

Xây dựng khung hỗ trợ lựa chọn các giải pháp xử lý chất thải cho ao nuôi tôm siêu thâm canh dựa trên MFA (Material flow analysis) kết hợp LCA (Life cycle assessment)

Tiền Hải Lý^{1*}, Nguyễn Thị Kiều¹, Nguyễn Thanh Tùng², Trần Trung Kiên²

¹Khoa Nông nghiệp, Trường Đại học Bạc Liêu, 178 Võ Thị Sáu, phường Bạc Liêu, tỉnh Cà Mau, Việt Nam

²Viện Môi trường và Tài nguyên, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, đường Nguyễn Du, phường Đông Hoà, TP Hồ Chí Minh, Việt Nam

Ngày nhận bài 8/12/2024; ngày chuyển phân biện 15/12/2024; ngày nhận phân biện 2/1/2025; ngày chấp nhận đăng 8/1/2025

Tóm tắt:

Nghiên cứu này nhằm đánh giá hiện trạng phát thải và đề xuất giải pháp xử lý chất thải cho ao nuôi tôm siêu thâm canh. Từ đó, xây dựng khung hỗ trợ lựa chọn giải pháp xử lý chất thải trong ao nuôi tôm siêu thâm canh dựa trên phương pháp phân tích dòng vật chất (Material flow analysis - MFA) kết hợp với phương pháp đánh giá vòng đời (Life cycle assessment - LCA). Phương pháp MFA được áp dụng để phân tích, đánh giá luồng vật liệu và chất thải trong quá trình sản xuất tôm, từ khâu nuôi đến xử lý chất thải. Trong khi LCA giúp định lượng tác động của các giải pháp đề xuất đến môi trường và hệ sinh thái. Kết quả đã lựa chọn và trình bày các giải pháp xử lý chất thải trong mô hình sinh thái tích hợp cho ao nuôi tôm siêu thâm canh. Lượng phát thải khí nhà kính đạt 24.600 kg CO₂ eq, lượng axit hóa đạt 219,5 kg SO₂ eq, phú dưỡng đạt 315 kg PO₄ eq, sử dụng năng lượng tích lũy CEU=307,5 GJ và năng suất sơ cấp ròng BRU đạt 303.500 kg C thải ra môi trường trong hoạt động nuôi tôm.

Từ khóa: đánh giá vòng đời, nuôi tôm siêu thâm canh, phân tích dòng vật chất, xử lý chất thải.

Chỉ số phân loại: 2.7, 4.5

Develop a supporting framework for selecting waste treatment solutions for super-intensive shrimp farming based on the combination of material flow analysis and life cycle assessment

Hai Ly Tien^{1*}, Thi Kieu Nguyen¹, Thanh Tung Nguyen², Trung Kien Tran²

¹College of Agriculture, Bac Lieu University, 178 Vo Thi Sau Street, Bac Lieu Ward, Ca Mau Province, Vietnam

²Institute of Resources and Environment, Vietnam National University - Ho Chi Minh City, Nguyen Du Street, Dong Hoa Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

Received 8 December 2024; revised 2 January 2025; accepted 8 January 2025

Abstract:

This study aims to assess the current status of emissions and to propose waste treatment solutions for super-intensive shrimp ponds. Then, a framework to support the selection of waste treatment solutions in super-intensive shrimp ponds was developed based on the material flow analysis (MFA) method combined with life cycle assessment (LCA). The MFA method was applied to analyse and evaluate the flow of materials and waste in shrimp production, from farming to waste treatment. Meanwhile, LCA was used to quantify the impacts of the proposed solutions on the environment and ecosystems. The results identified and demonstrated waste treatment solutions within an integrated ecological model for super-intensive shrimp ponds. Greenhouse gas emissions reached 24,600 kg CO₂ eq, acidification reached 219.5 kg SO₂ eq, eutrophication reached 315 kg PO₄ eq, cumulative energy use (CEU) was 307.5 GJ, and net primary productivity (BRU) reached 303,500 kg C released into the environment from shrimp farming activities.

Keywords: life cycle assessment, material flow analysis, super-intensive shrimp farming, waste treatment.

Classification numbers: 2.7, 4.5

*Tác giả liên hệ: Email: thly@blu.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, hoạt động nuôi tôm thẻ chân trắng tại các tỉnh thuộc khu vực Đồng bằng sông Cửu Long được triển khai theo hai hình thức là nuôi thâm canh và siêu thâm canh. Tuy nhiên, nghề nuôi tôm đang gặp phải nhiều khó khăn khi phải đối mặt với các vấn đề về nguồn nước ô nhiễm và biến đổi khí hậu. Nhiệt độ tăng cao và lượng mưa bất thường không theo quy luật là những điều kiện bất lợi đối với hoạt động nuôi tôm [1, 2]. Thức ăn là yếu tố gây ô nhiễm chính trong nuôi tôm thâm canh, việc quản lý thức ăn phù hợp đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa thức ăn đầu vào, giảm thiểu tác động xấu đến hệ thống nuôi và giảm tải lượng chất dinh dưỡng trong nước thải [3]. Trong mô hình nuôi tôm thâm canh, khoảng 22% lượng nitơ được chuyển hóa vào cơ thể tôm, 14% tích tụ trầm tích, 57% thất thoát ra môi trường và chỉ có khoảng 3% lượng nitơ có thể bay hơi vào không khí dưới dạng ammonia [4]. Hệ thống nuôi thủy sản tuần hoàn (RAS) đang là xu hướng của hoạt động nuôi tôm siêu thâm canh, giúp tái sử dụng nguồn nước trong quá trình nuôi các loài thủy sản nước ngọt, cá biển và tôm thẻ chân trắng [5, 6]. Phương pháp LCA được sử dụng để phân tích lượng khí thải carbon của các trang trại nuôi tôm. Kết quả nghiên cứu đã ước tính lượng khí thải carbon trong toàn bộ vòng đời của tôm thẻ chân trắng là 6,9389 kgCO₂ e/kg, 23,98%, nguyên liệu gián tiếp (1,4782 kgCO₂ e/kg, 21,62%), xử lý chất thải (0,7783 kgCO₂ e/kg, 11,40%), khả năng vận chuyển và chất làm lạnh (0,7524 kgCO₂ e/kg, 11,01%). Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu của S.Z. Kamal và cs (2022) [7] cũng chứng minh rằng, lượng phát thải của chuỗi giá trị ngành hàng tôm có thể được giảm thiểu bằng cách áp dụng các giải pháp xử lý nước thải và sử dụng các công nghệ tiết kiệm năng lượng. Nghiên cứu đã sử dụng phương pháp MFA kết hợp với LCA để đánh giá các chất độc hại trong chất thải điện tử và tác động môi trường tiềm ẩn của chúng. Nghiên cứu của P. Kidde và cs (2013) [8] sử dụng phương pháp MFA kết hợp LCA với lý thuyết tiện ích đa thuộc tính để đánh giá các kịch bản cuối vòng đời đối với vật liệu Polyethylene Terephthalate (PET) ở thành phố Tunja chỉ ra rằng, tái chế là giải pháp tốt nhất để tối ưu hóa việc xử lý chất thải PET theo hướng thân thiện môi trường. Trong các nghiên cứu trước, phương pháp MFA và LCA được sử dụng riêng lẻ hoặc được kết hợp để đánh giá các tác động đến môi trường trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu kết hợp MFA và LCA trong việc hỗ trợ lựa chọn các giải pháp xử lý chất thải hiệu quả cho ao nuôi tôm siêu thâm canh.

Nghiên cứu này sẽ tổng hợp các ưu điểm của các công nghệ xử lý chất thải có khả năng ứng dụng cho ao nuôi tôm siêu thâm canh, từ đó đưa ra khung hỗ trợ lựa chọn các giải pháp xử lý chất thải theo hướng không phát thải và phù hợp với các điều kiện tự nhiên sẵn có của đối tượng nghiên cứu điển hình. Khung hỗ trợ lựa chọn giải pháp xử lý chất thải cho ao nuôi tôm siêu

thâm canh dựa trên MFA kết hợp LCA trong hệ thống tuần hoàn khép kín, từ đó đề xuất mô hình sinh thái khép kín cho ao nuôi tôm hướng đến không phát thải và sử dụng hợp lý tài nguyên.

2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu dòng tuần hoàn vật chất và năng lượng ao nuôi tôm siêu thâm canh dựa trên MFA kết hợp LCA. Nghiên cứu được thực hiện trên địa bàn huyện Đầm Dơi, tỉnh Cà Mau (trước sáp nhập) từ tháng 12/2023 đến tháng 4/2024.

2.1. Phương pháp khảo sát thực địa, thu thập dữ liệu thứ cấp và sơ cấp

Các dữ liệu thứ cấp sẽ được thu thập tại các cơ quan quản lý chuyên ngành của địa phương, chủ yếu là Sở Nông nghiệp và Phát triển nông thôn và Sở Tài nguyên và Môi trường tỉnh Cà Mau (trước sáp nhập). Điều tra khảo sát thông tin sơ bộ 20 hộ nuôi tôm thâm canh và 20 hộ nuôi tôm siêu thâm canh theo sự hướng dẫn của cán bộ quản lý chuyên ngành tại huyện Đầm Dơi, tỉnh Cà Mau nhằm đánh giá chung về hiện trạng phát thải, quy trình nuôi, bố trí mặt bằng khu nuôi, các phương pháp xử lý chất thải hiện có. Sau đó, lựa chọn 1 hộ dân nuôi tôm siêu thâm canh điển hình để phân tích chi tiết các dòng vật chất và năng lượng. Dữ liệu này là cơ sở để tính toán và đề xuất mô hình xử lý chất thải hướng đến tuần hoàn vật chất và năng lượng ao nuôi tôm siêu thâm canh dựa trên MFA kết hợp LCA.

2.2. Phương pháp lấy mẫu và phân tích mẫu

Bước 1: Xác định vị trí lấy mẫu

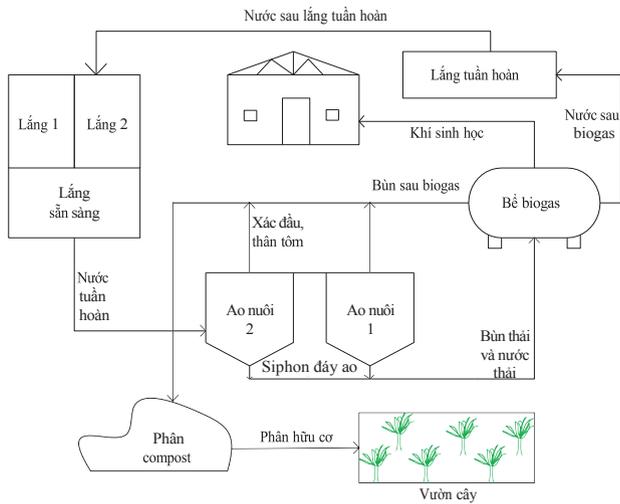
Mẫu nước thải được lấy tại cống xả của các ao nuôi thâm canh và siêu thâm canh khi thay nước và siphon định kỳ (1 tuần/lần trong 3 tuần). Mỗi ao nuôi lấy nước ở 5 vị trí (4 vị trí cách bờ khoảng 2,5 m và cách đều nhau, vị trí thứ 5 lấy giữa ao), bao gồm ao nuôi chính và ao thải. Bảo quản và vận chuyển mẫu về phòng thí nghiệm trong ngày.

Bước 2: Phương pháp phân tích mẫu

Chỉ tiêu pH đo tại hiện trường tuân theo quy trình kỹ thuật của TCVN 6492:2011, nhu cầu oxy hóa học (COD) được phân tích theo phương pháp TCVN 6491:1999, nhu cầu oxy sinh hóa (BOD₅) được đo theo chuẩn phân tích nước và nước thải (SMEWW) 5210 B:2017, amoni (NH₄⁺ tính theo N) được đo theo phương pháp SMEWW 4500-NH₃ F:2017, chỉ tiêu tổng chất rắn lơ lửng (TSS) được phân tích theo SMEWW 2540 D:2017, chỉ tiêu coliform được phân tích theo phương pháp thử SMEWW 9221 B:2017 [9].

2.3. Mô tả mô hình sinh thái khép kín

Mô hình sinh thái khép kín cùng các giải pháp xử lý chất thải hướng đến tuần hoàn dinh dưỡng cho hoạt động nuôi tôm siêu thâm canh được mô tả trong hình 1.



Hình 1. Mô hình sinh thái tích hợp cho trại nuôi tôm khép kín.

Nước thải từ ao nuôi tôm sau khi siphon sẽ được lọc để tách chất thải rắn bằng túi lưới. Chất thải rắn từ quá trình nuôi tôm bao gồm: vỏ tôm, thức ăn thừa, phân tôm. Phân tôm có kích cỡ nhỏ hơn mắt lưới nên lọt qua túi lưới và được lắng ở hồ lắng 1; phần nước tiếp tục chảy tràn qua hồ lắng 2, sau đó chảy tràn ra ao sẵn sàng. Lượng nước này có thể được tuần hoàn ngược trở lại ao nuôi. Bùn lắng sau biogas sau thời gian thu hồi khí sinh học có thể làm nguyên liệu hữu cơ ủ phân compost để sử dụng và trồng rau sạch, tuy nhiên lượng bùn này cần phải được giảm độ mặn trước khi sử dụng làm nguyên liệu cho quá trình ủ.

2.4. Mô tả mô hình nuôi tôm thâm canh và siêu thâm canh

Hình thức nuôi hoàn toàn bằng thức ăn bên ngoài, thả giống với mật độ cao (tôm sú ≥ 20 PL/m²; tôm thẻ chân trắng ≥ 60 PL/m²), giúp chủ động trong quản lý hệ thống nuôi (thay nước, sục khí...) [9].

Nuôi tôm nước lợ siêu thâm canh là nuôi trong ao đất lót bạt nilong hoặc trong hệ thống bể hoàn chỉnh nuôi theo công nghệ biofloc, thả giống nhân tạo giai đoạn 1 với mật độ rất cao 1.000-3.000 con/m², giai đoạn 2 thả mật độ nuôi 100-300 con/m², năng suất đạt 34-40 tấn/ha/vụ đối với tôm chân trắng, đòi hỏi kỹ thuật cao, có khả năng kiểm soát môi trường và cho ăn tự động bằng thức ăn viên chất lượng cao [10].

2.5. Phương pháp phân tích dòng vật chất

Công thức cân bằng MFA được tính như sau [11]:

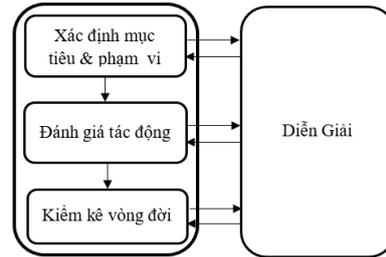
$$\sum_{i=1}^j \dot{m}_i = \sum_{i=1}^k \dot{m}_i + \Delta S$$

trong đó: j là số lượng đầu vào; k là số lượng đầu ra; i là dòng vật chất có trong mô hình ở thứ tự i; \dot{m}_i là dòng vật chất được tính toán; ΔS là sự tích lũy của dòng vật chất.

Dữ liệu có thể chia thành các nhóm chính theo định lượng hoạt động có ảnh hưởng đến phát thải chất ô nhiễm và nồng độ của chất ô nhiễm cụ thể trong môi trường. Cân bằng khối lượng

phải được thực hiện đối với mỗi quá trình của hệ thống và với tổng dòng nguyên liệu. Trước khi phần mềm được áp dụng để giải các phương trình cân bằng khối lượng, quy trình MFA cần được thực hiện lập đi lập lại, trong đó lưu lượng và nồng độ được điều chỉnh thủ công để làm cho hệ thống nhất quán nhất.

2.6. Phương pháp phân tích đánh giá vòng đời



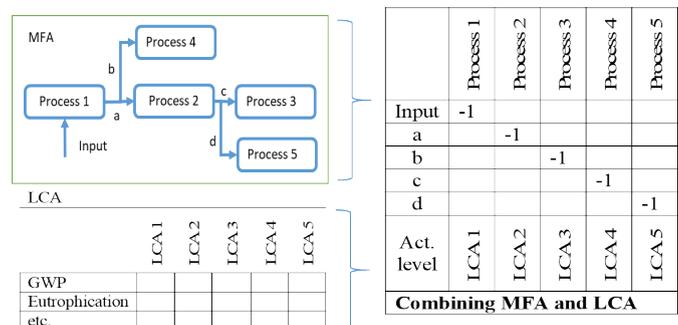
Hình 2. Quy trình đánh giá vòng đời.

Đánh giá vòng đời còn được gọi là phân tích “từ đầu đến cuối”, theo dõi tác động môi trường của sản phẩm từ việc tạo ra nguyên liệu thô đến chế tạo, sử dụng sản phẩm và cuối cùng là thải bỏ hoặc tái sử dụng sản phẩm. Quy trình LCA bao gồm việc kiểm kê vòng đời (LCI) của tất cả các yếu tố đầu vào để tạo ra sản phẩm và tất cả các đầu ra hoặc chất thải của quá trình sản xuất, sử dụng và thải bỏ sản phẩm. Quy trình LCA, được mô tả trong mô hình 2, thường bao gồm bốn bước: mục tiêu và phạm vi, kiểm kê vòng đời, đánh giá tác động vòng đời và diễn giải.

Sử dụng công cụ đánh giá vòng đời có thể giúp xác định nhân sinh thái tốt hơn, đồng thời đảm bảo việc sản xuất và chứng nhận sản phẩm trong tương lai. Một nghiên cứu LCA có thể xử lý tác động môi trường của các đầu vào khác nhau được sử dụng trong hệ thống nuôi tôm và những lựa chọn hiện có để giảm tác động môi trường.

2.7. Mô hình kết hợp phương pháp phân tích dòng vật chất (MFA) và đánh giá vòng đời

Trình tự và phương pháp nghiên cứu được thể hiện như hình 3:



Hình 3. Mô hình kết hợp phương pháp phân tích dòng vật chất và đánh giá vòng đời.

Đầu tiên, mô hình MFA được xây dựng, bước đầu phân tích đầu vào của hệ thống (input), sau đó phân phối đến các quá trình (process) tiếp theo trong quy trình xử lý (dòng a đến dòng d) và các sản phẩm thứ cấp. Tiếp đó, các mô-đun LCA cho toàn bộ quy trình được mô hình hóa và tính toán chỉ số ưu tiên của các tác động (khả năng ấm lên toàn cầu, phú dưỡng hóa và độc sinh thái). Sau đó, MFA được chuyển thành ma trận công nghệ với giải pháp - quy trình - chất thải/sản phẩm, tất cả các hệ số chuyển giao của các quy trình (số dương) và các quy trình hấp thụ các luồng ("-1" trong ma trận). Nhân đầu vào của mỗi quá trình (process) với hệ số chuyển đổi tương ứng để thu được chỉ số đánh giá hoạt động của toàn bộ quy trình. Các tác động môi trường đối với dòng chảy riêng lẻ và hệ thống tổng thể có thể được tính toán bằng cách nhân các mức hoạt động với các mô-đun LCA. Sự thay thế đạt được thông qua tái chế cũng được tích hợp trong cấu trúc quy trình nuôi và được mô hình hóa bằng cách sử dụng phương pháp tiếp cận tải trọng dinh dưỡng.

2.8. Phương pháp xử lý số liệu

Phần mềm Excel 2021 được sử dụng để tổng hợp và xử lý các số liệu điều tra và phân tích chất lượng mẫu nước và bùn.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Chất lượng nước thải của các ao nuôi tôm thâm canh và siêu thâm canh

Kết quả điều tra ghi nhận chất lượng nước thải từ 20 hộ nuôi tôm theo hình thức nuôi thâm canh và siêu thâm canh tại tỉnh Cà Mau cho thấy, hiện trạng ô nhiễm môi trường do hoạt động nuôi trồng thủy sản nói chung và nuôi tôm thâm canh và siêu thâm canh nói riêng ở tỉnh Cà Mau có xu hướng bị ô nhiễm bởi các thành phần chất hữu cơ được thể hiện qua các thông số: BOD₅, COD, DO, N-NO₂, N-NH₄⁺, P-PO₄³⁻, tổng coliform. Kết quả cho thấy, các thông số này có khuynh hướng tiệm cận với ngưỡng trên theo QCVN 43:2017/BTNMT [12].

Bảng 1. Thông số chất lượng nước thải nuôi tôm.

STT	Chỉ số	Đơn vị	Nước thải nuôi tôm thâm canh (n=20)	Nước thải nuôi tôm siêu thâm canh (n=20)	QCVN 43:2017/BTNMT [12]
1	pH	-	7,1-8,3	7,4-8,5	5,5-9
2	BOD ₅	mg/l	34±7	26±5	50
3	COD	mg/l	38±3	41±12	150
4	TSS	mg/l	40±5	64±12,7	100
5	Amoni (NH ₄ ⁺ tính theo N)	mg/l	0,55±0,11	0,6±0,33	10
6	Tổng coliform	MPN/100 ml	2,5x10 ³ -3x10 ³	2,6x10 ³	≤5.000

BOD₅: nhu cầu oxy sinh hoá; COD: nhu cầu oxy hoá học; TSS: tổng chất rắn lơ lửng.

Kết quả bảng 1 cho thấy, nước thải nuôi tôm có thể tác động đến môi trường khi thải ra sông rạch. Hoạt động nuôi tôm siêu thâm canh được kiểm soát tốt hơn hoạt động nuôi tôm thâm canh, do đó, chất lượng nước thải nuôi tôm siêu thâm canh không tăng cao so với QCVN 43:2017/BTNMT [12]. Tuy nhiên, theo nghiên cứu của V.Q. Lam và cs (2020) [13] tại nước sông các khu vực nuôi trồng thủy sản (bao gồm cả nuôi tôm) thành phố Hội An (trước sáp nhập), BOD₅ dao động từ 2,1 đến 9,7 mg/l, cao hơn QCVN 43:2017/BTNMT [12], TSS cũng vượt giới hạn cho phép, trong khi COD vượt giới hạn cho phép từ 1,07 đến 1,4 lần [12].

Kết quả trên tương đồng với kết quả phân tích chất lượng nước thải của ao nuôi tôm thâm canh và siêu thâm canh tại các huyện trên địa bàn tỉnh Bạc Liêu do H.T.H. Vy (2020) [14] thực hiện. Kết quả cho thấy, không có sự chênh lệch nhiều giữa giá trị pH của nước thải nuôi tôm thâm canh và siêu thâm canh. Riêng nồng độ BOD₅ trong nước thải nuôi tôm thâm canh cao hơn nước thải nuôi tôm siêu thâm canh khoảng 1,5 lần và đều vượt xa giới hạn cho phép. Các giá trị pH này đều nằm trong khoảng cho phép so với TCVN 13656:2023 [9] và là các giá trị pH thích hợp để nuôi tôm thẻ chân trắng (pH 7,5-8,5). Theo kết quả điều tra của nghiên cứu này, hiện nay tỉnh Cà Mau còn có đến 20 hộ trên địa bàn tỉnh chưa có biện pháp thu gom, xử lý nước thải nên nguy cơ gây ra ô nhiễm môi trường trong hệ thống kênh, rạch, sông ngòi là rất cao.

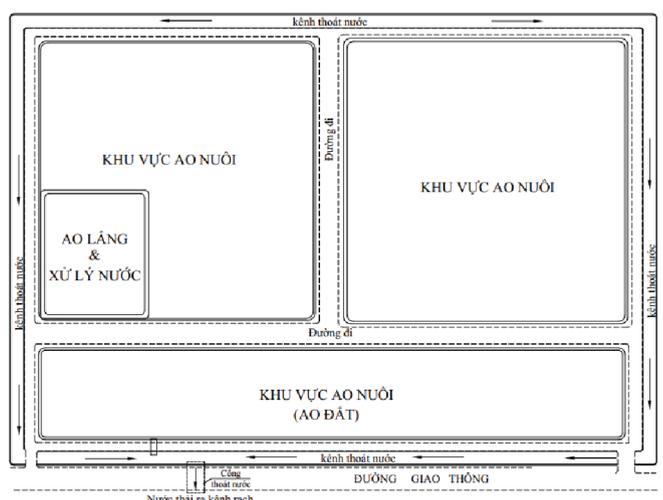
3.2. Đề xuất mô hình thí điểm và áp dụng khung lựa chọn giải pháp xử lý

Đề xuất mô hình thí điểm điển hình tại hộ Mạch Đồng Khởi, xã Tạ An Khương Nam, huyện Đầm Dơi, tỉnh Cà Mau với quy mô 2,5 ha, có các công trình được bố trí như hình 4.



Hình 4. Hệ thống thoát nước ao nuôi tôm tại khu vực nghiên cứu.

Sơ đồ bố trí mặt bằng của hộ nuôi tôm điển hình được thể hiện trong hình 5:



Hình 5. Sơ đồ bố trí mặt bằng tổng thể của hệ nuôi tôm điển hình.

Bước 1: Xác định thông số kỹ thuật của ao nuôi tôm: Các thông số sẵn có của ao nuôi tôm được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. Thông số kỹ thuật cao của ao nuôi tôm hộ dân.

STT	Thông số nhập liệu	Đơn vị	Số lượng	Ghi chú
1	Nhập diện tích ao	m ²	1.600	
2	Nhập mật độ nuôi	Con/m ²	500	
3	Mật độ ươm	Con/m ²	2.000	
4	Chiều cao mặt nước (H)	m	1,2	[15]
5	Phân bón	kg	3	
6	TCCA 90%	kg	5,88	

TCCA: Trichloroisocyanuric acid.

Bước 2: Cân bằng vật chất: Các hoạt động trong quá trình nuôi tôm theo hướng tuần hoàn vật chất, bao gồm các dòng vật chất đầu vào và đầu ra được tính toán dựa trên kết quả nhập liệu đầu vào (bảng 3).

Bảng 3. Kết quả cân bằng vật chất hệ nuôi.

Công đoạn	Nguyên liệu vào		Dòng thải	
	Loại	Số lượng	Loại	Số lượng
Chuẩn bị	Nước (m ³)	2.496		198,8
	Vôi (kg)	24		
	Phân bón (kg)	3		
Ươm	Hóa chất (kg)	5,88		
	Nước (m ³)	480	Nước thải (m ³)	480
	Thức ăn (kg)	49,85	Xác tôm (kg)	6,86
Nuôi và thu hoạch	Tôm (kg)	2,4	Bùn thải (kg)	54,10
	Nước (m ³)	2.016	Nước thải (m ³)	2.016
	Thức ăn (kg)	1234,5	Chất thải hữu cơ (kg)	944,79
	Tôm (kg)	137,14	Xác tôm (kg)	2750

Quá trình cân bằng vật chất cho thấy, thức ăn cho tôm là nguồn dinh dưỡng duy nhất được đưa vào hệ thống và nguồn nước nuôi tôm nên có tác động trực tiếp đến chất lượng của nguồn nước nuôi tôm. Vì thức ăn cho mô hình nuôi tôm công nghệ cao đã được định lượng tốt nên các chất dinh dưỡng, chất rắn và chất thải carbon trong mô hình nuôi tôm siêu thâm canh có thể được tính toán dựa trên nguồn thức ăn đưa vào. Ở giai đoạn tôm ươm, lượng thức ăn tương đối thấp (49,85 kg) nhưng đến giai đoạn nuôi và thu hoạch, lượng thức ăn này có thể lên đến 1.234,5 kg. Việc tối ưu hóa thiết kế hệ thống có thể nâng cao tính sẵn có của chất dinh dưỡng và carbon cũng như tăng năng suất và sản lượng dự kiến. Quá trình nuôi sẽ phát sinh ra các loại chất thải như: nước thải ao nuôi; chất thải rắn (xác tôm chết, vỏ, phân tôm, thức ăn thừa); bùn đáy ao.

Bước 3: Lựa chọn giải pháp dựa trên khối lượng chất thải phát sinh: Xác định hiệu quả xử lý của các giải pháp (bảng 4).

Bảng 4. Hiệu quả của các giải pháp xử lý.

Cụm giải pháp	Tên giải pháp	Hiệu suất xử lý (%)	Giới hạn hoặc N, P đầu vào có thể xử lý	
			Tổng N (mg/l)	Tổng P (mg/l)
GP3 (Bùn thải sau siphon)	Chất thải rắn nuôi tôm làm phân bón cho Caulerpa đầu lắng	48,0	112	32
	Xử lý bùn trong các lò phân ứng kỵ khí ngược dòng (UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket)	70	83,8	30,8
	Tăng cường quá trình phân hủy kỵ khí để xử lý bùn	75	132	16
	Quản lý bùn trong ao nuôi tôm	67	2560	1480
	Xử lý nước thải bằng hồ nuôi cá đối kết hợp với bãi lọc đứng nhân tạo	38	1,4	1,1
GP4 (giải pháp khác) năng lượng	Ứng dụng công nghệ biofloc	89	14	7
	Giải pháp thay thế điện mặt trời và gió cho cung cấp năng lượng tái tạo	51	-	-
	Thiết kế hệ thống máy bơm nước DC chạy bằng năng lượng mặt trời (SWPS - Solar Water Pumping Systems)	63,7	-	-
	Giải pháp phát thải carbon xanh	70	67	18

Bảng 4 phân loại các nhóm giải pháp xử lý chất thải nuôi tôm, trong đó có các giải pháp cụ thể được tính theo giới hạn hoặc N, P đầu vào có thể xử lý. Đây là một trong những tiêu chí đánh giá, giúp lựa chọn những giải pháp phù hợp trong quá trình triển khai các giải pháp xử lý chất thải trong mô hình nuôi tôm đạt hiệu quả tốt hơn.

Đánh giá tác động vòng đời (LCIA - Life cycle impact assessment) mô tả các tác động môi trường dựa trên kết quả kiểm kê vòng đời (LCI). Các loại tác động môi trường sau đây đã được xem xét: sử dụng tài nguyên sinh học (BRU, năng suất sơ cấp ròng được đo bằng carbon), sử dụng năng lượng tích lũy (CEU), nóng lên toàn cầu (GW), axit hóa (Acid) và phú dưỡng (Eut) (bảng 5).

Bảng 5. Đánh giá tác động vòng đời của 1 tấn tôm trọng lượng sống.

LCIA/LCA	Axit hoá (kg SO ₂ eq)	Phú dưỡng (kg PO ₄ eq)	Nóng lên toàn cầu (kg CO ₂ eq)	Năng lượng tích lũy (GJ)	Năng suất sơ cấp ròng (tấn)
Sản xuất giống	1,15	0,23	188	2,72	0
Cơ sở hạ tầng khu nuôi	0,25	0,02	64,5	2,66	0
Sản xuất thức ăn	15,8	6,3	210	28,3	60.700
Sử dụng điện	25,2	1,04	2.450	23,2	0
Clo	0,24	0,02	48,4	0,94	0
Đá vôi (CaCO ₃)	0,03	0,004	5,41	0,12	0
Vôi nung (CaO)	0,55	0,03	270	1,32	0
Nước thải khu nuôi	0	55,3	0	0	0
Vận chuyển con giống	0,21	0,03	56,4	1,02	0
Vận chuyển thức ăn	0,42	0,07	59,5	0,87	0
Vận chuyển khác	0,17	0,03	24,5	0,36	0
Tổng (±SD)	43,9±4,2	63±11	5280±510	61,5±6,1	60.700±390

Tính trung bình các hệ thống nuôi thâm canh (15%) và bán thâm canh (85%), sản lượng 1 tấn tôm sống cần 61,5±6,1 GJ năng lượng, cũng như 60.700±390 tấn năng suất sơ cấp ròng và tạo ra 43,9±4,2 kg SO₂ tương đương, 63±11 kg PO₄ tương đương và 5280±510 tấn CO₂ tương đương.

Hệ số phát thải cho thấy mức độ tài nguyên và năng lượng cần thiết để sản xuất một tấn tôm sống (bảng 6).

Bảng 6. Các tác động vòng đời đến môi trường sống của các hệ dân.

LCIA/LCA	Acid (kg SO ₂ eq)	Eut (kg PO ₄ eq)	GW (kg CO ₂ eq)	CEU (GJ)	BRU (kg C)
Hệ số phát thải	43,9	63	5.280	61,5	60.700
Phát thải hộ dân	219,5	315	24.600	307,5	303.500

BRU: tài nguyên sinh học; CEU: sử dụng năng lượng tích lũy, GW: nóng lên toàn cầu; Acid: axit hóa; Eut: phú dưỡng (Eut).

Sau khi thực hiện LCIA, chỉ số nóng lên toàn cầu (GW) của phát thải hộ dân đạt 24.600 kg CO₂ eq, lượng axit hóa đạt 219,5 kg SO₂ eq, phú dưỡng đạt 315 kg PO₄ eq, sử dụng năng lượng tích lũy CEU=307,5 GJ và năng suất sơ cấp ròng BRU đạt 303.500 kg C.

Hệ số phát thải của hộ dân có mức hệ số cao cho thấy, quy trình sản xuất không hiệu quả và cần được cải tiến. Trung bình một hệ thống nuôi tôm thâm canh khi sản xuất được 1 tấn tôm sẽ

cần tiêu hao năng lượng khoảng 38,3±4,3 GJ, tạo ra 23,1±2,6 kg SO₂eq, 36,9±4,3 kg PO₄eq và 3,1±0,4 tấn CO₂eq [12]. Hệ số phát thải khí CO₂, SO₂, và PO₄ cũng là những yếu tố quan trọng cần được theo dõi.

Chất lượng nước thải từ ao xử lý nước thải trước khi thải ra môi trường bên ngoài được thể hiện trong bảng 7.

Bảng 7. Chất lượng nước thải sau khi được xử lý.

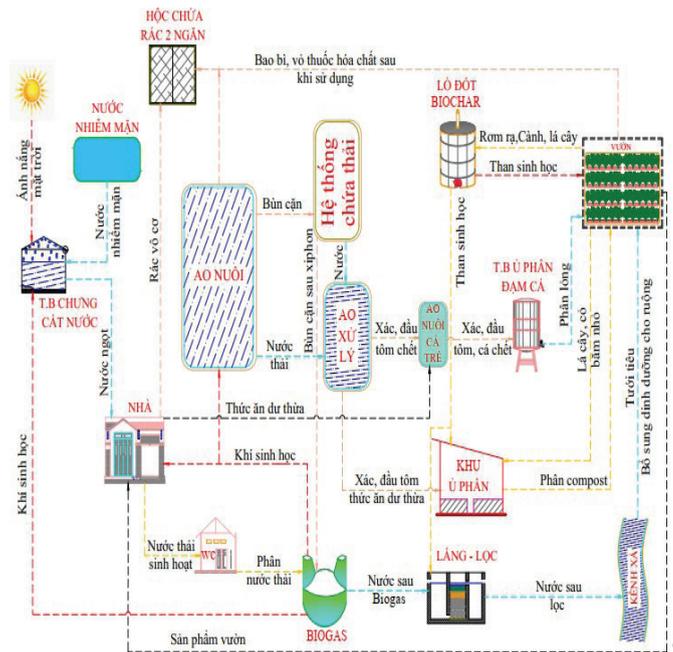
STT	Thông số phân tích	Đơn vị	Kết quả	LOD	QCVN 43:2017/BTNMT [12]
1	pH	-	6,71	1-14	5,5-9
2	COD	mg/l	142	2	150
3	BOD ₅	mg/l	3,4	0,5	50
4	TSS	mg/l	16	2	100
5	Tổng coliform	CFU/100 ml	4,3.10 ³	1	5.000

LOD: giới hạn phát hiện; BOD₅: nhu cầu oxy sinh hoá; COD: nhu cầu oxy hoá học; TSS: tổng chất rắn lơ lửng.

Kết quả phân tích so sánh với QCVN 43:2017/BTNMT [12] cho thấy, đa số các thông số ô nhiễm trong nước thải ao nuôi ở mức hình đều đạt quy chuẩn cho phép.

Bước 4: Xây dựng mô hình nuôi tôm siêu thâm canh xử lý tuần hoàn nước và vật chất dinh dưỡng.

Hình 6 là mô hình sinh kế sinh thái tích hợp cho hộ dân cư nông thôn vùng mặn được thực hiện cho đối tượng có sinh kế chính là nuôi tôm siêu thâm canh. Trong quá trình nuôi tôm siêu thâm canh thì chất thải phát sinh chủ yếu là nước thải, bùn thải sau quá trình siphon và đầu (vỏ) tôm chết cùng một số loại chất thải sinh hoạt khác. Các loại chất thải này được xử lý theo định hướng tuần hoàn dòng vật chất và năng lượng thông qua các giải pháp



Hình 6. Đề xuất mô hình nuôi tôm siêu thâm canh.

được tích hợp vào mô hình. Bùn thải sau quá trình siphon được đưa vào biogas, thông qua quá trình phân hủy kỵ khí thu hồi được khí sinh học, lượng khí sinh học này được sử dụng cho mục đích sinh hoạt của hộ gia đình thay thế nhiên liệu nấu nướng. Nước thải từ quá trình nuôi tôm chứa các chất ô nhiễm được đưa ra ao xử lý. Tại đây, các chế phẩm vi sinh được bổ sung vào ao giúp đẩy nhanh quá trình phân hủy các chất hữu cơ có trong nước. Bên cạnh đó, thực vật thủy sinh bản địa cũng được trồng trong ao giúp cải thiện chất lượng nước trước khi thải ra kênh tiếp nhận. Đầu (vỏ) tôm được định hướng làm nguyên liệu cho quá trình ủ phân hữu cơ, đầu (vỏ) tôm chết chứa một lượng dinh dưỡng phù hợp sản xuất phân bón cải tạo đất tại khu vực. Thiết bị chưng cất nước ngọt cũng được sử dụng cho khu vực để tận dụng lượng nhiệt từ mặt trời nhằm thu hồi nước ngọt phục vụ cho sinh hoạt cơ bản của hộ dân. Một giải pháp nữa được thiết kế để thu hồi sinh khối thực vật của địa phương là sản xuất than sinh học quy mô hộ gia đình. Các loài thực vật này chủ yếu là thực vật khu vực vùng mặn, than sinh học này thường được phối trộn cùng với phân hữu cơ (đầu, vỏ tôm chết) để cải tạo đất của khu vực, giúp hộ dân có thể trồng được các loại rau ăn lá cho gia đình.

4. Kết luận

Nghiên cứu đánh giá và dự báo diễn biến chất lượng và tác động môi trường, các giải pháp ngăn ngừa và xử lý ô nhiễm nước thải tại một số ao nuôi tôm tập trung. Dựa trên kết quả phân tích, khung hỗ trợ có thể đề xuất các hướng đi và biện pháp cụ thể để cải thiện quản lý và xử lý chất thải trong ao nuôi tôm siêu thâm canh.

Kết quả phát thải hộ dân sau khi thực hiện LCIA cho thấy, lượng phát thải khí nhà kính đạt 24.600 kgCO₂ eq, lượng axit hóa đạt 219,5 kgSO₂ eq, phú dưỡng đạt 315 kgPO₄ eq, sử dụng năng lượng tích lũy CEU=307,5 GJ và năng suất sơ cấp ròng BRU đạt 303.500 kg C. Hệ số phát thải của hộ dân cao, điều đó chỉ ra rằng, quy trình sản xuất không hiệu quả và cần được cải tiến. Hệ số phát thải khí CO₂, SO₂, và PO₄ cũng là những yếu tố quan trọng cần được theo dõi. Bản thân giai đoạn nuôi dưỡng là nguyên nhân chính gây ra hiện tượng phú dưỡng, chiếm đất và phụ thuộc vào nước. Tuy nhiên, thức ăn là nguyên nhân chính gây ra hiện tượng axit hóa và sử dụng ròng trong sản xuất sơ cấp trong tất cả các hệ thống. Năng suất và tỷ lệ trao đổi nguồn cấp dữ liệu là xác định hệ thống hiệu quả nhất theo quan điểm bảo vệ môi trường.

Khung hỗ trợ cung cấp cho các nhà quản lý và người nuôi tôm một công cụ hữu ích để lựa chọn và triển khai các giải pháp xử lý chất thải tối ưu. Các loại dòng thải có thể được tận dụng làm nguồn cung cấp đầu vào cho các quy trình khác nhau trong hệ thống: bùn thải có thể tận dụng để sản xuất khí sinh học bằng phương pháp biogas, bùn lắng sau biogas sau thời gian thu hồi khí sinh học có thể làm nguyên liệu hữu cơ ủ phân compost... Hệ thống này có thể hỗ trợ đắc lực trong việc đạt được các mục tiêu kinh tế, môi trường và bền vững.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được thực hiện trong khuôn khổ đề tài “Nghiên cứu đề xuất mô hình sinh kế bền vững theo định hướng kinh tế tuần hoàn nhằm thích ứng với các điều kiện tự nhiên bất lợi (mặn, phèn, biến đổi khí hậu) cho người dân nông thôn trên địa bàn tỉnh Cà Mau” (mã số 02/HD-SKHHCN) do Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Cà Mau quản lý. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S.P. Kam, M.C. Badjeck, L. Teh, et al. (2012), *Autonomous Adaptation to Climate Change by Shrimp and Catfish Farmers in Vietnam's Mekong River Delta*, World Fish, 24pp.
- [2] T.P.M. Le, V.N. Duong, N.H. Tran, et al. (2016), “Evaluation of impacts and solutions to deal with the climate change in the improved extensive culture system in the Mekong delta”, *CTU Journal of Science*, **42**, pp.28-39 (in Vietnamese).
- [3] T.N.A. Nguyen, H.V. Nguyen, M.L. Lam, et al. (2019), “Effects of different feeding rates on water quality, growth and feed efficiency of the black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) co-cultured with red seaweed (*Gracilaria tenuistipitata*)”, *CTU Journal of Science*, **55(3)**, pp.111-122 (in Vietnamese).
- [4] C. Jackson, N. Preston, P.J. Thompson, et al. (2003), “Nitrogen budget and effluent nitrogen components at an intensive shrimp farm”, *Aquaculture*, **218(1-4)**, pp.397-411, DOI: 10.1016/S0044-8486(03)00014-0.
- [5] C.I.M. Martins, E.H. Eding, M.C.J. Verdegem, et al. (2010), “New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability”, *Aquacultural Engineering*, **43(3)**, pp.83-93, DOI: 10.1016/j.aquaeng.2010.09.002.
- [6] G. Suantika, M.L. Situmorang, A. Nurfathurahmi, et al. (2018), “Application of indoor recirculation aquaculture system for white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) grow out super-intensive culture at low salinity conditions”, *Journal of Aquaculture Research and Development*, **9(4)**, 6pp, DOI: 10.4172/2155-9546.1000530.
- [7] S.Z. Kamal, M. Koyama, F. Syukri, et al. (2022), “Effect of enzymatic pretreatment on thermophilic composting of shrimp pond sludge to improve ammonia recovery”, *Environmental Research*, **204**, 30pp, DOI: 10.1016/j.envres.2021.112299.
- [8] P. Kiddee, R. Naidu, M.H. Wong (2013), “Electronic waste management approaches: An overview”, *Waste Management*, **33(5)**, pp.1237-1250, DOI: 10.1016/j.wasman.2013.01.006.
- [9] Ministry of Science and Technology (2023), *TCVN 13656:2023 on Water for Aquaculture - Water Quality for Intensive Culture of Black Tiger Shrimp, White Leg Shrimp* (in Vietnamese).
- [10] A.X. Le (2017), *TCKT 03-01:2017/BNNPTNT (Issued Under Decision No. 502/QĐ-TCTS/KHCN & HTQT On 3 May 2017)*, by The Director General of The Directorate of Fisheries, *Outlines The Technical Process for Super-Intensive Two-Stage White-Leg Shrimp (Litopenaeus Vannamei) Farming with Minimal Water Exchange Using Truc Anh Technology*, 12pp (in Vietnamese).
- [11] D. Laner, H. Rechberger (2016), “Special types of life cycle assessment”, *Material Flow Analysis*, Springer Nature, pp.293-332.
- [12] Ministry of Natural Resources and Environment (2017), *QCVN 43:2017/BTNMT on National Technical Regulation on Sediment Quality*, 7pp (in Vietnamese).
- [13] V.Q. Lam, T.T. Chat (2020), “Warning of organic pollution in shrimp farming areas in Hoian city”, *Dalat University Journal of Science*, **42**, pp.65-75.
- [14] H.T.H. Vy (2020), *Research on The Effective Treatment of Wastewater from Intensive and Super-Intensive Shrimp Farming at The Household Scale Towards Waste Reuse in Bac Lieu Province*, Master's Thesis, Institute for Environment and Natural Resources (in Vietnamese).
- [15] The Directorate of Fisheries (2014), *QCVN 02-19:2014/BNNPTNT on National Technical Regulation on Brackish Water Shrimp Culture Farm - Conditions for Veterinary Hygiene, Environmental Protection and Food Safety*, 10pp (in Vietnamese).