



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.4.49-61>

***Corresponding author:**

Email address:

mntien@ctu.edu.vn

Received: 12/11/2025

Received in Revised Form:

19/03/2026

Accepted: 15/04/2026

Evaluation of technical, economic and environmental aspects of a solar energy model for shrimp farms

Nguyen Mong Long¹, Nguyen Trong Hieu¹, Tran Thi Hong Chau¹, Hoang Dang Khoa², Nguyen Nhut Tien^{2,*}

¹Can Tho Vocational College

²Faculty of Electrical Engineering, Can Tho University

Abstract: This study develops and evaluates a hybrid solar energy system integrated into shrimp farming in the Mekong Delta, Vietnam, aiming to improve energy efficiency, reduce operating costs, and minimize environmental impacts. Four scenarios are analyzed: grid-connected systems with and without battery storage (S1, S2), an off-grid system with battery and diesel backup (S3), and a conventional grid-only system (S4). The system is optimized using the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) in MATLAB, considering key techno-economic and environmental indicators, including annual cost and CO₂ emissions. Results show that all solar-based configurations outperform the baseline (S4), significantly reducing both costs and emissions. Among the scenarios, S1 achieves the best overall performance, with the lowest annual cost (275.58 million VND) and substantial emission reduction (66.7 t-CO₂/year in operation). Although S3 yields the lowest operational emissions, its high cost limits practical applicability. When considering life-cycle emissions, battery integration introduces additional indirect emissions; however, S1 still provides the best balance between economic and environmental performance. These findings highlight that the optimal solution lies in balancing cost, reliability, and environmental impact, offering a scalable approach for sustainable aquaculture and low-carbon energy transition.

Keywords: Solar energy system; energy optimization; techno-economic-environmental analysis; sustainable aquaculture; shrimp farms



Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.4.49-61>

Tác giả liên hệ:
Địa chỉ Email:
nntien@ctu.edu.vn

Ngày nộp bài: 12/11/2025
Ngày nộp bài sửa: 19/03/2026
Ngày chấp nhận: 15/04/2026

Đánh giá các khía cạnh kỹ thuật, kinh tế và môi trường của mô hình năng lượng mặt trời cho các trang trại nuôi tôm

Nguyễn Mộng Long¹, Nguyễn Trọng Hiếu¹, Trần Thị Hồng Châu¹, Hoàng Đăng Khoa², Nguyễn Nhật Tiến^{2,*}

¹Trường Cao đẳng nghề Cần Thơ

²Khoa Kỹ thuật điện, Đại học Cần Thơ

Tóm tắt: Nghiên cứu này phát triển và đánh giá một hệ thống năng lượng mặt trời lai tích hợp vào mô hình nuôi tôm tại Đồng bằng sông Cửu Long, Việt Nam, nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng, giảm chi phí vận hành và hạn chế tác động môi trường. Bốn kịch bản được phân tích, bao gồm: hệ thống nổi lưới có và không có bộ lưu trữ (S1, S2), hệ thống độc lập kết hợp pin lưu trữ và máy phát diesel (S3), và kịch bản cơ sở sử dụng hoàn toàn điện lưới (S4). Hệ thống được tối ưu hóa bằng thuật toán NSGA-II trong MATLAB, xét đến các chỉ tiêu kỹ thuật – kinh tế – môi trường, bao gồm chi phí hàng năm và lượng phát thải CO₂. Kết quả cho thấy tất cả các cấu hình tích hợp năng lượng mặt trời đều vượt trội so với kịch bản cơ sở (S4), giúp giảm đáng kể cả chi phí và phát thải. Trong số các kịch bản, S1 đạt hiệu quả tổng thể tốt nhất, với chi phí hàng năm thấp nhất (275,58 triệu đồng) và mức giảm phát thải đáng kể (66,7 t-CO₂/năm trong quá trình vận hành). Mặc dù S3 có lượng phát thải vận hành thấp nhất nhưng chi phí cao khiến phương án này hạn chế về tính khả thi thực tế. Khi xét đến phát thải vòng đời, việc tích hợp bộ lưu trữ làm phát sinh thêm khí thải gián tiếp; tuy nhiên, S1 vẫn đạt được sự cân bằng tối ưu giữa hiệu quả kinh tế và môi trường. Những kết quả này cho thấy phương án tối ưu không phải là phương án có phát thải thấp nhất, mà là phương án đạt được sự cân bằng giữa chi phí, độ tin cậy và tác động môi trường, từ đó cung cấp một hướng tiếp cận có khả năng mở rộng cho nuôi trồng thủy sản bền vững và chuyển đổi năng lượng theo hướng phát thải thấp.

Từ khóa: Hệ thống năng lượng mặt trời; tối ưu hóa năng lượng; phân tích kỹ thuật - kinh tế - môi trường; nuôi trồng thủy sản bền vững; trang trại nuôi tôm.

1. Giới thiệu

Ngành nuôi tôm Việt Nam đã khẳng định vị thế vững chắc trên thị trường thủy sản toàn cầu, nhưng đang đối mặt với nhiều thách thức như biến đổi khí hậu, dịch bệnh gia tăng và cạnh tranh mạnh mẽ từ các nước sản xuất lớn như Ấn Độ và Ecuador. Những yếu tố này gây áp lực lớn lên khả năng duy

trì chất lượng sản phẩm và giá thành cạnh tranh của Việt Nam.

Một trong những khó khăn nổi bật là tiêu thụ điện năng cao trong quá trình nuôi. Các thiết bị như máy sục khí và máy tạo oxy phải hoạt động liên tục để duy trì chất lượng nước, khiến chi phí năng lượng tăng đáng kể, đặc biệt ở các trang trại lớn.

Cụ thể, nuôi tôm thẻ chân trắng thâm canh trên ao lót bạt tiêu thụ khoảng 150.282 kWh/ha/vụ, trong khi nuôi trong ao đất tiêu thụ 26.775 kWh/ha/vụ, nuôi tôm sú thâm canh tiêu thụ 21.540 kWh/ha/vụ [1]. Hệ thống sục khí chiếm khoảng 80% tổng năng lượng sử dụng trong hoạt động nuôi tôm.

Để vượt qua các thách thức hiện nay của ngành nuôi tôm Việt Nam, cần triển khai những giải pháp kịp thời và hiệu quả. Một hướng tiếp cận quan trọng là thường xuyên cập nhật và áp dụng các kỹ thuật nuôi tôm tiên tiến phù hợp với điều kiện địa phương. Trong đó, việc giảm chi phí điện năng là ưu tiên hàng đầu, đòi hỏi các biện pháp chiến lược như: đồng bộ hóa thiết bị và quy trình vận hành để nâng cao hiệu suất năng lượng. Đầu tư vào nguồn năng lượng tái tạo, đặc biệt là điện năng lượng mặt trời nhằm giảm phụ thuộc vào lưới điện quốc gia. Xây dựng kế hoạch sử dụng năng lượng một cách khoa học nhằm tối ưu hóa mức tiêu thụ điện năng trong suốt chu kỳ nuôi.

Một nghiên cứu tại Đài Loan đã sử dụng phương pháp phân tích chi phí – lợi ích kết hợp với mô phỏng Monte Carlo nhằm đánh giá tính khả thi về kinh tế và mức độ rủi ro khi tích hợp hệ thống điện năng lượng mặt trời vào mô hình nuôi tôm thẻ chân trắng [2]. Kết quả chỉ ra rằng, với một số cấu hình nhất định, hệ thống năng lượng mặt trời có thể mang lại lợi nhuận kinh tế đáng kể, đồng thời góp phần giảm thiểu rủi ro về thị trường và môi trường.

Ngoài ra, một nghiên cứu khác đã phát triển khuôn khổ hỗ trợ dựa trên GIS, tích hợp dữ liệu về vị trí ao nuôi, điều kiện khí tượng và tải điện của máy sục khí nhằm tối ưu kích thước hệ thống điện mặt trời cho mô hình nuôi tôm. Phương pháp này cho phép đánh giá và lựa chọn cấu hình phù hợp nhất trong nhiều kịch bản vận hành khác nhau [3]. Các nghiên cứu gần đây cho thấy hệ thống điện mặt trời nổi lưới mang lại hiệu quả kinh tế vượt trội, giúp giảm đáng kể chi phí năng lượng và nâng cao tính bền vững khi các yếu tố không gian và vận hành được xem xét một cách toàn diện. Các thuật

toán tối ưu hóa tiên tiến như Queen Honey Bee Migration (QHBM) và Grey Wolf Optimization (GWO) đã được áp dụng để đánh giá hiệu suất kinh tế, kỹ thuật, môi trường của hệ thống năng lượng lai, điện lưới và máy phát diesel. Trong đó, kịch bản 1 cho thấy hiệu quả vượt trội, với chi phí hiện tại được cải thiện, tỷ lệ sử dụng năng lượng tái tạo tăng và lượng phát thải carbon giảm đáng kể, cho thấy thời gian hoàn vốn chỉ khoảng 5 năm [4]. Bên cạnh đó, hệ thống sục khí bánh guồng sử dụng năng lượng mặt trời đạt hiệu suất năng lượng tới 89%, góp phần nâng cao năng suất thu hoạch và hiệu quả kinh tế tổng thể. Mặc dù chi phí đầu tư ban đầu tương đối cao, các kết quả nghiên cứu cho thấy đây là giải pháp bền vững và giàu tiềm năng cho ngành nuôi tôm trong tương lai [5].

Ngoài ra, hệ thống năng lượng và làm mát lai ghép mặt trời - gió cho nuôi trồng thủy sản đã được phát triển nhằm mục tiêu cung cấp năng lượng bền vững, giảm phát thải khí nhà kính và hạn chế thất thoát nước [6]. Sử dụng dữ liệu MERRA-2 của NASA và các chỉ số kinh tế như giá trị hiện tại ròng, chi phí năng lượng cân bằng và hệ số công suất, nghiên cứu đã chứng minh tính khả thi về kỹ thuật và tài chính của mô hình tại Karbala, Iraq, khẳng định tiềm năng ứng dụng của hệ thống trong nuôi trồng thủy sản bền vững. Để hướng tới nuôi tôm thân thiện môi trường, một nghiên cứu khác tại Trung Java (Indonesia) đã mô phỏng hệ thống năng lượng lai cho trang trại có diện tích 2.000 m² bằng phần mềm HOMER. Trong các cấu hình được thử nghiệm, kịch bản S2 cho kết quả tối ưu nhất, với tỷ lệ năng lượng tái tạo đạt 85,4%, tiết kiệm đáng kể chi phí vận hành và giảm tới 85% lượng phát thải carbon [7]. Mặc dù các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra tiềm năng kỹ thuật, kinh tế và môi trường của việc tích hợp năng lượng điện mặt trời và các hệ thống năng lượng tái tạo lai vào nuôi trồng thủy sản, vẫn tồn tại một số thách thức nghiên cứu quan trọng cần được làm rõ. Thứ nhất, đa số các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tập trung vào đánh giá tính khả thi kinh tế tổng thể của hệ thống năng lượng mặt trời hoặc các hệ thống lai theo mô hình chung, mà chưa phản ánh đầy đủ

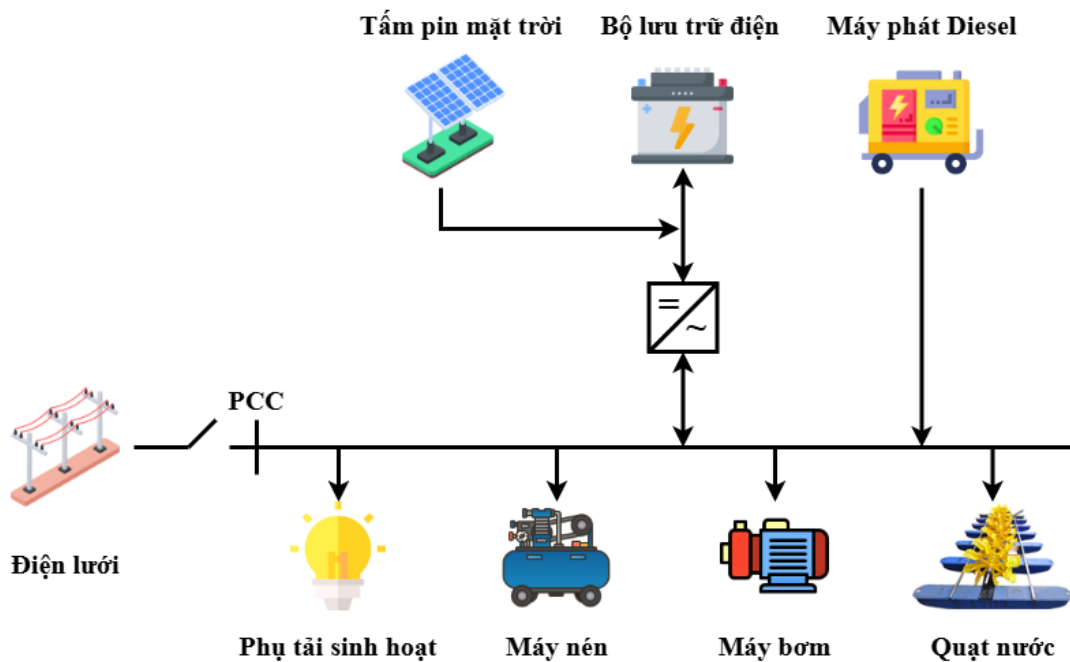
đặc thù tải điện thực tế của các trang trại nuôi tôm. Trong thực tế, nhu cầu sục khí, bơm nước và cung cấp oxy thay đổi đáng kể theo các giai đoạn sinh trưởng khác nhau của tôm, nhưng ít nghiên cứu mô tả rõ sự biến thiên theo thời gian này trong quá trình thiết kế và tối ưu hóa hệ thống năng lượng. Thứ hai, phần lớn các công trình trước đây tập trung vào các hệ thống độc lập hoặc hệ thống năng lượng mặt trời nối lưới đơn thuần, mà bỏ qua các mô hình lai phức hợp kết hợp điện mặt trời với pin lưu trữ và máy phát diesel dự phòng. Điều này dẫn đến thiếu những đánh giá so sánh toàn diện giữa

các kịch bản như hệ thống nối lưới có lưu trữ, hệ thống nối lưới không lưu trữ và hệ thống độc lập.

2. Phương pháp luận

2.1. Cấu hình hệ thống

Hệ thống điện mặt trời tại trang trại nuôi tôm được mô tả trong Hình 1, bao gồm hai nhóm chính: nguồn điện và tải điện. Nguồn điện gồm các tấm pin mặt trời, hệ thống pin lưu trữ, máy phát điện diesel (trong chế độ độc lập) và lưới điện quốc gia (trong chế độ nối lưới). Tải điện bao gồm máy sục khí, máy bơm nước, máy nén khí và hệ thống chiếu sáng phục vụ cho quá trình nuôi tôm.



Hình 1. Hệ thống điện mặt trời cho trang trại nuôi tôm

Trong quá trình nuôi tôm, việc sục khí liên tục là yếu tố bắt buộc nhằm duy trì chất lượng nước, trong đó nhu cầu oxy cao hơn vào ban đêm. Vào ban ngày, năng lượng được tạo ra từ các tấm pin mặt trời sẽ cấp điện trực tiếp cho các tải điện, phần dư được lưu trữ vào hệ thống pin, phần còn lại được hòa vào lưới điện quốc gia (tối đa 20% công suất hệ thống năng lượng mặt trời). Do quá trình quang hợp tự nhiên của tảo trong ao, nhu cầu oxy trong ao giảm nên mức tiêu thụ điện thấp khi bức xạ mặt trời yếu hoặc vào ban đêm, năng lượng điện từ các tấm pin mặt trời không đủ để đáp ứng nhu cầu tải, hệ thống pin lưu trữ sẽ cung cấp năng lượng điện để bổ sung năng lượng thiếu hụt. Trong trường hợp nhu cầu của tải điện vượt quá khả

năng cung cấp của pin, hệ thống tự động chuyển sang sử dụng lưới điện quốc gia, đảm bảo hoạt động liên tục và ổn định trong chế độ nối lưới. Đối với chế độ độc lập, pin lưu trữ đóng vai trò nguồn dự phòng chính, và khi công suất pin không đáp ứng được, máy phát điện diesel sẽ được kích hoạt để cung cấp năng lượng bổ sung, đảm bảo hệ thống vận hành liên tục mà không bị gián đoạn.

2.2. Mô hình pin quang điện mặt trời (PV)

Công suất của hệ thống pin năng lượng mặt trời (P_{PV}) được tính theo công thức (1) [9].

$$P_{PV}(t) = \eta_{mp} \cdot \eta_e \cdot A_{PV} \cdot G(t) \quad (1)$$

trong đó η_{mp} là hiệu suất tối đa của tấm pin năng lượng mặt trời (%), η_e là hiệu suất của thiết

bị điều hòa công suất (%), A_{PV} là diện tích tấm pin (m^2), G là bức xạ tới trên tấm pin (W/m^2), t là thời gian bức xạ (h).

2.3. Mô hình bộ lưu trữ (BB)

Tại một thời điểm cụ thể, bộ pin lưu trữ có thể hoạt động ở một trong hai chế độ, sạc hoặc xả, được thể hiện theo công thức (2) [10].

$$SOC(t) = SOC_0(t-1) - \frac{\eta_{bat}}{E_{bat}} \int \frac{P_o(t)}{V_{bat}(t)} dt \quad (2)$$

trong đó $SOC(t)$ là trạng thái sạc ban đầu, η_{bat} biểu thị hiệu suất sạc-xả (%), E_{bat} là dung lượng pin (Wh), P_o là công suất đầu ra (W), V_{bat} là điện áp của pin (V).

2.4. Mô hình máy phát điện diesel (DG)

Máy phát điện diesel đóng vai trò là nguồn điện dự phòng cho hệ thống khi vận hành ở chế độ độc lập trong các thời điểm thiếu hụt năng lượng. Ngoài ra, mức tiêu thụ nhiên liệu của máy phát được xác định theo công thức (3) [11]:

$$FC_{DG} = c_1 P_{DG}^{rated} + c_2 P_{DG} \quad (3)$$

trong đó P_{DG} và P_{DG}^{rated} tương ứng là công suất đầu ra thực và công suất định mức tương ứng của DG (kW), c_1 và c_2 tương ứng là hệ số chặn và độ dốc của đường cong tiêu thụ nhiên liệu (L/kWh).

2.5. Hàm mục tiêu

2.5.1. Chi phí hàng năm của hệ thống (ACS)

Chi phí hàng năm của hệ thống bao gồm chi phí hàng năm của các thành phần trong hệ thống C_{ACC} cùng với chi phí mua điện C_{GP} và chi phí bán điện C_{GS} , được tính theo công thức (4) [12]:

$$ACS = C_{ACC} + C_{GP} - C_{GS} \quad (4)$$

trong đó C_{ACC} là chi phí hàng năm của các thành phần trong hệ thống, C_{GP} là chi phí mua điện, C_{GS} là chi phí bán điện.

2.5.2. Khí thải carbon dioxide (EMI)

Tổng lượng khí thải CO_2 từ lưới điện quốc gia ($EMI_{on-grid}$) trong quá trình vận hành nối lưới được tính theo công thức (5) [13]:

$$EMI_{on-grid} = \sum_{t=1}^T e_{grid} P_{gp}(t) \quad (5)$$

Tổng lượng khí thải CO_2 từ máy phát điện diesel trong quá trình vận hành độc lập được tính theo công thức (6) [13]:

$$EMI_{off-grid} = \sum_{t=1}^T e_{DF} P_{DG}(t) \quad (6)$$

trong đó e_{grid} là hệ số phát thải của lưới điện ($g-CO_2/kWh$), e_{DF} là hệ số phát thải của nhiên liệu diesel ($g-CO_2/kWh$).

2.6. Phân tích kỹ thuật - kinh tế - môi trường

2.6.1. Phân tích kỹ thuật

SCR là chỉ số đo lường tỷ lệ năng lượng mặt trời được tạo ra bởi một hệ thống được tiêu thụ trực tiếp tại chỗ so với tổng năng lượng được tạo ra. Tỷ lệ này là một chỉ số quan trọng trong việc đánh giá hiệu quả vận hành của các hệ thống điện mặt trời và được tính bằng cách sử dụng công thức (7) [14]:

$$SCR = \frac{E_{PV} - E_{excess}}{E_{PV}} \times 100 \quad (7)$$

trong đó E_{PV} là tổng số điện năng lượng mặt trời phát tại chỗ (kWh), E_{excess} là điện dư sản xuất từ các tấm pin mặt trời ở chế độ độc lập hoặc điện dư bán cho lưới điện quốc gia ở chế độ nối lưới (kWh).

SSR là một chỉ số quan trọng cho biết mức độ mà hệ thống điện mặt trời có thể đáp ứng nhu cầu phụ tải một cách độc lập, mà không phụ thuộc vào các nguồn năng lượng bên ngoài, chẳng hạn như lưới điện quốc gia ở chế độ nối lưới hoặc máy phát điện diesel ở chế độ độc lập. Chỉ số này được tính bằng cách sử dụng công thức (8) [14]:

$$SSR = \frac{E_{load} - E_{on-grid}}{E_{load}} \times 100; \quad SSR = \frac{E_{load} - E_{DG}}{E_{load}} \times 10 \quad (8)$$

trong đó E_{load} là nhu cầu phụ tải điện (kWh), $E_{on-grid}$ là lượng điện mua từ lưới điện (kWh), E_{DG} là lượng điện sinh ra từ máy phát điện diesel ở chế độ độc lập (kWh).

2.6.2. Phân tích kinh tế

Tỷ lệ lợi ích (BCR) của hệ thống được tính theo công thức (9) [15]:

$$BCR = \frac{CF}{TC} \quad (9)$$

trong đó CF là dòng tiền hàng năm (triệu đồng), TC là tổng chi phí của hệ thống (triệu đồng).

Giá trị hiện tại ròng (NPV) của hệ thống được xác định bằng cách lấy giá trị hiện tại ròng của lợi nhuận hàng năm dự kiến trừ đi chi phí đầu tư ban đầu, được tính theo công thức (10):

$$NPV(n) = -C_{CAP} + \sum_{n=1}^N \frac{CF(n)}{(1+i)^n} \quad (10)$$

Tỷ suất hoàn vốn nội bộ là lãi suất mà tại đó giá trị hiện tại ròng của tất cả các dòng tiền phát sinh từ một dự án bằng không. Tỷ suất này còn được gọi là hiệu quả cận biên của vốn, lợi tức đầu tư hoặc tỷ lệ chiết khấu của dự án, được tính bằng công thức (11):

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{CF(n)}{(1+IRR)^n} = 0 \quad (11)$$

Thời gian hoàn vốn (PBP) được tính bằng (12):

$$PBP = A + \frac{B}{C} \quad (12)$$

trong đó *A* là năm cuối cùng của dự án có dòng tiền tích lũy âm, *B* biểu thị giá trị dương của dòng tiền ròng trong năm tiếp theo *A*, *C* là tổng lưu chuyển tiền tệ của năm sau *A*.

2.6.3. Phân tích môi trường

Trong nghiên cứu này, lượng khí thải CO₂ được xác định cho cả hai chế độ vận hành: kết nối lưới điện và độc lập. Việc tính toán được thực hiện bằng cách nhân lượng điện mua từ lưới điện hoặc lượng điện do máy phát điện diesel tạo ra với các hệ số phát thải tương ứng. Các giá trị phát thải thu được là cơ sở để phân tích và đánh giá tác động môi trường của các kịch bản vận hành hệ thống.

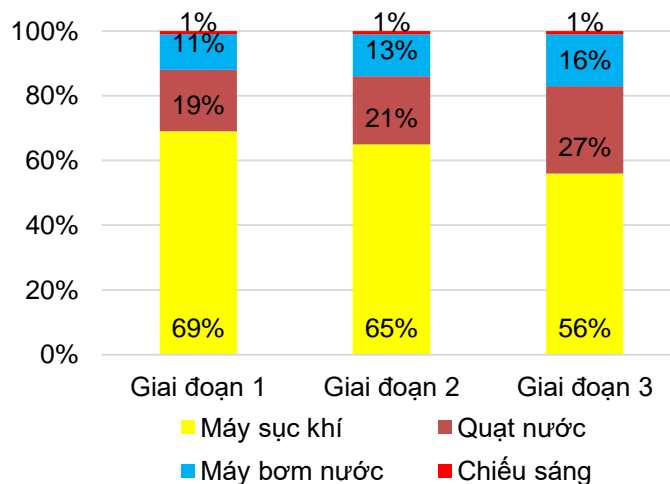
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Vị trí nghiên cứu và thông số cài đặt cho mô phỏng

Hệ thống điện năng lượng mặt trời được triển khai tại một trang trại nuôi tôm ở Sóc Trăng. Địa điểm này nằm ở kinh độ 105°57'45,3" và vĩ độ 9°22'51,5", thuộc múi giờ GMT+7, với độ cao 8 m

so với mực nước biển. Các tấm pin năng lượng mặt trời sẽ được lắp đặt phía trên ao lắng có diện tích 5.000 m². Việc bố trí các tấm pin trên mặt nước mang lại hai lợi thế chính là giảm thiểu sự bay hơi nước trong ao nuôi và tăng hiệu suất hoạt động của các tấm pin mặt trời nhờ hiệu ứng làm mát tự nhiên từ mặt nước.

Điện năng tiêu thụ của một vụ nuôi tôm được thu thập tại một trang trại ở Sóc Trăng (Hình 2) cho thấy sự biến động rõ rệt về cơ cấu tiêu thụ điện năng của các loại thiết bị qua ba giai đoạn của một vụ nuôi. Ở giai đoạn 1, tôm còn nhỏ nên nhu cầu oxy và tuần hoàn nước thấp, do đó, tỷ lệ điện năng dành cho quạt nước ở mức vừa phải, trong khi bơm nước và bơm chất thải chiếm 11% do các hoạt động cấp – tháo nước và vệ sinh ao. Bước sang giai đoạn 2, khi mật độ sinh khối tăng, các thiết bị cung cấp oxy chiếm tỷ lệ cao hơn, làm thay đổi đáng kể trong phân bố tiêu thụ điện năng giữa các nhóm thiết bị. Đến giai đoạn 3, tỷ lệ điện năng tiêu thụ tăng mạnh ở quạt nước (27%) và máy sục khí, do tôm đã trưởng thành, nhu cầu oxy cao và lượng chất thải nhiều; quạt nước hoạt động đến 18 giờ/ngày, máy sục khí hoạt động liên tục 24 giờ/ngày, khiến hai nhóm thiết bị này chiếm tỷ lệ điện năng lớn nhất trong cả ba giai đoạn. Trong khi đó, bơm nước và bơm chất thải vẫn duy trì vai trò quan trọng, chiếm 16% tổng điện năng tiêu thụ. Thông số kinh tế và kỹ thuật của các thiết bị trong hệ thống sử dụng làm đầu vào cho mô phỏng được trình bày trong Bảng 1.



Hình 2. Tỷ lệ phần trăm điện năng tiêu thụ của các loại thiết bị trong ba giai đoạn của một vụ nuôi tôm

Bảng 1. Thông số kinh tế và kỹ thuật của các thiết bị của hệ thống sử dụng cho mô phỏng

Tên thiết bị	Thông số kỹ thuật	Giá trị
Tấm pin quang điện	Công suất đỉnh (Wp)	450
	Vòng đời (năm)	25
	Tỷ lệ bảo trì (%)	1,5
	Chi phí đầu tư (triệu đồng/kWp)	4,5
	Dung lượng định mức (Ah)	100
Bộ lưu trữ	Vòng đời (năm)	15
	Tỷ lệ bảo trì (%)	4
	Chi phí đầu tư (triệu đồng/kWh)	5
Bộ biến tần hòa lưới	Vòng đời (năm)	15
	Chi phí đầu tư (triệu đồng/kW)	4
	Độ dốc của đường cong tiêu thụ nhiên liệu (L/kWh)	0,2461
Máy phát diesel	Hệ số chặn của đường cong tiêu thụ nhiên liệu (L/kWh)	0,0815
	Chi phí đầu tư (triệu đồng/kW)	5,8
	Chi phí nhiên liệu (đồng/L)	18,455
	Tuổi thọ (năm)	7
	Tỷ lệ bảo trì (%)	2

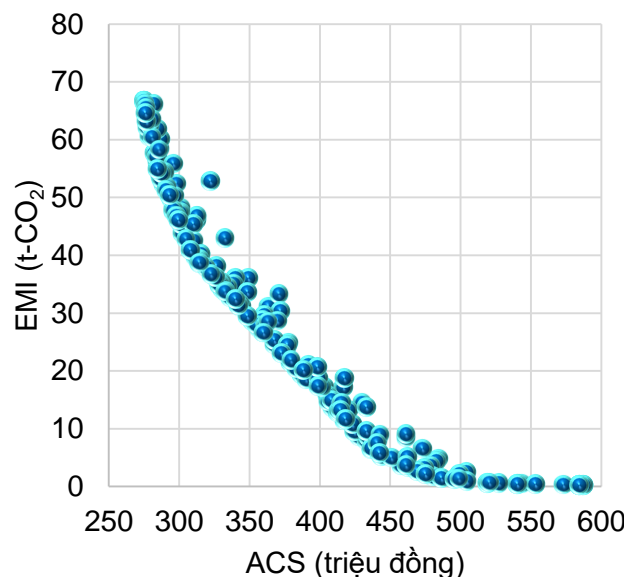
3.2. Kịch bản mô phỏng

Hệ thống điện mặt trời lắp cho trang trại nuôi tôm được đánh giá theo ba kịch bản vận hành, dựa trên nhu cầu điện năng tiêu thụ trong ba giai đoạn khác nhau của một vụ nuôi, như minh họa trong Hình 2.

Trong kịch bản đầu tiên S1, hệ thống hoạt

động ở chế độ nổi lưới kết hợp với pin lưu trữ. Kịch bản thứ hai S2 hoạt động ở chế độ nổi lưới không sử dụng pin lưu trữ. Kịch bản thứ ba S3 là hệ thống độc lập, bao gồm các tấm pin mặt trời, pin lưu trữ và máy phát điện diesel.

3.2.1. Kết quả mô phỏng của chế độ nổi lưới có lưu trữ ở kịch bản S1



Hình 1. Biên Pareto giữa chi phí hàng năm và lượng phát thải trong kịch bản S1

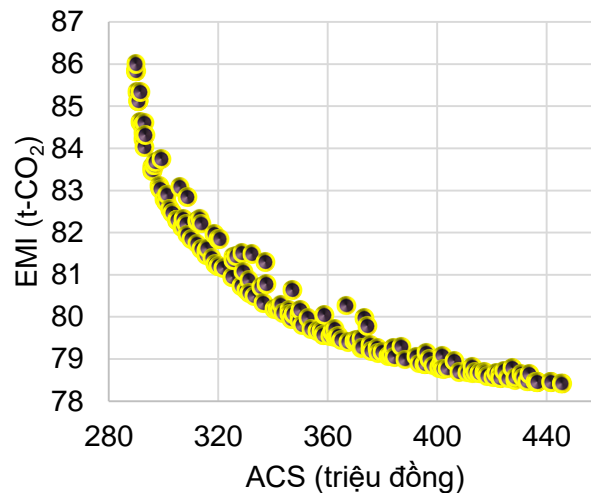
Đường cong Pareto cho kịch bản S1 được trình bày trong Hình 3 thể hiện mối quan hệ giữa chi phí hàng năm (ACS) và lượng khí thải CO₂.

Kịch bản này bao gồm hệ thống điện mặt trời, bộ lưu trữ và lưới điện. Kết quả cho thấy rằng khi chi phí hàng năm tăng, lượng khí thải CO₂ giảm tương

ứng. Đặc biệt, trong khoảng chi phí từ 274-422 triệu đồng, lượng khí thải giảm mạnh từ 66 tấn xuống dưới 10 tấn, cho thấy mối tương quan chặt chẽ giữa mức đầu tư và khả năng giảm phát thải. Khi chi phí vượt quá 422 triệu đồng, tốc độ giảm lượng khí thải trở nên chậm hơn đáng kể. Tại mức

chi phí hàng năm 587,86 triệu đồng, lượng khí thải CO₂ đạt mức tối thiểu, chỉ còn 0,24 tấn, phản ánh hiệu quả tối đa về mặt môi trường trong kịch bản này.

3.2.2. Kết quả mô phỏng của chế độ nổi lưới ở kịch bản S2



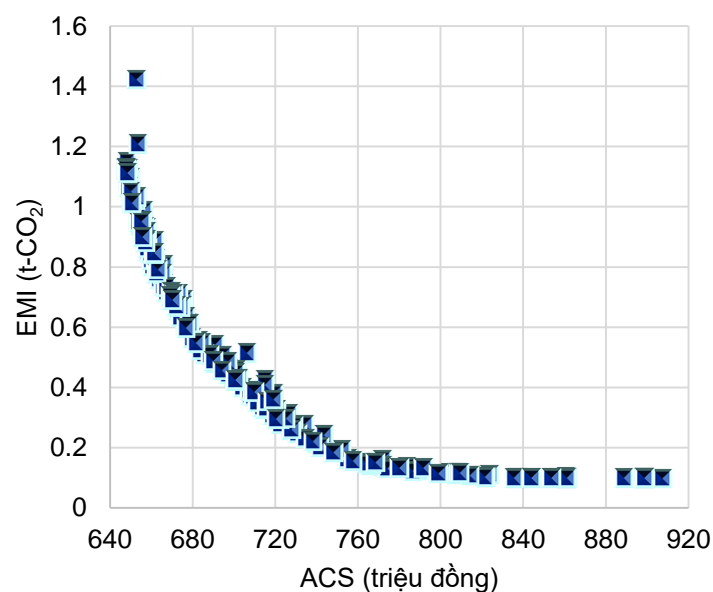
Hình 2. Biên Pareto giữa chi phí hàng năm và lượng phát thải trong kịch bản S2

Đường cong Pareto cho kịch bản S2 được trình bày trong Hình 4 đối với hệ thống điện mặt trời nổi lưới không có bộ lưu trữ. Kết quả cho thấy lượng khí thải CO₂ giảm dần khi chi phí hàng năm tăng, phản ánh mối quan hệ nghịch giữa chi phí đầu tư và lượng phát thải.

thống đã tiến gần đến mức hiệu quả tối đa. Điều này cho thấy lợi tức đầu tư bắt đầu giảm dần, nghĩa là khi chi tiêu vượt quá ngưỡng nhất định, khoản đầu tư bổ sung chỉ mang lại mức giảm nhỏ về lượng khí thải, không còn mang lại hiệu quả kinh tế rõ rệt.

Tuy nhiên, tốc độ giảm phát thải chậm lại khi chi phí đạt khoảng 395-448 triệu đồng, cho thấy hệ

3.2.3. Kết quả mô phỏng của chế độ độc lập ở kịch bản S3



Hình 5. Mặt trước Pareto cho thấy sự cân bằng giữa chi phí phát thải trong kịch bản S3

Hình 5 cho thấy lượng khí thải CO₂ ban đầu giảm mạnh khi chi phí hệ thống tăng, sau đó dần chững lại khi hệ thống đạt hiệu quả tối đa. Cụ thể, khi chi phí hàng năm dao động trong khoảng 651-738 triệu đồng, lượng khí thải CO₂ giảm đáng kể từ khoảng 1,43 tấn xuống còn dưới 0,2 tấn. Khi chi phí vượt quá 738 triệu đồng, lượng khí thải duy trì ở mức thấp ổn định, cho thấy hiệu suất giảm phát thải đạt ngưỡng bão hòa và lợi nhuận đầu tư bổ sung bắt đầu giảm. Mức phát thải thấp nhất chỉ 0,1 tấn tương ứng với chi phí hàng năm cao nhất là 907,45 triệu đồng. Xu hướng này nhấn mạnh tính hiệu quả của hệ thống điện mặt trời kết hợp bộ lưu

trữ được thiết kế tối ưu trong việc giảm thiểu sự phụ thuộc vào máy phát điện diesel và hạn chế đáng kể lượng khí thải CO₂ ngay cả trong điều kiện hoạt động độc lập không nối lưới.

3.2.4. So sánh các kịch bản

Bảng 2 thể hiện cấu hình của hệ thống cho ba kịch bản mô phỏng và kịch bản S4 trong trường hợp hệ thống năng lượng được cung cấp hoàn toàn từ lưới điện, đóng vai trò là kịch bản cơ sở để so sánh. Việc đưa vào kịch bản S4 cho phép đánh giá định lượng hiệu quả của các giải pháp năng lượng tái tạo so với phương án truyền thống đang được áp dụng phổ biến tại các trang trại nuôi tôm.

Bảng 2. So sánh giữa các kịch bản

	S1	S2	S3	S4
Công suất PV (kWp)	146	128	241	0
Dung lượng pin (kWh)	100	0	640	0
ACS (triệu đồng)	275,58	290,21	648,27	470,5
EMI (t-CO ₂)	66,7	86	1,1	141,5

Kết quả cho thấy kịch bản S4 có chi phí vận hành hàng năm và lượng phát thải CO₂ cao nhất, lần lượt đạt 470,5 triệu đồng và 141,5 tấn. So với kịch bản cơ sở này, các hệ thống tích hợp năng lượng mặt trời đều cho thấy hiệu quả rõ rệt.

Cụ thể, kịch bản S1 giúp giảm khoảng 41,4% chi phí vận hành và 52,9% lượng phát thải CO₂, trong khi kịch bản S2 giảm khoảng 38,3% chi phí và 39,2% lượng phát thải. Điều này khẳng định tiềm năng đáng kể của việc tích hợp năng lượng tái tạo trong việc nâng cao hiệu quả kinh tế và giảm tác động môi trường cho mô hình nuôi tôm. Trong số các phương án, kịch bản S1 (hệ thống nối lưới có bộ lưu trữ) mang lại chi phí hàng năm thấp nhất, ở mức 275,58 triệu đồng, đồng thời duy trì lượng phát thải CO₂ ở mức 66,7 tấn. So với S2, việc tích hợp bộ lưu trữ giúp giảm sự phụ thuộc vào lưới điện vào ban đêm, từ đó cải thiện hiệu quả vận hành và giảm chi phí tổng thể.

Kịch bản S3 (hệ thống độc lập) đạt lượng phát thải CO₂ thấp nhất, chỉ 1,1 tấn, do giảm thiểu gần như hoàn toàn sự phụ thuộc vào lưới điện. Tuy nhiên, chi phí hàng năm của hệ thống này rất cao,

lên tới 648,27 triệu đồng, cao hơn khoảng 2,35 lần so với S1 và cao hơn đáng kể so với kịch bản cơ sở S4. Điều này cho thấy việc theo đuổi mục tiêu giảm phát thải tối đa trong S3 phải đánh đổi bằng chi phí đầu tư và vận hành lớn, làm giảm tính khả thi về mặt kinh tế.

Dựa trên phân tích tổng hợp các chỉ số kỹ thuật, kinh tế và môi trường, kịch bản S1 được lựa chọn là phương án tối ưu. Mặc dù không đạt mức phát thải thấp nhất như S3, nhưng S1 mang lại sự cân bằng hiệu quả giữa chi phí và môi trường, với chi phí thấp nhất và mức giảm phát thải đáng kể so với kịch bản cơ sở. Do đó, S1 được xem là giải pháp khả thi và phù hợp hơn cho ứng dụng thực tế trong điều kiện nuôi tôm tại Việt Nam.

3.3. Phân tích kỹ thuật

Hệ thống được lựa chọn để đánh giá kỹ thuật là hệ thống điện mặt trời nối lưới tích hợp bộ lưu trữ. Khi được mô phỏng và phân tích, nghiên cứu này tập trung đánh giá các chỉ số hiệu suất tĩnh, đặc biệt là tỷ lệ tự tiêu thụ và tỷ lệ tự cung tự cấp. Bảng 3 minh họa chỉ số tỷ lệ tự tiêu thụ trong suốt cả năm luôn duy trì trên 80%. Giá trị cao và ổn định

này chứng tỏ hệ thống vận hành hiệu quả, tối đa hóa việc sử dụng năng lượng mặt trời tại chỗ và giảm đáng kể sự phụ thuộc vào lưới điện quốc gia. Sự ổn định của chỉ số này phản ánh khả năng quản lý năng lượng hiệu quả, với sự phối hợp hợp lý giữa sản xuất, tiêu thụ và lưu trữ điện năng, ngay cả khi điều kiện bức xạ mặt trời và thời tiết thay đổi. Tỷ lệ tự tiêu thụ cao duy trì trong kịch bản S1 cho thấy mức độ tự chủ năng lượng vượt trội, đồng thời đóng góp tích cực vào hiệu quả kinh tế và tính bền vững môi trường của hệ thống. Bảng 3 thể hiện chỉ

Bảng 3. Tỷ lệ tự tiêu thụ và tự cung tự cấp của kịch bản S1 trong 1 năm

Tháng	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SCR	0,82	0,81	0,81	0,82	0,82	0,82	0,83	0,82	0,83	0,82	0,83	0,82
SSR	0,56	0,71	0,46	0,54	0,6	0,72	0,46	0,54	0,58	0,7	0,43	0,51

3.4. Phân tích kinh tế

Các chỉ số kinh tế cho kịch bản S1 được tóm tắt trong Bảng 4. Dựa trên phân tích chi phí - lợi ích và dữ liệu dòng tiền hàng năm, các chỉ số tài chính chính bao gồm tỷ số lợi ích – chi phí (BCR), giá trị hiện tại ròng (NPV), tỷ suất hoàn vốn nội bộ (IRR) và thời gian hoàn vốn (PBP) đã được tính toán.

Kịch bản S1 thể hiện khả năng tài chính và tiềm năng lợi nhuận mạnh mẽ. Cụ thể, BCR đạt 1,99, cho thấy hệ thống tạo ra 1,99 đồng lợi ích cho

số tự cung tự cấp của kịch bản S1, cho thấy sự biến thiên hàng tháng trong suốt cả năm.

Tháng hai, tháng sáu và tháng mười ghi nhận giá trị tự cung tự cấp cao nhất, đạt khoảng 70%, chứng tỏ hệ thống điện mặt trời có khả năng đáp ứng hiệu quả nhu cầu điện của trang trại trong những tháng này, với mức độ phụ thuộc tối thiểu vào lưới điện. Hiệu suất cao này chủ yếu là do điều kiện thời tiết thuận lợi và cường độ bức xạ mặt trời mạnh, giúp hệ thống phát điện tối ưu trong các giai đoạn này.

mỗi đồng đầu tư, khẳng định sức hấp dẫn kinh tế của dự án. NPV đạt 1,79 tỷ đồng, có nghĩa là dự án không chỉ thu hồi khoản đầu tư ban đầu mà còn mang lại lợi nhuận đáng kể khi được điều chỉnh theo giá trị thời gian của tiền. IRR là 10,44%, cao hơn đáng kể so với tỷ lệ chiết khấu giả định, phản ánh lợi tức đầu tư mạnh mẽ. Thời gian hoàn vốn (PBP) là 6,86 năm, ngắn hơn đáng kể so với tuổi thọ dự kiến của hệ thống, cho thấy dự án có khả năng thu hồi vốn nhanh và mang lại lợi ích kinh tế lâu dài.

Bảng 4. Các chỉ tiêu kinh tế của kịch bản S1

Thông số	BCR	NPV (tỷ đồng)	IRR (%)	PBP (năm)
Giá trị	1,99	1,79	10,44	6,86

3.5. Phân tích môi trường

Hình 6 so sánh lượng khí thải CO₂ giữa các kịch bản vận hành khác nhau của hệ thống, bao gồm S1, S2, S3 và kịch bản cơ sở S4. Cần lưu ý rằng, không giống như Bảng 2 chỉ phản ánh lượng phát thải trong quá trình vận hành, các giá trị trong Hình 6 đã bao gồm cả khí thải gián tiếp phát sinh từ quá trình sản xuất và vận hành các thành phần của hệ thống, đặc biệt là bộ lưu trữ năng lượng.

Kết quả cho thấy kịch bản S4 có lượng phát thải cao nhất, đạt khoảng 141,5 tấn CO₂, do phụ thuộc hoàn toàn vào nguồn điện lưới. Kịch bản S2 có mức phát thải tương đương, khoảng 86 tấn

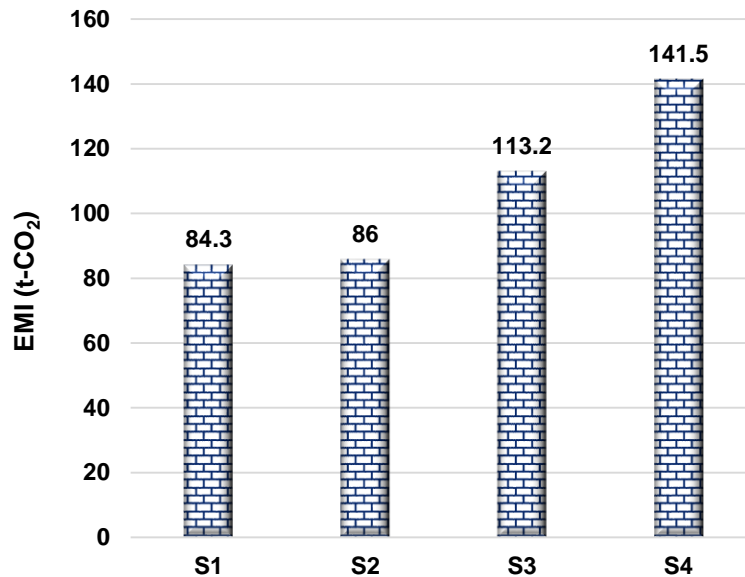
CO₂, do mặc dù có tích hợp năng lượng mặt trời nhưng vẫn phụ thuộc đáng kể vào điện lưới, đặc biệt trong thời gian ban đêm.

Đối với kịch bản S1, lượng phát thải CO₂ tăng lên khoảng 84,3 tấn khi xét thêm các yếu tố phát thải gián tiếp từ bộ lưu trữ. Mặc dù cao hơn so với giá trị phát thải vận hành trong Bảng 2, kịch bản này vẫn duy trì mức phát thải thấp hơn đáng kể so với kịch bản cơ sở S4. Đồng thời, việc tích hợp bộ lưu trữ giúp nâng cao khả năng khai thác năng lượng mặt trời, giảm phụ thuộc vào điện lưới và cải thiện tính ổn định của hệ thống.

Kịch bản S3 tiếp tục cho thấy lợi thế vượt trội

về môi trường với lượng phát thải khoảng 113,2 tấn CO₂ khi xét theo vòng đời. Mặc dù hệ thống độc lập gần như loại bỏ nhu cầu sử dụng điện lưới trong quá trình vận hành, nhưng dung lượng pin

lớn và sự phụ thuộc vào máy phát diesel làm gia tăng đáng kể lượng phát thải gián tiếp, dẫn đến tổng phát thải cao hơn so với kỳ vọng khi chỉ xét riêng giai đoạn vận hành.



Hình 3. So sánh lượng khí thải của các chế độ vận hành của hệ thống

Tổng hợp các kết quả phân tích cho thấy kịch bản S1 – hệ thống điện mặt trời nối lưới tích hợp bộ lưu trữ – vẫn là phương án phù hợp nhất khi xét đồng thời các khía cạnh kỹ thuật, kinh tế và môi trường. Về mặt kỹ thuật, hệ thống đảm bảo khả năng cung cấp điện ổn định với tỷ lệ tự tiêu thụ và tự cung tự cấp cao. Về mặt kinh tế, S1 đạt hiệu quả tài chính tốt với chi phí vận hành thấp và thời gian hoàn vốn hợp lý. Về mặt môi trường, mặc dù phát sinh thêm khí thải gián tiếp từ bộ lưu trữ, S1 vẫn giúp giảm đáng kể lượng phát thải CO₂ so với kịch bản cơ sở, đồng thời duy trì sự cân bằng hợp lý giữa hiệu quả kinh tế và môi trường.

Những kết quả này cho thấy việc tích hợp hệ thống lưu trữ cần được đánh giá trên toàn bộ vòng đời, thay vì chỉ xét riêng giai đoạn vận hành. Đồng thời, chúng khẳng định rằng giải pháp tối ưu không nhất thiết là phương án có phát thải thấp nhất, mà là phương án đạt được sự cân bằng hiệu quả giữa chi phí, hiệu suất kỹ thuật và tác động môi trường trong điều kiện thực tế.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng và đánh giá mô hình hệ thống điện mặt trời lai cho trang trại nuôi

tôm, dựa trên dữ liệu phụ tải thực tế, phản ánh sự biến thiên nhu cầu năng lượng theo từng giai đoạn sinh trưởng của tôm. Thông qua tối ưu hóa đa mục tiêu bằng thuật toán NSGA-II, bốn kịch bản vận hành đã được phân tích toàn diện theo các tiêu chí kỹ thuật, kinh tế và môi trường, bao gồm cả kịch bản cơ sở sử dụng hoàn toàn điện lưới.

Kết quả cho thấy các hệ thống tích hợp năng lượng mặt trời đều mang lại hiệu quả vượt trội so với kịch bản cơ sở, giúp giảm đáng kể chi phí vận hành và lượng phát thải CO₂. Trong đó, kịch bản S1 (nối lưới có bộ lưu trữ) đạt hiệu quả tổng thể tốt nhất, với chi phí hàng năm thấp nhất, đồng thời giảm đáng kể phát thải so với hệ thống truyền thống.

Mặc dù kịch bản S3 (hệ thống độc lập) đạt mức phát thải vận hành thấp nhất, nhưng chi phí cao làm hạn chế tính khả thi trong thực tế. Khi xét đến phát thải vòng đời, việc tích hợp bộ lưu trữ làm gia tăng khí thải gián tiếp; tuy nhiên, kịch bản S1 vẫn duy trì sự cân bằng hiệu quả giữa chi phí và môi trường, đồng thời đảm bảo độ tin cậy vận hành của hệ thống.

Những kết quả này cho thấy phương án tối

ưu không phải là phương án có phát thải thấp nhất, mà là phương án đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả kinh tế, độ tin cậy kỹ thuật và tác động môi trường. Nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn quan trọng cho việc triển khai các hệ thống năng lượng tái tạo trong nuôi trồng thủy sản, góp phần thúc đẩy phát triển bền vững và chuyển đổi năng lượng theo hướng phát thải thấp tại Đồng bằng sông Cửu Long.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Cần Thơ, Mã số: CTCS2025-02-05.

Tài liệu tham khảo

- [1] H. Villarreal. (2023). Shrimp farming advances, challenges, and opportunities. *Journal of the World Aquaculture Society*, 54(5), 1092-1095. <https://doi.org/10.1111/jwas.13027>
- [2] B.-Y. Chen, P.-L. Huang, Y.-L. Hou, H.-Y. Lan, C.-T. Huang, F.-H. Nan. (2024). The economic feasibility of aquavoltaics in Taiwan-A case study of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture. *Aquaculture*, 581, 740454. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.740454>
- [3] C. Jamroen, T. Suttikul. (2024). A geographic information system-assisted techno-economic assessment framework for aquavoltaic systems in shrimp farming. *Energy Reports*, 12, 881-891. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.06.059>
- [4] A. Aripriharta, A.W.S. Adji, M.C. Bagaskoro, S. Omar, G.-J. Horng. (2025). Techno-Economic Feasibility: Planning an On-Grid Solar Power System for Shrimp Pond Aeration. *Applied Science and Engineering Progress*, 18(2), 7616. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2024.11.003>
- [5]. H. Ariadi, A. Fahrurrozi, T. Mujtahidah. (2025). Analysis of energy efficiency and financial feasibility of using solar panels technology for paddle aerators in shrimp ponds. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 18(2), 1037-1045.
- [6]. Y. Kassem, H. Gokcekus, H. Camur, G. A. A. Alsakhni. (2025). Innovative Solar-Wind powered Aquaculture System: A Sustainable Solution for Aquaculture in Karbala, Iraq. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(3), 23649-23658. https://doi.org/10.48084/etasr.10979?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [7] Z. A. Fikriyadi, R. Nafiah, D.M.P. Utami. (2025). Optimisation of Solar-Powered Aerators for Shrimp Aquaculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1488, IOP Publishing, 012131. doi:10.1088/1755-1315/1488/1/012131
- [8] C.E. Boyd. (1989). Water Quality Management and Aeration in Shrimp Farming. *Fisheries and Allied Aquaculture Departmental Series No. 2*. Auburn, Alabama: Alabama Agricultural Experiments Stations.
- [9] J.A. Duffie, W.A. Beckman. (2013). Design of photovoltaic systems. Solar Engineering of Thermal Processes, 4th edition. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 745-773.
- [10] S. Wang et al. (2021). Battery system modeling. Elsevier.
- [11] M.S. Ismail, M. Moghavvemi, T. Mahlia. (2013). Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate. *Energy conversion and management*, 69, 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.005>
- [12] T. Adefarati et al. (2024). Design and techno-economic assessment of a standalone photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for electrification of rural areas: A step towards sustainable development. *Renewable Energy*, 227, 120556. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120556>
- [13] D.V. Phu, N.D. Ninh, L.T. Nhan, N.N. Tien. (2023). Optimization of a grid-connected solar photovoltaic system with battery storage. *TNU Journal of Science and Technology*, 228(14), 280-289. <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9041>

- [14] S. Dong, E. Kremers, M. Brucoli, R. Rothman, and S. Brown. (2020). Improving the feasibility of household and community energy storage: A techno-enviro-economic study for the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110009. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110009>
- [15] H. Ali, M. M. Rahman, K. Murshed-e-Jahan, G.C. Dhar. (2018). Production economics of striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*, Sauvage, 1878) farming under polyculture system in Bangladesh. *Aquaculture*, 491, 381-390. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.12.004>