

TĂNG TRƯỞNG VÀ CHỐNG CHỊU STRESS AMMONIA CỦA CÁ RÔ PHI (*Oreochromis niloticus*), ĐIỀU HỒNG (*Oreochromis* sp.) VÀ RÔ ĐẦU VUÔNG (*Anabas testudineus*) NUÔI TRONG HỆ THỐNG BIOFLOC Ở ĐIỀU KIỆN PHÒNG THÍ NGHIỆM

Nguyễn Ngọc Vũ Thịnh¹, Tôn Thất Cường¹, Trần Đức Minh¹, Nguyễn Đức Thành¹,
Phạm Thị Ái Niệm², Trương Văn Đan¹, Trần Thị Thúy Hằng¹, Nguyễn Văn Huy¹,
Nguyễn Tử Minh^{1*}

¹Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế;

²Trung tâm Công nghệ sinh học Thành phố Hồ Chí Minh.

*Tác giả liên hệ: nguyentuminh@huaf.edu.vn

Nhận bài: 20/11/2025 Hoàn thành phản biện: 05/01/2025 Chấp nhận bài: 16/01/2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá và so sánh hiệu quả tăng trưởng của cá rô đầu vuông (*Anabas testudineus*), cá rô phi sông Nile (*Oreochromis niloticus*) và cá rô phi đỏ (*Oreochromis* sp.) trong điều kiện nuôi biofloc. Nghiên cứu thực hiện tổng 50 ngày trên ba đối tượng cá tưng ứng ba nghiệm thức nuôi trong môi trường biofloc (i) R_phi: rô phi; (ii) D_hong: điều hồng; (iii) Đ_vuong: rô đầu vuông, với độ lặp lại ba lần/nghiệm thức. Cá ban đầu đạt khối lượng trung bình 3,5 g/con được bố trí với mật độ 200 con/m³ (50 con/bể) trong bể có thể tích 250 L. Tỷ lệ C/N = 10 được duy trì bằng nguồn các-bon từ mật đường mía. Cá rô đầu vuông tăng trưởng tốt nhất khi đạt khối lượng 41,02 ± 1,90 g/con và tỷ lệ sống 94,67 ± 1,15% (p < 0,05). Các giá trị này tốt hơn so với ghi nhận ở cá rô phi (35,55 ± 2,02 g/con và 87,33 ± 2,31%) và điều hồng (36,70 ± 2,20 g/con và 89,33 ± 2,31%). Hàm lượng glucose và protein máu cá sai khác có ý nghĩa (p < 0,05). Cả ba loài cá có phản ứng giống nhau trong điều kiện stress TAN, với ngưỡng chịu đựng 6 mg/L và 8 mg/L. Trong đó, rô đầu vuông có thể chống chịu tốt nhất, p < 0,05. Ý nghĩa thực tiễn cho thấy đây là đối tượng ưu tiên tiềm năng (rời đến cá điều hồng và rô phi) ương nuôi theo công nghệ biofloc.

Từ khóa: Ammonia stress, *Anabas testudineus*, Biofloc, *Oreochromis*, TAN

GROWTH PERFORMANCE AND AMMONIA STRESS TOLERANCE OF NILE TILAPIA (*Oreochromis niloticus*), RED TILAPIA (*Oreochromis* sp.) AND SQUARE-HEAD CLIMBING PERCH (*Anabas testudineus*) REARED IN THE BIOFLOC SYSTEM UNDER LABORATORY CONDITIONS

Nguyen Ngoc Vu Thinh¹, Ton That Cuong¹, Tran Duc Minh¹, Nguyen Duc Thanh¹,
Pham Thi Ai Niem², Truong Van Dan¹, Tran Thi Thuy Hang¹, Nguyen Van Huy¹,
Nguyen Tu Minh^{1*}

¹University of Agriculture and Forestry, Hue University;

²Biotechnology Center of Ho Chi Minh City.

*Corresponding author: nguyentuminh@huaf.edu.vn

Received: 20/11/2025

Revised: 05/01/2025

Accepted: 16/01/2025

ABSTRACT

This research evaluated and compared the growth performance of square-head climbing perch (*Anabas testudineus*), Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), and red tilapia (*Oreochromis* sp.) under biofloc conditions. A 50-day experiment was conducted with three treatments in biofloc: (i) R_phi: Nile tilapia, (ii) D_hong: red tilapia, and (iii) Đ_vuong: climbing perch, each with three replicates. Fish (3.5 g/individual) were stocked at a density of 200 fish/m³ in 250-L composite tanks. A C/N ratio of 10 was maintained by supplementing molasses as the carbon source. Results showed that water quality was consistently better in the climbing perch (Đ_vuong) tanks, reflected by lower concentrations of TAN, NO₂-N and PO₄³⁻-P (p < 0.05), compared with red tilapia (D_hong) and Nile tilapia (R_phi). Climbing perch exhibited the best growth performance, with final body weight and survival rate reaching 41.02

± 1.90 g/fish and $94.67 \pm 1.15\%$ ($p < 0.05$), respectively, compared with Nile tilapia (35.55 ± 2.02 g/fish and $87.33 \pm 2.31\%$) and red tilapia (36.70 ± 2.20 g/fish and $89.33 \pm 2.31\%$). Blood glucose and protein levels in fishes differed significantly among treatments ($p < 0.05$). After harvest, all three species indicated similar responses to sudden TAN stress, with tolerance thresholds at 6 mg/L and 8 mg/L. However, climbing perch, followed by Nile tilapia, demonstrated significantly higher resistance to ammonia stress compared to the other cultured species ($p < 0.05$). Practically, this species represents a priority candidate (followed by red tilapia and Nile tilapia) for biofloc-based nursing systems.

Keywords: Ammonia stress, *Anabas testudineus*, Biofloc, *Oreochromis*, TAN

1. MỞ ĐẦU

Trước bối cảnh ngành thủy sản ngày càng đóng vai trò quan trọng trong đáp ứng nhu cầu lương thực và đảm bảo an ninh dinh dưỡng, việc lựa chọn cũng như đa dạng hóa đối tượng nuôi được xem là yếu tố then chốt để nâng cao hiệu quả quá trình sản xuất (Gloal, 2019; Minh, 2023). Theo xu thế này, trong nuôi trồng thủy sản nước ngọt các loài cá rô phi, cá diêu hồng hay cá rô đầu vuông đã và đang là đối tượng được tập trung phát triển tại Việt Nam cũng như các nước trong khu vực Đông Nam Á (Lê Minh Khôi và cs., 2023; Renuhadevi và cs., 2019). Chúng được ưa chuộng là nhờ vào ưu thế sinh trưởng nhanh, khả năng thích nghi tốt với nhiều điều kiện môi trường và đặc biệt là giá trị kinh tế cao phù hợp với yêu cầu của người nuôi (Leonard và cs. 2000; Lê Minh Khôi và cs., 2023; Trần Thị Năng Thu và cs., 2022). Tuy nhiên, sự phát triển nhanh các mô hình nuôi thâm canh truyền thống với mật độ cao ở những loài cá này nhằm gia tăng năng suất thu hoạch sẽ đồng thời kéo theo nguy cơ ô nhiễm môi trường nuôi ngày càng lớn (Minh, 2023). Nguy cơ này có thể được giảm thiểu hiệu quả bằng việc áp dụng các công nghệ nuôi thân thiện với môi trường như hệ thống tuần hoàn (RAS) hay biofloc (Phan và Nguyen, 2023; Pinho, 2021). Trong đó, ứng dụng công nghệ biofloc đã được chứng minh là giải pháp tiềm năng giúp cải thiện chất lượng nước, nâng cao độ an toàn sinh học và tối ưu hóa giá trị tăng trưởng của các đối tượng nuôi này (Pinho, 2021). Tính hiệu quả của mô hình biofloc là kết quả tổng hòa của nhiều cơ chế đồng bộ bao gồm (1) xử lý chất ô nhiễm nitơ vô cơ như $\text{NH}_4^+\text{-N}$ và $\text{NO}_2\text{-N}$ thông qua quá trình đồng hóa thành protein

xây dựng cấu trúc biofloc; (2) cung cấp nguồn thức ăn bổ sung tại chỗ cho vật nuôi bằng chính sinh khối biofloc tạo ra; (3) ức chế sự phát triển của hệ vi khuẩn cơ hội gây bệnh, điển hình là các chủng *Vibrio* sp., trong môi trường nước nuôi (Minh, 2023). Tính ưu việt này được Arida và cs. (2023) ghi nhận trên cá rô đồng (*Anabas testudineus*) nuôi trong môi trường biofloc, với tăng trưởng khối lượng và tỷ lệ sống tốt hơn lần lượt là 29% và 9%, so với không biofloc. Khi so sánh sinh trưởng của cá rô phi (*Oreochromis niloticus*) và diêu hồng (*Oreochromis* sp.) trong môi trường biofloc trong ao đất và nguồn vi sinh bổ sung từ chế phẩm bên ngoài (Pond Plus, Bayer, Việt Nam), Phan và Nguyen (2023) đã ghi nhận chỉ có hệ số chuyển hóa thức ăn là chỉ tiêu thể hiện sự khác biệt về mặt thống kê (FCR, $p < 0,05$). Farhana và cs. (2025) đã khẳng định tính khả thi trong ứng dụng thương mại của việc nuôi cá rô phi giai đoạn giống trong hệ thống biofloc. Qua đó, cá 35 ngày tuổi thể hiện khả năng thích nghi vượt trội, với khối lượng thu hoạch $292,33 \pm 5,54$ g, tỷ lệ sống $98,67 \pm 0,58\%$ và tỷ lệ lợi nhuận/chi phí là 1,426. Việc ứng dụng môi trường biofloc trong ương nuôi cá rô phi còn đem lại hiệu quả sử dụng dinh dưỡng tốt, tiêu thụ nước tối thiểu và tác động môi trường thấp. Blatt và cs. (2025) đã chỉ ra rằng, khi nuôi cá trong hệ thống biofloc thì tỷ lệ giữ lại dinh dưỡng trong sinh khối cá đạt 29,74% tổng các-bon (TC), 45,38% tổng nitơ (TN) và 46,34% tổng photpho (TP). Hệ thống có tiềm năng phú dưỡng thấp, ước tính 57,39 kg TC, 20,02 kg TN và 5,70 kg TP trên mỗi tấn cá. Như vậy, việc áp dụng hệ thống biofloc trong ương nuôi các loài cá rô nhìn chung đều đem lại hiệu quả tích cực khi góp

phần ổn định chất lượng nước và cải thiện tăng trưởng của đối tượng nuôi. Đến nay chưa có đủ cơ sở khoa học để xác định loài cá rô phù hợp nhất cho mô hình biofloc dựa trên nguồn vi sinh vật hiếu khí dị dưỡng sẵn có trong môi trường ao nuôi. Nghiên cứu này được tiến hành nhằm đánh giá và so sánh khả năng tăng trưởng cùng sức chịu đựng stress môi trường của cá rô phi (*O. niloticus*), cá diêu hồng (*Oreochromis* sp.) và cá rô đầu vuông (*A. testudineus*) nuôi theo công nghệ biofloc sử dụng hệ vi sinh tại chỗ.

2. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thời gian và địa điểm nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện từ tháng 5/2025–7/2025, tại phòng thí nghiệm WetLab, Khoa Thủy sản, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế. Thí nghiệm được bố trí hoàn toàn ngẫu nhiên trên ba loài cá nghiên cứu nuôi theo công nghệ biofloc, bao gồm cá rô phi *O. niloticus*, diêu hồng *Oreochromis* sp. và rô đầu vuông *A. testudineus*.

2.2. Phương pháp bố trí thí nghiệm

Nước ngọt được cấp trực tiếp từ nguồn nước máy qua túi lọc 1 μm vào bể tròn composite thí nghiệm, với thể tích 300 L và thể tích làm việc 250 L. Sau đó, nước được xử lý bằng chlorine (100 ppm) và sục khí liên tục trong vòng 48 giờ (để loại bỏ hết chlorine) trước khi thả cá vào bể nuôi. Khí Oxy trong hệ thống bể nuôi được cung cấp liên tục bằng máy thổi khí (Veratti, Trung Quốc) thông qua vòng sủi oxy nano được đặt tại vị trí trung tâm của đáy bể (Công ty Trách nhiệm hữu hạn Maxaquastore, Đà

Nẵng), đảm bảo hàm lượng Oxy luôn được duy trì ở mức $\geq 4 \text{ mg/L}$. Chế độ chiếu sáng được duy trì theo chu kỳ 12 giờ sáng/12 giờ tối bằng hệ thống đèn huỳnh quang với cường độ 1200 lux (Hioki FT3424 Lux Meter, Nhật Bản).

Giống cá rô phi, diêu hồng và rô đầu vuông khỏe mạnh sạch bệnh được thu mua từ Trung tâm Giống Thủy sản Thành phố Huế. Sau khi vận chuyển về phòng thí nghiệm, cá được lưu giữ và thuần dưỡng trong 5 ngày trước khi bố trí vào các bể nuôi với mật độ 50 con/bể (200 con/ m^3). Cá tại thời điểm ban đầu nghiên cứu đạt khối lượng và chiều dài trung bình lần lượt là 3,5 g/con và 4,3 cm/con. Thí nghiệm được tiến hành với ba nghiệm thức bao gồm (i) R_phi: cá rô phi nuôi trong môi trường biofloc, (ii) D_hong: cá diêu hồng nuôi trong môi trường biofloc và (iii) Đ_vuong: cá rô đầu vuông nuôi trong môi trường biofloc. Mỗi nghiệm thức được lặp lại 3 lần với tổng thời gian nuôi 50 ngày.

Cá thí nghiệm trong suốt quá trình nuôi thử nghiệm được cho ăn 2 lần mỗi ngày (7 giờ 00 và 19 giờ 00) bằng thức ăn viên nổi (986, Gold Coin Feedmill, Ninh Bình). Thành phần protein (36,68%) trong thức ăn (AOAC, 2005-981.10) và tổng cacbon (34,77%) trong mật đường mía (TCVN 9294: 2012) được phân tích tại Trung tâm Công nghệ sinh học, Thành phố Hồ Chí Minh. Tỷ lệ C/N=10 trong môi trường nước bể nuôi được duy trì trong suốt vụ nuôi để đảm bảo tính cân bằng và ổn định của hệ vi sinh phát triển tạo sinh khối biofloc. Tỷ lệ này được duy trì bằng nguồn cacbon bên ngoài từ mật đường mía theo công thức như sau (Minh, 2023):

$$\text{Mật mía (g)} = \left(\text{lượng ăn (g)} \times \text{tỷ lệ P thức ăn (\%)} \times 0,16 \times 0,75 \times \text{tỷ lệ } \frac{C}{N} \right) \div \text{tỷ lệ C mật đường (\%)}$$

Khẩu phần ăn hằng ngày được tính toán theo hướng dẫn của nhà sản xuất (in trên bao bì), dao động từ 3–10% khối lượng thân/ngày. Không thay nước và siphon trong suốt quá trình thí nghiệm.

2.2.1. Phương pháp theo dõi chất lượng nước

Thông số chất lượng nước và biofloc được theo dõi định kỳ suốt quá trình thí nghiệm. Nhiệt độ và pH được đo trực tiếp hàng ngày tại bể nuôi. Đối với các chỉ tiêu

chất lượng nước còn lại, mẫu nước được thu tại vị trí trung tâm bể (từ đáy bể lên 30 cm) sử dụng thiết bị lấy mẫu nằm ngang và lọc qua màng 0,45µm (Whatman® Puradisc 30,

Anh Quốc) trước khi được dùng cho các phân tích. Tần suất thu mẫu và phương pháp xác định được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Yếu tố đánh giá và phương pháp xác định trong suốt vụ nuôi

Chỉ tiêu	Đơn vị	Tần suất	Phương pháp
Nhiệt độ	°C	1 lần/ngày	Temp/pH meter (Adwa
pH		1 lần/ngày	112, Romania)
SS (Settleable solids-chất rắn có thể lắng được)	mL/L	5 ngày/lần	Phễu Imhoff, Italia
Tổng ammonia (TAN)	mg/L	5 ngày/lần	Hanna HI733, Romania
NO ₂ -N	mg/L	5 ngày/lần	Hanna HI767, Romania
PO ₄ ³⁻ -P	mg/L	5 ngày/lần	Hanna, HI708, Romania

2.2.2. Phương pháp xác định các chỉ tiêu sinh trưởng của cá

Định kỳ 7 ngày/lần, cá tại các bể thí nghiệm được thu mẫu ngẫu nhiên (10 cá thể/nghiệm thức) và thấm bớt nước qua giấy lọc (Whatman No1, Anh Quốc) trước khi xác định chiều dài từ điểm đầu tiên hàm dưới đến điểm cuối cùng của đuôi bằng thước đo chia vạch (mm) và khối lượng bằng cân có độ chia 0.001 g. Khả năng tăng trưởng, tỷ lệ sống và hệ số chuyển hóa thức ăn FCR của cá được xác định theo các công thức sau (Châu Tài Tảo và cs., 2021):

Tốc độ tăng trưởng khối lượng theo ngày: $DWG (g/ngày) = (Wt - W0)/t$
(2)

Tốc độ tăng trưởng chiều dài theo ngày: $DLG (cm/ngày) = (Lt - L0)/t$
(3)

Tỷ lệ sống: $SR (\%) =$

$(\text{số cá thu hoạch/số cá thả ban đầu}) \times 100$
(4)

Hệ số chuyển hóa thức ăn:

$FCR =$
 $(\text{tổng thức ăn sử dụng})/(\text{tổng trọng lượng cá tăng})$
(5)

Với Wt, W0, Lt, L0 và t – khối lượng tại thời điểm xác định (g), khối lượng ban đầu (g), chiều dài tại điểm xác định (mm), chiều dài ban đầu (mm) và thời gian nuôi (ngày).

2.2.3. Phương pháp xác định thành phần sinh hóa máu cá

Tại thời điểm kết thúc thí nghiệm, cá khỏe mạnh không có các tổn thương hay

dấu hiệu xuất huyết trên cơ thể (5 cá thể/bể) được thu ngẫu nhiên sau 12 giờ kể từ lần cho ăn cuối cùng và gây mê hoàn toàn bằng dung dịch AQUI-S® (Bayer, Việt nam) với nồng độ 100 ppm trong 5 phút (Lê Minh Khôi và cs., 2023). Máu cá được lấy từ động mạch chủ ở cột sống (vị trí gần đuôi) bằng bơm tiêm vô trùng có kích thước đầu kim 27 G × 13 mm. Mẫu máu thu được từ các bể cùng một nghiệm thức được gộp lại làm mẫu đại diện cho mỗi loài cá nghiên cứu. Sau khi ly tâm ở 600 × g (4°C trong 5 phút), phần dịch nổi huyết thanh được sử dụng ngay cho các phân tích về chỉ tiêu glucose, protein tổng số, triglyceride và cholesterol toàn phần bằng thiết bị phân tích mẫu tự động sử dụng quy trình và hóa chất theo hãng trên máy Cobas® 6000 Analyzer (Roche Diagnostics, Thụy Sĩ).

2.2.4. Phương pháp đánh giá khả năng chống chịu stress môi trường của cá

Khả năng chống chịu stress môi trường được đánh giá sau khi kết thúc vụ nuôi trong điều kiện biến động đột ngột về TAN ở các mức nồng độ 0 mg/L, 2 mg/L, 4 mg/L, 6 mg/L, 8 mg/L và 10 mg/L. Nồng độ TAN trong môi trường nước được chuẩn bị bằng cách hòa tan NH₄NO₃ (dạng ion NO₃⁻ không độc cho động vật thủy sản ở ngưỡng cho phép trong thí nghiệm này) với lượng hóa chất tương ứng đã được sấy khô trong 24 giờ ở 105°C tại thời điểm bắt đầu thí nghiệm. Sau đó, cá khỏe mạnh (5 cá thể/nghiệm thức) với đặc điểm bơi lội tốt; phản xạ ánh sáng nhanh và không có dấu hiệu tổn thương trên cơ thể được lựa chọn

tham gia vào thử nghiệm này. Bể thí nghiệm có thể tích làm việc 17 L, với điều kiện ban đầu môi trường nước đạt pH 7,5 và nhiệt độ 28°C. Khả năng chống chịu stress môi trường được đánh giá dựa trên giá trị thời gian ghi nhận tại thời điểm cá chết hoàn toàn (Sudong và cs., 2010).

2.3. Phương pháp thu thập số liệu

Phân tích thống kê được thực hiện bằng phần mềm SPSS phiên bản 26 (SPSS Inc., Chicago, IL). Phân phối chuẩn và đồng nhất phương sai được kiểm định bằng Shapiro–Wilk và Levene. Số liệu không đạt điều kiện ANOVA được phân tích bằng Kruskal–Wallis. Trong khi đó, các số liệu phân phối chuẩn và phương sai đồng nhất, phân tích One-way ANOVA được áp dụng và nếu phân tích phương sai có $p < 0,05$ thì phép kiểm Tukey hoặc Tamhane ở mức ý nghĩa $p < 0,05$ được sử dụng.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Biến động yếu tố môi trường nuôi

Bảng 2 cho thấy sự biến động của nhiệt độ và pH trong quá trình thí nghiệm nhìn chung không quá lớn, với khoảng giá trị lần lượt là 25,09–30,30°C và 6,7–8,0. Sự chênh lệch này hầu như không đáng kể giữa các nghiệm thức thí nghiệm, dưới 1%, và có thể được xem như không đáng kể về mặt

thực tiễn sản xuất. Điều này dựa trên cơ sở đây là các ngưỡng nhiệt độ và pH tối ưu cho các loài cá rô nói chung sinh trưởng phát triển.

Hàm lượng TAN, NO_2^- -N và PO_4^{3-} -P thể hiện khuynh hướng tăng dần cũng như khác biệt giữa các nghiệm thức theo thời gian nuôi (Hình 1). Đây được xem là kết quả từ sự tích lũy ô nhiễm trong môi trường nước theo lượng gia tăng thức ăn cung cấp và hoạt động bài tiết của cá trong quá trình sinh trưởng phát triển của chúng. Cụ thể sau 50 ngày nuôi, nồng độ TAN, NO_2^- -N cũng như PO_4^{3-} -P của nghiệm thức R_phi ($0,76 \pm 0,10$ mg/L, $1,24 \pm 0,16$ mg/L và $4,91 \pm 0,27$ mg/L) luôn đạt giá trị lớn nhất trong ba nghiệm thức thí nghiệm ($p < 0,05$). Các ngưỡng này cao hơn trong khoảng 2,5–33,3% so với nghiệm thức D_hong ($0,68 \pm 0,08$ mg/L, $0,93 \pm 0,20$ mg/L và $4,79 \pm 0,28$ mg/L) và 25,3–148,0% so với nghiệm thức Đ_vuong ($0,44 \pm 0,10$ mg/L, $0,50 \pm 0,20$ mg/L và $3,92 \pm 0,20$ mg/L). Nhìn chung sự biến động của TAN, NO_2^- -N và PO_4^{3-} -P trong suốt quá trình thí nghiệm luôn nằm trong ngưỡng thích hợp cho sinh trưởng và phát triển bình thường của cá rô phi, điêu hồng và rô đầu vuông (Minh, 2023; Pinho và cs., 2021).

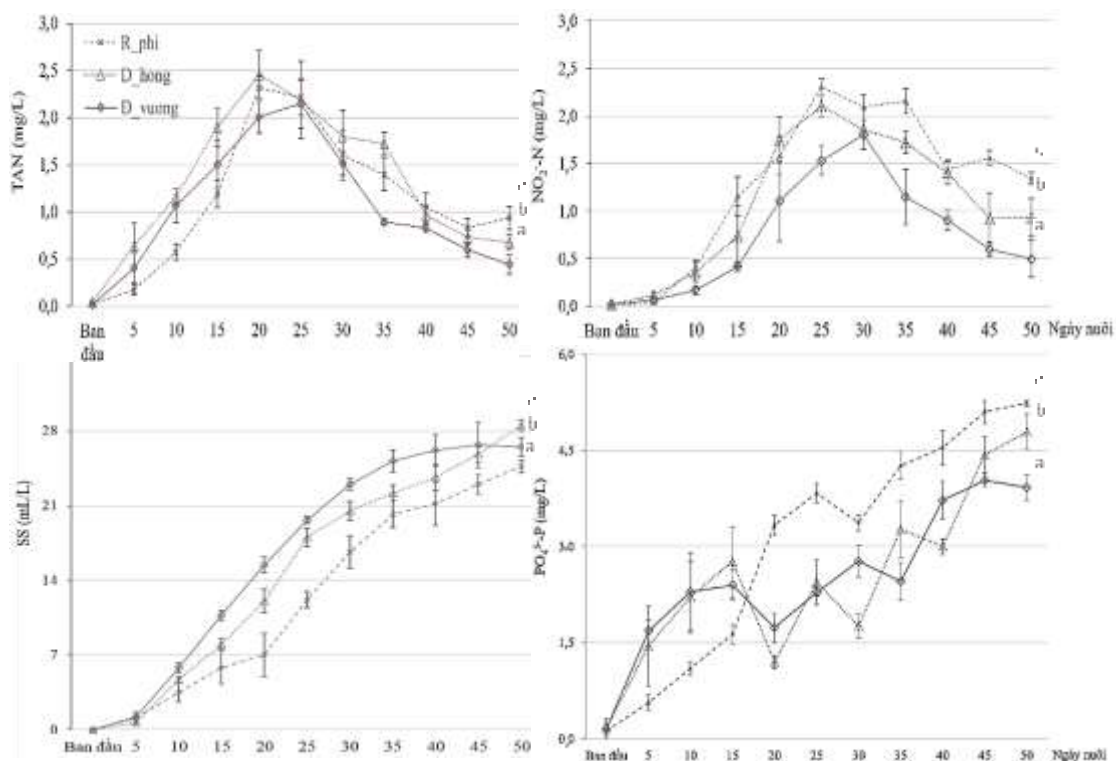
Bảng 2. Nhiệt độ và pH môi trường nước ghi nhận trong quá trình thí nghiệm

Chỉ tiêu	Nghiệm thức thí nghiệm		
	R_phi	D_hong	Đ_vuong
Nhiệt độ (°C)	$28,43 \pm 0,92^a$	$28,20 \pm 0,84^b$	$28,25 \pm 0,78^b$
	25,09 – 30,09	25,0 – 30,30	25,50 – 30,30
pH	$7,71 \pm 0,21^a$	$7,62 \pm 0,21^b$	$7,64 \pm 0,20^b$
	6,9 – 7,99	6,86 – 7,98	6,76 – 7,99

R_phi: nghiệm thức cá rô phi, D_hong: nghiệm thức cá điêu hồng, Đ_vuong: nghiệm thức cá rô đầu vuông. Các số liệu trong bảng được biểu thị dưới dạng trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn, cùng với Min – Max. Số liệu trên cùng hàng có chữ cái khác nhau là sai khác có ý nghĩa về mặt thống kê ($p < 0,05$)

Xu hướng tăng dần theo thời gian nuôi cũng được quan sát đối với thể tích biofloc (SS). Đến cuối vụ nuôi, nghiệm thức D_hong ghi nhận mức SS cao nhất, trung bình $28,50 \pm 0,50$ mL/L ($p < 0,05$). Giá trị này nhiều hơn 7,5–15,5% so với nghiệm thức R_phi ($24,67 \pm 0,58$ mL/L) và

Đ_vuong ($26,50 \pm 2,08$ mL/L). Ở cả ba nghiệm thức thử nghiệm, hàm lượng SS luôn duy trì dưới ngưỡng 30 mL/L trong suốt quá trình nuôi, thích hợp cho tăng trưởng và phát triển bình thường của các loài cá nuôi thí nghiệm (Minh, 2023; Pinho và cs., 2021).



Hình 1. Biến động của chất lượng nước trong các bể ương thí nghiệm

3.2. Tăng trưởng về khối lượng và chiều dài của cá thí nghiệm

Trong ba tuần nuôi đầu tiên khối lượng của cá giữa các nghiệm thức chưa có sự khác biệt về tăng trưởng (Hình 2, $p > 0,05$). Khối lượng cá trung bình ghi nhận được dao động trong khoảng 3,44–15,28 g/con. Các giá trị này tăng dần theo thời gian nuôi với sự khác biệt rõ ràng hơn ở các nghiệm thức bắt đầu từ ngày thứ 28. Sự khác biệt về khả năng tăng trưởng giữa cá rô đầu vuông so với cá rô phi và điêu hồng có thể được giải thích dựa trên đặc tính dinh dưỡng của loài. Cụ thể, cá rô đầu vuông có tập tính ăn tạp thiên về động vật trong khi cá rô phi và điêu hồng thiên về thực vật và chất hữu cơ phân hủy. Do đó, cá rô đầu vuông có thể đã ưu tiên hơn trong sử dụng nguồn thức ăn công nghiệp bổ sung vào bể nuôi hàng ngày. Chính sự triệt để khai thác nguồn thức ăn giàu đạm động vật này (so với nguồn dinh dưỡng biofloc tại chỗ) đã giúp chúng có khả năng tăng trưởng khối lượng tốt hơn. Nhận định này được củng cố

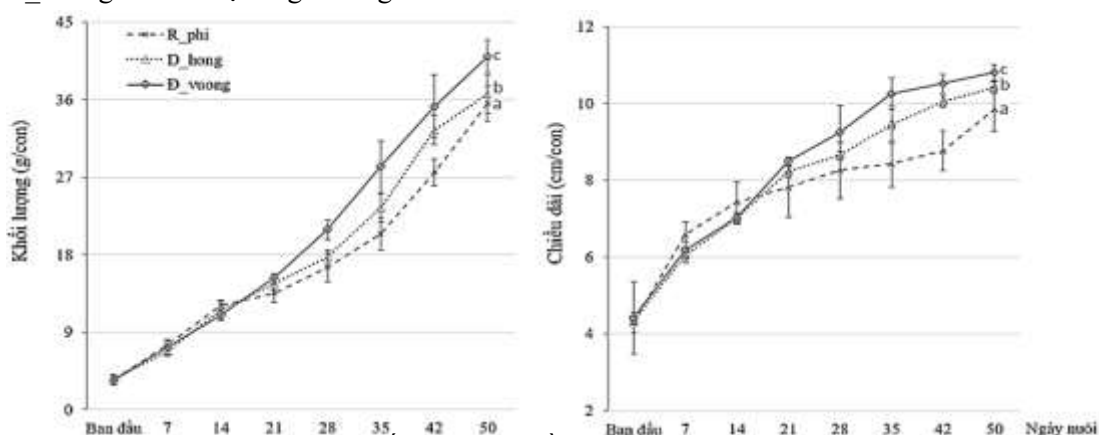
bởi việc duy trì nồng độ SS nhiều hơn trong môi trường ở nghiệm thức Đ_vuong so với R_phi và D_hong suốt quá trình nuôi (Hình 1, $p < 0,05$).

Sự chênh lệch về khả năng tăng trưởng khối lượng của các đối tượng thí nghiệm tiếp tục được ghi nhận trong suốt quá trình nuôi tiếp theo. Tại thời điểm thu hoạch (Bảng 3), khối lượng trung bình của cá ở các nghiệm thức R_phi, D_hong và Đ_vuong lần lượt đạt $35,55 \pm 2,02$ g/con, $36,70 \pm 2,20$ g/con và $41,02 \pm 1,90$ g/con. Qua đó, cá rô đầu vuông có khả năng tăng trưởng khối lượng tốt hơn cả cá rô phi và cá điêu hồng, với mức lần lượt 15,4% và 11,8%, trong điều kiện thí nghiệm. Đồng thời tốc độ tăng trưởng khối lượng tuyệt đối cao hơn ($0,77 \pm 0,01$ g/con/ngày, $p < 0,05$) cũng được thể hiện ở nghiệm thức Đ_vuong so với nghiệm thức R_phi ($0,65 \pm 0,01$ g/con/ngày) và D_hong ($0,68 \pm 0,01$ g/con/ngày).

Tăng trưởng chiều dài của cá thể hiện xu hướng tương đồng chỉ tiêu khối lượng

của chúng, với kết quả tăng dần và khác biệt giữa các nghiệm thức thí nghiệm theo thời gian nuôi (Hình 2). Cá ở nghiệm thức Đ_vuong có tốc độ tăng trưởng chiều dài

nh nhanh hơn so với nghiệm thức R_phi và D_hong, đồng thời mức chênh lệch trở nên rõ rệt hơn vào giai đoạn cuối vụ ($p < 0,05$).



Hình 2. Tăng trưởng khối lượng và chiều dài của cá trong quá trình nghiên cứu

Trong 35 ngày nuôi đầu, chiều dài trung bình của cá giữa các nghiệm thức chưa có sự khác biệt thống kê ($p > 0,05$), với giá trị dao động trong khoảng 4,28–10,25 cm/con. Trong khi đó, sự khác biệt đáng kể về khối lượng cá đã được ghi nhận từ sau 28

ngày nuôi ($p < 0,05$). Điều này cho thấy so với chiều dài, tốc độ tăng trưởng của ba loài cá rô phi, điêu hồng và rô đầu vuông được phản ánh rõ ràng hơn thông qua chỉ tiêu khối lượng.

Bảng 3. Tăng trưởng về khối lượng và chiều dài của cá ở các nghiệm thức thí nghiệm

Chỉ tiêu	Nghiệm thức R_phi	Nghiệm thức D_hong	Nghiệm thức Đ_vuong
Khối lượng cá ban đầu (g/con)	$3,55 \pm 0,11^a$	$3,52 \pm 0,12^a$	$3,43 \pm 0,04^a$
Khối lượng cá thu hoạch (g/con)	$35,55 \pm 2,02^a$	$36,70 \pm 2,20^b$	$41,02 \pm 1,90^c$
Tăng trưởng khối lượng tuyệt đối (g/ngày)	$0,65 \pm 0,01^a$	$0,68 \pm 0,01^b$	$0,77 \pm 0,01^c$
Chiều dài cá ban đầu (cm/con)	$4,28 \pm 0,74^a$	$4,34 \pm 0,01^a$	$4,42 \pm 0,11^a$
Chiều dài cá thu hoạch (cm/con)	$9,86 \pm 0,58^a$	$10,42 \pm 0,15^b$	$10,80 \pm 0,21^c$
Tăng trưởng chiều dài tuyệt đối (cm/ngày)	$0,11 \pm 0,01^a$	$0,12 \pm 0,00^a$	$0,13 \pm 0,00^b$

R_phi: nghiệm thức cá rô phi, D_hong: nghiệm thức cá điêu hồng, Đ_vuong: nghiệm thức cá rô đầu vuông. Các số liệu trong bảng được biểu thị dưới dạng trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn, Các số liệu trên cùng hàng có chữ cái khác nhau là sai khác có ý nghĩa về mặt thống kê ($p < 0,05$)

3.3. Tỷ lệ sống và hệ số chuyển hóa thức ăn của cá nuôi thí nghiệm

Bảng 4 cho thấy tại thời điểm kết thúc thí nghiệm, tỷ lệ sống cá rô đầu vuông đạt $94,67 \pm 1,15\%$. Giá trị này cao hơn lần lượt 7,3% và 5,3% ($p < 0,05$) so với cá rô phi

($87,33 \pm 2,31\%$) và điêu hồng ($89,33 \pm 2,31\%$). Ghi nhận tương tự cũng được quan sát đối với hiệu quả sử dụng thức ăn của cá, khi giá trị FCR tối ưu đạt $1,07 \pm 0,03$ ở nghiệm thức Đ_vuong, tốt hơn 5% so với hai nghiệm thức còn lại (Bảng 4, $p < 0,05$).

Bảng 4. Tỷ lệ sống (%) và hệ số FCR của cá thí nghiệm tại thời điểm thu hoạch

Chỉ tiêu	Nghiệm thức R_phi	Nghiệm thức D_hong	Nghiệm thức Đ_vuong
Tỷ lệ sống (%)	$87,33 \pm 2,31^a$	$89,33 \pm 2,31^a$	$94,67 \pm 1,15^b$
FCR	$1,12 \pm 0,03^a$	$1,13 \pm 0,01^a$	$1,07 \pm 0,03^b$

Các số liệu trong bảng được biểu thị dưới dạng trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn, Các số liệu trên cùng hàng có chữ cái khác nhau là sai khác có ý nghĩa về mặt thống kê ($p < 0,05$)

Các kết quả này có thể được giải thích là do hoạt động hiệu quả hơn của biofloc trong nghiệm thức Đ_vuong so với cả nghiệm thức R_phi và D_hong. Từ đó, nguồn dinh dưỡng dư thừa (vốn là tác nhân gây ô nhiễm môi trường) trong suốt quá trình nuôi được sử dụng/đồng hóa triệt để hơn để xây dựng cấu trúc biofloc. Nhận định này được củng cố thông qua việc luôn duy trì nồng độ thấp hơn đáng kể ($p < 0,05$) của hợp chất nitơ dưới dạng TAN và $\text{NO}_2\text{-N}$ (yếu tố môi trường có khả năng ức chế hoạt động sống của đối tượng thủy sản) trong môi trường nước ở các bể nuôi nghiệm thức Đ_vuong (Hình 1). Kết quả là môi trường nước nuôi trở nên thuận lợi hơn cho quá trình sinh trưởng phát triển, từ đó góp phần nâng cao tỷ lệ sống và cải thiện FCR của cá rô đầu vuông so với cá rô phi và điêu hồng. Trên cùng cơ sở này, giá trị tỷ lệ sống và FCR của cá điêu hồng (nghiệm thức D_hong) cũng được ghi nhận tốt hơn so với cá rô phi (nghiệm thức R_phi) vào thời điểm kết thúc thí nghiệm. Tuy nhiên, mức chênh lệch này của chúng hầu như không đáng kể ($\leq 2\%$, $p > 0,05$).

Tỷ lệ sống của ba loài cá rô phi, điêu hồng và rô đầu vuông trong nghiên cứu này (Bảng 4) nhìn chung cao hơn so với các báo cáo trước đó ở điều kiện nuôi thông thường. Đối với cá rô phi, Thu và cs. (2022) kết luận rằng giá trị tỷ lệ sống trung bình đạt khoảng 80,0% tại giai đoạn ương nuôi.

Bảng 5. Thành phần sinh hóa và khả năng chống chịu stress TAN môi trường đột ngột của cá

	Nghiệm thức R_phi	Nghiệm thức D_hong	Nghiệm thức Đ_vuong
<i>Chỉ tiêu sinh hóa máu</i>			
Glucose (mmol/L)	8,07 ± 0,15 ^b	6,63 ± 0,42 ^a	9,23 ± 0,45 ^c
Protein (g/L)	42,80 ± 0,90 ^b	36,27 ± 2,30 ^a	47,53 ± 1,50 ^c
<i>Nồng độ TAN gây stress (mg/L)</i>			
<i>Thời gian chịu đựng của cá (phút)</i>			
Từ 0 đến 6	-	-	-
8	195,85 ± 20,19 ^b	100,59 ± 2,92 ^a	358,83 ± 5,88 ^c
10	124,88 ± 12,85 ^b	56,01 ± 7,76 ^a	234,64 ± 5,82 ^c

R_phi: nghiệm thức cá rô phi, D_hong: nghiệm thức cá điêu hồng, Đ_vuong: nghiệm thức cá rô đầu vuông. “-” thể hiện việc không ghi nhận được hiện tượng cá chết hoàn toàn trong quá trình thử nghiệm. Các số liệu trong bảng được biểu thị dưới dạng trung bình ± độ lệch chuẩn. Số liệu trên cùng hàng có chữ cái khác nhau thể hiện sai khác có ý nghĩa về mặt thống kê ($p < 0,05$)

Nguyễn Thị Ngọc Anh và cs. (2017) trước đó lại cho thấy tỷ lệ sống của cá rô phi có thể đạt tới 96,7%, tuy nhiên thí nghiệm này được tiến hành trong môi trường nước lợ với độ mặn duy trì ở mức 10 ppt. Trên cá điêu hồng, Trần Văn Việt (2016) ghi nhận tỷ lệ sống trung bình của loài cá này khi nuôi lồng bè chỉ đạt 65,1%. Trong khi đó, Trần Lê Cẩm Tú và cs. (2020) báo cáo giá trị cao hơn đáng kể, dao động trong khoảng 91,1–97,8% khi thí nghiệm được thực hiện trong điều kiện phòng thí nghiệm. Đối với cá rô đầu vuông, nghiên cứu của Hạnh và Yên (2016) kết luận rằng mật độ ương nuôi có ảnh hưởng trực tiếp đến tỷ lệ sống của cá, giá trị trung bình ghi nhận được trong khoảng 82,7–84,3%. Với cá rô đầu vuông ban đầu có kích cỡ tương đồng trong thí nghiệm này, Phạm Thị Trúc và Võ Văn Chí (2020) cho thấy tỷ lệ sống tốt hơn khi dao động khoảng 97,50–99,17%. Nhưng, mật độ nuôi chỉ 40 con/bể (300 L) và FCR cao hơn đáng kể (1,54–1,83) tại thời điểm thu hoạch.

3.4. Thành phần sinh hóa máu và khả năng chống chịu stress TAN của cá thí nghiệm

Khả năng chống chịu stress môi trường đột ngột của cá ba loài cá sau 50 ngày nuôi cho thấy phản ứng giống nhau đối với các mức stress trong thử nghiệm (Bảng 5).

Cụ thể, cá rô phi, điêu hồng và rô đầu vuông đều bắt đầu chết ở ngưỡng nồng độ TAN đạt mức 8 mg/L và 10 mg/L. Trong đó, khả năng chịu đựng tốt và kém nhất ($p < 0,05$) lần lượt được quan sát ở cá rô đầu vuông và cá điêu hồng. Điều này biểu thị qua thời gian chết hoàn toàn của cá từ nghiệm thức Đ_vuông luôn lâu hơn so với cá từ nghiệm thức R_phi rồi đến D_hong.

Trong điều kiện stress, cơ thể cá cần huy động một lượng lớn năng lượng để duy trì hoạt động sống, cân bằng thẩm thấu và tăng cường đáp ứng miễn dịch (Dawood và cs., 2023). Glucose đóng vai trò là nguồn năng lượng để huy động và cung cấp nhanh chóng cho tế bào thông qua cả hô hấp hiếu khí lẫn kỵ khí (Guo và cs., 2023). Ngoài ra, stress thường gây tổn thương ở gan, mang và thận, từ đó làm gia tăng nhu cầu protein trong máu nhằm tổng hợp enzyme, hormone và cấu trúc tế bào mới. Nhờ đó, cá có khả năng phục hồi tốt hơn đồng thời duy trì các chức năng sinh lý quan trọng, bao gồm khử độc amonia tại gan và vận chuyển oxy ở mang (Basu và cs., 2003; Vijayaram và cs., 2024). Như vậy, có mối liên hệ tỷ lệ thuận giữa nồng độ glucose và protein máu với khả năng chống chịu stress môi trường của cá. Đây có thể là lý do mà cá rô đầu vuông ở nghiệm thức Đ_vuong có thể chống chịu stress TAN tốt nhất trong quá trình thí nghiệm, với thời gian chết hoàn toàn dao động sau $234,64 \pm 5,82$ – $358,83 \pm 5,88$ phút. Trên cùng cơ sở này, thời gian chịu đựng của cá điêu hồng (nghiệm thức D_hong) cũng được ghi nhận lâu hơn so với cá rô phi (nghiệm thức R_phi). Sự sai khác này ở cả ba nghiệm thức thí nghiệm có ý nghĩa về mặt thống kê ($p < 0,05$).

4. KẾT LUẬN VÀ ĐỀ NGHỊ

4.1. Kết luận

Môi trường nước thuận lợi hơn cho sinh trưởng của cá rô đầu vuông, với các giá trị trung bình TAN, $\text{NO}_2\text{-N}$ và $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ lần lượt $0,44 \pm 0,10$ mg/L, $0,50 \pm 0,20$ mg/L và $3,92 \pm 0,20$ mg/L.

Cá rô đầu vuông ghi nhận khả năng tăng trưởng tốt hơn ở nghiệm thức Đ_vuong

($p < 0,05$), với các giá trị đạt được là $41,02 \pm 1,90$ g/con, $10,80 \pm 0,21$ cm/con và $94,67 \pm 1,15\%$.

Cá rô đầu vuông, rô phi và điêu hồng có ngưỡng stress môi trường gây chết giống nhau, tại ngưỡng nồng độ TAN đạt giá trị 6 mg/L và 8 mg/L. Cá rô đầu vuông có khả năng chịu đựng với những biến động đột ngột về TAN môi trường tốt hơn qua thời gian cá chết hoàn toàn lâu hơn (tương ứng lần lượt là $358,83 \pm 5,88$ và $234,64 \pm 5,82$ phút) so với hai loài cá còn lại.

4.2. Đề nghị

Ứng dụng mô hình nuôi biofloc đối với cá rô đầu vuông (*Anabas testudineus*) sẽ cho hiệu quả nuôi tốt hơn cá rô phi (*Oreochromis niloticus*) và điêu hồng (*Oreochromis sp.*).

LỜI CẢM ƠN

Đây là một phần kết quả của đề tài nghiên cứu khoa học sinh viên Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế năm 2025. Mã số: DHL-2025-TS-SV-08. Chân thành được gửi lời cảm ơn đến Khoa Thủy sản, Đại học Nông Lâm và Trường Đại học Nông Lâm đã tạo điều kiện và hỗ trợ cho nghiên cứu được hoàn thành.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Tài liệu tiếng Việt

- Châu Tài Tảo, Nguyễn Văn Hòa và Trần Ngọc Hải. (2021). Ảnh hưởng của mật độ lên tăng trưởng và tỷ lệ sống của tôm càng xanh (*Macrobrachium rosebergii*) nuôi theo công nghệ biofloc. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam*, 4(125), 139–145.
- Lê Minh Khôi, Nguyễn Bảo Trung, Huỳnh Trung Hiếu và Từ Thanh Dung. (2023). Ảnh hưởng của tần suất cho ăn và khả năng tăng cường hiệu quả của β -glucan và vitamin C đối với vaccine phòng bệnh *Edwardsiella ictaluri* lây nhiễm trên cá tra (*Pangasianodon hypophthalmus*). *Tạp chí Khoa học, Trường Đại học Cần Thơ*, 59(2), 154–164. DOI: <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2023.075>
- Phan Thị Trúc và Võ Văn Chí. (2020). Ảnh hưởng của phương pháp cho ăn gián đoạn đến sinh trưởng, sống sót và hiệu quả sử dụng thức ăn của cá rô đầu vuông (*Anabas testudineus* Bloch, 1792). *Tạp chí Khoa học và công nghệ – Đại học Đà Nẵng*, 18(7), 106–109.

- TCVN 9294:2012. (2021). Phân bón – xác định cacbon hữu cơ tổng số bằng phương pháp Walkley– Black. Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam.
- Trần Lê Cẩm Tú, Trần Thị Thanh Hiền, Yutaka Haga và Trần Minh Phú. (2020). Xác định tỉ lệ năng lượng (protein: lipid) tối ưu của cá điêu hồng (*Oreochromis* sp.) trong điều kiện nhiệt độ – độ mặn cao. *Tạp chí Khoa học, Trường Đại học Cần Thơ*, 56(1), 29–37.
- Trần Thị Năng Thu, Mai Văn Tùng, Nguyễn Công Thiết, Trịnh Đình Khuyển và Đỗ Thị Ngọc Anh. (2022). Nghiên cứu nuôi cá rô phi bằng đậu tằm (*Vicia faba*) tạo sản phẩm cá giòn. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam*, 20(1), 47–55.
- Trần Văn Việt (2016). Đánh giá tình hình nuôi cá điêu hồng (*Oreochromis* spp.) trong lồng bè ở sông Tiền vùng thượng nguồn tỉnh Vĩnh Long. *Tạp chí Khoa học, Trường Đại học Cần Thơ*, 47b, 110 – 118.
- ## 2. Tài liệu nước ngoài
- AOAC. (2005). Official Methods of Analysis of AOAC International, 18th ed. (Method No. 981.10). AOAC International. Gaithersburg, Maryland 20877 – 2417, USA.
- Arida Fauzana, N., Fatmawati, Biyatmoko D. & Hanafie, A. (2023). Growth performance and survival of climbing perch (*Anabas testudineus* Bloch) raised in conventional and bioflocs system. *Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 21(2), 14–37. DOI: <https://doi.org/10.9734/ajfar/2023/v21i2530>
- Blatt, T.L.d.S., Cardoso, A.J.d.S., Watanabe, A.L., Neto, C.C.B., & Hisano, H. (2025). Environmental sustainability of Nile tilapia reared in biofloc technology (bft) system: Evaluation of carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics and indicators of sustainability. *Sustainability*, 17, 5670. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17135670>
- Basu, N., Kennedy, C.J., & Iwama, G.K. (2003). The effects of stress on the association between hsp70 and the glucocorticoid receptor in rainbow trout. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 134(3), 655–663. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1095-6433\(02\)00372-0](https://doi.org/10.1016/s1095-6433(02)00372-0)
- Dawood, M.A.O., Gewaily, M., & Sewilam, H. (2023). Combined effects of water salinity and ammonia exposure on the antioxidative status, serum biochemistry, and immunity of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fish Physiology Biochemistry*, 49(6), 1461–1477. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10695-023-01267-5>
- Tveteras, R., Nystoyl, R., & Jory, D. E. (2019, December 9). GOAL 2019: Global finfish production review and forecast. Responsible Seafood Advocate. Retrieved 12 December 2024, from <https://www.globalseafood.org/advocate/goal-2019-global-fish-production-review-and-forecast/>,
- Guo, M., Xu, Z., Zhang, H., Mei, J., & Xie, J. (2023). The Effects of Acute Exposure to Ammonia on Oxidative Stress, Hematological Parameters, Flesh Quality, and Gill Morphological Changes of the Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*). *Animals (Basel)*, 13(15), 2534. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani13152534>
- Leonard, L.L. (2000). Criteria for selecting Nile tilapia and Red tilapia for culture. Department of Fisheries and Allied Aquacultures Auburn University, Alabama 36849 USA.
- Minh, N.T. (2023). *Biofloc-based integrated multitrophic aquaculture - Practical application for the sustainable environmental development of the intensive shrimp industry*. Ph.D. Thesis, Ghent University, Belgium.
- Phan, L.P., & Nguyen, T.V. (2023). Efficiency of intensive tilapia culture in the earthen ponds applied biofloc technology (BFT), probiotics and off-flavor control methods. *The Journal of Agriculture and Development*, 22(3), 9–18. DOI: <https://doi.org/10.52997/jad.2.03.2023>
- Pinho, S. M., Lima, J. P., David, L.H., Emerenciano, M.G.C., Goddek, S., Verdegem, M.C.J., Keesman, K.J. & Portella, M.C. (2021). FLOCponics: The integration of biofloc technology with plant production. *Reviews in Aquaculture*, 14(2), 647–675. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12617>.
- Renuhadevi, M., Jeevagan, I. J. M. A., Ahilan, B., Rajagopalsamy, C.B. T., & Prabu, E. (2019). Tilapia – An Excellent Candidate Species for World Aquaculture: A Review. *Annual Research & Review in Biology*, 31(3), 1–14. DOI: <https://doi.org/10.9734/arrb/2019/v31i330052>.
- Shawon, F.I., Islam, N., Islam, F. & Azam, H. (2025). Adaptability of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in biofloc systems: Effects on growth, feed efficiency, water quality, and economic viability. *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 14(2), 271–283.

DOI:
<https://doi.org/10.20473/jafh.v14i2.68674>
Sudong, X., Yong, L., Wenqi, W., Mayalagu, R., Kumaravel, P.K.V., & Hua, W. (2010). Influence of dietary protein levels on growth, digestibility, digestive enzyme activity and stress tolerance in white-leg shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931), reared in high-density tank trials. *Aquaculture Research*, 41, 1845–1854. DOI:

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02585.x>
Vijayaram, S., Ringø, E., Zuorro, A., van Doan, H., & Sun, Y. (2024). Beneficial roles of nutrients as immunostimulants in aquaculture: A review. *Aquaculture and Fisheries*, 9(5), 707–720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2023.02.001>.