

XỬ LÝ Bùn Đáy ao Nuôi cá Tra bằng Trùn quế (*Perionyx excavatus*): Tối ưu hóa quá trình phân giải hữu cơ tạo phân bón hữu cơ và sinh khối trùn

ĐẬU THỊ PHƯƠNG¹, BÙI KIM HIẾU², LÊ ĐỨC TRUNG¹, TRẦN THÀNH^{1,3,4,*}

¹ Viện Môi Trường và Tài Nguyên, Đại học Quốc gia TP.HCM

² Công ty Cổ phần xuất nhập khẩu thủy sản Bến Tre (Aquatex)

³ Viện Khoa học liên ngành (IIS), Trường Đại học Nguyễn Tất Thành

⁴ Trung tâm Phát triển Công nghệ cao Đại học Nguyễn Tất Thành, Khu Công nghệ cao TP.HCM

Tóm tắt

Ngành nuôi cá tra tại Bến Tre hiện đóng vai trò chủ lực, góp phần đáng kể vào kim ngạch xuất khẩu thủy sản. Tuy nhiên, quá trình nuôi thâm canh mật độ cao đã tạo ra một lượng lớn bùn thải đáy ao, ước tính khoảng 1–1,5 tấn cho mỗi tấn cá thương phẩm, chứa hàm lượng cao chất hữu cơ, nitơ và photpho. Nếu không được xử lý thích hợp, bùn thải này có thể gây ô nhiễm nghiêm trọng nguồn nước, đất và phát thải khí nhà kính, đe dọa trực tiếp đến hệ sinh thái và cộng đồng dân cư. Trước thực trạng đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá tiềm năng ứng dụng trùn quế (*Perionyx excavatus*) để xử lý bùn đáy ao cá tra, đồng thời tối ưu hóa điều kiện phối trộn bùn với xơ dừa và mật độ trùn ban đầu, qua đó nâng cao hiệu quả phân giải hữu cơ, tạo ra phân hữu cơ và sinh khối trùn giàu protein. Thí nghiệm được bố trí theo thiết kế lặp tâm trung tâm (CCD) kết hợp mô hình hóa bề mặt đáp ứng (RSM), khảo sát ba yếu tố chính gồm tỷ lệ bùn:xơ dừa (80–100%), lượng xơ dừa (0–20%) và khối lượng trùn ban đầu (1–3 kg). Kết quả cho thấy điều kiện tối ưu đạt được khi phối trộn bùn:xơ dừa theo tỷ lệ 90:10 và bổ sung 2 kg trùn giống ban đầu, cho phép thu hoạch 3.45 kg sinh khối trùn và 9.47 kg phân trùn sau 43 ngày xử lý. Phân trùn thu được nhìn chung đáp ứng các tiêu chuẩn QCVN 01-189:2019/BNNPTNT về pH, tỷ lệ C/N, hàm lượng nitơ và photpho. Mô hình xử lý này không chỉ góp phần giảm ô nhiễm môi trường tại vùng nuôi cá tra mà còn tạo ra phân hữu cơ cải thiện đất và sinh khối trùn có thể sử dụng làm thức ăn thủy sản, hướng tới phát triển hệ thống nuôi cá tuần hoàn theo định hướng nông nghiệp xanh và bền vững.

Từ khóa: Xử lý bùn đáy ao nuôi cá tra, trùn quế, sinh khối trùn, phân bón hữu cơ, tái sử dụng chất thải nuôi trồng thủy sản.

Ngày nhận bài: 30/5/2025; **Ngày sửa chữa:** 16/6/2025; **Ngày duyệt đăng:** 26/6/2025.

Treatment of pangasius pond sludge using earthworms (*Perionyx excavatus*): Optimization of organic decomposition for organic fertilizer and worm biomass production

Abstract

The pangasius farming industry in Ben Tre currently plays a pivotal role, significantly contributing to Vietnam's seafood export revenue. However, intensive high density farming practices have generated substantial amounts of pond sludge, estimated at approximately 1 to 1.5 tons for every ton of harvested fish. This sludge contains high levels of organic matter, nitrogen, and phosphorus. If not properly treated, it can severely pollute water and soil resources and release greenhouse gases, thereby posing direct threats to surrounding ecosystems and local communities. Against this backdrop, this study was conducted to evaluate the potential application of earthworms (*Perionyx excavatus*) for treating pangasius pond sludge. It also aimed to optimize the mixing conditions of sludge with coir and the initial worm stocking density, thereby enhancing organic decomposition efficiency and producing nutrient-rich vermicompost and protein-rich worm biomass. The experiment was arranged following a central composite design (CCD) combined with response surface methodology (RSM), investigating three main factors: the sludge-to-coir ratio (80–100%), the coir proportion (0–20%), and the initial worm mass (1–3 kg). Results showed that optimal conditions were achieved with a sludge-to-coir ratio of 90:10 and an initial worm mass of 2 kg, yielding 3.45 kg of worm biomass and 9.47 kg of vermicompost after 43 days of treatment. The resulting vermicompost generally met Vietnam's QCVN 01-189:2019/BNNPTNT standards for pH, C/N ratio, nitrogen, and phosphorus contents. This treatment model not only helps mitigate environmental pollution in pangasius farming areas but also generates organic fertilizer that improves soil quality and produces worm biomass that can be used as an aquafeed ingredient, supporting the development of circular and sustainable aquaculture systems aligned with green agricultural practices.

Keywords: Pangasius pond sludge, *perionyx excavatus*, vermicomposting, organic fertilizer, circular aquaculture.

JEL Classifications: Q53, Q55, Q57.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nuôi cá tra (*Pangasius hypophthalmus*) là ngành thủy sản then chốt và mang tính chiến lược tại tỉnh Bến Tre nói riêng và vùng Đồng bằng sông Cửu Long nói chung, nơi chiếm trên 90% diện tích nuôi và sản lượng xuất khẩu của cả nước (Huy et al., 2021). Theo Tổng cục Thủy sản, năm 2023 diện tích nuôi cá tra toàn quốc đạt hơn 5.700 ha, sản lượng khoảng 1,6 triệu tấn, đóng góp gần 2,4 tỷ USD, chiếm tới 95% tổng sản lượng cá tra thương mại toàn cầu. Bên cạnh giá trị xuất khẩu lớn, ngành này còn tạo việc làm, ổn định sinh kế, nâng cao thu nhập và chất lượng sống cho người dân các tỉnh miền Tây Nam bộ (Anh et al., 2010). Tuy nhiên, mô hình nuôi thâm canh mật độ cao cũng kéo theo nhiều thách thức môi trường. Lượng lớn thức ăn dư, phân cá và tảo chết tích tụ tạo lớp bùn đáy giàu chất hữu cơ, nitơ, photpho, trung bình từ 1–1,5 tấn bùn cho mỗi tấn cá. Nếu không được xử lý, bùn nhanh chóng lắng đáy ao, làm giảm thể tích hữu ích, tăng nhu cầu thay nước, đồng thời phát sinh khí nhà kính như NH_3 , CH_4 , H_2S , gây ô nhiễm nguồn nước, đe dọa hệ sinh thái thủy vực và sức khỏe cộng đồng (Jespersen et al., 2014).

Hiện nay, tại Việt Nam, bùn thải từ ao nuôi cá tra thường được nạo vét định kỳ và xử lý theo các phương pháp truyền thống như phơi khô, ủ đống tự nhiên hoặc thậm chí xả trực tiếp ra môi trường mà không qua bất kỳ quá trình phân hủy sinh học kiểm soát nào. Tuy nhiên, các phương pháp này tồn tại nhiều bất cập. Phơi hoặc ủ đống ngoài trời đòi hỏi diện tích lớn, thời gian dài, hiệu quả ổn định thấp và không ngăn chặn triệt để nguy cơ lây lan mầm bệnh (Morello et al., 2022). Đốt bùn thì chi phí cao, tiêu tốn năng lượng, đồng thời phát thải khí độc, đi ngược lại xu hướng giảm phát thải CO_2 (Chang et al., 2025). Các nghiên cứu cũng chỉ ra các giải pháp xử lý cơ học, hóa lý mặc dù xử lý nhanh nhưng thường khó triển khai ở quy mô nông hộ, gây tốn kém và để lại lượng cặn thứ cấp cần xử lý tiếp theo (Bachev et al., 2021; Patel et al., 2021). Trước thực trạng đó, việc nghiên cứu và áp dụng các công nghệ xử lý bùn thải bền vững, chi phí thấp và an toàn môi trường là một yêu cầu cấp thiết không chỉ ở Việt Nam mà còn trên phạm vi toàn cầu.

Trong bối cảnh đó, phương pháp xử lý chất thải rắn hữu cơ bằng sinh học, điển hình là sử dụng trùn quế (*Perionyx excavatus*), đã và đang thu hút sự quan tâm đặc biệt của giới nghiên cứu cũng như các nhà quản lý. Quá trình xử lý sinh học có ưu điểm nổi trội so với các phương pháp khác: chi phí vận hành thấp hơn, không đòi hỏi hệ thống thiết bị phức tạp, hạn chế phát sinh ô nhiễm thứ cấp, đồng thời góp phần tái chế chất thải hữu cơ thành các sản phẩm giá trị gia tăng như phân hữu cơ hoặc nguyên liệu làm thức ăn chăn nuôi (Singh

et al., 2019). Ngoài ra, quá trình này còn hỗ trợ giảm phát thải khí nhà kính, cải thiện cấu trúc và khả năng giữ ẩm của đất, giảm phụ thuộc vào phân bón hóa học, qua đó đóng góp trực tiếp vào mục tiêu phát triển nông nghiệp tuần hoàn, kinh tế xanh và bền vững.

Trùn quế là loài sinh vật đất có khả năng tiêu thụ, phân giải nhanh các hợp chất hữu cơ, chuyển hóa chất nền giàu carbon, nitơ và khoáng thành phân trùn, một loại phân bón hữu cơ ổn định, giàu dinh dưỡng, chứa trung bình khoảng 1,5–2,5% N, 1–1,5% P_2O_5 và 1,2–2% K_2O (Pottipati et al., 2022). Đồng thời, sinh khối trùn phát triển trong quá trình xử lý cũng rất giàu protein (48–55% khối lượng khô) và lipid, có thể sử dụng làm nguồn thức ăn thủy sản hoặc gia cầm (ZHU et al., 2009). Điều này mở ra cơ hội khép kín chuỗi tuần hoàn ngay tại hệ thống nuôi cá tra: bùn ao thải ra được xử lý trực tiếp bởi trùn quế, tạo phân hữu cơ để cải thiện đất, giảm dùng phân bón vô cơ, còn sinh khối trùn lại quay trở lại làm thức ăn cho cá, giảm chi phí thức ăn công nghiệp và tối ưu hiệu quả kinh tế tổng thể (Abdel-Raouf et al., 2012; Li et al., 2019).

Để góp phần hoàn thiện giải pháp xử lý sinh học cho phế phẩm ngành thủy sản đồng thời mở ra hướng phát triển mô hình nuôi cá tra tuần hoàn, bền vững, giúp gia tăng giá trị kinh tế và giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường, nghiên cứu này đã được thực hiện nhằm đánh giá tối ưu các yếu tố kỹ thuật như tỷ lệ phối trộn bùn với phụ liệu xơ dừa để điều chỉnh tỷ lệ C/N, độ xốp, khả năng giữ ẩm; cũng như mật độ trùn ban đầu để đạt đồng thời mục tiêu nâng cao tốc độ phân giải hữu cơ, tối ưu chất lượng phân trùn và sinh khối trùn (Katiyar et al., 2023). Bên cạnh đó, thí nghiệm nhằm đánh giá kỹ lưỡng các chỉ tiêu chất lượng phân trùn như pH, độ ẩm, hàm lượng hữu cơ, N, P_2O_5 , K_2O để đảm bảo đáp ứng yêu cầu của QCVN 01-189:2019/BNNPTNT, từ đó có thể thương mại hóa và áp dụng rộng rãi trong cải tạo đất nông nghiệp.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu và đối tượng nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, mẫu bùn thải từ ao nuôi cá tra được thu thập tại các ao nuôi của Công ty Cổ phần Xuất nhập khẩu Thủy sản Bến Tre, điển hình cho hình thức nuôi cá tra thâm canh tại Đồng bằng sông Cửu Long. Vào thời điểm cuối vụ nuôi và sau thu hoạch cá tra mẫu bùn được lấy từ đáy ao, các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng bùn đáy ao như thức ăn dư thừa, chất thải từ cá, xác chết của vi sinh vật và các tác nhân môi trường đã đạt mức ổn định nhất. Trùn quế là loài trùn có khả năng phân hủy nhanh các hợp chất hữu cơ. Trùn quế được mua từ Công ty Cổ phần Trang trại Sạch, tỉnh Tiền Giang, đảm bảo nguồn giống khỏe mạnh, đồng đều về kích thước và sinh trưởng ổn định.

Bảng 1. Bố trí thí nghiệm đánh giá tỷ lệ bùn ao cá tra và xơ dừa.

Nghiệm thức	Tỷ lệ bùn/xơ dừa	Khối lượng bùn ban đầu (kg)	Khối lượng xơ dừa ban đầu (kg)	Khối lượng trùn ban đầu (kg)
NT1	80:20	24	6	2
NT2	80:20	24	6	1
NT3	100:0	30	0	2
NT4	100:0	30	0	1
NT5	90:10	27	3	1
NT6	90:10	27	3	2
NT7	90:10	27	3	3
NT8	90:10	27	3	2
NT9	80:20	24	6	3
NT10	100:0	30	0	3

Nguồn:....

Xơ dừa sử dụng làm vật liệu phối trộn nhằm cải thiện tính chất cơ học của bùn, tăng độ tơi xốp, điều chỉnh độ ẩm và hỗ trợ quá trình thông khí. Xơ dừa có sẵn tại địa phương, là nguyên liệu tái chế từ ngành công nghiệp dừa Bến Tre, góp phần nâng cao tính bền vững của mô hình nghiên cứu xử lý bùn ao nuôi cá tra.

2.2. Phương pháp và địa điểm thực hiện

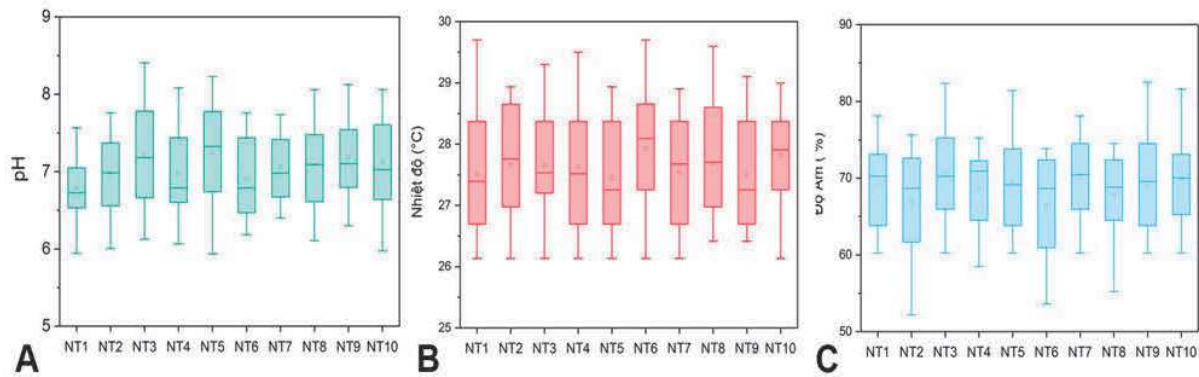
Nghiên cứu được thực hiện tại Phòng thí nghiệm Công nghệ Nông nghiệp và Môi trường Bền vững (SATEL), Viện Khoa học liên ngành, trường Đại học Nguyễn Tất Thành. Nghiên cứu được triển khai nhằm giảm thiểu ô nhiễm môi trường do bùn thải phát sinh từ ao nuôi cá tra, đồng thời tận dụng sản phẩm thu được là trùn quế làm thức ăn bổ sung cho cá tra và sử dụng phân trùn quế làm phân bón hữu cơ cho cây trồng (Mupambwa et al., 2018). Quá trình xử lý bùn thải được thực hiện thông qua phương pháp tối ưu hóa bề mặt đáp ứng (RSM - Response Surface Methodology) kết hợp với thiết kế mô hình lập tâm (CCD - Central Composite Design). Phương pháp được áp dụng nhằm xác định ảnh hưởng của ba yếu tố chính bao gồm tỷ lệ bùn thải ao nuôi (80 - 100%), tỷ lệ xơ dừa phối trộn (0 - 20%) và khối lượng trùn quế ban đầu (1 - 3 kg) lên lượng phân và chất lượng của trùn quế thu được. Thí nghiệm được bố trí với 10 nghiệm thức khác nhau, thiết kế bằng phần mềm Design-Expert được thể hiện tại Bảng 1.

Sau khi phối trộn, bùn được đựng trong các thùng xốp kích thước 7 x 50 x 64,5 cm (thể tích 0,1 m³), mỗi thùng chứa khoảng 30 kg chất nền, chiếm khoảng ¾ thể tích, được đặt ở vị trí thoáng mát, cao ráo, tránh ngập úng, ánh sáng trực tiếp. Độ pH của nền nuôi được duy trì ổn định trong khoảng 6,5 - 7,5 nhằm đảm bảo điều kiện lý tưởng cho quá trình phát triển của trùn. Trong suốt quá trình thí nghiệm, các thùng được bổ sung thức ăn định kỳ với lượng khoảng 0,0025 m³

mỗi 2 - 3 ngày để duy trì môi trường dinh dưỡng ổn định. Việc sắp xếp và kiểm soát chặt chẽ các yếu tố trên cho phép đánh giá chính xác ảnh hưởng của từng biến thí nghiệm cũng như xác định được điều kiện tối ưu cho hiệu quả xử lý bùn thải và phát triển trùn quế, góp phần hoàn thiện giải pháp sinh học xử lý chất thải theo hướng tuần hoàn, bền vững.

2.3. Phương pháp lấy mẫu và tần suất

Để đánh giá hiệu quả xử lý, ngoài chất lượng của trùn quế và lượng phân thu được. Nghiên cứu đã tiến hành phân tích các chỉ tiêu quan trọng phản ánh đặc tính lý hóa học và giá trị nông học của sản phẩm. Chỉ tiêu pH được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 13263-9:2020, cho phép đánh giá tính axit hoặc kiềm của môi trường bùn, yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng sinh trưởng của vi sinh vật và cây trồng. Độ ẩm được xác định theo phương pháp sấy khối lượng quy định tại TCVN 9297:2012, nhằm xác định tỷ lệ nước còn lại trong bùn, từ đó điều chỉnh thích hợp quá trình bảo quản và sử dụng. Hàm lượng chất hữu cơ được xác định dựa trên phương pháp nung mẫu và mất khối lượng ở nhiệt độ cao, theo tiêu chuẩn TCVN 9294:2012, phản ánh mức độ giàu chất nền hữu cơ cần thiết cho quá trình khoáng hóa đất. Song song đó, tổng hàm lượng nitơ được xác định bằng phương pháp Kjeldahl theo TCVN 8557:2010, cung cấp thông tin về tiềm năng cung cấp đạm cho cây trồng. Hàm lượng photpho hữu hiệu (P₂O₅) được đo theo TCVN 8559:2010, và hàm lượng kali hữu hiệu (K₂O) được xác định theo TCVN 8560:2018, hai chỉ tiêu này phản ánh khả năng cung cấp dinh dưỡng đa lượng thiết yếu cho cây. Ngoài ra, tỷ lệ C/N được tính toán dựa trên hàm lượng carbon và nitơ đã phân tích, lần lượt theo TCVN 9294:2012 và TCVN 8557:2010, giúp đánh giá mức độ cân đối dinh dưỡng và khả năng khoáng hóa của chất nền.



Hình 1. Các chỉ tiêu vật lý trong quá trình xử lý bùn ao nuôi cá tra bằng trùn quế: (A) pH; (B) Nhiệt độ; (C) độ ẩm.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

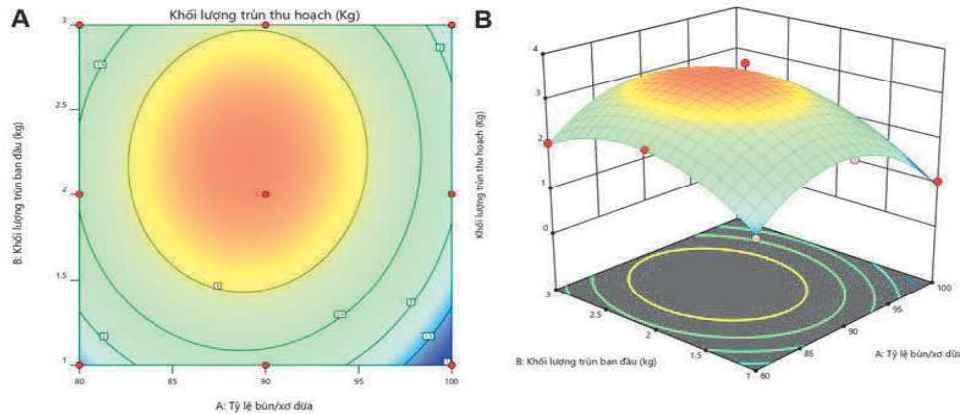
3.1. Đánh giá các chỉ tiêu vật lý trong quá trình xử lý bùn ao nuôi cá tra bằng trùn quế

Sau giai đoạn ủ yếm khí sơ bộ nhằm điều hòa môi trường nền, trùn quế được đưa vào hệ thống để tiếp tục xử lý bùn thải ao nuôi cá tra. Trong suốt 43 ngày vận hành, các chỉ tiêu vật lý chủ đạo gồm pH, nhiệt độ và độ ẩm được ghi nhận định kỳ, qua đó phản ánh mức độ ổn định của nền xử lý, khả năng thích nghi của trùn cũng như hiệu quả của phương pháp phối trộn và chăm sóc. Đây là các thông số then chốt ảnh hưởng trực tiếp đến hoạt tính của hệ vi sinh vật và sinh vật đất, đồng thời quyết định khả năng phân giải chất hữu cơ, chuyển hóa các hợp chất nitơ, photpho, góp phần nâng cao hiệu quả xử lý tổng thể.

Kết quả Hình 1A mô tả pH trong quá trình xử lý, kết quả theo dõi cho thấy giá trị dao động khá rộng, từ mức thấp nhất là 5.9 đến mức cao nhất là 8.4 tùy theo nghiệm thức và giai đoạn xử lý. Tuy nhiên, phần lớn các giá trị trung vị tập trung trong khoảng 6.6 đến 7.6, là khoảng pH được xem là tối ưu cho hoạt động trao đổi chất của trùn quế, vốn ưa môi trường hơi axit nhẹ đến trung tính. Điều này cho thấy hệ thống đã đạt được trạng thái cân bằng sinh học nhất định sau giai đoạn đầu thích ứng. Các nghiệm thức có tỷ lệ phối trộn xơ dừa cao hơn như NT6, NT7 và NT8 thường duy trì pH ổn định hơn, với biên độ dao động hẹp xung quanh mức trung tính. Xơ dừa đóng vai trò quan trọng như vật liệu đệm, có khả năng hấp phụ ion NH₄⁺ sinh ra từ quá trình phân giải protein trong bùn cá, cũng như làm chậm quá trình khoáng hóa các hợp chất hữu cơ dễ phân hủy, từ đó giảm các đột biến pH. Ngược lại, một số nghiệm thức như NT3, NT5 và NT10 thể hiện biên độ dao động lớn, pH có lúc lên trên 8, phản ánh quá trình phân giải protein mạnh sinh ra amoniac làm kiềm hóa môi trường, hoặc có thể do khả năng đệm của nền phối trộn kém, dẫn đến biến động pH mạnh khi các hợp

chất dễ tiêu phân hủy nhanh chóng. Trong những ngày đầu sau khi thả trùn, hoạt động của hệ vi sinh vật hiếu khí và vi hiếu khí tăng mạnh để phân hủy các hợp chất hữu cơ dễ tiêu như carbohydrate, protein hòa tan, từ đó sinh ra acid hữu cơ làm pH có xu hướng giảm nhẹ. Khi các hợp chất này cạn dần và quá trình khoáng hóa ổn định hơn, pH bắt đầu tăng nhẹ trở lại nhờ sản phẩm chuyển hóa cuối của các phản ứng thường là CO₂ và ion bicarbonate. Trùn quế cũng góp phần ổn định pH thông qua việc tiết ra dịch cơ thể mang tính trung tính và làm đồng đều môi trường nhờ quá trình di chuyển, đào xới, phân bố lại chất nền và vi sinh vật.

Đối với yếu tố nhiệt độ, dữ liệu ghi nhận từ 43 ngày thí nghiệm cho thấy biên độ dao động tương đối hẹp, chủ yếu từ 26°C đến 30°C, phản ánh rõ sự chi phối của điều kiện thời tiết ngoài trời cũng như mức độ sinh nhiệt bên trong khối nền xử lý. Nhiệt độ được mô tả trong hình 1B cho thấy trung bình giữa các nghiệm thức dao động quanh 27.5°C đến 28.5°C, là vùng nhiệt lý tưởng cho sự phát triển của trùn quế cũng như hoạt động phân hủy hữu cơ của hệ vi sinh vật cộng sinh. Một số nghiệm thức như NT6, NT7 và NT9 có xu hướng ghi nhận nhiệt độ cao hơn, có thể do thành phần nền giàu dinh dưỡng, hoạt tính vi sinh mạnh làm gia tăng quá trình sinh nhiệt cục bộ. Tuy nhiên, nhìn chung nhiệt độ được duy trì dưới ngưỡng 30°C nên không gây hiện tượng sốc nhiệt, bảo đảm an toàn sinh lý cho trùn quế. Kết quả cho thấy phần lớn các nghiệm thức có nhiệt độ phân bố đồng đều, ít ngoại lệ, chứng tỏ khả năng tự điều tiết tốt nhờ tương tác giữa ba yếu tố chính: bức xạ nhiệt môi trường, quá trình sinh nhiệt vi sinh và khả năng giữ/tản nhiệt của khối nền. Hoạt động đào bới không ngừng của trùn quế cũng góp phần phá vỡ các vùng nhiệt độ cục bộ, làm nhiệt độ phân bố đồng đều hơn trong toàn bộ thể tích khối xử lý. Đây là lợi thế rõ rệt so với các hệ thống tĩnh, vốn dễ hình thành điểm nóng làm gia tăng tốc độ phân hủy



Hình 2. Tối ưu hóa khối lượng trùn thu hoạch: (A) biểu đồ 2D; (B) biểu đồ 3D.

không kiểm soát, dẫn đến biến động pH hoặc mất cân bằng độ ẩm.

Yếu tố độ ẩm được theo dõi suốt chu kỳ xử lý và cho thấy nền được duy trì khá tốt trong khoảng từ 60% đến 80%, vốn là ngưỡng tối ưu cho hô hấp và hoạt động tiêu hóa của trùn quế. Các nghiệm thức như NT1, NT6 và NT8 cho thấy độ ẩm ổn định, trung vị dao động quanh 70% và biên độ hẹp, phản ánh vai trò của xơ dừa trong việc giữ nước, giảm dao động ẩm giữa ngày và đêm. Ngược lại, những nghiệm thức như NT3, NT5, NT7 và NT9 thể hiện mức độ dao động độ ẩm lớn hơn, phần lõi hộp của biểu đồ mở rộng chứng tỏ nước dễ bị bốc hơi hoặc phân bố không đồng đều trong khối nền. Mặc dù có bổ sung nước đều đặn hàng ngày, một số thời điểm độ ẩm vẫn xuống gần mức 55% - 60%, đặc biệt ở các nghiệm thức có tỷ lệ xơ dừa thấp, do khả năng giữ nước kém hoặc cấu trúc nền bị nén chặt làm giảm tính mao dẫn.

Từ các chỉ tiêu pH, nhiệt độ và độ ẩm, có thể nhận xét rằng quá trình xử lý bùn ao nuôi cá tra bằng trùn quế đã đạt được trạng thái cân bằng sinh học tương đối ổn định sau giai đoạn thích nghi ban đầu. Sự có mặt của xơ dừa không chỉ cải thiện độ tơi xốp và khả năng giữ nước mà còn đóng vai trò như một hệ đệm giúp điều hòa pH và phân tán đều nhiệt độ, hạn chế các dao động bất lợi trong suốt chu kỳ xử lý. Việc bổ sung nước hàng ngày kết hợp với đặc tính cấu trúc nền cũng góp phần duy trì độ ẩm ở mức tối ưu cho hoạt động của cả vi sinh vật lẫn trùn quế. Những biến động ngắn hạn về các thông số vật lý, nhất là pH và độ ẩm, đã được kiểm soát hiệu quả, không vượt quá ngưỡng chịu đựng sinh lý của trùn, nhờ đó quá trình phân giải hữu cơ và tích lũy sinh khối trùn diễn ra thuận lợi.

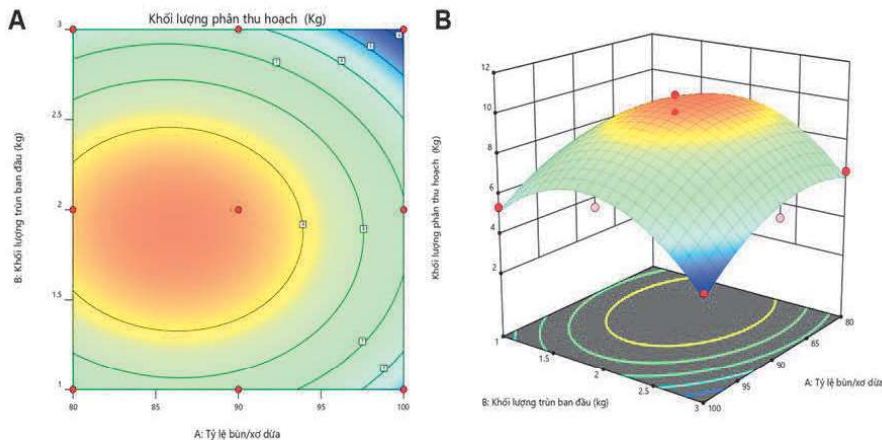
3.2. Đánh giá hiệu quả xử lý bùn ao nuôi cá tra bằng trùn quế

Sau khi quá trình ủ kết thúc, hỗn hợp chất nền được chuyển sang giai đoạn xử lý chính thức bằng trùn quế. Trùn được đưa vào các thùng nuôi thể tích 0.1 m³ với

tổng khối lượng chất nền trong mỗi thùng là 30 kg. Khối lượng trùn ban đầu được thay đổi theo các mức 1 kg, 2 kg và 3 kg tùy theo thiết kế thí nghiệm. Tổng cộng có mười nghiệm thức được bố trí tương ứng với các tổ hợp khác nhau giữa tỷ lệ phối trộn bùn và xơ dừa, khối lượng nền và khối lượng trùn giống. Trong đó, các nghiệm thức NT3 và NT4 sử dụng hoàn toàn bùn không phối trộn xơ dừa, các nghiệm thức NT1, NT2 và NT9 sử dụng tỷ lệ phối trộn 80:20, trong khi các nghiệm thức còn lại sử dụng tỷ lệ 90:10. Một số nghiệm thức như NT6 được lặp lại nhiều lần để tăng độ tin cậy của dữ liệu và kiểm tra tính ổn định của điều kiện xử lý (Hình 2).

Biểu đồ tối ưu hóa theo mô hình RSM đã thể hiện rõ mối quan hệ phi tuyến giữa hai biến đầu vào là tỷ lệ phối trộn bùn: xơ dừa và khối lượng trùn ban đầu đối với biến phản hồi là khối lượng trùn thu hoạch sau 43 ngày xử lý. Phân tích bề mặt đáp ứng cho thấy điểm tối ưu đạt được tại tổ hợp điều kiện tỷ lệ bùn:xơ dừa 90:10 và khối lượng trùn giống là 2.0 kg, với khối lượng trùn thu hoạch dự đoán là 3.45 kg. Đây là vùng có màu cam đậm trên biểu đồ contour và vùng đỉnh trên đồ thị 3D, phản ánh hiệu quả tối đa về mặt sinh khối trong hệ thống xử lý.

Khi phân tích xu hướng thay đổi của biểu đồ, có thể nhận thấy rằng việc giảm tỷ lệ bùn và tăng tỷ lệ xơ dừa từ 100:0 đến 90:10 hoặc 80:20 giúp cải thiện đáng kể hiệu suất sinh trưởng của trùn. Cụ thể, ở nghiệm thức sử dụng 100% bùn, khối lượng trùn thu được dao động từ 0.93 kg đến 1.75 kg, thấp hơn rất nhiều so với các nghiệm thức có bổ sung xơ dừa. Điều này có thể lý giải do bản chất của bùn ao cá tra có độ đặc cao, thiếu độ tơi xốp và dễ bị yếm khí cục bộ. Nếu không có vật liệu xốp như xơ dừa làm giá thể đệm, trùn sẽ gặp khó khăn trong việc di chuyển, trao đổi khí, và không có khoảng trống thích hợp để trú ẩn. Điều này dẫn đến hiện tượng trùn phân bố không đều trong hệ, tích tụ CO₂ cục bộ và gây ức chế sinh lý. Ngược lại, khi tỷ lệ xơ



Hình 3. Tối ưu hóa khối lượng phân thu hoạch: (A) biểu đồ 2D; (B) biểu đồ 3D.

dừa được bổ sung ở mức hợp lý, chẳng hạn 10%, chất nền trở nên xốp hơn, có khả năng giữ ẩm tốt, cung cấp các vi khoáng trống khí cho trùn trú ẩn và phát triển. Ngoài ra, xơ dừa còn hỗ trợ điều tiết độ pH và độ dẫn điện trong nền, hạn chế biến động đột ngột của các chỉ tiêu môi trường trong suốt quá trình xử lý.

Về khối lượng trùn ban đầu, dữ liệu cho thấy rằng việc tăng khối lượng trùn từ 1.0 kg lên 2.0 kg làm tăng đáng kể khối lượng trùn thu hoạch, với các giá trị tăng từ 2.05 kg lên 3.38 kg, theo dữ liệu thực nghiệm tại tỷ lệ bùn:xơ dừa 90:10. Tuy nhiên, khi tăng khối lượng trùn lên 3.0 kg, khối lượng thu hoạch không tăng tương ứng, thậm chí có xu hướng giảm nhẹ xuống còn 2.70 kg. Hiện tượng này cho thấy rằng mật độ trùn quá cao dẫn đến cạnh tranh sinh học, giảm khả năng tiếp cận nguồn dinh dưỡng và làm tăng mức tiêu hao oxy nội tại trong chất nền, dẫn đến giảm hiệu suất tổng thể. Ngoài ra, mật độ trùn lớn trong một thể tích xử lý giới hạn còn có thể gây stress quần thể, làm tăng tỷ lệ chết và ức chế sinh trưởng của cá thể non. Xét trên mô hình và bảng dữ liệu thực tế, có thể thấy hiệu quả sinh trưởng đạt cao nhất tại tỷ lệ bùn:xơ dừa 90:10 và khối lượng trùn ban đầu 2.0 kg, khi đó khối lượng trùn thu hoạch đạt 3.38 - 3.75 kg, cao hơn 1.5 - 2 lần so với các tổ hợp khác. Trong khi đó, các nghiệm thức ở hai cực đoạn của mỗi yếu tố (tức 100:0 hoặc 3.0 kg trùn) đều cho kết quả thấp hơn mức tối ưu từ 20% đến gần 70%, tùy tổ hợp (Hình 3).

Biểu đồ tối ưu hóa khối lượng phân trùn thu hoạch tại hình 3 cho thấy rõ ảnh hưởng đồng thời của hai yếu tố đầu vào gồm tỷ lệ bùn: xơ dừa và khối lượng trùn ban đầu đến năng suất phân hữu cơ tạo ra trong hệ thống. Tại vùng trung tâm của biểu đồ, mô hình dự đoán khối lượng phân trùn đạt cực đại là 9.86 kg khi sử dụng tỷ lệ bùn:xơ dừa là 90:10 và khối lượng trùn ban đầu là 2.0 kg. Điều này hoàn toàn tương đồng với kết quả tối ưu về khối lượng trùn sinh trưởng đã được ghi

nhận trước đó, cho thấy đây là tổ hợp điều kiện đồng thời tối ưu cả về mặt xử lý chất hữu cơ lẫn sinh khối trùn tạo thành.

Xu hướng thay đổi theo tỷ lệ bùn:xơ dừa được thể hiện rõ: khi tỷ lệ xơ dừa tăng, lượng phân trùn thu được tăng lên rõ rệt. Cụ thể, ở mức 100% bùn (không phối trộn xơ dừa), năng suất phân thu được chỉ dao động từ 3.7 đến 5.3 kg, trong khi ở tỷ lệ 90:10, con số này đạt gần 10 kg. Nguyên nhân có thể giải thích là do xơ dừa ngoài vai trò tạo kết cấu thông thoáng còn cung cấp chất xơ không phân giải nhanh, giúp trùn tăng cường hoạt động đào bới, đồng thời hỗ trợ duy trì độ ẩm, giảm tình trạng bùn vón cục và tăng khả năng thấm khí trong hệ thống. Những điều kiện này đặc biệt cần thiết trong các hệ thống xử lý yếm khí bán tự nhiên, vốn thiếu khả năng sục khí cơ học. Nếu chỉ sử dụng bùn nguyên chất mà không bổ sung xơ dừa, môi trường trở nên bí kín, nghèo oxy vi mô, dễ sinh khí độc như amoniac và H_2S , từ đó làm giảm hoạt lực phân giải của trùn và các vi sinh vật hiếu khí cộng sinh. Về yếu tố khối lượng trùn ban đầu, kết quả phân tích cho thấy khi tăng khối lượng trùn từ 1.0 lên 2.0 kg, khối lượng phân thu được cũng tăng tương ứng từ 7.2 kg lên gần 9.9 kg, phản ánh rõ hiệu quả tăng mật độ sinh học hợp lý. Tuy nhiên, khi khối lượng trùn tăng lên 3.0 kg, lượng phân tạo ra lại giảm chỉ còn khoảng 6.23 kg, cho thấy xu hướng quá tải sinh học. Mật độ trùn quá cao dẫn đến sự cạnh tranh về không gian trú ẩn, thức ăn và oxy, đồng thời có thể gây stress quần thể, làm giảm hiệu suất chuyển hóa hữu cơ thành phân. Khi kết hợp cả hai yếu tố, có thể thấy hiệu quả thu phân trùn đạt tối đa trong vùng giới hạn khoảng 88% đến 92% bùn kết hợp 8% đến 12% xơ dừa, cùng với khối lượng trùn ban đầu dao động 1.8 kg đến 2.2 kg. Đây là vùng hoạt động ổn định, giúp hệ thống duy trì hiệu quả xử lý ngay cả khi điều kiện vật liệu không hoàn toàn đồng nhất, điều rất phổ biến trong ứng dụng thực tế tại các trang trại

quy mô nhỏ. Một điểm đáng chú ý là xu hướng giảm hiệu suất phân trùn rõ rệt khi cả hai yếu tố cùng tăng đến cực đại hoặc giảm đến cực tiểu. Cụ thể, tổ hợp 100% bùn và 3 kg trùn cho sản lượng phân thấp nhất, chỉ đạt khoảng 3.79 kg, phản ánh tác động bất lợi tích lũy của chất nền quá đặc và mật độ trùn quá cao. Dữ liệu mô phỏng này cũng hoàn toàn khớp với giá trị thực nghiệm, càng củng cố tính tin cậy của mô hình RSM đã xây dựng.

Phân tích ANOVA cho thấy cả hai mô hình hồi quy bậc hai nhằm tối ưu khối lượng trùn và lượng phân thu hoạch đều đạt ý nghĩa thống kê (F-value lần lượt 12.96 và 10.65, $p < 0.05$), chứng minh mối quan hệ giữa tỷ lệ bùn:xơ dừa (A), khối lượng trùn ban đầu (B) và kết quả đầu ra không xảy ra ngẫu nhiên. Trong mô hình dự báo khối lượng trùn, các biến A^2 và B^2 có $p < 0.05$, khẳng định tác động phi tuyến, tức trùn phát triển tốt đến ngưỡng tối ưu rồi giảm khi vượt tải. Tác động tuyến tính A, B chưa rõ rệt nhưng vẫn cần thiết. Không có tương tác đáng kể giữa A và B, cho thấy chúng ảnh hưởng độc lập.

Đối với mô hình tối ưu lượng phân, A đạt ý nghĩa ($p = 0.0283$), cho thấy rõ vai trò phối trộn xơ dừa, còn B^2 rất quan trọng ($p = 0.0071$), phản ánh hiện tượng quá tải sinh học khi mật độ trùn cao. Cả hai mô hình đều có Lack of Fit không đáng kể ($p > 0.46$), chứng tỏ phù hợp thực nghiệm, với R^2 cao (0.93–0.94) và Adjusted R^2 từ 0.84–0.87, giải thích 84–94% biến thiên. Tuy nhiên, Predicted R^2 thấp hơn (≈ 0.56), cho thấy cần thí nghiệm xác nhận để củng cố khả năng dự báo. Giá trị Adequate Precision trên 9 khẳng định mô hình đáng tin cậy.

Kết quả này phù hợp với cơ chế thực tế: tăng bùn (giảm xơ dừa) làm giảm trùn và phân do nền kém thoáng, yếm khí, còn quá nhiều trùn ban đầu gây cạnh tranh, giảm hiệu quả xử lý. Các phương trình hồi quy bậc hai thu được đã mô tả chính xác mối liên hệ và xác định khoảng tối ưu, làm cơ sở thiết lập quy trình nuôi trùn xử lý bùn ao cá tra hiệu quả.

Phương trình đầu tiên mô tả khối lượng trùn thu hoạch như sau:

$$Y_1 = -86.39643 + 1.94931A + 2.77893B + 0.00675AB - 0.011029A^2 - 0.767857B^2$$

Kết quả cho thấy cả hai yếu tố A và B đều có ảnh hưởng đáng kể đến sinh trưởng trùn, trong đó A biểu thị vai trò điều tiết cơ học của xơ dừa trong hỗn hợp và B thể hiện sự gia tăng khối lượng trùn ban đầu làm cơ sở sinh khối. Các hệ số âm ở A^2 và B^2 khẳng định xu hướng cực đại của hệ thống, tức là sau một ngưỡng tối ưu, hiệu suất thu trùn sẽ giảm nếu tiếp tục tăng tỷ lệ bùn hoặc mật độ trùn ban đầu.

Tương tự, phương trình thứ hai mô tả khối lượng phân trùn thu được sau xử lý:

$$Y_2 = -106.94119 + 2.46245A + 11.43702B - 0.01325AB - 0.014157A^2 - 2.72071B^2$$

Trong phương trình này, yếu tố B có ảnh hưởng rõ rệt hơn với hệ số lớn, phản ánh mối quan hệ mật thiết giữa sinh khối ban đầu và lượng phân tích lũy được. Tuy nhiên, hệ số âm của B^2 cho thấy nếu mật độ trùn vượt quá giới hạn sinh học, khả năng chuyển hóa chất hữu cơ sẽ bị suy giảm. Cũng tương tự như Y_1 , tỷ lệ bùn quá cao mà thiếu xơ dừa sẽ làm môi trường nén chặt, gây thiếu khí và ức chế hoạt động của vi sinh vật và trùn, từ đó làm giảm hiệu quả xử lý. Từ các kết quả mô hình hóa để xuất tối ưu đạt được tại tỷ lệ phối trộn bùn/xơ dừa là 90:10 và khối lượng trùn quế ban đầu là 2kg từ đó cho thấy hiệu quả tối ưu lượng trùn và phân thu hoạch được sau quá trình xử lý lần lượt là 3.45kg và 9.47kg. Kết quả cho thấy nghiên cứu khi phối trộn với xơ dừa và ủ trong thời gian 43 ngày cho hiệu quả xử lý lượng bùn cao hơn phối trộn với lục bình theo tỷ lệ 7:3 với thời gian 90 ngày (Kien et al., 2024).

Kết quả nghiên cứu cho thấy, quá trình xử lý bùn thải ao nuôi cá tra bằng trùn quế đã bước đầu tạo ra sản phẩm phân trùn có tiềm năng làm phân bón hữu cơ, song chất lượng phân thu được còn biến động đáng kể giữa các nghiệm thức và chưa hoàn toàn đáp ứng đồng bộ tất cả tiêu chuẩn theo QCVN 01-189:2019/BNNPTNT. Chỉ tiêu pH của phân trùn dao động từ 5.07 đến 6.33, phù hợp ngưỡng quy chuẩn (5.5–8.5), ngoại trừ NT6 tiệm cận giới hạn dưới, phản ánh môi trường hơi axit. Độ ẩm của tất cả các nghiệm thức đều vượt quá mức cho phép 30%, dao động từ 36.3% đến 53.2%, cho thấy cần có giai đoạn phơi hoặc sấy để ổn định khi đóng gói, bảo quản.

Tỷ lệ C/N – chỉ tiêu quan trọng phản ánh mức độ ổn định phân hủy hữu cơ – chỉ đạt chuẩn (10–20) ở NT1, NT5, NT6, NT7, NT8 và NT9, trong khi NT2 quá cao (27.5) và NT3, NT4, NT10 quá thấp (<10), báo hiệu dư thừa carbon chưa phân giải hoặc ngược lại là quá trình khoáng hóa mạnh dẫn đến thiếu carbon, cần điều chỉnh phối trộn hoặc kéo dài thời gian ủ. Hàm lượng chất hữu cơ chỉ đạt yêu cầu tối thiểu 15% ở NT1, NT2, NT5, NT6, NT7, NT9, các nghiệm thức còn lại thấp hơn, cho thấy hạn chế nguồn carbon hoặc phân hủy chưa triệt để. Hàm lượng nitơ tổng đạt chuẩn $\geq 0.5\%$ ở hầu hết mẫu, ngoại trừ NT2 và NT4 hơi thấp, chứng minh khả năng tích lũy đạm tốt nhờ hoạt động đồng hóa của trùn. Về lân hữu hiệu (P2O5), các nghiệm thức NT2, NT3, NT4, NT7, NT8 và NT10 đạt chuẩn $\geq 0.3\%$, nhưng một số mẫu khác không phát hiện, do đó cần kiểm soát phương pháp kiểm định chặt chẽ hơn. Kali hữu hiệu (K2O) lại là chỉ tiêu yếu nhất, chỉ NT1 đạt chuẩn $\geq 0.5\%$, các mẫu còn lại thấp hơn hoặc không phát hiện, phản ánh nhu



Bảng 2. Chất lượng phân trùn sau quá trình xử lý.

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	NT1	NT2	NT3	NT4	NT5	NT6	NT7	NT8	NT9	NT10
1	pH	-	5.93	6.33	6.12	6.09	6.03	5.07	5.72	5.72	5.87	6.27
2	Độ ẩm	%	49.2	49.2	36.4	37.5	42.2	42.2	43.2	44.4	53.2	36.3
3	Tỷ lệ C/N	-	19.5	27.5	6.18	9.2	18.8	14.3	11.4	12.7	17.6	4.33
4	Hàm lượng chất hữu cơ	%	28.8	24.8	8.56	8.94	18.6	16	18.5	14	23.6	5.53
5	Hàm lượng Nito tổng	%	0.67	0.41	0.63	0.44	0.45	0.51	0.74	0.5	0.61	0.58
6	Hàm lượng P ₂ O ₅	%	KPH	0.37	0.49	0.51	KPH	KPH	0.41	0.4	KPH	0.32
7	Hàm lượng K ₂ O	%	0.52	0.41	KPH	KPH	0.25	0.21	0.27	0.22	0.44	KPH

cầu bổ sung nguồn kali tự nhiên nếu định hướng sản phẩm thương mại (Bảng 2).

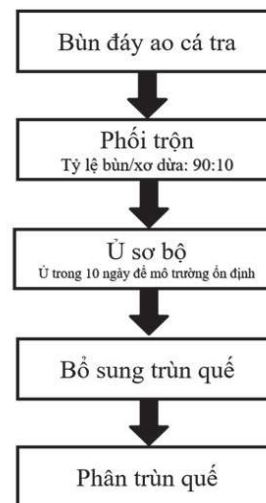
Nhìn chung, NT1 là nghiệm thức duy nhất đạt đồng thời gần đầy đủ các chỉ tiêu chính (trừ độ ẩm), trong khi NT6 – nghiệm thức tối ưu theo mô hình RSM – tuy chưa đạt về độ ẩm, chất hữu cơ và kali, nhưng vẫn cho thấy tiềm năng ứng dụng sau xử lý bổ sung như phơi sấy, cải thiện nguyên liệu đầu vào. Các nghiệm thức NT3, NT4, NT10 có chất lượng thấp, không phù hợp yêu cầu kỹ thuật, cần loại bỏ hoặc điều chỉnh công thức phối trộn. Kết quả này nhấn mạnh vai trò quan trọng của việc thiết lập tỷ lệ bùn:xơ dừa hợp lý, kiểm soát mật độ trùn ban đầu cũng như thời gian ủ để nâng cao chất lượng phân trùn, đáp ứng tiêu chuẩn sử dụng nông nghiệp, góp phần vào phát triển mô hình tuần hoàn, bền vững cho vùng nuôi cá tra.

3.3. Đề xuất quy trình xử lý bùn ao nuôi cá bằng trùn quế

Định hướng xử lý bùn đáy ao nuôi cá tra theo mô hình kết hợp nuôi trùn quế không chỉ giải quyết hiệu quả vấn đề phế phẩm phát sinh trong quá trình nuôi trồng thủy sản mà còn tạo ra giá trị gia tăng, hướng tới phát triển tuần hoàn. Quy trình bắt đầu bằng việc thu gom bùn đáy ao cá tra, một nguồn chất thải giàu hữu cơ nhưng tiềm ẩn nguy cơ gây ô nhiễm nếu thải trực tiếp ra môi trường. Bùn sau đó được phối trộn với xơ dừa theo tỷ lệ 90:10, vừa cải thiện độ tối xốp, tăng khả năng giữ ẩm, vừa cung cấp thêm lignocellulose giúp cân bằng C/N. Hỗn hợp này tiếp tục được ủ sơ bộ trong 10 ngày nhằm ổn định các thông số sinh học như pH, độ ẩm và giảm nồng độ các hợp chất dễ phân hủy, tránh gây sốc cho hệ sinh học.

Sau giai đoạn ổn định, trùn quế được bổ sung vào khối nền để bắt đầu giai đoạn xử lý chính kéo dài 43 ngày. Trong suốt quá trình này, trùn quế tiêu thụ bùn, xơ dừa và các hợp chất hữu cơ để phân hủy, đồng thời đào xới khối nền giúp tăng cường oxy, thúc đẩy hoạt động vi sinh vật và phân giải các chất hữu cơ còn lại. Kết quả cuối cùng là sản phẩm phân trùn quế – một loại phân hữu cơ ổn định, giàu chất dinh dưỡng như nitơ, lân, kali, phù hợp cải tạo đất, nâng cao độ phì nhiêu, giảm phụ thuộc vào phân bón hóa học.

Đặc biệt, ngoài việc tạo phân hữu cơ, mô hình còn mang lại nguồn sinh khối trùn quế có thể tận dụng làm thức ăn giàu đạm cho cá tra, qua đó khép kín chuỗi tuần hoàn vật chất ngay tại hệ thống nuôi. Giải pháp này không chỉ giảm chi phí thức ăn công nghiệp mà còn gia tăng



Hình 4. Quy trình xử lý bùn ao cá tra bằng trùn quế.

hiệu quả sinh học tổng thể. Như vậy, toàn bộ quy trình đã tận dụng triệt để phế phẩm bùn ao nuôi, biến chất thải thành nguồn tài nguyên có ích, từ đó góp phần xây dựng hệ thống nuôi cá tra thân thiện môi trường, tiết kiệm chi phí và phát triển theo hướng kinh tế tuần hoàn, bền vững.

4. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Nghiên cứu này đã chứng minh tiềm năng áp dụng trùn quế (*Perionyx excavatus*) để xử lý bùn thải ao nuôi cá tra, qua đó biến phế phẩm thủy sản giàu hữu cơ, nitơ và phốt pho thành các sản phẩm có giá trị gia tăng theo hướng kinh tế tuần hoàn. Kết quả thực nghiệm và mô hình hóa cho thấy tỷ lệ phối trộn bùn:xơ dừa 90:10 kết hợp

mật độ trùn ban đầu 2 kg đã đạt tối ưu, cho sinh khối trùn thu hoạch 3.45 kg và phân trùn 9.47 kg sau 43 ngày. Phân tích về mặt chất lượng, phân trùn nhìn chung đáp ứng tốt tiêu chuẩn QCVN 01-189:2019/BNNPTNT về pH, tỷ lệ C/N, nitơ và photpho có thể tái sử dụng trong nông nghiệp.

Bên cạnh đó, một số hạn chế của nghiên cứu cũng được xác định như chưa tập trung chuyên sâu về mối liên hệ giữa các chỉ tiêu vi sinh vật có lợi và tính năng cải tạo đất của phân trùn, cũng như chưa thực hiện các thí nghiệm cho ăn thực nghiệm trên cá để đánh giá trực tiếp hiệu quả sinh khối trùn làm thức ăn. Ngoài ra, việc kiểm soát đồng nhất nguồn nguyên liệu bùn và xơ dừa ở quy mô lớn vẫn là thách thức khi áp dụng thực tế.

Từ những hạn chế này, nghiên cứu mở ra các hướng đi mới cho tương lai, bao gồm nghiên cứu bổ sung các phụ liệu phối trộn khác như tro trấu, mùn cưa nhằm cải thiện tỷ lệ C/N, tối ưu hóa thêm thành phần dinh dưỡng của phân trùn, cũng như tích hợp công nghệ vi sinh để tăng khả năng phân hủy hữu cơ và cố định dưỡng chất. Ngoài ra, cần triển khai thêm các nghiên cứu cho ăn thực nghiệm trực tiếp trên cá tra để đánh giá giá trị sinh học của sinh khối trùn làm thức ăn giàu protein.

Trên cơ sở các kết quả đã đạt được, nghiên cứu có thể làm cơ sở để áp dụng phương pháp xử lý bùn thải bằng trùn quế tại các doanh nghiệp đang hướng đến giải pháp quản lý chất thải bền vững, tiết kiệm chi phí xử lý so với các phương pháp cơ học, hóa lý. Đồng thời, việc thương mại hóa sản phẩm phân trùn quế và khai thác sinh khối trùn làm thức ăn có thể tạo thêm nguồn thu, giảm phụ thuộc vào thức ăn công nghiệp, góp phần tăng lợi nhuận tổng thể. Để mô hình phát huy hiệu quả, các cơ quan quản lý cần hỗ trợ đào tạo kỹ thuật, thiết lập tiêu chuẩn chất lượng phân trùn cụ thể hơn cho từng loại cây trồng, và xây dựng cơ chế tín dụng xanh, khuyến khích các hộ nuôi áp dụng các giải pháp tuần hoàn, hướng tới phát triển bền vững cho ngành cá tra và nông nghiệp.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, TP.Hồ Chí Minh, đã hỗ trợ thời gian, phương tiện vật chất và phòng thí nghiệm thử nghiệm cho nghiên cứu này. Nghiên cứu cũng được sự hỗ trợ bùn thải và một số nguyên liệu từ Công ty CP xuất nhập khẩu thủy sản Bến Tre (Aquatex Bến Tre) ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A., & Ibraheem, I. J. S. *j. o. b. s.* (2012). *Microalgae and wastewater treatment*. 19(3), 257-275.
2. Anh, P. T., Kroeze, C., Bush, S. R., & Mol, A. P. J. A. r. (2010). *Water pollution by Pangasius production in the Mekong Delta, Vietnam: causes and options for control*. 42(1), 108-128.

3. Bachev, H., & Ivanov, B. (2021). *A study on wastewater treatment sludge utilization in Bulgarian agriculture. Technology audit and production reserves*, 5(4/61), 35-44.
4. Chang, Y.-C., & Shen, Y.-H. (2025). *Sustainable Energy Transition: Converting Textile Water Sludge (TWS) to Solid Recovered Fuel (SRF) in Taiwan. Energies* (19961073), 18(4).
5. Huy, D. T. N., Nam, V. Q., Hanh, H. T., Minh, P. N., Huong, L. T. T. J. F. S., & Technology. (2021). *A review and further analysis on seafood processing and the development of the fish Pangasius from the food industry perspective*. 42, e76421.
6. Jespersen, K. S., Kelling, I., Ponte, S., & Kruijssen, F. J. F. p. (2014). *What shapes food value chains? Lessons from aquaculture in Asia*. 49, 228-240.
7. Katiyar, R. B., Sundaramurthy, S., Sharma, A. K., Arisutha, S., Khan, M. A., & Sillanpää, M. J. S. (2023). *Optimization of engineering and process parameters for vermicomposting*. 15(10), 8090.
8. Kien, T. T., & Hung, N. T. (2024). *Utilizing sludge from catfish farming to produce vermicompost for improving soil quality. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*,
9. Li, J., See, K. F., & Chi, J. J. J. o. c. p. (2019). *Water resources and water pollution emissions in China's industrial sector: A green-biased technological progress analysis*. 229, 1412-1426.
10. Morello, R., Di Capua, F., Esposito, G., Pirozzi, F., Fratino, U., & Spasiano, D. J. J. o. E. M. (2022). *Sludge minimization in mainstream wastewater treatment: Mechanisms, strategies, technologies, and current development*. 319, 115756.
11. Mupambwa, H. A., Mnkeni, P. N. S. J. E. S., & Research, P. (2018). *Optimizing the vermicomposting of organic wastes amended with inorganic materials for production of nutrient-rich organic fertilizers: a review*. 25, 10577-10595.
12. Patel, A., Arkatkar, A., Singh, S., Rabbani, A., Medina, J. D. S., Ong, E. S., Habashy, M. M., Jadhav, D. A., Rene, E. R., & Mungray, A. A. (2021). *Physico-chemical and biological treatment strategies for converting municipal wastewater and its residue to resources. Chemosphere*, 282, 130881.
13. Pottipati, S., Kundu, A., & Kalamdhad, A. S. J. B. t. (2022). *Process optimization by combining in-vessel composting and vermicomposting of vegetable waste*. 346, 126357.
14. Singh, R. L., Singh, R. P., Gupta, R., & Singh, R. (2019). *Advances in biological treatment of industrial waste water and their recycling for a sustainable future. Springer*.