
5	Fiber	1.65	7.75
6	NFE	3.11	19.21

2. อาหารทดลองสำหรับปลาดุกลูกผสม ประกอบด้วยอาหารปลาสูตรผสมหนอนแมลงวันลายต่อปลาป่นในอัตราส่วน 75:25 โดยขั้นตอนการผลิตอาหารปลาเริ่มจากการบดปลายข้าวสุกและกล้วยน้ำว้าสุกด้วยเครื่องบดเนื้อ จากนั้นผสมวัตถุดิบอื่นๆ ตามสัดส่วนใน **Table 2** คลุกเคล้าให้เข้ากัน อัดเม็ดด้วยเครื่องบดเนื้อ และร่อนด้วยรำละเอียดเพื่อให้ได้อาหารเม็ด นำอาหารที่ได้ไปผึ่งให้แห้งและเก็บ

ในภาชนะปิดสนิท ตัวอย่างอาหาร 100 ก. ถูกส่งไปวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน เยื่อใย ไขมัน เถ้า คาร์โบไฮเดรต และความชื้น ตามวิธี AOAC (1990) **(Table 3)** ในการทดลองเลี้ยงปลาดุกลูกผสม ให้อาหารดังกล่าวในปริมาณ 5% ของน้ำหนักตัว วันละ 2 ครั้ง (เช้า-เย็น) และปรับปริมาณอาหารทุกสัปดาห์ตามน้ำหนักตัวที่เปลี่ยนแปลง และจัดการเก็บอาหารส่วนที่เหลือออกจากบ่อหลังการให้อาหารทุกครั้ง เพื่อป้องกันการเน่าเสียและรักษาคุณภาพน้ำ

Table 2 Fish feed ingredient (%)

No.	Raw materials	Percentage
1	Fishmeal	5
2	BSFL Powder	15
3	Soybean Meal	35
4	Rice Bran Fine	21
5	Cooked Broken Rice	10
6	Ripe Banana	10
7	Coconut Meal	2
8	Effective Microorganisms (EM)	1
9	Vegetable Oil	1
	SUM	100
	Production Cost (Baht/kg)	10.81

Table 3 Chemical nutritional of fish feed

No.	Proximate analysis (%)	Amount
1	Protein	32.03
2	Moisture	9.75
3	Ash	12.95
4	Fat	12.05
5	Fiber	7.41
6	NFE	7.42

การเตรียมระบบ RAS อัจฉริยะสำหรับการเลี้ยงปลาดุกลูกผสม

ระบบ RAS อัจฉริยะสำหรับการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมมีจำนวนทั้งหมด 3 ชุด ทำงานแยกกันอย่างอิสระต่อกัน **(Figure 1)** โดยการออกแบบระบบเลี้ยงปลาแบบ RAS ใน 1 ชุดการทดลอง **(Figure 2)** ประกอบไปด้วยบ่อเลี้ยงปลาพลาสติกขนาด 5,000 ล. (กว้าง 3.0 ม. สูง 70 ซม.) ทั้งหมด 3 บ่อ โดยน้ำที่ผ่านการเลี้ยงจะไหลล้นทางท่อน้ำล้นขนาด 2 นิ้ว ที่ติดตั้งภายในบ่อ ไหลล้นเข้าสู่ระบบกรองกายภาพชนิด Drum filter เพื่อกรองเอาตะกอนของเสียจากการขับถ่ายและเศษอาหารเหลือออก ก่อนที่น้ำจะไหลเข้าสู่บ่อกรองชีวภาพชนิด Moving bed bioreactor (MBBR) ซึ่งเป็นบ่อบำบัดแอมโมเนียโดยอาศัยกระบวนการแบคทีเรียกลุ่มไนตริฟิเคชันเป็นหลัก จำนวน 1 บ่อ จุน้ำที่ 200 ล. โดยภายในบรรจุตัวกลางชีวภาพ (Bio-media) ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) 900 ตร.ม./ลบ.ม. ปริมาตร 60 ล. ใช้ปั๊มขนาด 220-240 วัตต์ ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น ACM-375SH ที่มีอัตราการไหลประมาณ 6,000 ล./ชม. โดยมีปริมาณน้ำทั้งระบบ 8,200 ล. สามารถหมุนเวียนน้ำทั้งระบบได้ภายในเวลาประมาณ 1 ชม. 20 นาที/รอบ วันละ 10 รอบ คิดเป็นปริมาตรน้ำที่

หมุนเวียน 82,000 ล./วัน โดยน้ำที่ผ่านการกรองทั้งทางกายภาพและชีวภาพแล้วจะไหลผ่านระบบฆ่าเชื้อก่อโรคด้วย UV filter ชนิดหลอดสัมผัสน้ำ ขนาด 30 วัตต์ ก่อนสูบกลับเข้าบ่อเลี้ยงต่อไป การให้อากาศในบ่อเลี้ยงและบ่อ MBBR ด้วยปั๊มลมผ่านหัวทราย และมีการเติมน้ำที่พักไว้ในถังเก็บน้ำขนาด 1,000 ล. อย่างน้อย 7 วันก่อนเติมเข้าในระบบบ่อเลี้ยง ประมาณ 800 ล./สัปดาห์ เนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำระหว่างการเลี้ยง

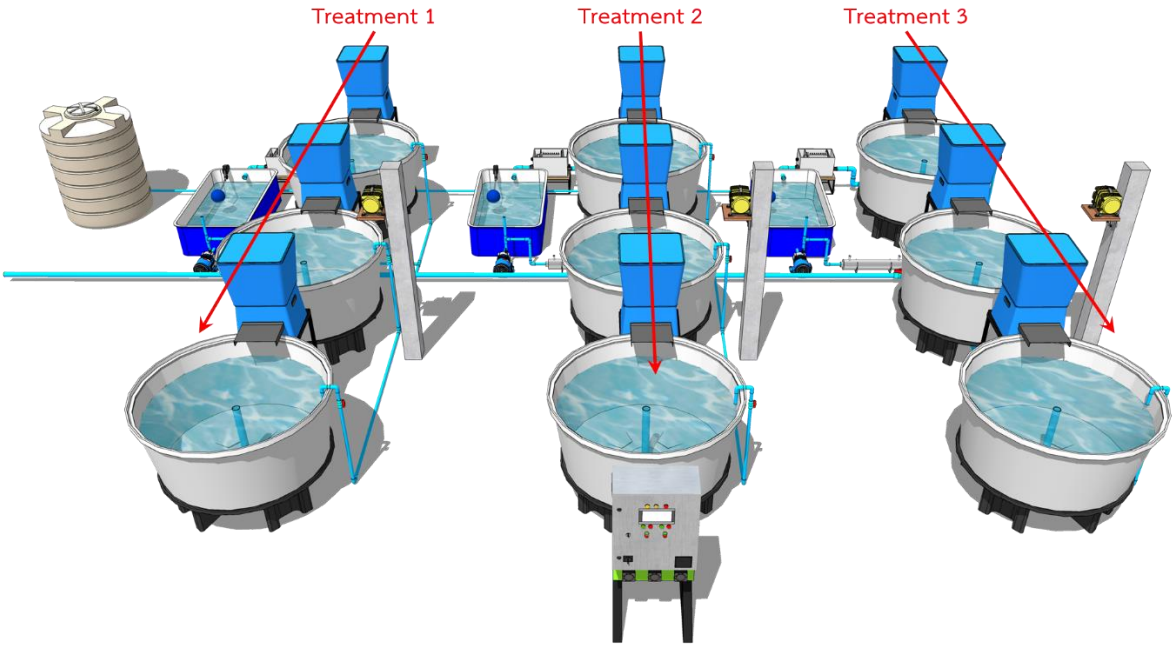


Figure 1 3 treatment groups of a smart RAS for hybrid catfish culture.

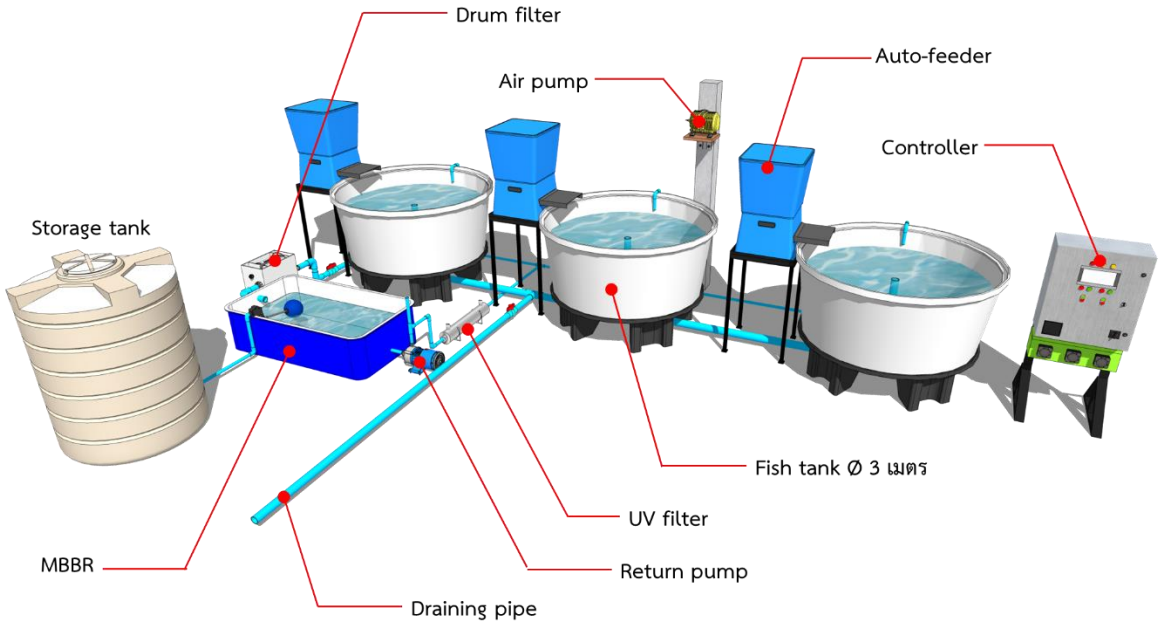


Figure 2 System components of a smart RAS for hybrid catfish culture in 1 treatment.

สำหรับระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับ RAS อัจฉริยะ **(Figure 3)** ประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด (Programmable Logic Controller: PLC) ยี่ห้อ Laink kong รุ่น LK3U-32-10AD-2DA ควบคุมผ่านหน้าจอสัมผัส (Human Machine Interface: HMI) ขนาด 7 นิ้ว ยี่ห้อ Haiwell รุ่น B7H-W ที่สามารถแสดงผล เชื่อมต่อ Wi-Fi ควบคุมและบันทึกข้อมูลที่มาจากเซ็นเซอร์ต่างๆที่ติดตั้งอยู่ภายในแต่ละบ่อเลี้ยงคือ เซ็นเซอร์วัดค่า DO, เซ็นเซอร์วัดค่าอุณหภูมิน้ำ และเซ็นเซอร์วัดค่า pH ผ่าน Haiwell Cloud และแอปพลิเคชันมือถือ **(Figure 4)**

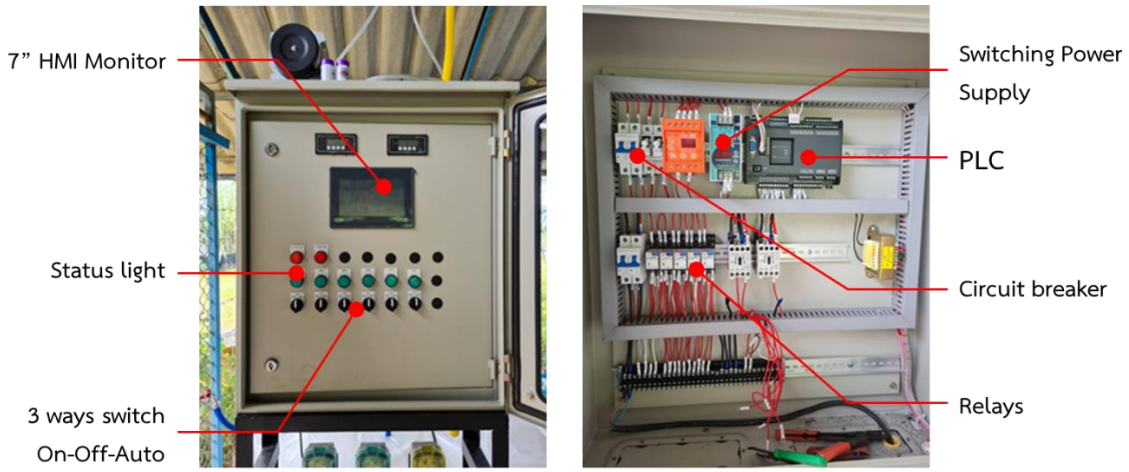


Figure 3 A controller system components for a smart RAS.

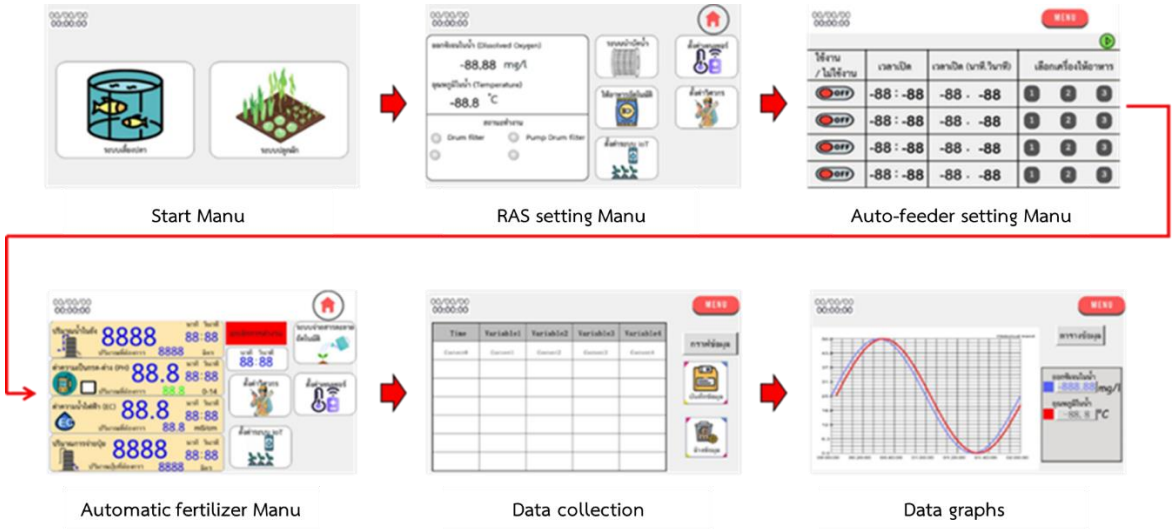


Figure 4 Water quality alerts through HMI and mobile applications.

สำหรับการควบคุมอัตโนมัติในงานวิจัยนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรมลง PLC เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดปั๊มลมอัตโนมัติให้การทำงานขึ้นอยู่กับเซ็นเซอร์วัดค่าระดับ DO ที่ติดตั้งในแต่ละบ่อ **(Figure 5 (a))** โดยทำการเขียนโปรแกรมการทำงานดังนี้ **(Figure 6)** ระบบอ่านค่าจากเซ็นเซอร์วัดค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO sensor) อย่างต่อเนื่อง เมื่อค่าที่อ่านได้ต่ำกว่า 3 มก./ล. ระบบจะส่งคำสั่งเปิดปั๊มเติมอากาศ ปั๊มเติมอากาศจะทำงานต่อเนื่องจนกว่าค่า DO ที่อ่านได้จะสูงกว่า 4.5 มก./ล. จากนั้นจึงจะสั่งปิดปั๊มเติมอากาศ เมื่อปิดปั๊ม

แล้วระบบจะกลับไปตรวจสอบค่าออกซิเจนละลายน้ำอีกครั้ง ทำซ้ำเช่นนี้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่ระบบทำงาน นอกจากนี้ยังเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการให้อาหารอัตโนมัติ **(Figure 5 (b))** โดยสามารถตั้งค่าปริมาณการให้ และช่วงเวลาการให้อาหารได้



(a) DO Sensor (b) Auto-feeder

Figure 5 DO sensors and auto-feeder used for smart RAS.

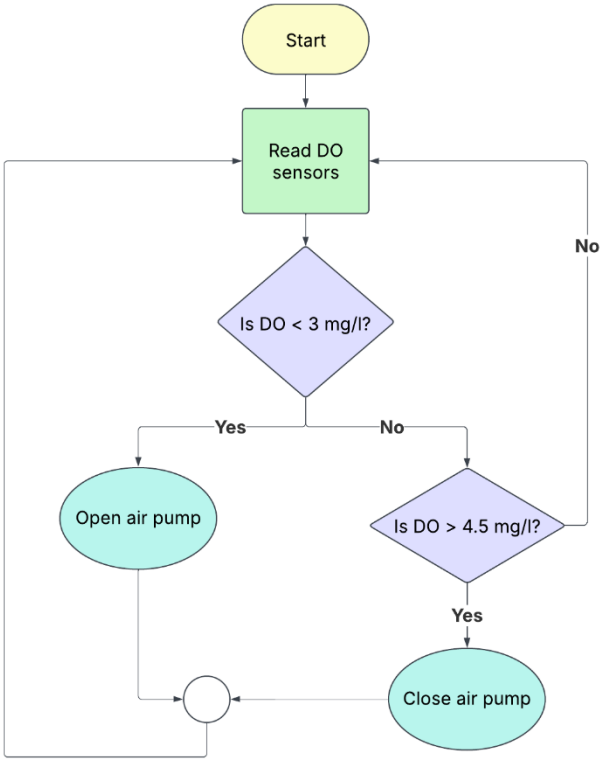


Figure 6 Flowchart of automatic DO control system

แผนการทดลอง

วางแผนการทดลอง แบบ CRD (completely randomized design: CRD) โดยบ่อพลาสติกที่ใช้ในการเลี้ยงมีความสม่ำเสมอ สุ่มบ่อพลาสติกสำหรับเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระดับความหนาแน่นแตกต่างกัน 3 ระดับ (ชุดการทดลอง: Treatments) ระดับละ 3 ซ้ำ (Replications) ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ระดับความหนาแน่น ของปลาดุกลูกผสม 50 ตัว/ตร.ม.

ชุดการทดลองที่ 2 ระดับความหนาแน่น ของปลาดุกลูกผสม 100 ตัว/ตร.ม.

ชุดการทดลองที่ 3 ระดับความหนาแน่น ของปลาดุกลูกผสม 150 ตัว/ตร.ม.

การเลี้ยงระหว่างการทดลอง

ทำการสุ่มนับและชั่งน้ำหนักลูกปลาเฉลี่ยเริ่มต้นเพื่อเลี้ยงในบ่อทดลอง ด้วยความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 50, 100 และ 150 ตัว/ตร.ม. ให้อาหารเม็ดลอยน้ำผสมหนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่น 75% ที่มีระดับโปรตีนไม่ต่ำกว่า 30% วันละ 2 ครั้ง (08.00 น. และ 16.00 น.) โดยให้อาหารแบบให้กินจนอิ่ม (satiation) ด้วยการสังเกตพฤติกรรมการกินอาหาร (appetite) ของปลา บันทึกปริมาณอาหารที่ปลากิน โดยใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงกลุ่มทดลองละ 16 สัปดาห์

การคำนวนการเจริญเติบโต

ทำการสุ่มปลาจำนวน 20% ของแต่ละซ้ำ นำมาชั่งน้ำหนักปลาด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง และวัดความยาวทั้งสิ้น (Total length; TL) โดยวัดจากปลายสุดทางด้านหัวไปจนถึงเส้นดิ่งที่ลากลงมาตัดกับปลายสุดของครีบหางส่วนที่ยาวที่สุด ทุก 7 วัน โดยงดให้อาหารปลา 1 วันก่อนชั่งน้ำหนัก นำข้อมูลน้ำหนัก ความยาว น้ำหนักอาหารที่กินมาคำนวณ เพื่อประเมินการเจริญเติบโตและอัตราการรอด ในแต่ละชุดการทดลอง ตามวิธีของ Halver (1972) ได้แก่

1) น้ำหนักสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (Final Weight: FW)
   FW = น้ำหนักเฉลี่ยของปลาต่อหนึ่งตัวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (ก./ตัว)
2) น้ำหนักที่เพิ่ม (Weight Gain: WG) คำนวณจากสูตร
   WG = น้ำหนักปลาเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง (ก.) – น้ำหนักปลาเริ่มต้น (ก.)
3) ความยาวเฉลี่ย (Average Total Length: ATL)
   ATL = ความยาวเฉลี่ยของปลาต่อหนึ่งตัว (ซม.)
4) อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (Average Daily Gain: ADG) คำนวณจากสูตร
   ADG = (น้ำหนักเฉลี่ยของปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (ก.) – น้ำหนักปลาเริ่มต้น (ก.)) / ระยะเวลาการทดลอง (วัน)
5) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (Feed Conversion Ratio: FCR) คำนวณจากสูตร
   FCR = ปริมาณอาหารที่ใช้ทั้งหมด (ก.) / น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดของปลา (ก.)
6) อัตราการรอด (Survival Rate: SR%)
   SR% = (จำนวนปลาที่รอด / จำนวนปลาที่ปล่อยเลี้ยง) × 100

การตรวจสอบคุณภาพน้ำ

การตรวจวัดคุณภาพน้ำทำโดยใช้ 2 วิธีคือการตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งภายในบ่อคือ เซ็นเซอร์วัดค่า DO, เซ็นเซอร์วัดค่าอุณหภูมิน้ำ และเซ็นเซอร์วัดค่า pH และจากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการทุก 3 วัน โดยวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนีย (ammonia) ปริมาณไนไตรท์ (nitrite) และปริมาณไนเตรท (nitrate) โดยใช้วิธีของ Boyd และ Tucker (1992) วิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอย (suspended solids) หาค่า dissolved oxygen (DO) และหาค่า biochemical oxygen demand (BOD) ใช้วิธีของ APHA และคณะ (1998) โดยมีจุดเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจวัดคือ (1) ภายในบ่อเลี้ยงทั้ง 3 บ่อ, (2) ท่อรวมน้ำเสียจาก 3 บ่อ ก่อนเข้าระบบบำบัด และ (3) น้ำที่ออกจากถัง MBBR เพื่อไหลกลับเข้าถังเลี้ยง **(Figure 7)**

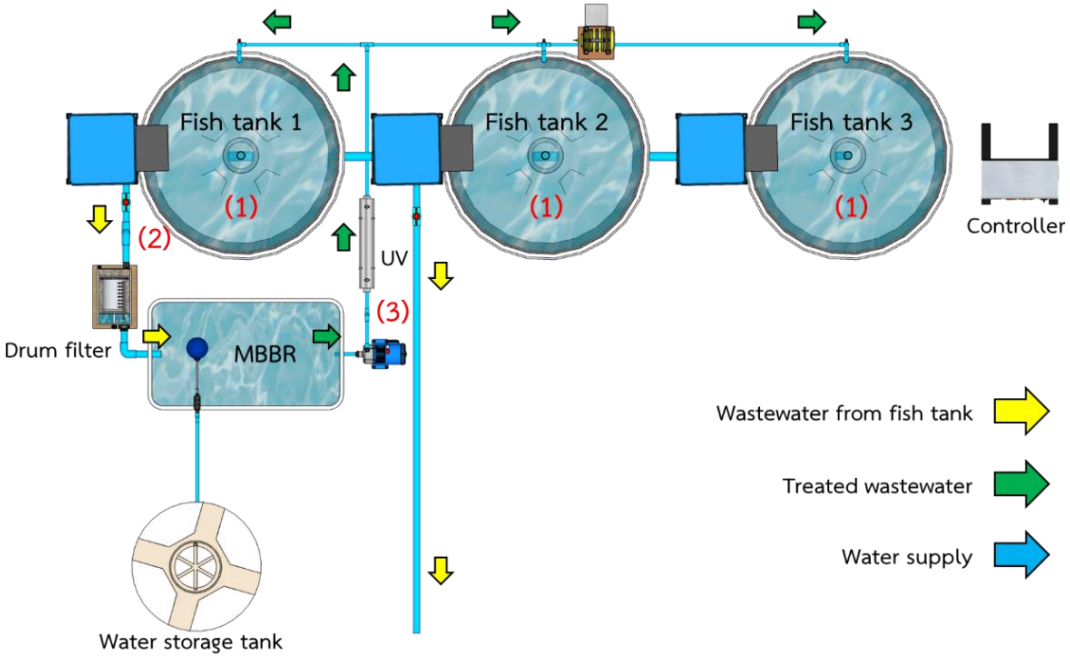


Figure 7 Sampling points for water qualities analysis.

การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (Return on Investment: ROI)

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาอัตราผลตอบแทนจากการการลงทุนจากการฝึกอบรมว่าเป็นอย่างไร ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ได้เลือกใช้แบบจำลองอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนของฟิลลิปส์ (Phillip'ROI Model) (Phillips, 2002) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังนี้

ROI (%) = (กำไรจากการลงทุน / ต้นทุนของการลงทุน) x 100%

การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการ ทดลองโดยวิธี Tukey's range test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS.15 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้มีสิทธิการใช้งานอย่างถูกต้องตามกฎหมายเพื่อประโยชน์ทางวิชาการและการวิจัย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการศึกษา

การศึกษาที่ 1 ผลของระดับความหนาแน่นต่ออัตราการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสมในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนอัจฉริยะร่วมกับการใช้หนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่น 75%

จากการทดลองเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนอัจฉริยะ ที่ระดับความหนาแน่น 50, 100 และ 150 ตัว/ตร.ม. เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์ พบว่าการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมที่ความหนาแน่น 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. มีค่าน้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุด ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) แต่แตกต่างกันทางสถิติกับกลุ่มที่เลี้ยงที่ความหนาแน่น 150 ตัว/ตร.ม. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) สำหรับอัตราการรอด พบว่าปลาดุกลูกผสมที่เลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัว/ตร.ม. มีอัตราการรอดสูงสุด รองลงมาคือกลุ่มที่เลี้ยงที่ 100 ตัว/ตร.ม. และกลุ่มที่เลี้ยงที่ 150 ตัว/ตร.ม. ซึ่งมีอัตราการรอดต่ำที่สุด โดยกลุ่มที่มีความหนาแน่น 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) แต่แตกต่างจากกลุ่ม 150 ตัว/ตร.ม. อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) นอกจากนี้ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) พบว่ากลุ่มที่มีความหนาแน่น

150 ตัว/ตร.ม. มีค่าต่ำกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) ขณะที่กลุ่มที่เลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05) **(Table 4)**

Table 4 Growth performance of hybrid catfish culture in smart RAS at different stocking densities

Growth performance	Densities		
	50 fish/m^2	**100 fish/m^2**	**150 fish/m^2**
Initial weight (g/fish)	15.74±0.76^a	14.32±0.36^a	15.57±0.33^a
final weight (g/fish)	325.56±9.75^a	322.98±12.63^a	282.49±4.29^b
Average daily gain (g/day)	2.77±0.09^a	2.76±0.12^a	2.38±0.04^b
Specific growth rate (%/day)	4.78±0.03^a	4.78±0.03^a	4.66±0.01^b
Feed conversion ratio	1.75±0.09^a	1.778±0.04^a	2.12±0.03^b
Survival rate (%)	91.56±3.36^a	88.33±3.93^a	75.26±6.80^b

All values mean ± SD, obtained from three replicates.

Values in the same row with different superscript letters are significantly different (P<0.05)

การศึกษาที่ 2 ผลของระดับความหนาแน่นต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพน้ำของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนอัจฉริยะร่วมกับการใช้หนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่น 75%

1. คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง

คุณภาพน้ำภายในบ่อเลี้ยงตลอดระยะเวลา 16 สัปดาห์ ของการทดลอง **(Table 5)** พบว่าอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 23.77±0.15 ถึง 23.83±0.04 °ซ ไม่แตกต่างกันในทุกกลุ่ม (P>0.05) ค่า pH อยู่ระหว่าง 7.11±0.02 ถึง 7.56±0.01 โดยกลุ่มความหนาแน่น 150 ตัว/ตร.ม. ต่ำกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) ค่า DO อยู่ระหว่าง 3.72±0.03 ถึง 4.27±0.02 มก./ล. โดยกลุ่ม 150 ตัว/ตร.ม. ต่ำที่สุดและแตกต่างจากกลุ่มอื่นชัดเจน (P<0.05)

ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งหมด (TAN) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.36±0.01 ถึง 0.45±0.03 มก./ล. และค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ไม่แตกตัว (NH_3-N) อยู่ในช่วง 0.0038±0.0004 ถึง 0.0085±0.0004 มก./ล. โดยพบว่ากลุ่มที่มีความหนาแน่น 150 ตัว/ตร.ม. มีค่า TAN สูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) ขณะที่ค่า NH_3-N ในกลุ่มนี้ต่ำกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) ค่าความเข้มข้นของไนไตรท์และไนเตรทเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.27±0.01 ถึง 0.32±0.02 มก./ล. และ 0.31±0.01 ถึง 0.37±0.02 มก./ล. ตามลำดับ โดยค่าไนไตรท์และไนเตรทของกลุ่ม 150 ตัว/ตร.ม. สูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) ในส่วนของปริมาณของแขวนลอยทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 8.82±0.01 ถึง 14.40±0.01 มก./ล. และค่า BOD อยู่ในช่วง 3.34±0.03 ถึง 7.24±0.02 มก./ล. โดยพบว่าทั้งสองค่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของปลา โดยกลุ่มที่มีความหนาแน่น 150 ตัว/ตร.ม. มีค่าของแขวนลอยและค่า BOD สูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)

Table 5 Water quality in fish tanks of hybrid catfish culture in smart RAS at different stocking densities

Water quality in fish tanks	Densities		
	50 fish/m^2	100 fish/m^2	150 fish/m^2
Temp (°C)	23.82±0.11^a	23.83±0.04^a	23.77±0.15^a
DO (mg/L)	4.27±0.02^a	4.16±0.06^b	3.72±0.03^c
pH	7.56±0.01^a	7.50±0.03^a	7.11±0.02^b
TAN (mg/L)	0.36±0.01^b	0.39±0.02^b	0.45±0.03^a
NH_3-N (mg/L)	0.0079±0.0010^a	0.0085±0.0004^a	0.0038±0.0004^b
Nitrite nitrogen (mg/L)	0.27±0.01^b	0.28±0.01^b	0.32±0.02^a
Nitrate nitrogen (mg/L)	0.31±0.01^b	0.34±0.01^a	0.37±0.02^a
Total suspended solid (mg/L)	8.82±0.01^b	10.47±0.03^b	14.40±0.01^a
BOD (mg/L)	3.34±0.03^c	4.85±0.02^b	7.24±0.02^a

All values mean ± SD, obtained from three replicates.

Values in the same row with different superscript letters are significantly different (P<0.05)

2. ประสิทธิภาพการกำจัดของเสียของระบบ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนอัจฉริยะในการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมโดยใช้หนอนแมลงวันลายเป็นแหล่งอาหารเสริมที่ความหนาแน่น 50, 100 และ 150 ตัว/ตร.ม. **(Table 6)** พบว่าค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำส่วนใหญ่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างความหนาแน่น 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. อย่างไรก็ตาม เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 150 ตัว/ตร.ม. พบว่าค่าพารามิเตอร์บางตัวเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับความหนาแน่นที่ต่ำกว่า

โดยค่า DO ณ จุดไหลออกของระบบมีค่ามากกว่าจุดไหลเข้าทุกระดับความหนาแน่นของปลา โดยค่า DO ไหลออกที่ความหนาแน่น 50 และ 150 ตัว/ตร.ม. (4.89±0.01 และ 4.88±0.00 มก./ล.) สูงกว่าที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ตร.ม. (4.83±0.01 มก./ล.) อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ในขณะที่ค่า pH มีแนวโน้มลดลงหลังผ่านระบบ โดยลดลงจาก 7.56±0.01 เป็น 7.18±0.01 ที่ความหนาแน่น 50 ตัว/ตร.ม. และลดลงมากขึ้นที่ระดับความหนาแน่นสูงขึ้น

สำหรับค่า TAN มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของปลาสูงขึ้น โดยที่ระดับ 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (0.05±0.00 และ 0.07±0.01 มก./ล. ตามลำดับ) แต่ที่ความหนาแน่น 150 ตัว/ตร.ม. ค่า TAN สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (0.12±0.01 มก./ล.) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงจาก 85.71±0.15% และ 82.50±0.52% ที่ 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. ตามลำดับ เหลือเพียง 72.73±1.43% ที่ 150 ตัว/ตร.ม. แนวโน้มเดียวกันนี้พบในค่า NH_3-N โดยประสิทธิภาพการกำจัดที่ 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (91.25±0.08% และ 92.95±0.42%) แต่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ 150 ตัว/ตร.ม. (83.03±1.40) สำหรับค่าไนไตรต์ (NO_2^--N) พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของปลาสูงขึ้น โดยประสิทธิภาพการกำจัดในระดับ 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. ไม่แตกต่างกัน (86.76±0.01% และ 82.94±0.03%) แต่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ 150 ตัว/ตร.ม. (72.15±0.03%)

ในด้านของประสิทธิภาพการกำจัด TSS ของระบบพบว่ามีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของปลาสูงขึ้น โดยที่ระดับ 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกัน (79.94±0.03% และ 75.09±0.05%) แต่ที่ระดับ 150 ตัว/ตร.ม. ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (65.90±0.05%) ลักษณะเดียวกันพบในค่า BOD โดยที่ระดับ 50 และ 100 ตัว/ตร.ม. มีประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกัน (90.42±1.17% และ 90.72±0.60%) แต่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ 150 ตัว/ตร.ม. (73.34±1.08%)

Table 6 Influent, effluent, and removal efficiencies of water quality parameters in smart RAS at different stocking densities

Efficiency parameters	Densities		
	50 fish/m^2	100 fish/m^2	150 fish/m^2
1. Dissolved oxygen (mg/l)			
Influent (mg/L)	4.41±0.01^b	4.39±0.00^c	4.46±0.00^a
Effluent (mg/l)	4.89±0.01^a	4.83±0.01^b	4.88±0.00^a
2. pH			
Influent (mg/L)	7.56±0.01^a	7.50±0.03^b	7.11±0.02^c
Effluent (mg/l)	7.18±0.01^a	6.90±0.03^b	6.76±0.02^c
3. Total ammonia nitrogen (TAN)			
Influent (mg/L)	0.35±0.01^b	0.40±0.02^a	0.44±0.02^a
Effluent (mg/L)	0.05±0.00^b	0.07±0.01^b	0.12±0.01^a
Removal efficiency (%)	85.71±0.15^a	82.50±0.52^a	72.73±1.43^b
4. Un-ionized Ammonia nitrogen (NH_3-N)			
Influent (mg/L)	0.00400±0.00028^a	0.00468±0.00023^b	0.00538±0.00000^c
Effluent (mg/L)	0.00035±0.00002^a	0.00033±0.00004^a	0.00059±0.00001^b
Removal efficiency (%)	91.25±0.08^a	92.95±0.42^a	83.03±1.40^b
5. Nitrite nitrogen (NO_2^--N)			
Influent (mg/L)	0.68±0.010^c	0.72±0.010^b	0.79±0.009^a
Effluent (mg/L)	0.09±0.001^b	0.13±0.002^b	0.22±0.003^a
Removal efficiency (%)	86.76±0.01^a	82.94±0.03^a	72.15±0.03^b
6. Total suspended solid (TSS)			
Influent (mg/L)	16.05±0.03^b	16.34±0.04^b	18.65±0.02^a
Effluent (mg/L)	3.22±0.01^b	4.07±0.01^b	6.36±0.01^a
Removal efficiency (%)	79.94±0.03^a	75.09±0.05^a	65.90±0.05^b
7. Biological oxygen demand (BOD)			
Influent (mg/L)	3.34±0.03^c	4.85±0.02^b	7.24±0.02^a
Effluent (mg/L)	0.32±0.04^b	0.45±0.03^b	1.93±0.08^a
Removal efficiency (%)	90.42±1.17^a	90.72±0.60^a	73.34±1.08^b

All values mean ± SD, obtained from three replicates.

Values in the same row with different superscript letters are significantly different (P<0.05)

การศึกษาที่ 3 ต้นทุนการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนอัจฉริยะร่วมกับการใช้หนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่น 75%

ต้นทุนการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนอัจฉริยะร่วมกับการใช้หนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่น 75% ที่ความหนาแน่นแตกต่างกัน **(Table 7)** พบว่า ต้นทุนรวมทั้งหมดของความหนาแน่น 50, 100 และ 150 ตัว/ตร.ม. คือ

5,272, 7,992 และ 9,567 บาท/บ่อ ตามลำดับ โดยแบ่งเป็นต้นทุนแปรผันร้อยละ 51, 67 และ 73 ของต้นทุนทั้งหมด ตามลำดับ โดยต้นทุนแปรผันที่สำคัญของทุกชุดการทดลองคือ ค่าอาหารปลา (31%-52%) รองลงมาคือค่าลูกพันธุ์ปลา และค่าไฟฟ้า (8%-13%) สำหรับต้นทุนคงที่มีค่าร้อยละ 49, 33 และ 27 ตามลำดับ โดยค่าต้นทุนคงที่ที่สำคัญคือค่าเสื่อมของระบบ RAS คิดเป็นร้อยละ 47, 31 และ 26 ตามลำดับ

ผลผลิตการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมพบว่าที่ความหนาแน่น 50, 100 และ 150 ตัว/ตร.ม. มีผลผลิต 92, 208 และ 223 กก./บ่อ ตามลำดับ รายได้จากการเลี้ยงพบว่าราคาขายปลาดุกเนื้ออยู่ที่ 59 บาท/กก. มีรายได้รวม 5,428, 12,272 และ 13,157 บาท/บ่อ ตามลำดับ โดยมีกำไรรวมสุทธิอยู่ที่ 156, 4,280 และ 3,590 บาท/บ่อ ตามลำดับ อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) มีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยเท่ากับ 2.96%, 53.55% และ 37.52% ตามลำดับ

Table 7 Cost and return analysis of hybrid catfish culture in smart RAS at different stocking densities

Production costs	50 fish/m^2		100 fish/m^2		150 fish/m^2	
	Cost	%	Cost	%	Cost	%
Variable costs	**2,664**	**51**	**5,384**	**67**	**6,959**	**73**
- Fish feed cost (Baht)	1,645	31	3,751	47	4,950	52
- Fish fingerlings cost (Baht)	424	8	846	11	1,265	13
- Electricity cost (Baht)	595	11	787	10	744	8
Fixed costs	**2,608**	**49**	**2,608**	**33**	**2,608**	**27**
- Depreciation of RAS equipment cost (Baht)	2,483	47	2,483	31	2,483	26
- Depreciation of Aquaculture Equipment cost (Baht)	125	2	125	2	125	1
Total cost (Baht)	**5,272**	**100**	**7,992**	**100**	**9,567**	**100**
Total Production (kg)	**92**		**208**		**223**	
Selling Price (Baht/kg)	59		59		59	
Turnover (Baht)	5,428		12,272		13,157	
Net Profit (Baht)	**156**		**4,280**		**3,590**	
Net Profit (Baht/kg)	1.70		20.58		16.10	
Return on Investment (%ROI)	**2.96**		**53.55**		**37.52**	

วิจารณ์

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าระดับความหนาแน่นของการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนอัจฉริยะที่ควบคุมด้วยระบบ PLC ร่วมกับการใช้หนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่น 75% มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่ออัตราการเจริญเติบโต อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และอัตราการรอดชีวิตของปลา โดยพบว่าการเลี้ยงที่ความหนาแน่นระดับต่ำและปานกลาง (50 และ 100 ตัว/ตร.ม.) ส่งผลให้ปลามีน้ำหนักสุดท้าย, ADG, อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ, อัตราการรอด และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ดีกว่ากลุ่มที่เลี้ยงในความหนาแน่นสูง (150 ตัว/ตร.ม.) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Majhi et al., (2023) ที่ระบุว่าการเลี้ยงปลาที่ระดับความหนาแน่นที่เหมาะสมช่วยลดความเครียดและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้อาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่เลี้ยงปลาดุกลูกผสมด้วยอาหารสำเร็จรูป พบว่าผลการทดลองในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสมที่เลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 100 ตัว/ตร.ม. เป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของ Bartucz et al. (2023) ซึ่งระบุว่าการใช้อาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วย BSFL สามารถช่วยให้การเจริญเติบโตของปลาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ในด้านคุณภาพน้ำ พบว่าการเพิ่มขึ้นของระดับความหนาแน่นส่งผลให้ค่า DO ลดลง และค่า TAN, ไนไตรท์, ไนเตรท, TSS และ BOD เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อความเครียดและภูมิคุ้มกันของปลา สอดคล้องกับรายงานของ Majhi et al. (2023) ที่พบว่าเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น คุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงเสื่อมลง ส่งผลเสียต่อสุขภาพปลาอย่างชัดเจน สำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติที่ตั้งค่าให้ปั๊มเติมอากาศเริ่มทำงานเมื่อ DO ต่ำกว่า 3 มก./ล. และหยุดทำงานเมื่อ DO สูงกว่า 4.5 มก./ล. นั้น พบว่าระบบสามารถรักษาระดับออกซิเจนให้อยู่ในช่วงเหมาะสมต่อการเลี้ยงได้ดี โดยไม่ต่ำกว่าระดับขั้นต่ำที่ปลาต้องการ (Ross, 2002) ช่วยลดความเครียดและอัตราการตาย อย่างไรก็ตาม ค่า DO ที่ผันผวนมากในช่วง 3.0–4.5 มก./ล. อาจส่งผลกระทบต่อปลาที่เลี้ยงในความหนาแน่นสูง แนะนำให้ปรับช่วงทำงานของระบบให้แคบลง เช่น เริ่มทำงานที่ 3.5 และหยุดที่ 4.0–4.5 มก./ล. เพื่อลดความผันผวนของค่า DO ในบ่อเลี้ยง ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอของ Yang et al. (2024) ที่แนะนำการใช้ระบบควบคุม DO อัจฉริยะเพื่อลดความผันผวนของค่า DO ในบ่อเลี้ยงและเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ด้านประสิทธิภาพการกำจัดของเสียของระบบ RAS พบว่าเมื่อความหนาแน่นเกิน 100 ตัว/ตร.ม. ประสิทธิภาพของระบบกรองทั้งชีวภาพและทางกายภาพลดลงอย่างชัดเจน โดยค่า TAN, ไนไตรท์, TSS และ BOD ในน้ำที่ออกจากระบบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับรายงานของ Brown et al. (2024) ที่ระบุว่าระบบ RAS มีข้อจำกัดในการจัดการของเสียเมื่อระดับความหนาแน่นสูงเกินขีดความสามารถของระบบกรองต่างๆ ภายในระบบ RAS

ในส่วนของต้นทุนการผลิต พบว่าต้นทุนรวมเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่น โดยมีค่าอาหารเป็นต้นทุนแปรผันหลัก และค่าเสื่อมของระบบเป็นต้นทุนคงที่ที่สำคัญ แม้ความหนาแน่นที่สูงจะเพิ่มผลผลิต แต่กำไรสุทธิกลับไม่ได้เพิ่มตาม โดยพบว่าความหนาแน่น 100 ตัว/ตร.ม. ให้กำไรสุทธิและ ROI สูงสุดที่ 53.55% ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Limbu et al. (2022) ที่พบว่าการใช้ BSFL ร่วมกับการบริหารจัดการความหนาแน่นที่เหมาะสมสามารถลดต้นทุนอาหารและเพิ่มอัตราผลตอบแทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น ในด้านประสิทธิภาพการเลี้ยงและประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพน้ำของระบบ แนะนำว่าระดับความหนาแน่นที่เหมาะสมในการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบ RAS ร่วมกับการใช้หนอนแมลงวันลายไม่ควรเกิน 100 ตัว/ตร.ม. เพื่อรักษาคุณภาพน้ำ ประสิทธิภาพของระบบ ประสิทธิภาพการผลิตให้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี และได้ผลตอบแทนที่สูงที่สุด

สรุป

ผลการวิจัยพบว่าการเลี้ยงปลาดุกลูกผสม (*Clarias macrocephalus x C. gariepinus*) ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนอัจฉริยะ (RAS) โดยใช้หนอนแมลงวันลาย (*H. illucens*) ทดแทนปลาป่นในอัตรา 75% ที่ระดับความหนาแน่น 50, 100 และ 150 ตัว/ตร.ม. ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต คุณภาพน้ำ ประสิทธิภาพระบบ และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ระดับความหนาแน่น 100 ตัว/ตร.ม. เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากปลามีการเจริญเติบโตที่ดี อัตรารอดสูง คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์เหมาะสมตลอดระยะเวลาการเลี้ยง มีค่า FCR ต่ำ และให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูงที่สุด โดยมีอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) สูงสุดที่ 53.55% ดังนั้น จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า การเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบหมุนเวียนน้ำอัจฉริยะที่ใช้หนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่น 75% ควรดำเนินการที่ระดับความหนาแน่นประมาณ 100 ตัว/ตร.ม. เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดทั้งด้านผลผลิต คุณภาพน้ำ การทำงานของระบบ และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ

ข้อเสนอแนะ

จากการกำหนดระดับความหนาแน่นในงานวิจัยครั้งนี้ที่ 50, 100 และ 150 ตัว/ตร.ม. ควรมีการศึกษาทดลองเพิ่มเติมในอนาคต โดยพิจารณาการกำหนดค่าความหนาแน่นในช่วงที่ละเอียดขึ้น เช่น 110, 120, 130 ตัว/ตร.ม. รวมถึงตรวจวัดค่าชีวเคมีในซีรั่ม ฮอร์โมนความเครียด (คอร์ติซอล) ค่าโลหิตวิทยา (AST, ALT) และฮีมาโตคริต เพื่อประเมินความเครียด ทดสอบการทนทานต่อโรค วิเคราะห์อัตราการย่อยได้ของอาหารที่ใช้ BSFL และทดลองระดับการแทนที่ปลาป่นที่หลากหลาย (50%, 75%, 100%) นอกจากนี้ ผู้ที่จะนำระบบ RAS ไปใช้ต้องมีความรู้ความเข้าใจด้านการควบคุมระบบ การจัดการคุณภาพน้ำ และการดูแลสุขภาพปลา ตลอดจนสามารถแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ เพื่อให้การเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบ RAS มีประสิทธิภาพสูงสุดและลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหาย

การอนุญาตวิจัยในสัตว์

การทดลองนี้ได้รับอนุญาตใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ ตามเอกสารอนุญาตเลขที่ (approval number) MACUC 026F/2565

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ และงบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมที่ให้การสนับสนุนในการจัดสรรงบประมาณวิจัยรหัสทะเบียนวิจัย มจ.1-67-06-005 และบุคคลอื่นที่มิได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่ได้ให้ความเกื้อหนุน ทำให้การวิจัยในครั้งนี้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

แจ่มจันทร์ เพชรศิริ, ทวีเดช ไชยนาพงษ์ และธัญญา พันธ์ฤทธิ์ดา. 2564. ประสิทธิภาพของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกในสูตรอาหารสำเร็จรูปต่อการเลี้ยงปลาดุกลูกผสม (*Clarias macrocephalus × C. gariepinus*) ในกระชัง. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา. 40: 16–30.

Ahmed, N., and G. M. Turchini. 2021. Recirculating aquaculture systems (RAS): Environmental solution and climate change adaptation. Journal of Cleaner Production. 297: 126604.

Alfiko, Y., D. Xie, R. T. Astuti, J. H. Wong, and L. Wang. 2022. Insects as a feed ingredient for fish culture: Status and trends. Aquaculture and Fisheries. 7: 166–178.

AOAC. 1990. Official Methods of Analysis. 15th Edition. Analytical Chemist. Washington DC.: Association of Official.

APHA, AWWA and WPCF. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Edition. American Public Health Association, Washington, D.C.

Bartucz, T., E. Csókás, B. Nagy, J. Molnár, B. Urbányi, and B. Csorbai. 2023. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) meal as direct replacement of complex fish feed for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and African catfish (*Clarias gariepinus*). Life. 13: 1978.

Boyd, C. E., and C. S. Tucker. 1992. Water Quality and Pond Soil Analyses for Aquaculture. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, Alabama.

Brown, A. R., R. W. Wilson, and C. R. Tyler. 2024. Assessing the benefits and challenges of recirculating aquaculture systems (RAS) for Atlantic salmon production. Reviews in Fisheries Science and Aquaculture. 32: 168–186.

Engle, C. R., G. Kumar, and J. van Senten. 2020. Cost drivers and profitability of U.S. Pond, raceway, and RAS aquaculture. Journal of the World Aquaculture Society. 51: 847–873.

Garlock, T. M., F. Asche, J. L. Anderson, A. Ceballos-Concha, D. C. Love, T. C. Osmundsen, and R. B. M. Pincinato. 2022. Aquaculture: The missing contributor in the food security agenda. Global Food Security. 32: 100620.

Halver, J. 1972. Fish Nutrition. Academic Press, NY.

Limbu, S. M., J. Lu, C. Ma, W. Xu, and M. Zhang. 2022. Black soldier fly (*Hermetia illucens*, *L.*) larvae meal improves growth performance, feed efficiency and economic returns of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*, L.) fry. Aquaculture, Fish and Fisheries. 2: 167–178.

Lisachov, A., D. H. M. Nguyen, T. Panthum, S. F. Ahmad, W. Singchat, J. Ponjarat, K. Jaisamut, P. Srisapoome, P. Duengkae, S. Hatachote, K. Sriphairoj, N. Muangmai, S. Unajak, K. Han, U. Na Nakorn, and K. Srikulnath. 2023.

Emerging importance of bighead catfish (*Clarias macrocephalus*) and North African catfish (*Clarias gariepinus*) as a bioresource and their genomic perspective. Aquaculture. 573: 739585.

Majhi, S. S., B. Mandal, A. Das, A. K. Prusty, S. Dasgupta, P. Paria, B. K. Das, and K. N. Mohanta. 2023. Effect of stocking density on growth, water quality changes and cost efficiency of butter catfish (*Ompok bimaculatus*) during seed rearing in a biofloc system. Fishes. 8: 61.

Naylor, R. L., R. W. Hardy, A. H. Buschmann, S. R. Bush, L. Cao, D. H. Klinger, D. C. Little, J. Lubchenco, S. E. Shumway, and M. Troell. 2021. A 20-year retrospective review of global aquaculture. Nature. 591: 551–563.

Nogales-Mérida, S., P. Gobbi, D. Józefiak, J. Mazurkiewicz, K. Dudek, M. Rawski, B. Kierończyk, and A. Józefiak. 2019. Insect meals in fish nutrition. Reviews in Aquaculture. 11: 1080–1103.

Oké, V., and N. J. Goosen. 2019. The effect of stocking density on profitability of African catfish (*Clarias gariepinus*) culture in extensive pond systems. Aquaculture. 507: 385–392.

Pasch, J., and H. W. Palm. 2021. Economic analysis and improvement opportunities of African catfish (*Clarias gariepinus*) aquaculture in Northern Germany. Sustainability. 13: 13569.

Phetsang, H., W. Panpipat, A. Panya, N. Phonsatta, and M. Chaijan. 2021. Occurrence and development of off odor compounds in farmed hybrid catfish (*Clarias macrocephalus × Clarias gariepinus*) muscle during refrigerated storage: Chemical and volatilomic analysis. Foods. 10: 1841.

Phillips, J. J. 2002. Measuring the return on investment in training and development: Certification materials. Butterworth-Heinemann, Woburn, MA.

Poapolathep, A., K. Sriphairoj, S. Hatachote, K. Wongpanit, D. Saensawath, N. Klangkaew, N. Phaochoosak, M. Giorgi, and S. Poapolathep. 2024. Pharmacokinetics of oxytetracycline in hybrid catfish (*Clarias macrocephalus × C. gariepinus*) after intravascular and oral administrations. Journal of Veterinary Science. 25: e58.

Ross, L.L. 2002. Environmental physiology and energetics. Fish and Fisheries Series. 25: 89–128.

Sorawit, P., and N. Chansawang. 2020. Economic analysis towards the feasibility of commercial recirculating aquaculture systems in Thailand. pp. 95. In: Proceedings of EMECS 11 – Managing for Sustainable Use of Estuaries and Coasts.

Yang, J., Y. Zhou, Z. Guo, Y. Zhou, and Y. Shen. 2024. Deep learning-based intelligent precise aeration strategy for factory recirculating aquaculture systems. Artificial Intelligence in Agriculture. 12: 57–71.