NÂNG CAO HIỆU QUẢ NĂNG LƯỢNG TRONG HỆ THỐNG AQUAPONICS CÔNG NGHIỆP: GIẢI PHÁP TRAO ĐỔI NHIỆT

ENHANCING ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRIAL AQUAPONICS SYSTEMS: A HEAT EXCHANGE SOLUTION

Lê Anh Tuấn

Khoa Điện tử và Kỹ thuật máy tính, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 16/7/2025, chấp nhận đăng ngày 15/8/2025

Tóm tắt: Nghiên cứu này đánh giá thực nghiệm một bộ trao đổi nhiệt dạng cuộn xoắn ốc (HCHE) tích hợp với hệ thống lưu trữ năng lượng nhiệt (TES) để tối ưu hóa nhiệt độ nước trong hệ thống aquaponics công nghiệp nuôi cá nước ấm. Hệ thống đã được thử nghiệm ở ba mức nhiệt độ hoạt động 60, 70 và 80°C, với lưu lượng khối lượng là 0,166; 0,224 và 0,332 kg/giây để duy trì nhiệt độ ổn định ở mức 28°C trong bể cá 3,4 m³. Kết quả chứng minh rằng dải nhiệt độ 60-80°C và lưu lượng khối lượng 0,166-0,332 kg/giây hoàn toàn phù hợp vận hành mô hình, trong đó mức nhiệt độ 60°C là hoạt động hiệu quả nhất. Mức tiêu thụ điện năng của hệ thống để vận hành bơm (384–840 kJ) không đáng kể so với năng lượng nhiệt trong bể cá được cung cấp (49,6 MJ), giúp giảm đáng kể chi phí vận hành so với hệ thống sưởi ấm bằng điện trực tiếp. Giải pháp trao đổi năng lượng nhiệt này cho thấy tiềm năng lớn đối với hệ thống aquaponics công nghiệp bền vững, đặc biệt là trong việc cân bằng nhu cầu nhiệt của cá và cây trồng, đồng thời giảm thiểu việc sử dụng năng lượng điện.

Từ khóa: Aquaponics, HCHE, năng lượng, trao đổi nhiệt, TES.

Abstract: This study experimentally evaluates a helical coil heat exchanger (HCHE) integrated with thermal energy storage (TES) for optimizing water temperature in warm-water fish aquaponics. The system was tested at three operating temperatures, 60, 70, and 80°C with mass flow rates of 0.166, 0.224, and 0.332 kg/s to maintain a stable 28°C in a 3.4 m³ fish tank. Results demonstrate that 60°C was the most efficient operating temperature, achievable using conventional heat sources like solar collectors or heat pumps. The system's electrical energy consumption for pumping (384–840 kJ) was negligible compared to the thermal energy delivered (49.6 MJ), significantly reducing operational costs versus direct electric heating. This thermal energy exchange solution demonstrates significant potential for sustainable industrial aquaponics systems, particularly in balancing the thermal demands of fish and crops while minimizing electricity consumption.

Keywords: Aquaponics, HCHE, energy, heat exchanger, TES.

1. GIỚI THIỆU

An ninh lương thực đang đối mặt với những thách thức ngày càng gia tăng do áp lực từ sự bùng nổ dân số toàn cầu và suy giảm diện tích đất canh tác nông nghiệp truyền thống. Thực trạng độc canh trong sản xuất nông nghiệp hiện nay đã dẫn đến tình trạng khai thác quá mức tài nguyên đất và nước, đe dọa nghiêm trọng đến tính bền vững của hệ sinh thái [1]. Trong bối cảnh đó, hệ thống aquaponics (kết hợp trồng rau và nuôi cá tuần hoàn) đã nổi lên như một giải pháp sản xuất thực phẩm bền vững, giảm thiểu đáng kể nhu cầu về tài nguyên đất và nước so với phương pháp canh

tác truyền thống [2]. Tuy nhiên, hệ thống aquaponics đang đối mặt với thách thức lớn về sự không tương thích nhiệt độ tối ưu giữa các thành phần thủy sinh và thực vật. Trong khi các loại rau phát triển tốt nhất ở nhiệt độ ban ngày 20-30^{o}C và ban đêm 14-18^{o}C [3], các loài cá nước ấm như cá trê, cá diêu hồng, cá chép, cá hồi nhiệt đới và cá rô phi đòi hỏi nhiệt độ nước duy trì ở mức 25-30^{o}C với nhiệt độ tối ưu khoảng 28^{o}C để đảm bảo tốc độ tăng trưởng, tỷ lệ sống và các chức năng sinh lý [4, 5]. Sự chênh lệch nhiệt độ này, đặc biệt vào ban đêm, đã làm giảm hiệu quả tổng thể của hệ thống. Hiện nay, việc sử dụng các phương pháp sưởi ấm bằng điện để duy trì nhiệt độ nước tối ưu cho cá đang tiêu tốn 40-70% tổng năng lượng tiêu thụ của hệ thống aquaponics [6, 7], làm giảm đáng kể hiệu quả kinh tế và gia tăng lượng khí thải carbon. Trước thực tế này, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào phát triển các giải pháp nâng cao hiệu quả năng lượng trong hệ thống aquaponics quy mô công nghiệp, nhằm đồng thời đạt được lợi ích kinh tế và giảm thiểu tác động môi trường [8, 9].

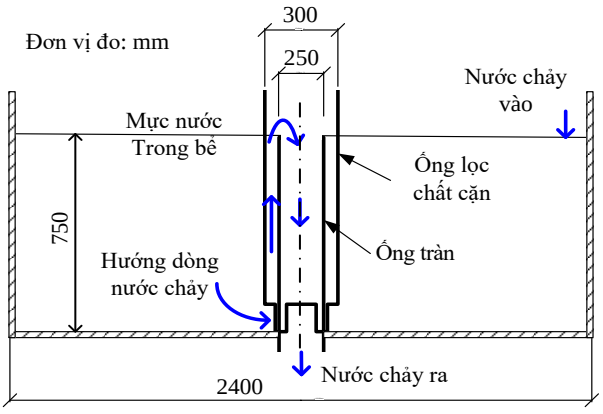
Nghiên cứu này trình bày một mô hình thực nghiệm tích hợp bộ trao đổi nhiệt dạng xoắn ốc (Helical Coil Heat Exchanger - HCHE) với hệ thống lưu trữ năng lượng nhiệt (Thermal Energy Storage - TES) nhằm tối ưu hóa hiệu suất trao đổi nhiệt và giảm tiêu thụ năng lượng điện trong hệ thống aquaponics. Nghiên cứu tập trung đánh giá hiệu suất của hệ thống ở ba mức nhiệt độ vận hành (60, 70 và 80^{o}C) và lưu lượng khối lượng (0,166; 0,224 và 0,332 kg/s) để duy trì nhiệt độ nước ổn định ở 28°C trong bể chứa 3,4 m³ phục vụ nuôi cá nước ấm. Đây có thể coi là bước đầu sử dụng mô hình này áp dụng trong trong hệ thống aquaponics công nghiệp trong thực tiễn.

Cấu trúc bài báo được tổ chức như sau: Phần 2 trình bày thiết kế thực nghiệm và phương pháp luận; Phần 3 phân tích kết quả thực nghiệm; và cuối cùng là kết luận cùng các đề xuất cho nghiên cứu tiếp theo.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Mô hình thực nghiệm

Bể nuôi cá là bể Hình trụ với đường kính 2,4 m, chiều cao thành bể là 1,0 m. Mực nước trong bể được giữ ở độ cao 0,75 m nhờ ống tràn để duy trì thể tích nước thực tế ở mức 3,4 m^3 (thể tích V= $\pi\times(1,2)^2\times0,75$=3,4 m^3) (Hình 1). Hình dạng của bể có Hình trụ tạo hiệu quả cung cấp chất lượng nước đồng đều và điều kiện pha trộn nước tốt hơn so với bể Hình chữ nhật [10].

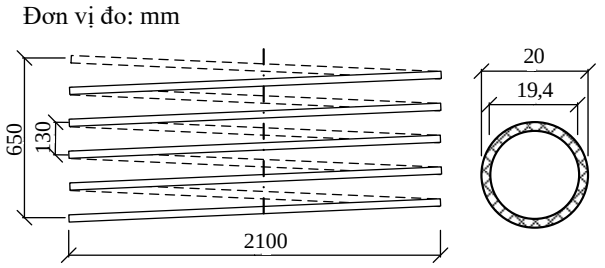


Hình 1. Kích thước Hình học của bể nuôi cá

Bộ trao đổi nhiệt HCHE được chế tạo từ ống thép không gỉ 304, ống có bề mặt trơn. HCHE có Hình dạng xoắn ốc, được đặt thẳng đứng trong bể cá. Kích thước Hình học của HCHE được thể hiện trong Bảng 1 và Hình 2.

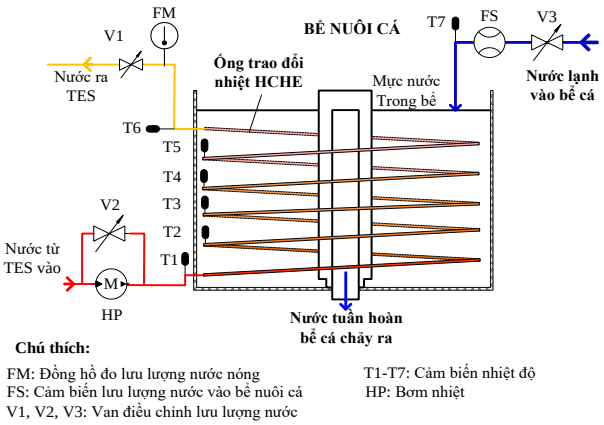
Bảng 1. Kích thước Hình học của HCHE

Tham số	Giá trị
Đường kính cuộn xoắn	2,1 m
Tổng chiều dài ống	34 m
Số vòng ống	5
Đường kính ngoài ống	20 mm
Đường kính trong ống	19,4 mm
Khoảng cách 1 vòng ống	130 mm



Hình 2. Kích thước Hình học của HCHE

Sơ đồ bộ trao đổi nhiệt giữa HCHE và bể cá được thể hiện trong Hình 3, bộ trao đổi nhiệt HCHE được cung cấp bởi nguồn nước nóng tuần hoàn (nước ngọt không pha trộn vật liệu thay đổi pha PCM) từ bể tích nhiệt TES thông qua bơm ly tâm HP, các van V1 và V2 để điều chỉnh lưu lượng nước nóng tuần hoàn trong HCHE.



Hình 3. Sơ đồ bộ trao đổi nhiệt giữa HCHE và bể cá

Nhiệt lượng được lưu trữ tại TES bằng hệ thống nước nóng năng lượng mặt trời độc lập hoặc có thể sử dụng kết hợp năng lượng mặt trời và máy bơm nhiệt nguồn không khí. Mặc dù hiệu suất lưu trữ năng lượng nhiệt của bể tích nhiệt TES không được tính toán trong nghiên cứu hiện tại, nhưng các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, so với hệ thống thông thường (điện hoặc dầu diesel), hiệu suất tích nhiệt của mô hình bể tích nhiệt TES này rất cao, tiêu thụ năng lượng điện dao động từ 1% đến 50% [11, 12].

2.2. Phương pháp thực nghiệm

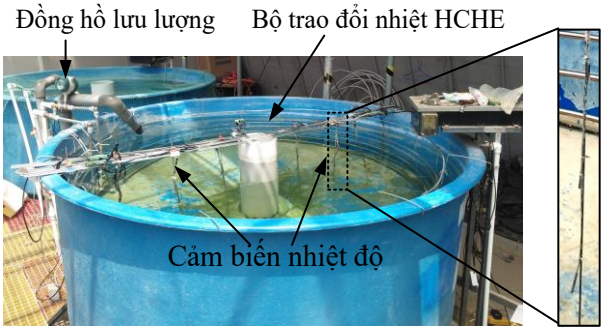
Thực nghiệm của nghiên cứu này được tiến hành dưới điều kiện trong nhà, với nhiệt độ môi trường dao động từ 25-32°C. Nước chảy vào bể cá được giữ không đổi với nhiệt độ 24,5± 0,5°C và lưu lượng khoảng 0,93 kg/s cho 5 trường hợp khác nhau của nước nóng tuần hoàn trong ống trao đổi nhiệt HCHE (Bảng 2).

Bảng 2. Các trường hợp thực nghiệm

Chế độ thực nghiệm	Lưu lượng (kg/s)	Nhiệt độ (°C, ±0,5)
TH 1	0,166	60
TH 2	0,249	
TH 3	0,332	
TH 4	0,166	70
TH 5		80

Nhiệt độ nước trong bể tích nhiệt TES đã được làm nóng đến giá trị yêu cầu và duy trì liên tục mức nhiệt độ của từng trường hợp. Để đánh giá hiệu suất nhiệt, các điểm kiểm tra về nhiệt độ đã được lắp đặt trên mô hình thực nghiệm, bao gồm:

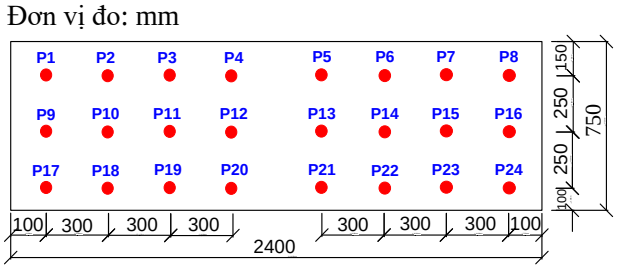
- Các cảm biến nhiệt (từ T1 – T6) được lắp tại HCHE để đo 6 điểm nhiệt độ của chất lỏng nóng: đầu vào, đầu ra, các vòng 1, 2, 3 và 4 của HCHE (Hình 3).



Hình 4. Sơ đồ bố trí các cảm biến đo trong bể cá thực nghiệm

- Tại bể cá có 1 điểm đo giám sát nhiệt độ nước chảy vào bể và 24 điểm đo (từ P1 đến P24) nhiệt độ nước trong lòng bể cá (Hình 4).

Các điểm đo này được chia thành 3 lớp với chiều cao lần lượt là 100, 350 và 600 mm. Mỗi lớp có 8 điểm đo với khoảng cách 300 mm, như thể hiện trong Hình 5.



Hình 5. Sơ đồ vị trí các điểm đo nhiệt độ nước trong bể cá

Các cảm biến đã được hiệu chỉnh trong dải nhiệt độ làm việc từ 0 đến 100°C bằng phần mềm với sai số giữa các cảm biến nhiệt độ trong phạm vi ± 0,3°C, và sai số ± 3% đối với cảm biến lưu lượng đo nước tuần hoàn bể cá. Đồng hồ đo lưu lượng được sử dụng để đo lưu lượng nước nóng của HCHE với dải nhiệt độ làm việc từ –20 đến 100°C, lưu lượng từ 1-50 L/phút, độ chính xác ±0,5% và áp suất làm việc ≤ 4,0 MPa. Máy bơm ly tâm có công suất điện (P) 200 W được sử dụng để bơm nước nóng tuần hoàn quá trình trao đổi nhiệt của HCHE, lưu lượng tối đa 2,2 kg/s ở cột áp định mức 8 m.

Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá hiệu quả trao đổi nhiệt giữa HCHE với bể nuôi cá nước ấm, vì vậy khi nhiệt độ trung bình của nước trong bể được đo tại 24 điểm nhiệt độ (P1-P24) đạt khoảng 30°C sẽ dừng chạy thí nghiệm. Hai lần chạy riêng biệt vào các thời điểm khác nhau đã được thực hiện để đánh giá dữ liệu thực nghiệm. Bước thời gian ghi dữ liệu tự động đặt là 30 giây và các kết quả tính toán nhiệt độ trong bể tại 28°C tối ưu đối với cá sẽ sử dụng phân tích cho nghiên cứu này.

2.3. Mô hình toán học

Tốc độ truyền nhiệt (Q_{he}) từ chất lỏng nóng trong HCHE đến bể được tính như sau:

$$Q_{he} = m_h C_p \Delta T_h \quad (1)$$

Trong đó: m_h là lưu lượng khối lượng của chất lỏng nóng; C_p là nhiệt dung riêng của chất lỏng; ΔT_h là sự thay đổi giữa nhiệt độ chất lỏng đầu vào và đầu ra của HCHE.

Tổng năng lượng nhiệt (Q_{TES}) cần thiết của bể tích nhiệt TES cung cấp để làm nóng nước bể nuôi cá từ 24,5°C đến 28°C với thời gian truyền nhiệt t_{he} được tính toán như sau:

$$Q_{TES} = Q_{he} t_{he} \quad (2)$$

Năng lượng nhiệt tích lũy Q_t của bể cá thu được từ HCHE cung cấp để làm nóng nước trong bể từ 24,5°C đến 28°C được tính theo công thức sau:

$$Q_t = \rho V_t C_p \Delta T_t \quad (3)$$

Trong đó: ρ là khối lượng riêng của nước; V_t là thể tích; ΔT_t là độ chênh lệch giữa nhiệt độ đầu và cuối của nước trong bể.

Hiệu suất năng lượng khả dụng của mô hình trao đổi nhiệt (η_{usable}) là tỷ số giữa năng lượng nhiệt tích lũy của nước trong bể cá (Q_t) và tổng năng lượng nhiệt (Q_{TES}) đã cung cấp như sau:

$$\eta_{usable} = \frac{Q_t}{Q_{TES}} \quad (4)$$

Tổng năng lượng điện tiêu thụ (Qe) của máy bơm cho quá trình trao đổi nhiệt của mô hình HCHE như sau:

$$Q_e = P\, t_{he} \quad (5)$$

Do nhiệt độ của chất lỏng trong HCHE biến đổi trong phạm vi lớn, vì vậy để có kết quả tính toán chính xác, các tham số về đặc tính của nước tuần hoàn trong HCHE bao gồm: khối lượng riêng (ρ); nhiệt dung riêng (Cp) tính theo các đa thức nhiệt độ Kelvin của chất lỏng như sau [13]:

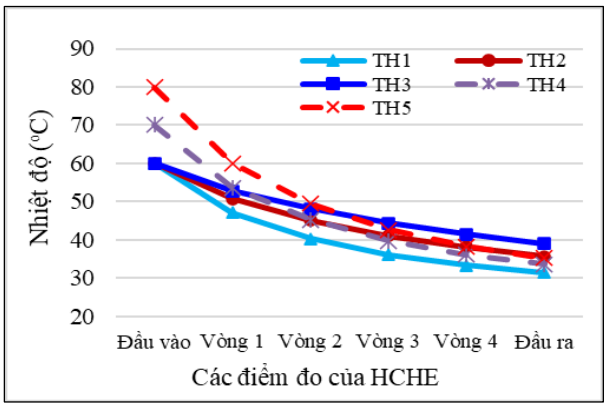
$$\rho(T) = -1{,}5629e{-}5T^3 + 0{,}011778T^2 - 3{,}0726T + 1227{,}8 \quad (6)$$

$C_p(T) = 1{,}1105e{-}5T^3 - 0{,}0031078T^2 - 1{,}478T + 4631{,}9$ (7)

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

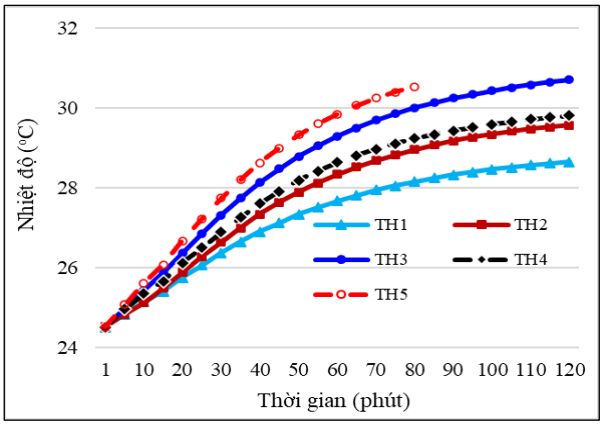
3.1. Biến đổi nhiệt độ của HCHE và bể cá

Biến đổi nhiệt độ trung bình tại 6 điểm đo của chất lỏng nóng cho 5 trường hợp thực nghiệm được thể hiện trong Hình 6.



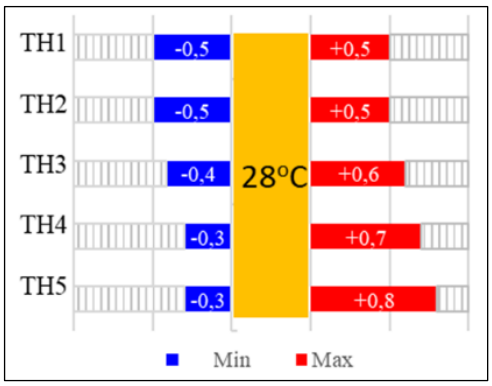
Hình 6. Biến đổi nhiệt độ của chất lỏng nóng trong HCHE

Kết quả thí nghiệm cho thấy mối quan hệ phi tuyến giữa nhiệt độ và lưu lượng cho mọi trường hợp, trong đó ở lưu lượng 0,166 kg/s, nhiệt độ đầu ra giữa các trường hợp chênh lệch không đáng kể (~3°C), nhưng khi tăng lưu lượng từ 0,166 lên 0,332 kg/s, nhiệt độ đầu ra tăng ~8°C.



Hình 7. Biến đổi nhiệt độ nước trung bình trong bể cá của 5 trường hợp thực nghiệm

Thời gian làm nóng nước bể từ 24,5°C lên 28°C dao động từ 32-70 phút (Hình 7), ngắn nhất ở TH5 (80°C, 0,166 kg/s) và dài nhất ở TH1 (60°C, 0,166 kg/s). Khi tăng 100% lưu lượng (từ TH1 sang TH3) giúp giảm 47% thời gian (từ 70 còn 37 phút), trong khi tăng 33% nhiệt độ (từ TH1 sang TH5) đã giảm 54% thời gian (từ 70 còn 32 phút), chứng tỏ nhiệt độ chất lỏng có ảnh hưởng lớn hơn lưu lượng đến hiệu suất truyền nhiệt.



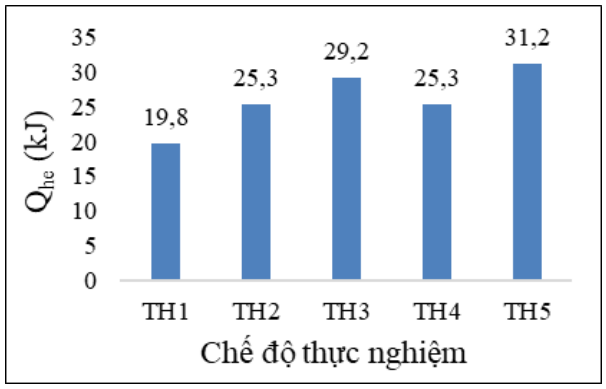
Hình 8. Phạm vi nhiệt độ dao động trong bể

Những kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây của Yang, Xiong [14], họ đã nghiên cứu quá trình lưu trữ năng lượng nhiệt bằng cách sử dụng bộ trao đổi nhiệt HCHE. Kết quả cũng cho thấy thời gian lưu trữ nhiệt giảm hơn 50% khi nhiệt độ đầu vào của chất lỏng truyền nhiệt tăng từ 55 lên 70°C, trong khi lưu lượng khối lượng của chất lỏng vẫn duy trì không đổi. Phạm vi nhiệt độ dao động của 24 điểm đo so với nhiệt độ trung bình trong bể là 1°C cho cả 5 trường hợp (Hình 8). Trường hợp TH1 và TH2, nhiệt độ của 24 điểm đo dao động phạm vi 28±0,5°C. Tuy nhiên, khi nhiệt độ đầu vào HCHE tăng lên (TH4 và TH5) hoặc lưu lượng tăng (TH3), các điểm đo nhiệt độ cao hơn nhiệt độ trung bình có xu hướng tăng lên. Điểm nhiệt độ cao nhất ghi nhận được là +0,8°C so với nhiệt độ trung bình tại TH5. Mặc dù có sự gia tăng nhẹ này, nhưng phạm vi nhiệt độ dao động xung quanh mức 28°C của 5 trường hợp được nghiên cứu vẫn trong phạm vi an toàn cho các quá trình sinh học và sinh sản của cá (phạm vi 25-30°C). Mặc

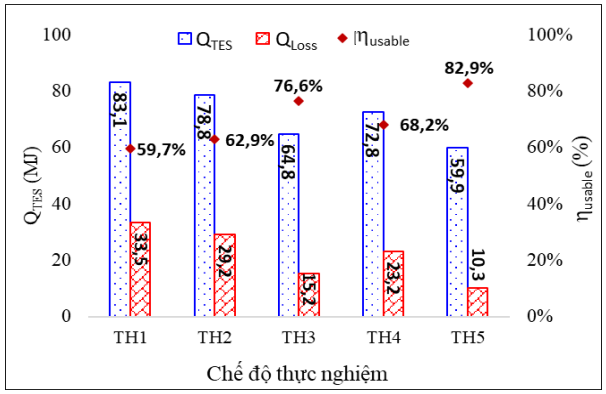
dù tăng nhiệt độ đầu vào chất lỏng nóng của bộ trao đổi nhiệt HCHE làm gia tăng dải nhiệt độ lệch về phía dương, nhưng điều này cũng dẫn đến tăng hiệu quả trao đổi nhiệt, giảm thời gian vận hành của máy bơm, từ đó cải thiện hiệu quả tổng thể của hệ thống. Do đó, trong dải nhiệt độ của nghiên cứu này, mức nhiệt độ 60°C là phù hợp nhất cho quá trình trao đổi nhiệt của mô hình. Mức nhiệt độ này không chỉ dễ dàng đạt được bằng các nguồn nhiệt của bộ thu nhiệt mặt trời hay hệ thống bơm nhiệt, mà còn mang lại hiệu quả vượt trội của hệ thống và giữ cho môi trường sống của cá luôn ổn định và an toàn.

3.2. Hiệu suất trao đổi nhiệt

Tốc độ truyền nhiệt (Q_{he}) của 5 trường hợp thực nghiệm được thể hiện trong Hình 9, giá trị Q_{he} của trường hợp 5 là cao nhất (31,2 kJ) và trường hợp 1 là thấp nhất (19,8 kJ).



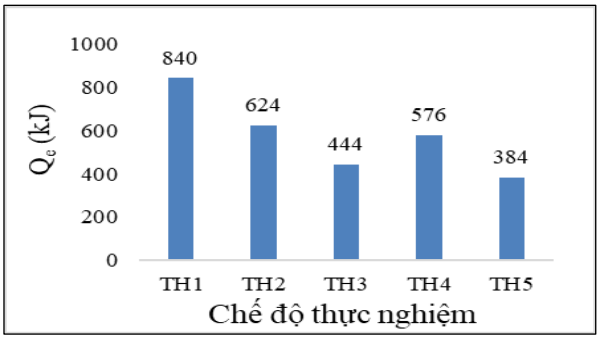
Hình 9. Tốc độ truyền nhiệt của HCHE đến bể



Hình 10. Tổng năng lượng nhiệt cung cấp và hiệu suất năng lượng của mô hình

Các trường hợp 2 và 4 tương tự như nhau, xấp xỉ là 25 kJ. Năng lượng nhiệt tích lũy Q_t của bể là 49,6 MJ để nâng nhiệt độ 3,4 m³ nước từ 24,5 lên 28°C trong 5 trường hợp được xem xét, trong khi tổng năng lượng nhiệt Q_{TES} cung cấp HCHE dao động từ 59,9-83,1 MJ với lượng nhiệt thất thoát (Q_{Loss}) từ 10,3-33,5 MJ, tương ứng hiệu suất năng lượng khả dụng (η_{usable}) trong phạm vi từ 59,7% đến 82,9% (Hình 10).

Từ kết quả của Hình 10 cho thấy giá trị η_{usable} cao nhất tại TH5 do tổn thất nhiệt (Q_{Loss}) là nhỏ nhất (10,3 MJ). Tổn thất nhiệt của hệ thống chủ yếu bao gồm tổn thất qua đối lưu và bức xạ từ bề mặt tự do của nước và thành bể ra môi trường xung quanh. Theo các định luật truyền nhiệt cơ bản, tốc độ tổn thất nhiệt này tỷ lệ thuận với thời gian truyền nhiệt (t_{he}) và chênh lệch nhiệt độ giữa hệ thống và môi trường (ΔT). Vì vậy, khi vận hành ở nhiệt độ 80°C so với mức 60 °C, ΔT tăng 33%, nhưng t_{he} giảm 54%, và so với mức 70°C, ΔT tăng 14%, nhưng t_{he} giảm 33%. Do đó, xét tổng thể Q_{Loss} tại nhiệt độ 80°C nhỏ hơn so với mức 60°C và 70°C. Mặt khác, hệ thống thí nghiệm trong nghiên cứu này được thiết lập với chế độ nước chảy một chiều (không tuần hoàn nước thải), do đó kết quả hiệu suất có thể thấp hơn so với hệ thống thực tế – nơi nhiệt độ nước tăng dần nhờ tuần hoàn liên tục. Lượng điện năng tiêu thụ để vận hành máy bơm 200 W dao động 384 - 840 kJ cho quá trình trao đổi nhiệt của mô hình (Hình 11).



Hình 11. Tổng năng lượng vận hành máy bơm

Mô hình trao đổi nhiệt HCHE trong nghiên cứu này không chuyển đổi điện trực tiếp thành nhiệt mà chỉ sử dụng điện để bơm chất lỏng nóng từ bể TES đến HCHE, các kết quả vẫn còn điểm hạn chế khi chưa đối sánh một bể cá tương tự được gia nhiệt bằng máy sưởi điện thương mại để đối chứng hiệu quả của mô hình trao đổi nhiệt. Tuy nhiên, các kết quả nghiên cứu cho thấy mức tiêu thụ điện năng cho vận hành hệ thống (384-840 kJ) là rất thấp so với lượng nhiệt có ích mà bể thu nhận được (49,6 MJ). Kết hợp với các nghiên cứu trước đây về hiệu suất lưu trữ năng lượng của bể tích nhiệt (TES) [11, 12], có thể khẳng định mô hình trao đổi nhiệt HCHE này mang lại hiệu quả năng lượng rõ rệt, giúp giảm đáng kể chi phí vận hành so với phương pháp sưởi bằng điện trở trực tiếp. Những phát hiện này mở ra triển vọng ứng dụng đầy tiềm năng cho các hệ thống sản xuất thực phẩm theo hướng tiết kiệm năng lượng.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã phát triển mô hình tích hợp bộ trao đổi nhiệt xoắn ốc (HCHE) và hệ thống lưu trữ nhiệt (TES) để tối ưu hiệu suất và giảm tiêu thụ điện trong hệ thống aquaponics. Kết quả cho thấy, dải nhiệt độ 60–80°C phù hợp cho hệ thống, trong đó 60°C là tối ưu và dễ đạt được bằng nguồn nhiệt mặt trời hoặc hệ thống bơm nhiệt, đồng thời giữ cho môi trường sống của cá luôn ổn định và an toàn. Hệ thống chỉ tiêu tốn 384–840 kJ điện để vận hành máy bơm nhưng cung cấp tới 49,6 MJ nhiệt, giảm đáng kể chi phí so với sưởi điện trực tiếp. Tuy nhiên, các kết quả đánh giá chưa toàn diện do còn điểm hạn chế khi chưa đối sánh một bể cá tương tự được gia nhiệt bằng máy sưởi điện thương mại và hệ thống không tái sử dụng nước thải từ bể cá chảy ra. Do đó, cần nghiên cứu bổ sung để đánh giá hiệu suất thực tế chính xác và toàn diện hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hampf, A.C., et al., "Future yields of double-cropping systems in the Southern Amazon, Brazil, under climate change and technological development", Agricultural Systems, 177, pp. 102707, (2020).

[2] Love, D.C., et al., "Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey", Aquaculture, 435, pp. 67-74, (2015).

[3] Inthichack, P., Y. Nishimura, and Y. Fukumoto, "Diurnal temperature alternations on plant growth and mineral absorption in eggplant, sweet pepper, and tomato", Horticulture, Environment, and Biotechnology, 54(1), pp. 37-43, (2013).

[4] El-Sayed, A.-F.M., "Tilapia culture". Academic press, (2019).

[5] Islam, M.J., A. Kunzmann, and M.J.J.J.o.t.W.A.S. Slater, "Responses of aquaculture fish to climate change□ induced extreme temperatures: A review", Journal of the World Aquaculture Society, 53(2), pp. 314-366, (2022).

[6] Zou, Y., et al., "Effect of seasonal variation on nitrogen transformations in aquaponics of northern China", Ecological Engineering, 94, pp. 30-36, (2016).

[7] Delaide, B., et al., "Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system", Aquacultural Engineering, 78, pp. 130-139, (2017).

[8] Kyaw, T.Y. and A.K. Ng, "Smart Aquaponics System for Urban Farming", Leveraging Energy Technologies and Policy Options for Low Carbon Cities, 143, pp. 342-347, (2017).

[9] Fu, X., et al., "A Review of Key Technologies and Trends in the Development of Integrated Heating and Power Systems in Agriculture", 23(2), pp. 260, (2021).

[10] Duarte, S., et al., "Influence of tank geometry and flow pattern in fish distribution", Aquacultural engineering 44(2), pp. 48-54, (2011).

[11] Gautam, A., et al., "A review on technical improvements, economic feasibility and world scenario of solar water heating system", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, pp. 541-562, (2017).

[12] Allouhi, A., et al., "Solar domestic heating water systems in Morocco: An energy analysis", Energy Conversion and Management, 92, pp. 105-113, (2015).

[13] Jayakumar, J.S., et al., "Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers", Chemical Engineering Research and Design, 86(3), pp. 221-232, (2008).

[14] Yang, X., et al., "Investigation of the dynamic melting process in a thermal energy storage unit using a helical coil heat exchanger", Energies, 10(8), pp. 1129, (2017).

Thông tin liên hệ: **Lê Anh Tuấn**

Điện thoại: 0944447827 - Email: latuan@uneti.edu.vn

Khoa Điện tử và Kỹ thuật máy tính, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.