

# TÁI ĐỊNH HÌNH QUẢN LÝ Bùn THẢI TRONG NUÔI CÁ RÔ PHI THÂM CANH: TÍCH HỢP CÔNG NGHỆ XỬ LÝ, THU HỒI TÀI NGUYÊN VÀ THÍCH ỨNG VÙNG NƯỚC LỢ

## RESHAPING INTENSIVE TILAPIA SLUDGE MANAGEMENT: INTEGRATING TREATMENT TECHNOLOGIES, RESOURCE RECOVERY, AND BRACKISH WATER ADAPTATIONS

Tiền Hải Lý<sup>1</sup>, Nguyễn Võ Châu Ngân<sup>2</sup>

1. Trường Đại học Bạc Liêu

2. Khoa Môi trường và Tài nguyên thiên nhiên, Đại học Cần Thơ

Tác giả liên hệ: Nguyễn Võ Châu Ngân, Email: [nvcngan@ctu.edu.vn](mailto:nvcngan@ctu.edu.vn)

Ngày nhận bài: 24/02/2026; Ngày phản biện thông qua: 23/03/2026; Ngày duyệt đăng: 25/03/2026

### TÓM TẮT

Nghề nuôi cá rô phi (*Oreochromis niloticus*) thâm canh đang tạo ra áp lực nghiêm trọng về chất thải rắn, đe dọa sự bền vững của hệ sinh thái tại các vùng nuôi trồng thủy sản trọng điểm như đồng bằng sông Cửu Long. Nhằm giải quyết thách thức này, bài báo đặt mục tiêu tổng hợp và phân tích các phương pháp xử lý bùn thải hiện hành, qua đó đề xuất các chiến lược quản lý tích hợp theo nguyên lý kinh tế tuần hoàn. Thông qua đánh giá phản biện dữ liệu từ các công trình nghiên cứu (2006–2025), bài viết làm rõ các dòng vật chất, hiệu quả công nghệ và rủi ro, đóng góp một khung tiếp cận toàn diện để quản lý bùn thải thích ứng với điều kiện sinh thái nước ngọt và nước lợ. Kết quả chỉ ra ba nhóm giải pháp chiến lược. Thứ nhất, về an toàn sinh học, chế độ quản lý bùn quyết định chất lượng bùn thải; dữ liệu hiện tại cho thấy tần suất thu gom bùn định kỳ ngắn hạn (như hàng tuần) là giải pháp giúp hạn chế sự tích tụ kim loại nặng (Cd, Pb, Cr, Cu). Thứ hai, tùy chọn về công nghệ xử lý: phân hủy kỵ khí kết hợp đồng phân hủy tối ưu cho thu hồi năng lượng (Biogas), trong khi quá trình hiếu khí vượt trội về khoáng hóa phot-pho và ni-trát cho hệ thống nuôi trồng thủy canh. Thứ ba, đối với những khu vực ven biển bị xâm nhập mặn, công nghệ UASB cho thấy tiềm năng là một giải pháp thay thế cho hồ sinh học nhờ khả năng khắc phục ức chế độ mặn. Bài báo đề xuất khung quản lý tích hợp, định hướng biến bùn thải thành phân bón và năng lượng giá trị cao.

Từ khóa: An toàn sinh học và kim loại nặng, Kinh tế tuần hoàn, Quản lý bùn thải cá rô phi, Thích ứng nước lợ, Thu hồi tài nguyên

### ABSTRACT

The intensification of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) farming is creating severe pressure from solid waste, threatening the sustainability of aquaculture ecosystems in key regions such as the Mekong Delta. To address this challenge, this paper aims to synthesize and analyze current sludge treatment methods, thereby proposing integrated management strategies based on circular economy principles. Through a critical review of data from relevant studies (2006–2025), the paper clarifies mass flows, technological efficiencies, and associated risks, contributing a comprehensive framework for sludge management adapted to both freshwater and brackish ecological conditions. The results indicate three strategic pillars. First, regarding biosafety, the sludge management regime determines resource quality; current data suggest that short-term periodic sludge removal (e.g., weekly) is an important factor in limiting heavy metal accumulation (Cd, Pb, Cr, Cu). Second, a distinct technological trade-off exists: anaerobic digestion combined with co-digestion is optimal for energy recovery (biogas), whereas aerobic processes are superior for phosphorus and nitrate mineralization in hydroponic systems. Third, for saline-intruded coastal areas, UASB technology shows potential as an alternative to stabilization ponds due to its ability to overcome salinity inhibition. Finally, the paper proposes an integrated management framework that directs the transformation of waste sludge into high-value fertilizer and energy.

Keywords: Biosafety and heavy metals, Circular economy, Tilapia sludge management, Brackish water adaptation, Resource recovery

## I. MỞ ĐẦU

Cá rô phi (*Oreochromis* spp.) đã trở thành loài cá nuôi quan trọng thứ hai trên thế giới (FAO, 2024) [1], đóng vai trò trụ cột trong an ninh lương thực toàn cầu nhờ tốc độ tăng trưởng nhanh và khả năng thích nghi môi trường rộng (Steffens, 2024) [2]. Tuy nhiên, sự phát triển nóng của ngành công nghiệp này đang đối mặt với một thách thức môi trường nghiêm trọng: sự phát sinh khổng lồ của bùn thải từ quá trình nuôi. Tại các vùng nuôi trọng điểm, việc xả thải trực tiếp nguồn bùn giàu dinh dưỡng ra môi trường dẫn đến hiện tượng phú dưỡng hóa, làm suy giảm chất lượng nước và đe dọa sự bền vững của chính hệ sinh thái nuôi trồng (Pereira *et al.*, 2012; White *et al.*, 2018) [3-4].

Ở đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL), nghề nuôi cá rô phi đang đứng trước ngã rẽ quan trọng. Các địa phương có đường bờ biển đang đối mặt với xâm nhập mặn, buộc phải chuyển đổi sang các mô hình nuôi thích ứng hoặc nuôi cá trong môi trường nước lợ, đồng thời đẩy mạnh thâm canh hóa để tối ưu diện tích. Điều này đặt ra bài toán phức tạp về công tác quản lý bùn thải:

- Tải lượng thải lớn: Sự chuyển dịch từ nuôi quảng canh sang thâm canh và siêu thâm canh làm gia tăng mật độ bùn thải cục bộ. Đặc biệt trong nuôi cá rô phi, tải lượng dinh dưỡng trong bùn thải ao nuôi là rất lớn.

- Yếu tố độ mặn: Tại các khu vực nuôi ven biển, bùn thải không chỉ chứa chất hữu cơ mà còn có độ mặn cao. Việc xử lý bùn nước lợ khó khăn hơn nhiều so với nước ngọt do độ mặn ức chế quá trình phân hủy sinh học thông thường.

Trong bối cảnh khan hiếm tài nguyên tại ĐBSCL và các quy định bảo vệ môi trường ngày càng thắt chặt, các phương pháp quản lý truyền thống như ao lắng hoặc xả thải trực tiếp không còn phù hợp. Đã đến lúc cần thay đổi tư duy từ xử lý chất thải sang thu hồi tài nguyên. Bùn thải phát sinh từ ao nuôi cá rô phi cần được xem là một nguồn nguyên liệu đầu vào giá trị cho kinh

tế tuần hoàn. Các nghiên cứu gần đây đã chứng minh tiềm năng to lớn của bùn thải từ ao nuôi cá rô phi trong việc sản xuất năng lượng và canh tác nông nghiệp. González-Hermoso & Segovia (2017) [5] đã chứng minh rằng thông qua các phương pháp tiên xử lý (kiềm, nhiệt, sinh học), bùn từ các hệ thống nuôi tuần hoàn nước (RAS – Recirculating Aquaculture System) có thể đạt hiệu suất loại bỏ ni-trát trên 90% và gia tăng đáng kể sản lượng biogas. Tương tự, việc tích hợp nuôi trồng thủy sản với trồng trọt - thủy canh (Aquaponics) cho phép tái sử dụng dinh dưỡng khoáng hóa từ bùn để nuôi cây trồng, giúp giảm thiểu chi phí phân bón và bảo vệ nguồn nước (Delaide *et al.*, 2018; Monsees *et al.*, 2017) [6-7].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về xử lý chất thải nuôi trồng thủy sản nói chung, nhưng hầu hết các công trình này còn phân tán, chủ yếu tập trung ở quy mô phòng thí nghiệm và hiện đang thiếu các dữ liệu định lượng dài hạn về dòng vật chất khi tái sử dụng bùn cá ở quy mô trang trại. Để thu hẹp những khoảng trống này, mục tiêu của bài báo là tổng hợp, phân tích phản biện và đề xuất các chiến lược quản lý bùn thải cá rô phi thâm canh theo hướng tuần hoàn. Phạm vi nghiên cứu tập trung vào việc đánh giá sự đánh đổi giữa các công nghệ xử lý tại chỗ và tập trung (hiếu khí, kỵ khí), tiềm năng thu hồi tài nguyên (năng lượng và phân bón), và khả năng thích ứng của vi sinh vật trong điều kiện xâm nhập mặn.

Tính mới và đóng góp khoa học của bài báo nằm ở việc hệ thống hóa các kết quả nghiên cứu rời rạc (giai đoạn 2006–2025) để thiết lập một phương pháp tiếp cận mới: đánh giá tính khả thi của công nghệ dưới tác động kép của tải lượng hữu cơ và ức chế độ mặn. Khác với các đánh giá trước đây, bài viết này không chỉ liệt kê công nghệ mà trực tiếp giải quyết khoảng trống về thiếu hụt dữ liệu tổng thể bằng cách xây dựng một khung quản lý tích hợp theo hướng tuần hoàn, làm tiền đề lý thuyết vững chắc cho các

nghiên cứu quy mô trang trại trong tương lai.

Về ý nghĩa thực tiễn, các kết quả và phân tích của bài báo cung cấp thông tin trực tiếp, hữu ích cho người nuôi và nhà quản lý thủy sản (đặc biệt tại ĐBSCL). Cụ thể, nghiên cứu đề xuất các thông số vận hành mang tính ứng dụng cao như tối ưu hóa tần suất xi phông bùn hàng tuần để kiểm soát kim loại nặng, chỉ ra các rủi ro tích tụ độc tố, và khuyến nghị công nghệ tối ưu như bể phản ứng kỵ khí dòng chảy ngược qua lớp bùn (UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket) cho vùng nước lợ nhằm biến gánh nặng chất thải thành nguồn phân bón và năng lượng giá trị cao, hướng tới phát triển bền vững.

## II. TỔNG QUAN CÁC KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

### 1. Đặc điểm và định lượng bùn thải

Trong nuôi trồng thủy sản thâm canh, bùn thải là một hỗn hợp phức tạp của phân cá, thức ăn thừa, xác vi sinh vật và các hạt đất lắng đọng. Đối với cá rô phi, đặc tính bùn thay đổi đáng kể tùy thuộc vào loại ao nuôi và điều kiện môi trường nuôi (nước ngọt hay nước lợ). Về mặt khối lượng, Obirikorang *et al.* (2022) [9] ước tính rằng trong các ao nuôi tuần hoàn nước, hàm lượng chất rắn lơ lửng (TSS) sinh ra dao động 15–25% tổng lượng thức ăn cung cấp (tính theo trọng lượng khô). Khi áp dụng công nghệ nuôi Biofloc, TSS chiếm khoảng 20–28% lượng thức ăn đưa vào; riêng ao đất có hàm lượng TSS trong bùn thải thấp hơn, chỉ khoảng 10–15% (Dela Cruz *et al.*, 2025) [10]. Đối với ao nuôi cá rô phi ở vùng nước lợ, Fahrurrozi *et al.* (2024) [11] ghi nhận lượng TSS sinh ra tương đương 12–20% lượng thức ăn khô. Có thể thấy lượng TSS tăng tỷ lệ thuận với % lượng thức ăn cung cấp, đặc biệt trong ao nuôi Biofloc. Điều này đồng nghĩa với việc cần quan tâm đến việc giảm lượng thức ăn cung cấp để hạn chế TSS mà vẫn duy trì tăng trưởng của cá.

Theo nguyên lý cân bằng vật chất, chỉ một phần của dinh dưỡng đầu vào được cá đồng hóa thành sinh khối. Trường hợp nuôi cá rô

phi bằng lồng bè với thức ăn thương mại chất lượng cao, có 28,0% chất hữu cơ, 15,9% đạm, 45,6% phốt-pho không được cá hấp thụ mà thải ra môi trường, tích tụ trong bùn đáy (Neto & Ostrensky, 2013) [12]. Với các ao nuôi đất, Osti *et al.* (2017) [13] ghi nhận 62% N và 40% P từ thức ăn cung cấp nằm lại trong bùn đáy ao, trong khi có 12% TN cùng 15% TP được thải ra ngoài qua nước thải. Mặc dù bùn thải từ ao nuôi cá rô phi được xem là một nguồn chứa chất dinh dưỡng tiềm tàng, nhưng tỷ lệ các chất phụ thuộc nhiều vào công nghệ nuôi:

- Công nghệ nuôi tuần hoàn nước: Bùn từ ao nuôi tuần hoàn nước thường có hàm lượng hữu cơ cao và giàu các nguyên tố vi lượng. Monsees *et al.* (2017) [7] phân tích bùn thải từ ao nuôi cá rô phi tuần hoàn nước và ghi nhận sự hiện diện đáng kể của phốt-pho (P), ka-li (K), can-xi (Ca) và ma-giê (Mg). Đặc biệt, nghiên cứu này nhấn mạnh rằng P trong bùn chủ yếu tồn tại ở dạng hạt khó tan, đòi hỏi quá trình phân hủy để giải phóng thành dạng hòa tan mà thực vật có thể hấp thụ trong mô hình nuôi Aquaponics.

- Công nghệ nuôi Biofloc và tỷ lệ C/N: Trong ao nuôi Biofloc, bùn có đặc tính khác biệt do sự bổ sung nguồn các-bon (mật rỉ đường) để kích thích vi khuẩn dị dưỡng. Chutivisut *et al.* (2014) [14] phát hiện rằng các hạt biofloc có tỷ lệ C/N cao, thúc đẩy quá trình khử ni-trát và khử ni-trát thành a-môn diễn ra mạnh mẽ ngay trong cấu trúc bùn. Điều này làm cho bùn từ ao nuôi Biofloc có hoạt tính sinh học cao hơn so với bùn lắng từ ao đất truyền thống.

- Công nghệ Aquaponics: Trong mô hình nuôi trồng thủy canh, bùn đáy ao nuôi chứa 6% N, 18% P, 6% K, 16% Ca, 89% Mg (Delaide *et al.*, 2018) [6].

Khi lượng dinh dưỡng dư thừa này tích tụ trong bùn thải và xả thải trực tiếp, nó làm thay đổi nghiêm trọng các thông số môi trường như điệp lục tố và hàm lượng chất hữu cơ, dẫn đến hiện tượng phú dưỡng hóa toàn diện hệ sinh thái thủy vực tiếp nhận. Và bất kể mô hình nuôi nào,

tải lượng dinh dưỡng dư thừa khổng lồ trong bùn thải đều khẳng định tính cấp thiết của việc áp dụng các công nghệ thu hồi tài nguyên.

Một khía cạnh quan trọng thường bị bỏ qua trong các mô hình nuôi thủy sản truyền thống tại ĐBSCL là sự tích tụ kim loại nặng trong bùn lắng. Nghiên cứu mới nhất của Habib *et al.* (2025) [15] trên ao nuôi cá rô phi Biofloc cho thấy tần suất loại bỏ bùn ảnh hưởng trực tiếp đến nồng độ Cd, Pb, Cr và Cu. Nhóm nghiên cứu ghi nhận việc lưu giữ bùn thải quá lâu trong ao (thu gom hàng tháng thay vì hàng tuần) không chỉ làm tăng nồng độ kim loại trong bùn mà còn gây tích tụ sinh học trong mô cá, đe dọa an toàn thực phẩm. Đây là dữ liệu quan trọng để khuyến cáo người nuôi tại ĐBSCL cần có chế độ thu gom (xi phông) bùn đáy ao định kỳ thay vì chỉ xử lý bùn vào cuối vụ nuôi.

Đối với các khu vực ven biển nơi mô hình nuôi cá rô phi nước lợ đang phát triển để thích ứng xâm nhập mặn, đặc tính bùn có sự thay đổi lớn do độ mặn. Mirzoyan *et al.* (2012) [16] chỉ ra rằng bùn nước lợ chứa hàm lượng muối cao, gây ức chế quá trình phân hủy sinh học tự nhiên trong các ao lắng bùn. Độ mặn cao làm giảm hiệu suất lắng của các hạt keo và ức chế nhóm vi khuẩn sinh khí mê-tan, đặt ra thách thức lớn cho việc áp dụng công nghệ khí sinh học truyền thống nếu không có sự điều chỉnh kỹ thuật. Ngoài ra, bùn thải nước lợ cũng có đặc tính hóa lý riêng biệt cần lưu ý khi tái sử dụng cho nông nghiệp (Campos-Pulido *et al.*, 2013) [17].

## 2. Các chiến lược quản lý bùn tại nguồn

Quản lý tại nguồn được xem là tuyến phòng thủ đầu tiên trong việc kiểm soát bùn thải. Mục tiêu của chiến lược này không chỉ là giảm khối lượng chất thải phát sinh mà còn chủ động điều chỉnh các đặc tính hóa lý của bùn tạo thuận lợi cho các bước xử lý hoặc tái sử dụng tiếp theo. Đối với nghề nuôi cá rô phi tại ĐBSCL, ba giải pháp chính của quản lý tại nguồn bao gồm: (i) tối ưu hóa dinh dưỡng, (ii) ứng dụng công nghệ nuôi Biofloc, và (iii) thiết lập chế độ thu gom

bùn hợp lý.

### 2.1. Tối ưu hóa dinh dưỡng và hệ số chuyển đổi thức ăn

Thức ăn thừa và phân cá là thành phần chính cấu thành bùn thải. Theo phân tích dòng vật chất của Neto và Ostrensky (2013) [12], cá rô phi nuôi lồng bè tiêu hóa được 71,97% chất hữu cơ, 84,06% đạm và 54,40% phốt-pho trong khẩu phần thức ăn. Trường hợp nuôi ao đất, cá rô phi hấp thụ 26% N và 45% P (Osti *et al.*, 2017) [13]. Moyo và Rapatsa (2021) [18] và đã chứng minh rằng việc tăng cường thâm canh bằng bất kỳ loại thức ăn nào (dạng viên hay ép đùn) đều làm suy giảm đáng kể chất lượng nước thải so với nguồn nước cấp ban đầu, đòi hỏi các biện pháp kiểm soát chặt chẽ. Do đó, việc cải thiện khả năng tiêu hóa của thức ăn là biện pháp căn cơ nhất.

Các nghiên cứu chỉ ra rằng việc sử dụng thức ăn có độ tiêu hóa cao và quản lý khẩu phần ăn chặt chẽ có thể giảm đáng kể tải lượng ô nhiễm. Osti *et al.* (2017) [13] nhấn mạnh việc sử dụng các chỉ số môi trường để kiểm soát lượng thức ăn đưa vào, qua đó giảm thiểu sự thất thoát N và P vào bùn. Đặc biệt, đối với những khu vực nuôi thâm canh cá rô phi nước ngọt, việc áp dụng công nghệ cho ăn tự động dựa trên phản hồi sinh học của cá có thể giảm hệ số chuyển hóa thức ăn, từ đó giảm trực tiếp khối lượng bùn thải phát sinh trong ao.

### 2.2.2 Công nghệ Biofloc

Nuôi Biofloc là giải pháp kỹ thuật phù hợp nhất cho bối cảnh khan hiếm nước và xâm nhập mặn tại các khu vực ven biển ở ĐBSCL. Nguyên lý của Biofloc là duy trì tỷ lệ C/N cao (thường > 10/1) bằng cách bổ sung nguồn các-bon (như mật rỉ đường), kích thích vi khuẩn dị dưỡng phát triển để chuyển hóa ni-tơ vô cơ thành sinh khối vi khuẩn, trở thành thức ăn quay lại cung cấp cho cá nuôi (Ogello *et al.*, 2014) [19]. Dilmi *et al.* (2021) [20] đã chứng minh việc điều chỉnh tỷ lệ C/N ở mức 14/1–20/1 giúp chuyển dịch hệ vi sinh từ tự dưỡng sang dị dưỡng, kiểm soát hiệu quả chất lượng nước mà không cần thay nước.

Bên cạnh đó, Chutivisut *et al.* (2014) [14] phát hiện rằng trong các hạt flocc, quá trình khử ni-trát và khử ni-trát thành a-môn diễn ra mạnh mẽ. Điều này biến ao nuôi thành một bể phản ứng sinh học tự nhiên, xử lý chất thải ngay tại chỗ, giúp giảm tải áp lực cho các hệ thống xử lý tiếp theo. Tuy nhiên, áp dụng công nghệ Biofloc đòi hỏi sự cân bằng tinh tế, nếu lượng flocc quá dày sẽ làm tăng độ nhớt của nước, gây ngạt cho cá và tạo ra lượng bùn dư thừa lớn cần phải loại bỏ định kỳ.

### 2.3. Chế độ thu gom bùn và kiểm soát độc tố

Trước đây, người nuôi cá có thói quen để bùn tích tụ lâu (hàng tháng) mới xả thải để tiết kiệm nước và công lao động. Tuy nhiên, nghiên cứu của Habib *et al.* (2025) [15] đã đề xuất thay đổi thói quen này. Kết quả thực nghiệm cho thấy tần suất loại bỏ bùn ảnh hưởng trực tiếp đến sự tích tụ kim loại nặng (Cd, Cr, Pb, Cu). Nhóm tác giả so sánh các chế độ thu gom bùn (hàng tuần, hai tuần/lần, hàng tháng) và kết luận rằng chế độ thu gom hàng tuần là có hiệu quả hơn. Việc lưu bùn quá 1 tháng dẫn đến: (i) Nồng độ kim loại nặng trong mô cá tăng cao do hiện tượng tái hòa tan từ bùn; (ii) Chất lượng nước suy giảm do hiện tượng gia tăng a-môn, ni-trít, ni-trát; (iii) Hệ số FCR tăng cao, lên đến 1,67 so với 1,44 ở chế độ thu gom hàng tuần.

Ghi nhận này giúp người nuôi cá cân nhắc về tần suất loại bỏ bùn trong các hệ thống thâm canh. Đối với các mô hình nuôi lót bạt mật độ cao ở ĐBSCL, việc thiết kế hệ thống thu gom (xi phong xả đáy tự động hoặc xả định kỳ ngắn hạn hàng tuần) được khuyến khích để đảm bảo an toàn vệ sinh thực phẩm và hiệu quả kinh tế.

### 2.4. Sử dụng chế phẩm sinh học

Bên cạnh công tác quản lý vật lý, việc sử dụng các chế phẩm sinh học và chất điều chỉnh hóa học để phân hủy bùn hữu cơ tại đáy ao đang là xu hướng mới. Nghiên cứu của Roveda *et al.* (2024) [21] cho thấy sử dụng kết hợp chất axit hóa và vi khuẩn *Bacillus spp.* giúp giảm đáng kể hàm lượng TSS và các hợp chất ni-tơ độc hại.

Gần đây, Cunha *et al.* (2025) [22] cũng khẳng định hiệu quả của việc sử dụng các chế phẩm cộng sinh để làm sạch đáy ao, giúp giảm thiểu nhu cầu nạo vét cơ học gây xáo trộn môi trường nước ao nuôi.

## 3. Các công nghệ xử lý bùn thải

Việc lựa chọn công nghệ cần dựa trên việc phân biệt rõ hai hướng tiếp cận cốt lõi: xử lý tại chỗ và xử lý tập trung ở nơi khác. Xử lý tại chỗ (như sử dụng công nghệ Biofloc hoặc đánh chế phẩm sinh học trực tiếp vào nền đáy) có ưu điểm lớn là tiết kiệm chi phí vận chuyển bùn và khả năng áp dụng linh hoạt ở quy mô trang trại nhỏ. Tuy nhiên, phương án này đòi hỏi sự kiểm soát nghiêm ngặt về chất lượng nước để tránh gây sốc cho cá. Ngược lại, xử lý tập trung ở nơi khác (vận chuyển bùn thải sang hệ thống riêng biệt như bể UASB hoặc hầm ủ biogas) đòi hỏi yêu cầu kỹ thuật cao hơn, tốn kém chi phí thu gom và vận chuyển, nhưng lại là phương án tối ưu để khoáng hóa triệt để và thu hồi tài nguyên năng lượng ở quy mô trang trại lớn.

### 3.1. Tách rắn – lỏng và cô đặc bùn

Trong các hệ thống nuôi tuần hoàn nước, bùn thải có đặc điểm là thể tích lớn nhưng hàm lượng chất rắn thấp. Obirikorang *et al.* (2022) [9] ước tính rằng hàm lượng TSS sinh ra chiếm khoảng 15–25% lượng thức ăn đầu vào, nhưng thường bị pha loãng trong dòng thải với hàm lượng nước trên 95%. Do đó, thách thức đầu tiên là cô đặc bùn để giảm chi phí vận chuyển và tăng hiệu quả xử lý cho các bể phản ứng sinh học phía sau.

Các phương pháp lọc cơ học và lắng trọng lực cải tiến đang cho thấy hiệu quả cao trong xử lý bùn. Bun *et al.* (2017) [23] đã phát triển quy trình kết hợp lắng và lọc đa vật liệu (cát và than anthracite) đạt hiệu suất loại bỏ TSS lên tới 92% đối với nước thải ao nuôi cá rô phi. Tuy nhiên, đối với các hạt keo mịn khó lắng, việc sử dụng hóa chất keo tụ là cần thiết. Ermukdakul *et al.* (2013) [24] đã chứng minh sử dụng phèn nhôm có thể đạt hiệu suất loại bỏ TSS tới 99,25%.

Mặc dù vậy, nhóm nghiên cứu cũng cảnh báo về việc giảm pH và gia tăng thể tích bùn hóa học, điều này có thể gây ức chế vi sinh vật trong quá trình phân hủy sinh học tiếp theo. Đây là một yếu tố cần cân nhắc kỹ đối với các hộ nuôi cá tại ĐBSCL muốn tái sử dụng bùn làm phân bón hữu cơ.

Ngoài ra, Helal Uddin *et al.* (2007) [25] đề xuất sử dụng bộ lọc than hoạt tính dạng bột cho giai đoạn xử lý tinh giúp loại bỏ 90% COD và 93% phốt-phát. Tuy nhiên, nếu xét đến bài toán kinh tế cho quy mô nuôi đại trà tại ĐBSCL, các phương pháp lắng lọc cơ học kết hợp vật liệu lọc địa phương (như cát, xỉ than) vẫn là giải pháp khả thi nhất.

### **3.2. Phân hủy kỵ khí thu hồi năng lượng**

Phân hủy kỵ khí là công nghệ chuyển hóa chất thải hữu cơ thành biogas, đồng thời giúp ổn định bùn. Tuy nhiên, bùn cá rô phi thường có tỷ lệ C/N thấp và chứa các hợp chất khó phân hủy, đòi hỏi các chiến lược kỹ thuật cụ thể để tối ưu hóa.

Hiệu suất sinh khí mê-tan có thể được cải thiện đáng kể thông qua các bước tiền xử lý bùn thải. Trong một nghiên cứu trên bùn thải ao nuôi cá rô phi tuần hoàn nước, González-Hermoso và Segovia (2017) [5] đã so sánh bốn phương pháp tiền xử lý: kiềm, cơ học, nhiệt và sinh học. Kết quả cho thấy tiền xử lý sinh học sử dụng enzyme/vi sinh đạt hiệu quả vượt trội, tạo ra sản lượng khí sinh học cao nhất (45,18 cm<sup>3</sup>/L). Đáng chú ý, nghiên cứu này ghi nhận khả năng loại bỏ ni-trát lên đến hơn 90% thông qua quá trình khử ni-trát, giải quyết mối lo ngại về ô nhiễm ni-tơ trong nguồn nước tiếp nhận.

Để khắc phục hạn chế về mất cân bằng dinh dưỡng trong phân hủy kỵ khí bùn thải đơn thuần, giải pháp đồng phân hủy đã được chứng minh là hiệu quả. Campos-Montiel *et al.* (2022) [26] nghiên cứu phối trộn bùn thải ao nuôi cá rô phi với phân bò theo tỷ lệ 1 : 1 và ghi nhận hỗn hợp ủ sản sinh lượng khí mê-tan cao hơn và lượng CO<sub>2</sub> thấp hơn so với khi ủ riêng lẻ. Hơn

nữa, phụ phẩm thu được sau quá trình phân hủy có khả năng kích thích nảy mầm cỏ Alfalfa tốt hơn, gợi mở mô hình kinh tế tuần hoàn bền vững cho các nông hộ.

Đối với các khu vực ven biển nơi nuôi cá rô phi nước lợ đang phát triển, độ mặn là rào cản lớn cho các công nghệ truyền thống. Mirzoyan *et al.* (2012) [16] chỉ ra rằng các ao lắng xử lý bùn thải thường kém hiệu quả do độ mặn ức chế quá trình phân hủy tự nhiên. Thay vào đó, nhóm tác giả đề xuất sử dụng công nghệ UASB giúp đạt hiệu suất giảm BOD lên tới 91% và giảm đến 97% chất hữu cơ đối với bùn thải từ ao nuôi cá nước lợ. Đây là luận cứ khoa học quan trọng cho thấy UASB là một giải pháp thay thế tiềm năng tại các vùng xâm nhập mặn. Tuy nhiên, để có thể khuyến nghị áp dụng rộng rãi cho các vùng nuôi tại ĐBSCL, cần thiết phải có thêm các nghiên cứu thực nghiệm và đánh giá chi tiết bài toán kinh tế - kỹ thuật trong điều kiện địa phương.

Công nghệ phân hủy kỵ khí thu hồi năng lượng này phù hợp để xử lý phần bùn đặc sau khi đã tách pha rắn – lỏng hỗn hợp bùn thải thu được từ ao nuôi cá rô phi. Theo đó, bể biogas được sử dụng để ủ bùn đặc, tương tự như ủ xử lý các loại phân gia súc đã khá phổ biến ở ĐBSCL. Phần lỏng tách riêng được cân nhắc xử lý hiếu khí để tái sử dụng dinh dưỡng.

### **3.3. Phân hủy hiếu khí và ổn định khoáng hóa**

Nếu mục tiêu là tái sử dụng dinh dưỡng từ bùn thải cho cây trồng (Aquaponics hoặc tưới) thay vì năng lượng, phân hủy hiếu khí nước thải là lựa chọn tối ưu nhờ khả năng khoáng hóa vượt trội. Monsees *et al.* (2017) [7] đã thực hiện một so sánh đối chứng quan trọng giữa xử lý hiếu khí và kỵ khí trên bùn ao nuôi cá rô phi. Kết quả cho thấy xử lý hiếu khí (có sục khí) làm tăng 3,2 lần nồng độ phốt-pho hòa tan, từ 9,4 lên 29,7 mg/L, phản ánh quá trình khoáng hóa và huy động P trong điều kiện oxy hóa. Ngược lại, quá trình kỵ khí không giải phóng hiệu quả lượng

phốt- pho này. Ngoài ra, xử lý hiếu khí giúp bảo toàn ni-tơ dưới dạng ni-trát – dạng dinh dưỡng ưa thích của thực vật, trong khi quá trình kỵ khí thường làm thất thoát ni-tơ thông qua quá trình khử ni-trát thành khí  $N_2$ .

Delaide *et al.* (2018) [27] đã xây dựng phương pháp luận để định lượng quá trình này, chỉ ra rằng các bể phản ứng hiếu khí có thể loại bỏ ít nhất 50% lượng COD và TSS đầu vào, đồng thời đạt mức khoáng hóa từ 10–60% cho các nguyên tố đa lượng và vi lượng. Điều này biến nước thải từ một gánh nặng thành nguồn phân bón lỏng giá trị cao. Nghiên cứu của Gichana *et al.* (2019) [28] cũng khẳng định hiệu quả của việc sử dụng nước thải đã qua xử lý hiếu khí để tưới bí ngô và rau dền trong các hệ thống quy mô nhỏ, giúp tận dụng dinh dưỡng dư thừa và tạo thêm thu nhập cho người trồng.

Tóm lại, việc lựa chọn công nghệ xử lý bùn

cho cá rô phi tại ĐBSCL cần dựa trên điều kiện cụ thể: công nghệ UASB và đồng phân hủy kỵ khí phù hợp cho các trang trại quy mô lớn hoặc vùng nước lợ cần năng lượng; trong khi xử lý hiếu khí là giải pháp lý tưởng cho các mô hình Aquaponics hướng tới tối đa hóa hiệu quả sử dụng phân bón. Tổng hợp các dữ liệu cho thấy việc lựa chọn công nghệ xử lý không có một giải pháp vạn năng mà là sự đánh đổi giữa các mục tiêu. Nếu áp dụng xử lý kỵ khí, rủi ro lớn nhất là sự thất thoát dinh dưỡng và nhạy cảm với độ mặn, nhưng mang lại giá trị năng lượng. Ngược lại, quá trình hiếu khí tối ưu cho việc khoáng hóa phốt-pho và giữ lại ni-tơ hữu ích cho thực vật, nhưng lại tiêu tốn chi phí năng lượng sạch lớn. Do đó, quyết định áp dụng công nghệ phải gắn liền với bài toán kinh tế và điều kiện sinh thái đặc thù của từng trang trại.

**Bảng 1. So sánh xử lý hiếu khí và kỵ khí trong xử lý bùn cá rô phi**

Chỉ tiêu	Xử lý hiếu khí	Xử lý kỵ khí
Cơ chế chính	Oxy hóa sinh học, quá trình ni-trát hóa, khoáng hóa P	Thủy phân – A-xít hóa – Sinh mê-tan
COD xử lý (%)	50–70% (bùn Aquaponics)	40–85% tùy thuộc cách thức tiền xử lý
BOD xử lý (%)	60–80% (hệ sạch khí liên tục)	70–91% (UASB)
Năng suất $CH_4$	Không tạo $CH_4$	0,15–0,35 $m^3 CH_4/kg$ chất rắn bay hơi (VS – Volatile Solids) trong điều kiện gia nhiệt (đồng phân hủy cao hơn)
Thành phần $CH_4$	Không	30–60% $CH_4$ trong biogas (tùy tỷ lệ C/N và độ mặn)
P hòa tan	Tăng 2–3 lần P hòa tan (~ 9–30 mg/L)	Thấp; P thường ở dạng kết tủa hoặc bùn ổn định
Dạng N đầu ra	$NO_3^-$ (ổn định cho cây trồng)	$NH_4^+$ (có thể gây ức chế nếu tích tụ)
Tỷ lệ C/N yêu cầu	Không quá nghiêm ngặt	Tối ưu 20–30; bùn cá thường < 10 → cần đồng phân hủy
Nhạy cảm với độ mặn	Trung bình	Cao (vi khuẩn sinh mê-tan nhạy mặn; UASB cải thiện phần nào)
Nhu cầu năng lượng vận hành	Cao (sạch khí liên tục)	Thấp – trung bình (gia nhiệt nếu thuộc quy trình ưa ấm)
Phù hợp mục tiêu	Thu hồi dinh dưỡng (phân bón, thủy canh)	Thu hồi năng lượng (biogas)

Chỉ tiêu	Xử lý hiếu khí	Xử lý kỵ khí
Ổn định bùn	Trung bình	Cao (giảm VS, giảm mùi)
Rủi ro NH <sub>3</sub> độc	Thấp nếu quá trình ni-trát hoàn chỉnh	Cao nếu C/N thấp, pH cao
Khả năng áp dụng hộ nhỏ	Khó do chi phí điện	Phổ biến nếu dạng hầm biogas đơn giản

(Nguồn: Tổng hợp từ González-Hermoso, 2017 [5]; Monsees, 2017) [7]; Mirzoyan, 2012 [16]; Campos-Montiel, 2022 [26]; Delaide, 2018 [27])

### 3.4. Xử lý bằng thực vật thủy sinh

Đối với các hộ nuôi thủy sản quảng canh cải tiến hoặc bán thâm canh tại ĐBSCL, việc sử dụng thực vật thủy sinh để hấp thụ trực tiếp dinh dưỡng từ nước thải/bùn lỏng là một hướng đi sinh thái học mang lại hiệu quả kinh tế cao. Hệ thực vật đóng vai trò như một bộ lọc sinh học tự nhiên, chuyển hóa chất ô nhiễm thành sinh khối thực vật.

Nghiên cứu của Henry-Silva và Camargo (2006) [29] cho thấy các loài bèo phổ biến như bèo tây (*Eichhornia crassipes*) và bèo cái (*Pistia stratiotes*) có khả năng loại bỏ tới 82,0–83,3% tổng phốt-pho và 43,9–46,1% tổng ni-tơ từ nước thải ao nuôi cá rô phi, biến nguồn nước này đạt tiêu chuẩn để tái sử dụng. Tương tự, bèo tấm (*Lemna minor*) khi kết hợp với vi khuẩn *Bacillus* sp. đã được chứng minh có khả năng giảm mạnh BOD, COD và phốt-phát, đồng thời cải thiện tỷ lệ sống và tốc độ tăng trưởng của cá rô phi khi tái sử dụng nguồn nước. Đặc biệt, rong đuôi chồn (*Ceratophyllum demersum*) không chỉ cho hiệu quả xử lý ô nhiễm cao (giảm TDS, a-môn, ni-trát) mà còn cải thiện rõ rệt các chỉ số sức khỏe của cá rô phi (chức năng gan, thận và huyết học). Việc ứng dụng các loài thực vật thủy sinh bản địa này tại ĐBSCL không chỉ giải quyết bài toán xử lý chất thải với chi phí gần như bằng không, mà sinh khối bèo thu hoạch được còn có thể tận dụng làm phân bón hữu cơ hoặc thức ăn chăn nuôi, khép kín vòng tuần hoàn sinh thái.

### 4. Thu hồi tài nguyên và kinh tế tuần hoàn

Trong bối cảnh chi phí thức ăn và năng lượng ngày càng tăng, mô hình kinh tế tuyến tính (khai thác – sử dụng – thải bỏ) trong nuôi trồng thủy

sản đang dần trở nên lỗi thời. Việc chuyển đổi sang mô hình kinh tế tuần hoàn, nơi bùn thải từ ao nuôi cá rô phi được xem là nguyên liệu đầu vào cho các quy trình sản xuất khác, không chỉ giải quyết bài toán ô nhiễm mà còn tạo ra nguồn thu thứ cấp.

#### 4.1. Thu hồi năng lượng: Tiềm năng và thách thức của biogas

Sản xuất biogas thông qua phân hủy kỵ khí bùn thải là con đường trực tiếp để thu hồi năng lượng. Tuy nhiên, bùn thải ao nuôi cá rô phi có tỷ lệ C/N thấp (thường < 10) do hàm lượng đạm cao, dẫn đến sự tích tụ a-môn tự do gây ức chế vi khuẩn sinh mê-tan.

Để khắc phục hạn chế về tỷ lệ C/N, việc phối trộn bùn thải với các chất thải nông nghiệp giàu các-bon là giải pháp tối ưu. Nghiên cứu của Campos-Montiel *et al.* (2022) [26] đã chứng minh đồng phân hủy bùn thải ao cá rô phi với phân bò giúp cân bằng dinh dưỡng, tạo ra sản lượng khí mê-tan cao vượt trội và ổn định hơn so với ủ bùn đơn lẻ. Kết quả này đặc biệt có ý nghĩa để tích hợp vào mô hình VAC (Vườn – Ao – Chuồng) tại ĐBSCL, nơi nông dân có thể kết hợp chất thải chăn nuôi và nuôi trồng thủy sản để tự chủ năng lượng đun nấu hoặc phát điện quy mô nhỏ.

Hơn nữa, Jordan *et al.* (2020) [30] cũng khẳng định tính khả thi của việc sản xuất biogas từ chất thải hệ thống Aquaponics nuôi cá rô phi. Mặc dù thể tích chất thải từ các hệ thống tuần hoàn nhỏ hơn so với ao đất, nhưng nồng độ hữu cơ đậm đặc sau khi qua bể lắng giúp hiệu suất sinh khí trên mỗi đơn vị thể tích cao hơn.

Tại các khu vực nuôi cá rô phi ven biển,

Mirzoyan *et al.* (2012) [16] đã chỉ ra rằng công nghệ UASB không chỉ xử lý nước thải mặn hiệu quả mà còn cho phép thu hồi khí mê-tan, điều mà các công nghệ xử lý sinh học truyền thống không làm được. Năng lượng thu hồi có thể vận hành và bù đắp một phần chi phí năng lượng sục khí trong các ao nuôi thâm canh.

#### **4.2. Thu hồi dinh dưỡng: Từ bùn thải đến phân bón sinh học**

Bên cạnh năng lượng, bùn thải sau xử lý là nguồn phân bón hữu cơ giá trị cao. Phụ phẩm sau quá trình phân hủy kỵ khí bùn thải không chỉ an toàn về mặt vi sinh mà còn giữ lại hầu hết các chất dinh dưỡng thiết yếu. Thử nghiệm này nằm trong nghiên cứu của Campos-Montiel *et al.* (2022) [26] cho thấy dịch phân hủy từ hỗn hợp ủ bùn ao nuôi cá rô phi và phân bò kích thích sự phát triển cỏ Alfalfa tốt hơn đáng kể so với nghiệm thức đối chứng. Điều này mở ra cơ hội sử dụng bùn sấy khô hoặc ủ compost để cải tạo đất phèn mặn hoặc đất bạc màu tại ĐBSCL.

Việc kết hợp giữa nuôi cá và trồng rau giúp thu hồi dinh dưỡng lỏng cho quy trình sản xuất. Thử nghiệm của Gichana *et al.* (2019) [28] đã chứng minh tính hiệu quả của hệ thống Aquaponic kết hợp nuôi cá rô phi và trồng bí ngô và rau dền. Hiệu quả loại bỏ photpho ở nghiệm thức trồng bí ngô rất cao ( $75,5 \pm 16,8\%$ ), tương ứng với hàm lượng photpho trong mô thực vật cao đáng kể ở cây bí ngô. Kết quả cho thấy nồng độ dinh dưỡng tại đầu ra thủy canh thấp hơn đáng kể so với đầu vào, đồng thời các thông số chất lượng nước có ảnh hưởng đáng kể đến sự tăng trưởng của cá.

Tuy nhiên, một phát hiện quan trọng từ Monsees *et al.* (2017) [7] cần được nhấn mạnh: công nghệ xử lý bùn quyết định cho loại cây trồng. Nếu xử lý bùn bằng công nghệ hiếu khí, giá trị pH giảm giúp hòa tan photpho ( $PO_4^{3-}$ ) và ka-li ( $K^+$ ), phù hợp cho các loại cây ăn quả hoặc cây lấy củ có nhu cầu dinh dưỡng cao. Nhưng nếu áp dụng xử lý kỵ khí, dinh dưỡng chủ yếu tồn tại ở dạng a-môn ( $NH_4^+$ ) phù hợp hơn cho các loại rau ăn lá.

#### **4.3. Định hướng chu trình khép kín**

Một hệ thống quản lý bền vững cho ao nuôi cá rô phi tại ĐBSCL nên đi theo hướng tiếp cận tích hợp. Trước tiên cho lắng bùn trong ao nuôi hoặc hệ thống lọc. Tiếp theo tiến hành xử lý theo nhóm:

- Phần bùn đặc: Đưa vào hầm biogas (phối trộn với rơm rạ/phân chuồng) ủ lấy khí đốt. Bã thải thu được dùng bón lúa hoặc cây ăn trái.

- Phần nước bùn loãng: Xử lý hiếu khí để khoáng hóa photpho, sau đó tưới cho rau màu hoặc dùng cho hệ thống thủy canh.

Cách tiếp cận này biến chất thải thành tài nguyên, giảm chi phí phân bón vô cơ cho nông nghiệp và giảm phát thải khí nhà kính từ hoạt động nuôi trồng.

#### **5. Thách thức và hướng đi tương lai**

Mặc dù các công nghệ xử lý và thu hồi tài nguyên từ bùn thải ao nuôi cá rô phi đã đạt được những tiến bộ đáng kể về mặt lý thuyết và thực nghiệm quy mô nhỏ, việc áp dụng rộng rãi chúng vào quy trình nuôi thương mại, đặc biệt tại các vùng nuôi trọng điểm như ĐBSCL, vẫn đối mặt với nhiều rào cản.

##### **5.1. Rào cản kỹ thuật và vận hành**

Để tối ưu hóa quá trình phân hủy kỵ khí, các phương pháp tiền xử lý (sinh học, nhiệt, hóa học) là cần thiết để phá vỡ cấu trúc phức tạp của bùn cá. González-Hermoso và Segovia (2017) [5] đã chứng minh tiền xử lý sinh học có thể tăng sản lượng biogas và loại bỏ ni-trát hiệu quả. Tuy nhiên, việc vận hành các bể phản ứng enzyme hoặc duy trì nhiệt độ ổn định cho quá trình thủy phân đòi hỏi trình độ kỹ thuật cao và kiểm soát nghiêm ngặt, điều khó khả thi đối với phần lớn các nông hộ quy mô nhỏ và vừa tại ĐBSCL. Nếu không thể kiểm soát các thông số vận hành (pH, nhiệt độ) bể kỵ khí sẽ bị a-xít hóa, làm ngưng trệ toàn bộ hệ thống xử lý.

Đối với chiến lược phát triển nuôi cá rô phi nước lợ tại các khu vực ven biển, độ mặn là yếu tố ức chế sinh học chính. Mirzoyan *et al.* (2012) [16] chỉ ra rằng mặc dù công nghệ UASB vượt trội hơn công nghệ xử lý sinh học truyền thống,

nhưng hiệu suất sinh khí mê-tan vẫn bị ảnh hưởng bởi nồng độ muối cao do áp suất thẩm thấu gây sốc cho vi khuẩn sinh mê-tan. Hiện tại, thiếu các nghiên cứu về việc thuần hóa các chủng vi sinh vật chịu mặn chuyên biệt cho xử lý bùn cá rô phi, tạo ra một khoảng trống kỹ thuật lớn cho vùng nuôi nước lợ.

Cá rô phi là loài có phổ sinh thái rộng, được nuôi ở nhiều môi trường có độ mặn khác nhau. Tuy nhiên, các nhóm vi sinh vật thông thường tham gia vào quá trình xử lý bùn (như vi khuẩn sinh mê-tan trong hệ kỵ khí hay vi khuẩn ni-trát hóa trong hệ hiếu khí) lại có đặc điểm sinh lý rất nhạy cảm với độ mặn. Môi trường nước lợ tạo ra áp suất thẩm thấu cao, gây ức chế hoạt động enzyme và làm suy giảm chức năng tế bào của các vi sinh vật nước ngọt. Do đó, khi ứng dụng công nghệ sinh học để xử lý bùn thải vùng ven biển, việc sử dụng các chế phẩm sinh học truyền thống là không hiệu quả. Đòi hỏi cấp thiết hiện nay là phải phân lập, chọn lọc và thuần hóa các nhóm vi sinh vật chịu mặn hoặc ưa mặn đặc hiệu. Việc hiểu rõ ngưỡng chịu mặn của từng chủng vi sinh vật sẽ quyết định trực tiếp đến khả năng triển khai thành công các công nghệ xử lý bùn ở từng vùng sinh thái khác nhau.

### 5.2. Rủi ro tích tụ độc tố

Đây là rào cản nghiêm trọng nhất đối với việc tái sử dụng bùn trong nông nghiệp, ảnh hưởng đến định hướng kinh tế tuần hoàn.

Một phát hiện mang tính cảnh báo từ nghiên cứu của Habib *et al.* (2025) [15] cho thấy bùn thải từ ao nuôi cá rô phi trong hệ thống nuôi Biofloc tích tụ các kim loại nặng như Cd, Cr, Pb và Cu. Nghiên cứu khẳng định rằng nếu tần suất loại bỏ bùn quá lâu (trên 1 tháng), nồng độ kim loại trong bùn sẽ tăng, dẫn đến hiện tượng tái hấp thụ vào mô cá và rủi ro cho cây trồng nếu dùng bùn này làm phân bón. Điều này đặt ra yêu cầu khắt khe về kiểm soát đầu vào (thức ăn, nguồn nước) và quy trình quản lý đầu ra (tần suất xi phông đáy) mà các quy định hiện hành (như VietGAP) có thể chưa chú trọng đúng mức.

Mặc dù quá trình ủ kỵ khí có thể tiêu diệt một

phần vi khuẩn gây bệnh, nhưng sự tồn tại của *Salmonella* và Coliforms trong bùn vẫn là mối lo ngại. Nghiên cứu của Campos-Montiel *et al.* (2022) [26] ghi nhận sự giảm thiểu mầm bệnh sau quá trình đồng phân hủy bùn thải với phân bò, nhưng chưa khẳng định được sự sạch khuẩn hoàn toàn để đáp ứng các tiêu chuẩn xuất khẩu nông sản khắt khe theo GlobalGAP nếu sử dụng phân bón sản xuất từ bùn này cho rau ăn sống.

### 5.3. Tính khả thi về kinh tế

Hiện nay, hầu hết các nghiên cứu tập trung vào hiệu quả kỹ thuật mà bỏ qua phân tích chi phí – lợi ích. Delaide *et al.* (2019) [27] lập luận rằng việc xử lý bùn tại chỗ giúp tiết kiệm chi phí phân bón và nước, nhưng chưa có dữ liệu định lượng về thời gian hoàn vốn cho việc đầu tư hệ thống UASB hay các bể phản ứng hiếu khí sục khí liên tục. Đối với người nuôi, nếu chi phí vận hành hệ thống xử lý (điện năng, bảo trì) cao hơn giá trị của biogas hay phân bón thu được, họ sẽ không có động lực áp dụng.

Từ năm 2017 Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn đã ban hành hai quy chuẩn kỹ thuật quốc gia bao gồm QCVN 02-25:2017/BNNPTNT và QCVN 02-26:2017/BNNPTNT về yêu cầu kỹ thuật đối với cơ sở sản xuất giống và nuôi cá rô phi [31]. Ở góc độ môi trường QCVN 02-25:2017/BNNPTNT tập trung vào việc thu gom, xử lý phân cá và nước thải, đảm bảo môi trường sạch để cá giống khỏe mạnh, không mang mầm bệnh; trong khi QCVN 02-26:2017/BNNPTNT chú trọng xử lý bùn thải, nước thải, hạn chế thức ăn dư, vừa bảo vệ môi trường vừa đảm bảo sản phẩm cá rô phi an toàn cho thị trường. Đáng chú ý nhất là yêu cầu các cơ sở chừa tối thiểu 10% tổng diện tích mặt nước nuôi cá để làm khu/ao xử lý nước thải, chứa bùn thải. Yêu cầu này liên quan đến diện tích nuôi cá còn lại và lợi nhuận thu được, do đó các cơ sở thường không thực hiện mà chuyển sang dùng diện tích này làm ao lắng để xử lý nước đầu vào. Do đó, bùn/nước thải phát sinh từ các ao nuôi không được xử lý đạt yêu cầu mà đưa ra nguồn tiếp nhận bên ngoài sẽ gây ô nhiễm môi trường.

Tại ĐBSCL, thị trường kinh doanh phân bón từ bùn cá chưa hình thành. Việc thiếu các tiêu chuẩn quốc gia cụ thể và thiếu các văn bản khuyến khích sử dụng phân bón hữu cơ từ bùn nuôi trồng thủy sản khiến sản phẩm này khó thương mại hóa, chỉ dừng lại ở mức độ tự cung tự cấp trong mô hình VAC.

Mặc dù bài báo đề xuất khung quản lý tích hợp hướng tới việc biến bùn thải thành phân bón và năng lượng, nhưng rào cản lớn nhất hiện nay là thiếu các phân tích định lượng chi tiết về hiệu quả kinh tế, chi phí đầu tư ban đầu và thời gian hoàn vốn của các hệ thống như UASB hay bể phản ứng hiếu khí. Đối với người nuôi, nếu chi phí vận hành (điện năng, bảo trì) hoặc chi phí thu gom cao hơn giá trị tài nguyên thu hồi được, họ sẽ không có động lực chuyển đổi.

#### 5.4. Khoảng trống nghiên cứu

Quá trình rà soát các tài liệu tham khảo liên quan cho thấy một sự mất cân đối lớn về các nghiên cứu liên quan:

- Chưa có các nghiên cứu quy mô thử nghiệm: Phần lớn các dữ liệu hiện có đều được thực hiện trong điều kiện phòng thí nghiệm với các biến số được kiểm soát chặt chẽ. Một số ít nghiên cứu như của Wang *et al.* (2016) [32] thực hiện trên quy mô thử nghiệm (pilot), nhưng cũng chưa đạt đến quy mô trang trại thực tế. Việc này dẫn đến hiệu suất xử lý thực tế tại ao nuôi ngoài trời ở ĐBSCL – nơi chịu ảnh hưởng của mưa, nắng, biến động nhiệt độ ngày đêm – có thể thấp hơn nhiều so với trong phòng thí nghiệm.

- Thiếu dữ liệu về dòng vật chất dài hạn: Các nghiên cứu thường diễn ra trong thời gian ngắn (vài tuần đến vài tháng). Chưa có đánh giá dài hạn về sự tích tụ dưỡng chất trong đất khi sử dụng bùn cá liên tục trong nhiều năm (Osti *et al.*, 2017; Coldebella *et al.*, 2020) [13, 33]. Liệu việc tưới bùn lỏng có gây mặn hóa hay phú dưỡng hóa đất nông nghiệp về lâu dài không? Đây là câu hỏi còn bỏ ngỏ cho việc xây dựng quy trình chuẩn để tái sử dụng bùn an toàn.

### III. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài viết đã phân tích các đặc tính, công nghệ xử lý và tiềm năng thu hồi tài nguyên từ bùn thải trong nuôi thâm canh cá rô phi (*Oreochromis niloticus*). Dựa trên tổng hợp dữ liệu từ nhiều công trình nghiên cứu và đối chiếu với điều kiện thực tiễn tại ĐBSCL, các phát hiện chính bao gồm:

Thứ nhất, chuyển đổi tư duy quản lý từ cuối đường ống sang kiểm soát tại nguồn. Chất lượng bùn thải và an toàn sinh học phụ thuộc mật thiết vào chế độ quản lý ao nuôi. Chế độ thu gom bùn định kỳ ngắn hạn (như hàng tuần) là một trong những giải pháp quan trọng được đề xuất nhằm hạn chế sự tích tụ kim loại nặng (Cd, Pb, Cr) trong mô cá và giảm thiểu sự tái hòa tan các hợp chất ni-tơ độc hại. Đây là khuyến nghị kỹ thuật quan trọng cho các mô hình nuôi thâm canh lót bạt tại ĐBSCL, giúp sản phẩm đáp ứng các tiêu chuẩn xuất khẩu.

Thứ hai, sự đánh đổi giữa năng lượng và dinh dưỡng trong lựa chọn công nghệ. Không có một công nghệ xử lý đơn lẻ nào là vạn năng; sự lựa chọn phụ thuộc vào mục đích thu hồi tài nguyên:

- Để thu hồi năng lượng: Phân hủy kỵ khí là lựa chọn chủ đạo, tuy nhiên, bùn cá rô phi cần được tiền xử lý sinh học hoặc đồng phân hủy với các loại phụ phẩm nông nghiệp (như phân bò, rơm rạ) để cân bằng tỷ lệ C/N và tối ưu hóa sản lượng biogas.

- Để thu hồi dinh dưỡng: Phân hủy hiếu khí vượt trội hơn nhờ khả năng khoáng hóa giúp hòa tan phốt-pho và bảo toàn ni-tơ dưới dạng ni-trát, tạo ra nguồn dinh dưỡng lỏng phù hợp cho cây trồng.

Thứ ba, giải pháp thích ứng cho bối cảnh đa dạng sinh thái của ĐBSCL. Bài báo đề xuất mô hình quản lý phân hóa theo vùng địa lý:

- Đối với những khu vực ven biển xâm nhập mặn: Các ao lắng xử lý chất thải truyền thống không còn phù hợp. Công nghệ UASB là một giải pháp thay thế tiềm năng cho phép xử lý hiệu quả bùn nước lợ với hiệu suất giảm BOD lên

đến 91%, khắc phục được sự ức chế của độ mặn đối với vi sinh vật.

- Đối với vùng nước ngọt: Khuyến khích mô hình kinh tế tuần hoàn khép kín (VAC kiểu mới), tích hợp giữa nuôi cá – ủ biogas (từ bùn đặc) – và trồng trọt thủy canh (từ nước bùn sau xử lý hiếu khí).

Bùn thải từ ao nuôi cá rô phi không nên được xem là một gánh nặng môi trường mà là một mắt xích quan trọng trong nền kinh tế tuần hoàn nông nghiệp. Tuy nhiên, để hiện thực hóa tiềm năng này, ngành thủy sản ĐBSCL cần vượt qua các rào cản về kỹ thuật vận hành và thiếu hụt khung pháp lý cho phân bón từ bùn. Bài viết đề xuất các chiến lược và định hướng cụ thể sau:

- Về khả năng ứng dụng thực tế và công nghệ: Cần cá nhân hóa công nghệ theo quy mô. Đối với các nông hộ quy mô nhỏ, ưu tiên ứng dụng các giải pháp xử lý tại chỗ hoặc ủ phân compost đơn giản với chi phí thấp. Đối với các trang trại thương mại quy mô lớn (xử lý tập trung ở nơi khác), cần phát triển các hệ thống lai, kết hợp tách rắn cơ học và phân hủy kỵ khí/UASB để tối ưu thu hồi năng lượng. Đặc biệt, trước khi khuyến cáo nhân rộng, các dự án chuyển giao công nghệ bắt buộc phải đi kèm bài toán phân tích chi phí - lợi ích và tính toán thời gian hoàn vốn để đảm bảo tính khả thi về kinh tế cho người nuôi.

- Về định hướng nghiên cứu tiếp theo: Nhằm lấp đầy các khoảng trống dữ liệu hiện hành, các nghiên cứu trong tương lai cần tập trung vào hai

hướng trọng tâm. Thứ nhất, tiến hành phân lập, chọn lọc và thuần hóa các chủng vi sinh vật ưa mặn/chịu mặn đặc hiệu để nâng cao hiệu suất cho hệ thống UASB tại vùng sinh thái nước lợ ven biển. Thứ hai, cần chuyển dịch từ quy mô phòng thí nghiệm sang các thử nghiệm thực tiễn ở quy mô trang trại; đồng thời tiến hành quan trắc dài hạn về sự biến động hệ sinh thái đất và mức độ tích tụ dưỡng chất khi tái sử dụng bùn cá làm phân bón liên tục qua nhiều vụ mùa.

- Về quản lý vận hành: Đưa chế độ thu gom bùn định kỳ ngắn hạn (tối thiểu hàng tuần đối với hệ thống thâm canh lót bạt) thành quy chuẩn vận hành bắt buộc. Điều này giúp ngăn ngừa rủi ro tái hòa tan kim loại nặng, đảm bảo bùn đầu ra đạt tiêu chuẩn an toàn sinh học để tái sử dụng làm phân bón.

- Về chính sách: Các cơ quan quản lý cần sớm thiết lập khung pháp lý, ban hành các tiêu chuẩn quốc gia để công nhận bùn thải thủy sản (sau khi xử lý đạt chuẩn) là một loại phân bón hữu cơ thương mại hóa. Đồng thời, cần có cơ chế hỗ trợ vốn và quỹ đất cho các dự án thí điểm mô hình kinh tế tuần hoàn Aquaponics/ VAC quy mô công nghiệp để tạo động lực chuyển đổi cho doanh nghiệp.

Chỉ khi giải quyết đồng bộ được bài toán an toàn sinh học, hiệu quả kinh tế và lấp đầy các khoảng trống thực nghiệm, bùn thải từ ao nuôi cá rô phi mới thực sự trở thành nguồn nguyên liệu đầu vào bền vững cho nền kinh tế tuần hoàn tại ĐBSCL.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. FAO (2024), The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA) 2024 - Blue transformation in action, Food and Agriculture Organization, DOI: 10.4060/cd0683en.
2. Steffens, B. (2024), "Tilapia's role in global aquaculture and food security", Fisheries and Aquaculture Journal, 15, 381, DOI: 10.35248/2150-3508.24.15.381.
3. Pereira, J. S., Mercante, C. T. J., Lombardi, J. V., Vaz-dos-Santos, A. M., Carmo, C. F. D., and Osti, J. A. S. (2012), "Eutrophication process in a system used for rearing the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), São Paulo State, Brazil", Acta Limnologica Brasiliensia, 24(4), pp. 387-396, DOI: 10.1590/S2179-975X2013005000006.
4. White, P. G., Shipton, T. A., Bueno, P. B., and Hasan, M. R. (2018), Better management practices for feed production and management of Nile tilapia and milkfish in the Philippines, FAO Fisheries and Aquaculture Technical Papers, ISBN 978-92-5-130485-3.

5. González-Hermoso J., and Segovia M. (2017), “Effect of four different pretreatments in anaerobic digestion and nutrient removal of effluents from a recirculating aquaculture system”, *Latin American Journal of Aquatic Research*, 45(2) pp. 276-292, DOI: 10.3856/vol45-issue2-fulltext-4
6. Delaide, B., Goddek, S., Keesman, K. J., and Jijakli, M. H. (2018), “A methodology to quantify the aerobic and anaerobic sludge digestion performance for nutrient recycling in aquaponics”, *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 22(2), pp. 106-112, DOI: 10.25518/1780-4507.16406.
7. Monsees, H., Keitel, J., Paul, M., Kloas, W., and Wuertz, S. (2017), “Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: Evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions”, *Aquaculture Environment Interactions*, 9, pp. 9-18, DOI: 10.3354/aei00205.
8. Wu, Y., and Song, K. (2020), “Source, treatment, and disposal of aquaculture solid waste: A review”, *Journal of Environmental Engineering*, 147(3), DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001850.
9. Obirikorang, K. A., Opoku, E. N., and Gyampoh, B. A. (2022), “Feed digestion, growth and disease prevalence in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured at different water exchange rates in a recirculating aquaculture system”, *Aquaculture Studies*, 22(3), AQUAST565, DOI: 10.4194/AQUAST565.
10. Dela Cruz, M. B., Aya, F. A., and Estante-Superio, E. G. (2025), “Effects of restricted feeding rates on growth, production, and economics of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) polyculture in pond-based biofloc and traditional grow-out system”, *Aquaculture International*, 33, 144, DOI: 10.1007/s10499-025-01833-z
11. Fahrurrozi, A., Madusari, B. D., Syakirin, M. B., Linayati, L., Mardiana, T. Y., Wijianto, H. A., and Budianto, B. (2024), “The optimization feeding rate towards saline tilapia production in stagnant waters, Pekalongan city”, *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 13(1), pp. 56–68, DOI: 10.20473/jafh.v13i1.49072.
12. Neto, R. M., and Ostrensky, A. (2013), “Nutrient load estimation in the waste of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) reared in cages in tropical climate conditions”, *Aquaculture Research*, 46(6) pp. 1309-1322, DOI: 10.1111/are.12280.
13. Osti, J. A. S., Moraes, M. D. A. B., Carmo, C. F. D., and Mercante, C. T. J. (2017), “Nitrogen and phosphorus flux from the production of Nile tilapia through the application of environmental indicators”, *Brazilian Journal of Biology*, 78(1), pp. 25-31, DOI: 10.1590/1519-6984.02116.
14. Chutivisut, P., Pungrasmi, W., and Powtongsook, S. (2014), “Denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA) activities in freshwater sludge and biofloc from Nile tilapia aquaculture systems”, *Journal of Water and Environment Technology*, 12(4), pp. 347-356, DOI: 10.2965/jwet.2014.347.
15. Habib, S. S., Arshad, M., Majeed, S., Ullah, M., Ujan, J. A., Naz, S., and Mohany, M. (2025), “Sludge removal frequency influences heavy metal accumulation, water quality, and growth in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) biofloc systems”, *Water Environment Research*, 97(6), e70081, DOI: 10.1002/wer.70081.
16. Mirzoyan, N., McDonald, R. C., and Gross, A. (2012), “Anaerobic treatment of brackishwater aquaculture sludge: An alternative to waste stabilization ponds”, *Journal of The World Aquaculture Society*, 43(2), pp. 238-248, DOI: 10.1111/j.1749-7345.2012.00554.x.
17. Campos-Pulido, R., Alonso-López, A., Avalos-de la Cruz, D. A., Asiain-Hoyos, A., and Reta-Mendiola, J. L. (2013), “Physicochemical characterization of a tilapia brackish effluent in aquaponics”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, pp. 939-950.
18. Moyo, N. A. G., and Rapatsa, M. M. (2021), “A review of the factors affecting tilapia aquaculture production in Southern Africa”. *Aquaculture*, 535, 736386, DOI: 10.1016/j.aquaculture.2021.736386.
19. Ogello, E. O., Musa, S., Aura, C. M., Abwao, J., and Munguti, J. M. (2014), “An appraisal of the feasibility of tilapia production in ponds using biofloc technology: A review”, *International Journal of Aquatic Science*, 5(1), pp. 21-39.
20. Dilmi, A., Refes, W., and Meknachi, A. (2021), “Effects of C/N ratio on water quality, growth performance, digestive enzyme activity and antioxidant status of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) in

- Biofloc based culture system”, Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 22(1), TRJFAS19754, DOI: 10.4194/TRJFAS19754.
21. Roveda, M., de Menezes, C. C. A., Bolivar-Ramírez, N. C., Owatari, M. S., and Jatobá, A. (2024), “Acidifying remediation and microbial bioremediation decrease ammoniacal nitrogen, orthophosphates, and total suspended solids levels in intensive Nile tilapia farming under biofloc conditions”, *Aquaculture*, 580(1), 740292, DOI: 10.1016/j.aquaculture.2023.740292.
  22. Cunha, W. C. da, Oliveira, G. S. de, Silva, L. de S., Barreiros, D. C., Barbosa, E. N. R., and Silva, V. B. da. (2025), “Utilização de simbiótico biorremediador para limpeza de fundo de tanque em piscicultura de tilápia (*Oreochromis niloticus*)”, *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 8(3), e81199, DOI: 10.34188/bjaerv8n3-019.
  23. Bun, S., Chawaloephonsiya, N., Ermukdakul, T., Pungrasmi, W., Suwannasilp, B. B., and Painmanakul, P. (2017), “Suspended solid and nitrate removal from aquaculture system wastewater by different approaches”, *Desalination and Water Treatment*, 81, pp. 87-94, DOI: 10.5004/dwt.2017.21198.
  24. Ermukdakul, T., Chawaloephonsiya, N., Boonchayaanant, B., Pungrasmi, W., and Painmanakul, P. (2013), “Different approaches for the separation of suspended solids in aquaculture system”, *Journal of Water and Environment Technology*, 11(2), pp. 59-70, DOI: 10.2965/jwet.2013.59.
  25. Helal Uddin, A.B.M., Saeed, M., and Mohd Asri, M. N. (2007), “Fish wastewater treatment with “PACP” filter and reuse of the treated water”. *Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(1), pp. 5-10.
  26. Campos-Montiel, R., Medina-Pérez, G., Afanador-Barajas, L., Ibarra-Sánchez, C., Prince, S., Pérez-Ríos, and S., Hernández-Niño, J. (2022), “Anaerobic co-digestion of bovine manure and residual sludge from tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) breeding ponds”, *Agro productividad*, 15(11), pp. 103-114, DOI: 10.32854/agrop.v15i11.2248.
  27. Delaide, B., Monsees, H., Gross, A., and Goddek, S. (2019), “Aerobic and anaerobic treatments for aquaponic sludge reduction and mineralisation”, in: *Aquaponics Food Production Systems*, Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M., Editors, Springer, pp. 247-266, DOI: 10.1007/978-3-030-15943-6\_10.
  28. Gichana, Z., Liti, D., Wakibia, J., Ogello, E., Drexler, S., Meulenbroek, P., Ondiba, R., Zollitsch, W., and Waidbacher, H. (2019), “Efficiency of pumpkin (*Cucurbita pepo*), sweet wormwood (*Artemisia annua*) and amaranth (*Amaranthus dubius*) in removing nutrients from a smallscale recirculating aquaponic system”, *Aquaculture International*, 27, pp. 1767–1786, DOI: 10.1007/S10499-019-00442-x.
  29. Henry-Silva, G. G., and Camargo, A. F. M. (2006), “Efficiency of aquatic macrophytes to treat Nile tilapia pond effluents”, *Animal Science and Pastures*, 63(5), pp. 433-438, DOI: 10.1590/S0103-90162006000500003.
  30. Jordan, R. A., Martins, V. P., Almeida, A. C. D. S., Oliveira, F. C. D., Quequeto, W. D., Siqueira, V. C., Martins, E. A. S., and Santos, R. C. (2020), “Potential for production of biogas from waste arising from the creation of tilapia in the aquaponic system”, *Research, Society and Development*, 9(9), e155997131, DOI: 10.33448/rsd-V9i9.7131.
  31. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2017), Thông tư số 12/2017/TT-BNNPTNT ngày 07/6/2017 ban hành Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia Cơ sở sản xuất cá rô phi giống – Yêu cầu kỹ thuật đảm bảo vệ sinh thú y và bảo vệ môi trường QCVN 02-25:2017/ BNNPTNT, và Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia Cơ sở nuôi cá rô phi – Yêu cầu kỹ thuật đảm bảo vệ sinh thú y, bảo vệ môi trường và an toàn thực phẩm QCVN 02-26:2017/ BNNPTNT.
  32. Wang, X., Tan, H., Luo, G., Liu, W., Pang, Y., and Cheng, L. (2016), “Pilot-scale study on sequencing batch reactor to treat aquaculture wastewater by biofloc technology”, *Journal of Shanghai Ocean University*, 25(6), pp. 884-893, DOI: 10.12024/jsou.20160401754.
  33. Coldebella, A., Godoy, A. C., Gentelini, A. L., Piana, P. A., Coldebella, P. F., Boscolo, W. R., and Feiden, A. (2020), “Nitrogen and phosphorus dynamics in Nile tilapia farming in excavated rearing ponds”, *Research, Society and Development*, 9(11), pp. 1-29, DOI: 10.33448/rsd-v9i11.9699.