

Tối ưu quy trình vận hành hệ thống aquaponics quy mô nhỏ nuôi cá Trê vàng (*Clarias macrocephalus*) bằng mô hình máy tính

Ngô Thế Ân*, Kim Văn Vạn², Nguyễn Thị Bích Yên¹

¹Khoa Tài nguyên và Môi trường, Học viện Nông nghiệp Việt Nam, xã Gia Lâm, Hà Nội, Việt Nam

²Khoa Thủy sản, Học viện Nông nghiệp Việt Nam, xã Gia Lâm, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 2/4/2025; ngày chuyển phản biện 4/4/2025; ngày nhận phản biện 18/4/2025; ngày chấp nhận đăng 26/4/2025

Tóm tắt:

Nghiên cứu này nhằm tối ưu quy trình vận hành hệ thống aquaponics dạng lọc giá thể (media-filled) bằng mô hình máy tính để nuôi cá Trê vàng (*Clarias macrocephalus*). Mô hình mô phỏng được xây dựng theo tiếp cận đa tác tử (ABM) và được hiệu chỉnh theo số liệu thí nghiệm. Kết quả tối ưu trên máy tính đã đưa ra quy trình vận hành cho sáu loại thể tích bể nuôi (500, 1000, 1500, 2000, 2500 và 3000 lít), trong đó mật độ cá có thể đạt tối đa 150 kg/m³ nước; cỡ cá giống là 20 g/con; diện tích trồng rau cân đối theo sản lượng cá (5-6 kg cá/m²); bơm tuần hoàn nước cần hiệu chỉnh theo thể tích bể nuôi, dao động từ 16 đến 24 lần/ngày. Cá được đề xuất thu hoạch sau 151 ngày nuôi. Khi áp dụng quy trình vận hành cần lưu ý giám sát thường xuyên chất lượng nước để hiệu chỉnh bơm và xả nước thải khi cần.

Từ khóa: aquaponics, cá Trê vàng, mô hình máy tính, nuôi cá tuần hoàn, tối ưu.

Chỉ số phân loại: 4.5, 4.6

Optimising the operation of a small-scale aquaponic system for yellow catfish (*Clarias macrocephalus*) using a computer-based model

The An Ngo^{1*}, Van Van Kim², Thi Bich Yen Nguyen¹

¹Department of Natural Resources and Environment, Vietnam National University of Agriculture, Gia Lam Commune, Hanoi, Vietnam

²Department of Seafood, Vietnam National University of Agriculture, Gia Lam Commune, Hanoi, Vietnam

Received 2 April 2025; revised 18 April 2025; accepted 26 April 2025

Abstract:

This study aimed to optimise the operating process of a media-filled aquaponic system for raising bighead catfish (*Clarias macrocephalus*) based on a computer model. The computer-based model was built using the agent-based modelling (ABM) approach and calibrated with experimental datasets. The optimised results from the model runs suggested operating processes for six fish tank volumes (500, 1000, 1500, 2000, 2500, and 3000 litres), where fish density can reach a maximum of 150 kg/m³ of water. The optimal fingerling size is 20 g/fish, and the vegetable growing area is balanced according to fish weight (5-6 kg of fish/m²). Water circulation should be adjusted according to the fish tank volume, ranging from 16 to 24 times per day. To maximise the benefits, which are calculated from the balance between fish weight gain and feed consumption, it is suggested to harvest the fish after 151 days of raising in the aquaponic system. When applying these operating processes, it is necessary to regularly monitor water quality and adjust pumping and wastewater discharge as needed.

Keywords: aquaponics, *Clarias macrocephalus*, computer-based model, optimisation, recirculation aquaculture.

Classification numbers: 4.5, 4.6

*Tác giả liên hệ: Email: ntan@vnua.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Thủy canh kết hợp thủy sản (aquaponics) là mô hình canh tác có sự kết hợp của cây trồng và nuôi thủy sản (thường là cá) trong một hệ thống tuần hoàn [1]. Đặc điểm cơ bản nhất của hệ aquaponics thể hiện qua dòng hoàn lưu nước chứa dinh dưỡng đi từ (i) bể nuôi cá với mật độ cao, qua (ii) hệ thống xử lý và cung cấp cho (iii) hệ thống trồng rau thủy canh để hấp thu dinh dưỡng trước khi trả lại nước sạch về bể nuôi cá [2]. Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên hợp quốc (FAO) đã xem aquaponics là biện pháp canh tác hiệu quả và thân thiện môi trường trong thế kỷ XXI vì tiết kiệm nước, ít gây ô nhiễm, tiết kiệm năng lượng, tiết kiệm không gian canh tác và tạo sản phẩm hữu cơ an toàn [3].

Aquaponics rất đa dạng nhưng nhìn chung được phân thành ba loại dựa vào kiểu giá thể trồng rau [3-5]: (i) Mạng dinh dưỡng (NFT), rau được trồng trên các ống dẫn nước liên tục chảy từ bể nuôi cá qua các bộ rễ; (ii) Bè nổi (floating-raft), rau được gắn vào tấm vật liệu nổi trên bề mặt tiếp nhận nước thải sau nuôi cá với bộ rễ ngấm chìm trong nước; (iii) Trồng rau trên hạt giá thể (media-filled). Loại (i) và (ii) cần phải có hệ thống xử lý nước (biofilter) để khoáng hóa dinh dưỡng và lắng cặn. Loại (iii) không nhất thiết phải có bộ lọc sinh học vì các hạt giá thể có chức năng tương tự, nhưng cần lắp bộ xi-phông để điều hòa mức ngập và thoát nước theo nhịp. Tuy nhiên, nếu không có bộ lọc thì hệ thống media-filled dễ bị tắc [2, 3]. Hiện nay, hệ thống aquaponics quy mô nhỏ (~1 m³ bể cá và 3 m² trồng rau) chiếm ưu thế và được khuyến khích phát triển [3].

Đối tượng nuôi trong hệ aquaponics thường là cá rô phi, diêu hồng, cá quả, cá trê, lươn. Trong đó, cá Trê vàng được xem là có hiệu quả cao và dễ nuôi nhất do có tính chịu đựng cao với môi trường khắc nghiệt [6]. Sử dụng cây trồng để hấp thu triệt để dinh dưỡng trong nước nuôi cá là mấu chốt trong duy trì cân bằng cho hệ thống aquaponics [4]. Cây trồng phổ biến của aquaponics là cà chua, rau diếp, cải thảo, diếp cá, rau muống [3].

Cho đến nay, nhiều công trình nghiên cứu đã được triển khai để cải thiện chức năng của aquaponics bằng cách điều chỉnh sự cân bằng dinh dưỡng giữa các thành phần trong hệ thống [2]. Việc điều chỉnh bao gồm cân đối giữa lượng thức ăn cho cá và cây trồng, hoặc cân đối giữa diện tích trồng cây, thể tích nuôi cá và bộ lọc sinh học [7]. Nghiên cứu về mô hình hóa áp dụng cho hệ aquaponics cũng đã được triển khai [2, 7, 8]. Tuy nhiên, việc sử dụng mô hình mô phỏng để tối ưu quy trình vận hành của aquaponics thì chưa được phổ biến [9]. Đặc biệt, ứng dụng mô hình máy tính để đề xuất quy trình canh tác có hiệu quả cho những đối tượng vật nuôi cụ thể thì rất khó tìm.

Ở Việt Nam, mặc dù tên gọi aquaponics mới chỉ xuất hiện trong một vài thập kỷ gần đây nhưng cũng đã có nhiều nghiên cứu về lĩnh vực này. Nghiên cứu về aquaponics ở nước ta chủ yếu tập trung vào hai chủ đề là (i) Những chỉ tiêu kỹ thuật nước, phát triển của cá, rau [10] và (ii) Tự động hóa trong vận hành hệ thống (thiết kế thuật toán tự động cho bơm, quạt thông gió) [11]. Nghiên cứu về mô phỏng và tối ưu hóa cho hệ aquaponics ở Việt Nam hiện rất khó tìm. Đây cũng chính là khoảng trống khoa học cần được bổ sung để góp phần phát triển aquaponics ở nước ta.

Nghiên cứu này có mục tiêu tối ưu quy trình vận hành hệ thống aquaponics dựa trên mô hình máy tính, mô phỏng theo những thông số cơ bản của FAO [3] và được hiệu chỉnh bằng số liệu thí nghiệm cho đối tượng cá Trê vàng. Mô hình máy tính được sử dụng để lựa chọn một cách tự động các quy trình vận hành hệ aquaponics từ rất nhiều tổ hợp các yếu tố thí nghiệm, hỗ trợ trả lời câu hỏi về “quy trình vận hành đặc biệt cho cá trê” mà tài liệu FAO [3] đã nêu ra nhưng chưa có hướng dẫn chi tiết.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng

Đối tượng chính của nghiên cứu này là cá Trê vàng (*Clarias macrocephalus*) và rau diếp cá (*Houttuynia cordata*); sử dụng hệ thống media-filled quy mô nhỏ.

Cá Trê vàng được lựa chọn vì rất phù hợp với hệ canh tác tuần hoàn [6]; rau diếp cá được lựa chọn vì loại rau này ưa ẩm, ít sâu bệnh, dễ thu hoạch, là cây thuốc mang lại giá trị kinh tế cao, đã được đề xuất cho hệ thống aquaponics [12].

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp bố trí thí nghiệm

Thí nghiệm được thực hiện để thu thập số liệu cho hiệu chỉnh và đánh giá mô hình máy tính. Thí nghiệm được triển khai tại khu nhà lưới của Học viện Nông nghiệp Việt Nam (HVN). Hệ thống aquaponics (media-filled) thiết kế theo hướng dẫn kỹ thuật của FAO [3], bao gồm 3 thành phần:

Bể nuôi cá: Bể vuông lót bạt (1,5x0,8x0,6 m), không chế nước ở độ cao 0,42 cm (thể tích khoảng 0,5 m³); thả 37 con/bể (mật độ 74 con/m³); khối lượng 46±5 g/con.

Chậu trồng rau: Sử dụng 8 chậu nhựa (0,65x0,42x0,19 m), chứa hạt giá thể đất nung nhẹ, đặt phía trên bể nuôi cá; diện tích 2,18 m². Mỗi chậu có lắp xi phông điều tiết nước đảm bảo thời gian ngập cạn xen kẽ. Rau được trồng thành khóm với mật độ 0,3 kg gốc/m², trồng trước 1 tuần thí nghiệm để kịp bén rễ và ổn định hệ vi sinh.

Bộ lọc sinh học: Thể tích 0,2 m³, chứa 50 lít giá thể nhựa MBBR (diện tích riêng bề mặt 750 m²/m³). Hệ thống media-filled có thể không cần bộ lọc sinh học nhưng vì thí nghiệm có quy mô nhỏ và lưu chuyển nước nhanh nên chúng tôi vẫn bố trí hệ thống lọc để chống tắc và đảm bảo quá trình khoáng hóa như đề xuất của nghiên cứu trước [3, 5].

Mô hình được vận hành dựa vào bơm hút nước (28W-1,350 m³/H) từ bể cá lên bể lọc sinh học, 3 tiếng một lần, mỗi lần bơm 12 phút (lưu lượng tuần hoàn 4x thể tích bể cá/ngày). Nước từ bể lọc được phân phối đều vào 8 chậu trồng rau và hoàn lưu trở lại bể cá. Cá cho ăn 2 lần/ngày bằng máy cho ăn tự động vào lúc 6h và 18h hàng ngày, thức ăn viên có hàm lượng đạm 40%, lượng thức ăn cân đối bằng 3% khối lượng cá ở những ngày nuôi đầu tiên và giảm dần đều xuống 1% ở ngày thu hoạch. Thời gian thí nghiệm kéo dài 180 ngày, từ 18/3/2023 đến 18/9/2023.

Lấy mẫu và phân tích nước: Các chỉ tiêu chất lượng nước theo dõi bao gồm: tổng đạm amôn (TAN) và nitrat (N-NO₃⁻), được thu 10 ngày một lần tại đầu ra của bể cá, bể lọc sinh học và chậu trồng rau. Mẫu được thu vào khoảng thời gian giữa 2 lần cho cá ăn. Tất cả các chỉ tiêu được phân tích theo các phương pháp chuẩn của E.W. Rice và cs (2012) [13].

Đánh giá tăng trưởng của cá và rau: Cá được cân theo định kỳ 10 ngày, mỗi lần thu (bằng vợt) ngẫu nhiên 10 con để tính khối lượng trung bình. Rau được thu hoạch 60 ngày/lần, bằng cách cắt sát gốc để cân xác định tổng khối lượng; Thu luân phiên rau thành 2 lần để duy trì sự hấp thu dinh dưỡng liên tục trong nước thải.

2.2.2. Phương pháp xây dựng mô hình máy tính

Phần mềm và tiếp cận xây dựng mô hình: Mô hình mô phỏng được xây dựng theo tiếp cận agent-based modeling (ABM) thiết kế trên phần mềm chuyên dụng Netlogo [14]. Trong đó, mỗi thành phần của hệ thống (bể cá, chậu rau và bể lọc sinh học) được thiết kế như một tác tử “agent”, có khả năng thể hiện hành vi một cách độc lập. Các thành phần của hệ thống aquaponics được liên hệ với nhau thông qua dòng trao đổi nước và dinh dưỡng.

Hoạt động của hệ thống được điều khiển bằng các yếu tố đầu vào (thể tích bể cá, cá giống, lưu lượng bơm nước, diện tích trồng rau, kiểu thu hoạch rau, số ngày nuôi) để chi phối mức cung cấp và sự chuyển hóa dinh dưỡng trong hệ thống. Đầu ra của mô hình bao gồm chất lượng nước, tăng trọng cá, rau và hiệu quả kinh tế của toàn hệ thống.

Tham số và thuật toán của mô hình:

Hàm số tăng trưởng của cá: sử dụng mô hình tăng trưởng Gompertz [15].

$$W_t = w_{max} * e^{\ln\left(\frac{w_0}{w_{max}}\right) * e^{-kt}} \quad (1)$$

trong đó: W_t (gam) là khối lượng cá tại ngày thứ t; w₀ và w_{max} là khối lượng lý thuyết tính cho cá tại thời điểm ngày đầu thí nghiệm và khối lượng cao nhất có thể đạt được; k là hệ số tăng trưởng riêng (k cần hiệu chỉnh theo thí nghiệm); t là thời gian (ngày).

Lượng dinh dưỡng (N_{excreted}) do cá thải ra [16]:

$$X_{N_{excreted}} = N_{feed} * R_{waste} * P_{feed} * P_{fish} \quad (2)$$

trong đó: N_{feed} là tỷ lệ N trong thức ăn (16%); R_{waste} là tỷ lệ thải (75%); P_{feed} là tỷ lệ đạm trong thức ăn (40%); và P_{fish} là tỷ lệ protein trong cá (17%).

Chuyển đổi N thành TAN trong bể cá [16]:

$$X_{NH_x-N_{excreted}} = X_{N_{excreted}[g]} * \left[\sin\left(\frac{\pi}{1440}\right) + 1 \right] \quad (3)$$

trong đó: X_{N_{excreted}} là lượng N do cá thải ra.

Hàm ước lượng mức ảnh hưởng của TAN lên khả năng từ vong của cá: Xây dựng từ số liệu thực nghiệm trong hệ thống nuôi tuần hoàn [6]. Theo đó:

$$\text{Tỷ lệ chết} = -17,087 + 5,491g(TAN * 1000) \quad (4)$$

Hàm số tăng trưởng của rau diếp cá: Áp dụng theo hàm logic của C. Geelen (2016) [17]:

$$X_t = \frac{X_{max} * X_{min} * e^{\mu * (t-t_0)}}{X_{max} + X_{min} * \{e^{\mu * (t-t_0)} - 1\}} \quad (5)$$

trong đó: X_{max}, X_{min} là khối lượng cao nhất và thấp nhất (trước và sau khi thu); X_t là khối lượng rau thu được tại ngày thứ t, tính từ ngày thu gần nhất t₀; μ là hệ số tăng trưởng riêng cho rau diếp cá (μ cần hiệu chỉnh theo thí nghiệm).

Chuyển hóa TAN thành Nitrate (N-NO₃⁻) [17]:

$$r_{TAN}(t) = -k_{BF}^{TAN} * A_{BF} * C_{TAN}^n(t) \quad (6)$$

trong đó: r_{TAN}(t) là tỷ lệ chuyển đổi; A_{BF} là diện tích bề mặt giá thể; C_{TAN}ⁿ là nồng độ TAN trong bể lọc; k_{BF}^{TAN} là hệ số chuyển đổi (k_{BF}^{TAN} cần hiệu chỉnh theo thí nghiệm); t là thời gian (ngày).

Nồng độ N-NO₃⁻ (C_{NO3-out}) đầu ra của các chậu trồng rau (media-filled) được tính như sau [17]:

$$C_{NO3out} = e^{\left[\ln C_{NO3in} - \ln f - \left(\frac{SHP * A_V^{1.75} * \frac{K_T}{1000} * (d_m * n + d_w)}{Q} \right) \right]} \quad (7)$$

trong đó: Q là lưu lượng nước (m³/ngày); C_{NO3in} là nồng độ N-NO₃⁻ nước đầu vào (từ bể lọc sinh học); d_m là độ sâu tầng giá thể; d_w là chiều cao lớp nước trong chậu; n là hệ số thành phần cơ giới (= 0,75); A_V là diện tích bề mặt hoạt động của vi sinh vật (m²/m³); f là lượng NO₃ chưa chuyển hóa lắng đọng trong bùn (=0,52); K_T là hệ số xử lý NO₃⁻ trong giá thể rau (K_T cần hiệu chỉnh theo thí nghiệm).

Các hàm số liên quan tới cân bằng nước, gồm có hấp thu nước của rau, bay hơi được áp dụng theo công thức tính của Greenen [17].

2.3. Phương pháp đánh giá và hiệu chỉnh mô hình

2.3.1. Đánh giá độ nhạy của mô hình

Đánh giá độ nhạy là để kiểm tra mức độ ảnh hưởng của các biến đầu vào đến kết quả đầu ra của mô hình. Nghiên cứu này áp dụng phương pháp “Sequential Bifurcation - SB” [18] do cách đánh giá này phân biệt được tác động của tổng hợp nhiều biến và của từng biến đơn lẻ [19]. Về cơ bản, phương pháp SB dựa vào so sánh sự tương phản giữa hai trạng thái (i) “on”: khi biến đầu vào đặt ở giá trị tạo đầu ra cao nhất (giới hạn trên); và (ii) “off”: biến đặt ở giá trị tạo đầu ra nhỏ nhất (giới hạn dưới).

2.3.2. Hiệu chỉnh mô hình

Mô hình ABM được hiệu chỉnh bằng cách điều chỉnh các giá trị của tham số mô hình ở ngưỡng phù hợp để có kết quả mô phỏng chính xác hoặc gần nhất với thực tế.

Tham số cần hiệu chỉnh bao gồm hệ số tăng trưởng riêng của cá (k); tăng trưởng riêng của rau (μ), hệ số chuyển đổi TAN (k_{TAN/BF}) trong bể lọc và chậu rau; hệ số xử lý NO₃ trong giá thể rau (K_T) như đã trình bày trong các hàm số phía trên. Khoảng giá trị của mỗi tham số cần hiệu chỉnh được xác định dựa trên cách giải ngược phương trình (hàm số) liên quan.

Độ chính xác của mỗi tham số được đánh giá dựa vào so sánh giữa kết quả chạy mô hình và đo đạc từ thí nghiệm theo công thức tính sai số RMSE [20] như sau:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}} \quad (8)$$

trong đó: $x_{1,i} - x_{2,i}$ là sự khác biệt giữa lần đo thứ i từ (1) kết quả dự báo từ mô hình và (2) từ thí nghiệm; n là tổng số lần đo (18 lần). Những số liệu sử dụng để so sánh tương ứng với tham số hiệu chỉnh là: khối lượng cá, rau, nồng độ TAN và $N-NO_3^-$.

2.4. Phương pháp tối ưu hóa bằng mô hình máy tính

Chương trình tối ưu hóa được xây dựng và chạy trong mô-đun BehaviorSearch thiết kế riêng cho phần mềm Netlogo. Về nguyên tắc, chương trình tối ưu dựa trên thuật toán di truyền (GA) - genetic algorithm theo nghiên cứu của T.A. Ngo và cs (2021) [19]. Phương pháp này phỏng theo cơ chế di truyền trong chọn lọc tự nhiên, được mô tả một cách đơn giản như sau:

Kiểu gen trong di truyền tương ứng với những giá trị đầu vào lựa chọn để tối ưu quy trình vận hành hệ thống aquaponics; bao gồm thể tích bể cá, mật độ cá, lưu lượng bơm, diện tích chậu trồng rau, kiểu thu hoạch rau, số ngày nuôi*.

Mỗi tổ hợp gen tương ứng với tổ hợp giá trị của tất cả yếu tố đầu vào mô hình.

Kiểu hình tương ứng với kết quả chạy mô hình (hiệu quả kinh tế của mô hình).

Mỗi lần chạy mô hình tương ứng với một vòng đời sinh học, kết quả chạy với tổ hợp tham số cho ra kết quả gần nhất với mục tiêu tối ưu thì sẽ được ghi lại để lại tạo (tổ hợp) với thế hệ mới (các tổ hợp tham số mới).

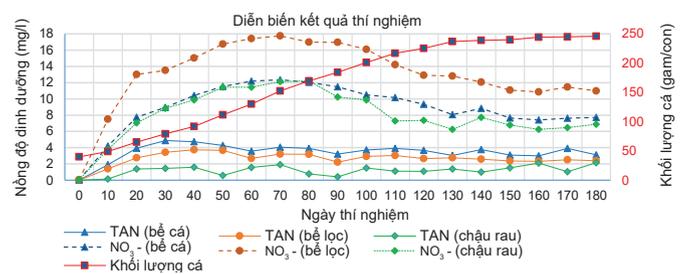
Hàm mục tiêu cho nghiên cứu này chính là hàm tối ưu quy trình vận hành của hệ thống để tạo ra hiệu quả kinh tế cao nhất; tức là đạt được năng suất cá và rau cao nhất trong khi giảm thiểu chi phí xây dựng và vận hành. Mô hình sẽ dò tìm tự động với rất nhiều tổ hợp các giá trị đầu vào, cho đến khi nào thỏa mãn hàm mục tiêu thì dừng lại.

3. Kết quả

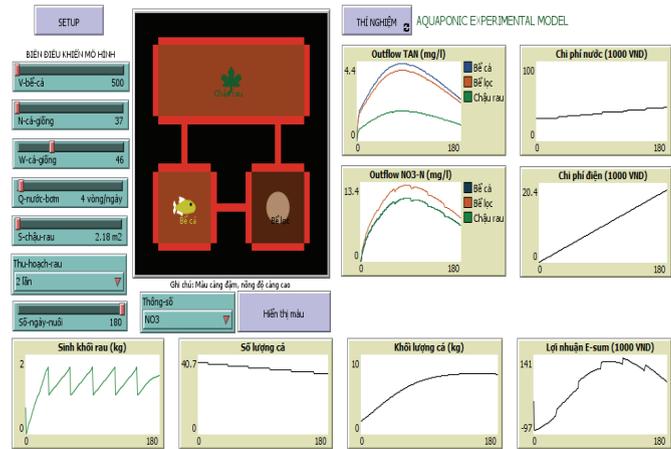
3.1. Kết quả theo dõi trên hệ thống aquaponics thí nghiệm

Sau 180 ngày nuôi thí nghiệm, số cá còn lại là 31 con, tổng khối lượng là 7,626 kg, tương đương mật độ 15,252 kg cá/m³ nước; khối lượng trung bình cá đạt 0,246 kg/con; tỷ lệ sống là 83,8%. Diễn biến tăng trưởng cá được trình bày ở hình 1.

*Genetic algorithm (GA) sử dụng trong nghiên cứu này là một chương trình độc lập. GA sử dụng yếu tố đầu vào là các yếu tố điều khiển trong mô hình máy tính ABM; GA điều khiển mô hình ABM vận hành với những tham số và thuật toán thể hiện mối liên hệ giữa tăng trưởng cá, rau và cân bằng dinh dưỡng của toàn hệ thống aquaponics.



Hình 1. Khối lượng cá Trê vàng, nồng độ TAN và $N-NO_3^-$ đo được trong hệ aquaponics thí nghiệm.



Hình 2. Giao diện mô hình mô phỏng hệ thống aquaponics.

Rau diếp cá thu hoạch dao động 0,55-1,12 kg/m²; thấp nhất ở lần thu đầu và tăng dần ở những lần sau. Mức thu trung bình đạt 0,96 kg/m²/đợt.

Nồng độ TAN trong bể cá cao nhất, đạt 4,88 mg/l; trong chậu rau rất thấp, chỉ dao động trong khoảng 0,14-2,14 mg/l, trung bình là 1,26 mg/l. Nồng độ nitrat ($N-NO_3^-$) trong bể lọc sinh học đạt cao nhất, lên tới 17,76 mg/l; trong bể nuôi cá và trồng rau không có sự khác biệt nhiều, chỉ dao động trong khoảng 3,78-12,22 mg/l.

3.2. Kết quả xây dựng mô hình aquaponics trên máy tính

Mô hình máy tính được xây dựng với giao diện có các thanh trượt để điều khiển biến đầu vào và đồ họa để quan sát kết quả đầu ra (hình 2).

Chương trình máy tính được vận hành bằng hệ thống mã (code) theo bộ ngôn ngữ riêng của Netlogo [14], bao gồm các chương trình mô phỏng tăng trưởng cá, rau, trao đổi nước và dinh dưỡng. Mô hình máy tính được thiết kế vận hành theo chu kỳ thời gian là ngày để phù hợp với nhịp điệu hoạt động của rau và cá [7, 8].

3.3. Kết quả đánh giá và hiệu chỉnh mô hình máy tính

3.3.1. Kết quả đánh giá độ nhạy của mô hình

Kết quả tính giá trị tương phản giữa hai trạng thái “on” và “off” của 7 yếu tố đầu vào đã xác định tổng giá trị tương phản của mô hình là 724,64 và hệ số tương phản (độ nhạy β) của

từng yếu tố như trong bảng 1. Chỉ có 6 yếu tố điều khiển có hệ số β lớn hơn giá trị ngưỡng 14,49 (5% của độ tương phản trung bình [19]). “Kiểu thu rau” không có ảnh hưởng một cách ý nghĩa tới hiệu quả kinh tế của mô hình.

Bảng 1. Hệ số độ nhạy của các yếu tố điều khiển mô hình.

| TT | Yếu tố đầu vào | Độ nhạy β | % so với tổng tương phản |
|----|--|-----------------|--------------------------|
| 1 | Thể tích bể cá (m ³) | 385,01 | 21,52 |
| 2 | Số lượng cá giống (con) | 670,03 | 46,23 |
| 3 | Cỡ cá giống (g/con) | 454,53 | 31,36 |
| 4 | Lưu lượng tuần hoàn nước (x lần thể tích bể cá/ngày) | 451,50 | 31,15 |
| 5 | Diện tích trồng rau (m ²) | 408,64 | 28,20 |
| 6 | Kiểu thu rau (số lần luân phiên) | 12,15 | 0,84 |
| 7 | Ngày thu hoạch (số ngày nuôi) | 492,62 | 27,53 |

3.3.2. Kết quả hiệu chỉnh mô hình

Hệ số tăng trưởng riêng của cá (k) trong công thức (1) được tính ngược từ khối lượng cá W_t thu được từ thí nghiệm như sau:

$$k = \ln[(\ln(W_t/w_{max})/\ln(w_0/w_{max}))]/t \tag{9}$$

Khi giải phương trình (9) với các tham số mặc định $w_0=0,460$; $w_{max}=0,250$ và W_t tương ứng với số liệu 18 lần cân cá, kết quả thu được khoảng trị k dao động 0,012-0,029. Hiệu chỉnh được thực hiện tự động bằng mô-đun BehaviorSearch, với 3 lần dò tìm độc lập trong khoảng giá trị trên và nhận được $k=0,025$. Quá trình hiệu chỉnh cũng được thực hiện tương tự cho các yếu tố còn lại và thu được kết quả như ở bảng 2.

Bảng 2. Tham số mô hình được hiệu chỉnh theo kết quả thí nghiệm nuôi cá Trê vàng.

| TT | Tham số mô hình | Khoảng giá trị ^(*) | Giá trị hiệu chỉnh |
|----|--|-------------------------------|--------------------|
| 1 | Hệ số tăng trưởng riêng của cá (k) | 0,020-0,029 | 0,025 |
| 2 | Hệ số tăng trưởng riêng của rau (μXnf) | 0,011-0,035 | 0,033 |
| 3 | Hệ số chuyển đổi TAN trong bể lọc ($k_{TAN/BE}$) | 0,0011-0,0090 | 0,0023 |
| 4 | Hệ số chuyển đổi TAN trong chậu rau ($k_{TAN/BE}$) | 0,0016-0,0072 | 0,0049 |
| 5 | Hệ số xử lý NO_3^- trong giá thể rau (K_T) | 0,010-0,430 | 0,117 |

^(*) xác định bằng cách giải ngược các phương trình (1, 5, 6 và 7) theo các tham số thu thập từ thí nghiệm.

Với những giá trị hiệu chỉnh do chương trình GA tìm được ở bảng 2, mô hình máy tính có thể được sử dụng để cho ra kết quả xác thực, phục vụ mục đích tối ưu hóa quá trình vận hành của hệ thống aquaponics.

3.4. Tối ưu hóa sự vận hành của mô hình aquaponics

3.4.1. Hàm mục tiêu vận hành mô hình aquaponics

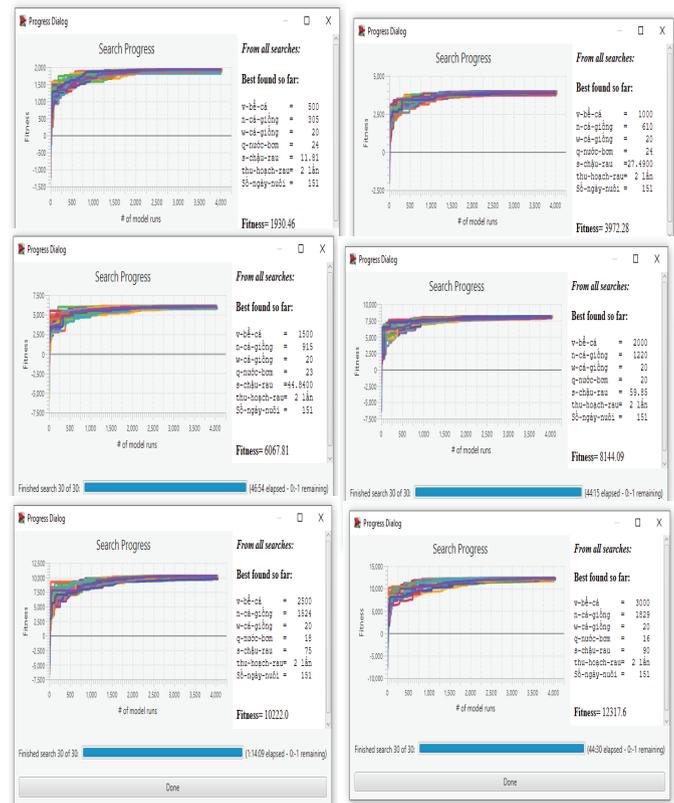
Mục tiêu mà hầu hết các mô hình aquaponics cần hướng tới là lợi ích kinh tế, xã hội và môi trường [1]. Trong nghiên cứu này, mục tiêu của mô hình được cụ thể hóa bằng hàm tối đa lợi nhuận (E_{SUM}) từ tiền bán cá và rau sau khấu trừ chi phí.

$$E_{SUM} = \max [W_t * fishPrice_w + \sum (X_t * vegPrice) - \sum (constructionCost) - \sum (operationCost_t)] \tag{10}$$

trong đó: W_t là khối lượng cá tại thời điểm thu hoạch t ; $fishPrice_w$ là giá bán (ngàn đ/kg) phụ thuộc cỡ cá, tính từ thực nghiệm: $fishPrice_w = e^{(3,033 + 0,005 * w_t)}$ (11)

X_t là tổng khối lượng rau tích lũy đến thời điểm t ; $vegPrice$ là giá rau (60.000 đồng/kg); $constructionCost$ là chi phí xây dựng mô hình tính kèm khấu hao (bể cá: 500.000 đồng/m³/5 năm; bể lọc: 750.000 đồng/m³/10 năm; bơm: 150.000 đồng/cái/2 năm; giá thể trồng rau: 1.800.000 đồng/m³/10 năm); $operationCost_t$ là chi phí vận hành tính đến thời điểm t , bao gồm thức ăn cá (16.000 đồng/kg); điện (2.500 đồng/kW); nước (27.000 đồng/m³).

Như vậy, nhiệm vụ tối ưu của mô hình là dò tìm tập hợp giá trị của 7 yếu tố đầu vào (bảng 1) để thỏa mãn hàm (10). Kiểu thu rau không ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả nhưng hình thức “thu luân phiên” vẫn được đề xuất để duy trì sinh khối.



Hình 3. Kết quả tối ưu mô hình aquaponics bằng thuật toán GA theo các quy mô bể nuôi khác nhau.

3.4.2. Kết quả tối ưu quy trình vận hành mô hình aquaponics

Phân tích tối ưu (giải hàm 10) được thực hiện trong mô-đun BehaviorSearch (30 lượt dò tìm độc lập, 4.000 thế hệ lai), theo các quy mô bể nuôi khác nhau, sử dụng khoảng giá trị đầu vào như hướng dẫn của FAO [3]. Kết quả đã tìm được quy trình nuôi cá tối ưu theo từng thể tích như trong hình 3 và tổng hợp hợp lại thành bảng 3.

Bảng 3. Đề xuất quy trình vận hành hệ thống aquaponics dạng media-filled nuôi cá Trê vàng.

| Yếu tố điều khiển | Thể tích bể nuôi | | | | | |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 0,5 m ³ | 1,0 m ³ | 1,5 m ³ | 2,0 m ³ | 2,5 m ³ | 3,0 m ³ |
| Số lượng cá giống (con) | 305 | 610 | 915 | 1.220 | 1.524 | 1.829 |
| Cỡ cá giống (g/con) | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Lưu lượng tuần hoàn nước (xlần thể tích bể cá/ngày) | 24 | 24 | 23 | 20 | 18 | 16 |
| Diện tích trồng rau (m ²) | 11,81 | 27,49 | 44,84 | 59,85 | 75 | 90 |
| Kiểu thu rau (số lần luân phiên) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Ngày thu hoạch (số ngày nuôi) | 151 | 151 | 151 | 151 | 151 | 151 |
| Lợi nhuận dự báo (ngàn đồng) | 1.930 | 3.972 | 6.068 | 8.144 | 10.222 | 12.318 |

4. Bàn luận

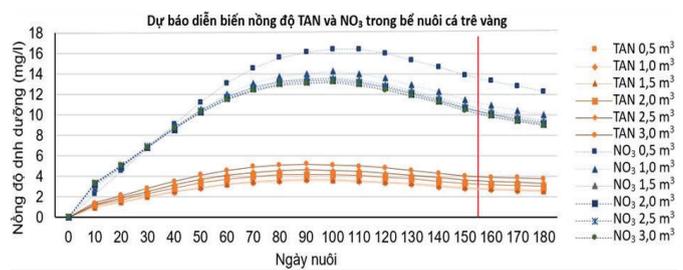
Trong các yếu tố đầu vào của mô hình, số lượng cá giống có ảnh hưởng nhiều nhất tới kết quả đầu ra. Kết quả này gợi ý cần ưu tiên nâng cao mật độ cá nếu muốn tăng lợi nhuận cho mô hình. Tuy nhiên, mật độ cá ở mức nào là phù hợp cho một hệ aquaponics hiện vẫn còn nhiều ý kiến khác biệt. Công trình nghiên cứu hệ tuần hoàn nuôi cá Trê vàng [6] cho rằng, mật độ nuôi có thể tới 1000 con/m³ nước (118 kg/m³); A. Endut và cs (2010) [21] khuyến cáo mật độ tối đa không quá 58,8 kg cá/m³ nước và tài liệu hướng dẫn của FAO [3] gợi ý mật độ cá trê có thể đạt 150 kg/m³ nước nhưng cần một quy trình nuôi đặc biệt. Lưu lượng nước bơm cũng tương tự; một số nghiên cứu cho rằng, bơm nước nhiều sẽ làm giảm nồng độ TAN trong nước, có lợi cho sự phát triển của cá [21]. Đồng thời, cảnh báo cũng đặt ra khi tốc độ nước trong hệ thống lưu chuyển quá nhanh sẽ giảm thời gian tiếp xúc của vi sinh vật khoáng hóa, giảm hiệu quả chuyển hóa dinh dưỡng, cản trở sự phát triển của cá rau và cá [21]. Vì vậy, xác định ngưỡng điều khiển cho hệ thống để đạt hiệu quả tối ưu trong sản xuất vẫn luôn có ý nghĩa thực tiễn to lớn.

Kết quả từ hình 3 cho thấy, quá trình tối ưu GA cho các quy mô thể tích bể nuôi đều tìm ra mức lợi nhuận tối đa từ khoảng lần chạy (số thế hệ lai GA) thứ 2.000 trở đi. Vì vậy, lời giải cho hàm 10 khi vận hành mô hình máy tính tới thế hệ lai thứ 4.000 là nhất quán, có thể sử dụng để đề xuất quy trình vận hành hệ aquaponics.

Đối với mỗi quy mô thể tích, gợi ý về số lượng cá giống đều ở số lượng mà khi thu hoạch đạt mật độ khoảng 124 kg cá/m³

nước, gần bằng mức tối đa trong phạm vi hướng dẫn của FAO (150 kg/m³ nước) [3]. Mật độ gợi ý này vượt 2,1 lần giới hạn mật độ đối với các loài cá khác theo tài liệu của A. Endut và cs (2010) [21] và cao hơn 5% so với mật độ cho cá Trê vàng đề xuất trong điều kiện nuôi tuần hoàn (không có hệ thống trồng rau) tại Việt Nam [6]. Đây là lợi thế khi chọn nuôi cá Trê vàng do khả năng chịu đựng cao của chúng. Cỡ cá giống được GA gợi ý đều ở mức thấp nhất (20 g/con), do ở cỡ này giá mua phù hợp trong khi vẫn đảm bảo tỷ lệ sống cao. Thời gian thu cá được gợi ý ở ngày nuôi thứ 151 vì liên quan tới mức tăng trọng đạt gần tối đa vào ngày thứ 150, và thời điểm thu rau luân phiên đúng vào ngày thứ 150.

Những yếu tố vận hành khác đi kèm theo mật độ cá tối đa (tài liệu FAO gọi là quy trình đặc biệt), bao gồm lưu lượng bơm và diện tích trồng rau, cũng đã được GA đề xuất trên cơ sở cân đối hàm lượng dinh dưỡng để rau và cá tăng trưởng tốt nhất. Các công trình nghiên cứu [3-5] đã chứng minh, nồng độ N-NO₃⁻ tối ưu cho rau phát triển là từ 10 mg/l trở lên; đối với cá Trê vàng, nồng độ TAN 15,5 mg/l và N-NO₃⁻ 100 mg/l vẫn trong ngưỡng phát triển bình thường [6]. Theo đó, diện tích rau và số lần tuần hoàn nước trong bể cá đã được GA tổ hợp để duy trì nồng độ TAN và N-NO₃⁻ ở mức không gây tử vong cho cá. Nhìn chung, diện tích rau được đề xuất ở tỷ lệ khoảng 5-6 kg cá/m² rau; tuần hoàn nước thì thay đổi theo bể nuôi: 0,5 m³ là 24 lần/ngày (12 m³/ngày), 3,0 m³ là 16 lần/ngày (48 m³/ngày). Với diện tích rau và số lần tuần hoàn nước như trên thì nồng độ dinh dưỡng trong nước được dự báo khá phù hợp với cả rau và cá (hình 4).



Hình 4. Nồng độ dinh dưỡng được mô hình máy tính dự báo theo các quy trình nuôi khác nhau.

Kết quả hình 4 cho thấy, nồng độ N-NO₃⁻ trong bể cá tăng nhanh trong khoảng 50 ngày đầu để đạt trên 10 mg/l và duy trì mức độ này tới hết vụ nuôi. Nồng độ cao nhất đạt 16,44 mg/l, vẫn thuộc ngưỡng an toàn của cá Trê vàng. Đây là nguồn dinh dưỡng rất phù hợp để cấp trực tiếp cho rau phát triển [12]. Đối với nồng độ TAN, các quy trình nuôi đều không vượt quá 5,5 mg/l, cũng chưa tới mức gây hại cho cá Trê vàng.

Kết quả chạy mô hình với kịch bản thể tích cao nhất (3,0 m³) và lưu lượng bơm 16 lần thay nước/ngày thì chi phí điện là 448.000 đồng (3,5% tổng chi), chi phí nước là 124.000 (1,0% tổng chi) đồng cho cả vụ nuôi. Chi phí vận hành chủ yếu là tiền

thức ăn cho cá (82,0% tổng chi phí). Thức ăn trong mô hình cần để tạo sinh khối cá nhưng đó cũng là nguồn dinh dưỡng (thức ăn thừa và chất thải của cá) để rau tăng trưởng. Như vậy, ngoài lợi ích kinh tế, những lợi ích môi trường khác của mô hình aquaponics như tiết kiệm năng lượng và hạn chế ô nhiễm môi trường cũng rất có ý nghĩa, đặc biệt là nhìn nhận theo góc độ kinh tế tuần hoàn.

Mô hình mô phỏng của nghiên cứu này có thể được sử dụng để tối ưu theo nhiều mục tiêu khác nhau. Ví dụ, tối ưu riêng cho mục đích trồng rau hoặc nuôi cá, hoặc tối ưu theo lợi nhuận trong hoàn cảnh giá sản phẩm bị thay đổi... Đây là ưu điểm của phương pháp sử dụng mô hình máy tính. Tuy nhiên, mô hình cũng có một số hạn chế, trước hết là chưa đề cập tới yếu tố khí tượng, tối ưu chưa tính đến chi phí nhân công, thuốc phòng và chữa bệnh. Đây cũng là gợi ý cho các nghiên cứu tiếp theo liên quan tới xây dựng mô hình và tối ưu hệ thống. Một điều cần nhấn mạnh nữa là những giá trị đưa ra trong quy trình là logic tương quan về cân bằng vật chất và chi phí. Trong quá trình áp dụng, người sản xuất có thể linh hoạt điều khiển mô hình gắn với giá trị ngưỡng, nhưng phải giám sát thường xuyên diễn biến về rau, cá và chất lượng nước để hiệu chỉnh khi cần. Ngoài ra, mức đầu tư ban đầu và yêu cầu mặt bằng cũng tăng theo quy mô. Vì vậy, người sản xuất phải lựa chọn quy mô cho phù hợp với điều kiện của mình và có những dự phòng về dịch bệnh phát sinh trong quá trình nuôi.

5. Kết luận

Mô hình máy tính mô phỏng hệ thống aquaponics nuôi cá Trê vàng và trồng rau diếp cá cho thấy, số lượng cá nuôi có ảnh hưởng nhiều nhất đến kết quả đầu ra của mô hình. Vì vậy, muốn tăng lợi nhuận sản xuất cần chú ý nhiều hơn tới mật độ cá. Kết quả phân tích tối ưu bằng thuật toán GA đã xác định quy trình vận hành hệ thống theo thể tích bể nuôi, trong đó, mật độ nuôi tối đa của cá Trê vàng có thể đạt tới 124 kg/m³ nước; cỡ cá giống là 20 g/con; diện tích trồng rau cân đối theo sản lượng cá (5-6 kg/m²); bơm tuần hoàn nước thay đổi theo thể tích bể nuôi, dao động từ 16 lần/ngày (bể 3,0 m³) tới 24 lần/ngày (bể 0,5 m³). Cá được đề xuất thu hoạch ở ngày nuôi thứ 151. Khi áp dụng quy trình vận hành như trên, cần lưu ý giám sát thường xuyên chất lượng nước để hiệu chỉnh bơm và xả nước thải khi cần, đồng thời phải có biện pháp kiểm soát những sự cố kỹ thuật và rủi ro dịch bệnh cho cá và rau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] V.T. Okomoda, S.A. Oladimeji, S.G. Solomon, et al. (2023), "Aquaponics production system: A review of historical perspective, opportunities, and challenges of its adoption", *Food Sci. Nutr.*, **11**(3), pp.1157-1165, DOI: 10.1002/fsn3.3154.

[2] S. Wongkiew, Z. Hu, K. Chandran, et al. (2017), "Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review", *Aquacultural Engineering*, **76**, pp.9-19, DOI: 10.1016/j.aquaeng.2017.01.004.

[3] C. Somerville, M. Cohen, E. Pantanella, et al. (2014), "Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming", *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*.

[4] J.E. Rakocy, M.P. Masser, T.M. Losordo (2006), "Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-integrating fish and plant culture", *Oklahoma Cooperative Extension Service*.

[5] S. Bernstein (2011), *Aquaponic Gardening: A Step-by-Step Guide to Raising Vegetables and Fish Together*, New Society Publishers, 296pp.

[6] N.T.H. Nho, H.T.K. Hong, P.T. Liem (2018), "Effects of farming density on water quality, growth and survival rate of yellow catfish (*Clarias macrocephalus*) in the recirculating system", *Can Tho University Journal of Science*, **54**, pp.108-114 (in Vietnamese).

[7] M. Bradley, S. Lane, N. Woodbury (2018), *Modeling and Control of An Aquaponics System*, Bibliography, 76pp.

[8] B. Stalport, P. Raulier, H. Jijakli, et al. (2022), "Modeling aquaponics: A review on available models and simulation tools", *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **6**(3), pp.155-165, DOI: 10.25518/1780-4507.19802.

[9] A.A. Channa, K. Munir, M. Hansen, et al. (2024), "Optimisation of small-scale aquaponics systems using artificial intelligence and the IoT: Current status, challenges, and opportunities", *Encyclopedia*, **4**(1), pp.313-336, DOI: 10.3390/encyclopedia4010023.

[10] N.P.C. Tu, N.N. Ha, T.T.T. Thuy, et al. (2021), "Effects of two hydroponic systems on water quality and growth of snakehead fish and mustard greens in the aquaponic model", *The Journal of Agriculture and Development*, **20**(2), pp.27-35 (in Vietnamese).

[11] N. L. Tuan, N. H. Nam, T. C. Dong, et al. (2016), "Automation in Aquaponics sustainable food production systems", *National Scientific Conference on Control and Automation* (in Vietnamese).

[12] X. Ke, M. Yi, Q. Li, et al. (2021), "Effect of the herbal *Houttuynia cordata* floating bed on the Nile tilapia pond culturing system", *Aquaculture Reports*, **20**, DOI: 10.1016/j.aqrep.2021.100680.

[13] E.W. Rice, L. Bridgewater, A.P.H. Association (2012), *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*, American public health association, 733pp.

[14] S. Tisue, U. Wilensky (1999), *NetLogo: Center for Connected Learning and Computer-Based Modelling*, Northwest, Evanston University.

[15] B.O. Musa, A.H. Flores, O.A. Adeogun, et al. (2021), "Determination of a predictive growth model for cultivated African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1882)", *Aquaculture Research*, **52**(9), pp.4434-4444, DOI: 10.1111/are.15282.

[16] K. J. Keesman, O. Körner, K. Wagner, et al. (2019), "Aquaponics systems modelling", *Aquaponics Food Production Systems.*, Springer, pp.267-299.

[17] C. Geelen (2016), *Dynamic Model of an INAPRO Demonstration Aquaponic System*, Thesis Biobased Chemistry and Technology, Wageningen University, 54pp.

[18] B. Bettonvil, J.P. Kleijnen (1997), "Searching for important factors in simulation models with many factors: Sequential bifurcation", *European Journal of Operational Research*, **96**(1), DOI: 10.1016/S0377-2217(96)00156-7.

[19] T.A. Ngo, L. See (2011), "Calibration and validation of agent-based models of land cover change", *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Springer, pp.181-197, DOI: 10.1007/978-90-481-8927-4_10.

[20] C. Chatfield (1992), "A commentary on error measures", *International Journal of Forecasting*, **8**(1), pp.100-102.

[21] A. Endut, A. Jusoh, N. Ali, et al. (2010), "A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system", *Bioresource Technology*, **101**(5), pp.1511-1517, DOI: 10.1016/j.biortech.2009.09.040.