

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA HÌNH DẠNG CÁNH TẢN NHIỆT ĐẾN TỐC ĐỘ LƯU TRỮ NHIỆT CỦA ẮC QUY NHIỆT DẠNG HÌNH TRỤ BẰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF FIN SHAPE ON HEAT STORAGE RATE OF CYLINDRICAL THERMAL BATTERIES USING THE NUMERICAL METHOD

TRẦN THỂ NAM¹, DƯƠNG XUÂN QUANG^{2*}

¹Phòng Khoa học - Công nghệ, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: duongxuanquang@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Nghiên cứu này tập trung tối ưu hóa quá trình truyền nhiệt trong hệ thống pin nhiệt sử dụng vật liệu chuyển pha (PCM) nhằm nâng cao hiệu suất lưu trữ năng lượng. Mô hình 2D với 28,500 phần tử được xây dựng, trong đó sáp parafin được sử dụng làm PCM và polystyrene (EPS) làm vật liệu cách nhiệt. Bốn cấu hình cánh tản nhiệt được phân tích: Case 1 sử dụng cánh thẳng; Case 2 bổ sung nhánh nghiêng 30°; Case 3 có thêm nhánh trên cùng; và Case 4 kết hợp hai nhánh ở thân và đỉnh. Kết quả cho thấy, so với mô hình cơ bản (Case 1), các thiết kế có cánh tản nhiệt - đặc biệt là Case 3 và 4 - đẩy nhanh quá trình nóng chảy PCM, rút ngắn thời gian đạt cân bằng nhiệt và tăng tổng lượng nhiệt hấp thụ từ 16% đến 20%. Các thiết kế này cũng giúp duy trì nhiệt độ trung bình của PCM cao hơn, cải thiện đáng kể hiệu suất truyền nhiệt. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở quan trọng cho việc phát triển hệ thống lưu trữ nhiệt trong các ứng dụng năng lượng mặt trời, thông gió và điều hòa không khí (HVAC), đồng thời mở ra hướng nghiên cứu mới nhằm tối ưu hóa hơn nữa thông qua các chiến lược kiểm soát nhiệt độ động.

Từ khóa: Ắc quy nhiệt, thay đổi pha, cánh tản nhiệt, lưu trữ nhiệt, CFD.

Abstract

This study investigates the optimization of heat transfer in a thermal battery system using phase change material (PCM) to enhance energy storage efficiency. A 2D model with 28,500 elements is developed, utilizing paraffin wax as the PCM and polystyrene (EPS) for insulation. Four fin configurations are analyzed: Case 1 features straight fins; Case 2 incorporates 30° inclined branches; Case 3 includes a top branch; and Case 4 combines two branches at the body and top. Compared to the baseline (Case 1), fin-enhanced designs - particularly Cases 3 and 4 - significantly accelerate PCM melting, reduce thermal equilibrium time, and increase total heat absorption by 16% to 20%. These configurations also achieve a higher average PCM temperature, improving overall heat transfer efficiency. The findings provide valuable insights for advancing thermal storage systems in solar energy and HVAC applications while highlighting opportunities for further optimization through dynamic temperature control strategies.

-significantly accelerate PCM melting, reduce thermal equilibrium time, and increase total heat absorption by 16% to 20%. These configurations also achieve a higher average PCM temperature, improving overall heat transfer efficiency. The findings provide valuable insights for advancing thermal storage systems in solar energy and HVAC applications while highlighting opportunities for further optimization through dynamic temperature control strategies.

Keywords: thermal battery, phase change, fin shape, heat storage, CFD.

1. Mở đầu

Năng lượng tái tạo đóng vai trò quan trọng trong việc giảm thiểu sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch và giảm tác động tiêu cực đến môi trường [1]. Trong đó, năng lượng mặt trời là một trong những nguồn năng lượng dồi dào nhất, có thể được khai thác và sử dụng theo nhiều cách khác nhau, phổ biến là chuyển đổi thành điện năng hoặc nhiệt năng. Lưu trữ nhiệt năng là một phương pháp quan trọng giúp tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng mặt trời, đảm bảo cung cấp nhiệt liên tục ngay cả khi không có bức xạ mặt trời [2].

Ắc quy nhiệt là một hệ thống lưu trữ năng lượng nhiệt có khả năng giữ và giải phóng nhiệt theo yêu cầu. Các nghiên cứu trước đây đã phát triển nhiều mô hình ắc quy nhiệt khác nhau, trong đó vật liệu thay đổi pha (PCM) được sử dụng phổ biến do khả năng hấp thụ và giải phóng nhiệt hiệu quả [3]. PCM có thể giúp tăng cường mật độ lưu trữ nhiệt, làm cho ắc quy nhiệt trở thành một giải pháp tối ưu so với các phương pháp lưu trữ nhiệt truyền thống [4], [5]. Nghiên cứu cũng cho thấy ắc quy nhiệt có khả năng lưu trữ năng lượng cao gấp ba lần so với bộ lưu trữ nhiệt thông thường [6]. Bên cạnh đó, các mô hình tiên tiến như ắc quy nhiệt sử dụng PCM kết hợp với bộ trao đổi nhiệt dạng ống có cánh đang được nghiên

cứ để cải thiện hiệu suất lưu trữ và giải phóng nhiệt [7], [8].

Ống có cánh được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống trao đổi nhiệt để tăng diện tích bề mặt tiếp xúc và cải thiện khả năng truyền nhiệt. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng số lượng, kích thước và hình dạng cánh tản nhiệt có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất truyền nhiệt. Việc tối ưu hóa thiết kế cánh tản nhiệt có thể nâng cao đáng kể hiệu quả của hệ thống trao đổi nhiệt, từ đó cải thiện hiệu suất của ắc quy nhiệt [9].

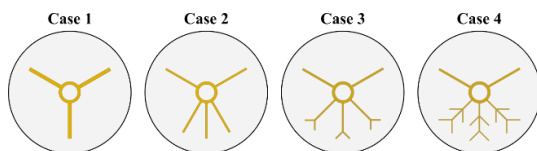
Mặc dù có nhiều nghiên cứu về ắc quy nhiệt và ống có cánh, nhưng ảnh hưởng của hình dạng cánh tản nhiệt đến tốc độ lưu trữ nhiệt vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Việc đánh giá và mô phỏng tác động của hình dạng cánh tản nhiệt trong hệ thống ắc quy nhiệt sẽ cung cấp thông tin quan trọng để tối ưu hóa thiết kế và nâng cao hiệu quả lưu trữ nhiệt. Chính vì vậy, nghiên cứu này tập trung vào việc xây dựng mô phỏng số để phân tích các yếu tố ảnh hưởng và đưa ra giải pháp thiết kế tối ưu của hình dạng cánh tản nhiệt sử dụng cho ắc quy nhiệt.

2. Mô hình mô phỏng

2.1 Mô hình ắc quy nhiệt

Mô hình ắc quy nhiệt với các thiết kế cánh tản nhiệt khác nhau được nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của hình dạng cánh đến hiệu suất lưu trữ nhiệt (Hình 1). Bốn thiết kế bao gồm: Case 1 - cánh thẳng, Case 2 - cánh thẳng có nhánh nghiêng 30°, Case 3 - cánh thẳng với nhánh tại đỉnh, và Case 4 - cánh thẳng với hai nhánh tại thân và đỉnh. Các thông số chi tiết của từng thiết kế được trình bày trong Bảng 1. Để đảm bảo so sánh chính xác về hiệu suất lưu trữ nhiệt, chiều dày của các cánh được điều chỉnh sao cho tổng diện tích mặt cắt ngang bằng nhau, tức là khối lượng vật liệu sử dụng là không đổi. Các cánh tản nhiệt này được hàn dọc theo chiều dài của ống đồng có đường kính ngoài 20mm, chiều dày 2mm.

Đồng thời, trong nghiên cứu này, vật liệu thay đổi pha (PCM) được sử dụng là sáp nến (Paraffin Wax),



Hình 1. Mô hình ắc quy nhiệt sử dụng ống có cánh với các hình dáng khác nhau

với các đặc tính nhiệt động học được liệt kê trong Bảng 2. PCM được điền đầy vào ắc quy nhiệt có đường kính 120mm và được bao bọc bởi lớp xốp cách nhiệt Expandable PolyStyrene (EPS), giúp hạn chế tác động của môi trường bên ngoài. Nhờ đó, hiệu suất lưu trữ và khả năng duy trì nhiệt của hệ thống được cải thiện rõ rệt, tạo điều kiện thuận lợi cho việc đánh giá tác động của các thiết kế cánh tản nhiệt.

Bảng 1. Thông số của cánh tản nhiệt

Tên trường hợp	Chiều dày cánh	Chiều cao cánh	Chiều cao nhánh	Góc nghiêng
Case 1	3	35	0	120
Case 2	2	35	0	120-30
Case 3	1.5	30	5	120-45
Case 4	1.5	20	10	120-45

Bảng 2. Tính chất vật lý của Parafin

Tham số	Giá trị	Đơn vị
Nhiệt độ nóng chảy (T_m)	43-56	°C
Khối lượng riêng (ρ_s/ρ_l)	970/900	kg/m ³
Nhiệt dung riêng ($C_{p,s}/C_{p,l}$)	2,0/2,9	kJ/kgK
Nhiệt nóng chảy (ΔH_m)	210	kJ/kg
Hệ số dẫn nhiệt (k)	0,22/0,24	W/mK

2.2 Mô hình toán

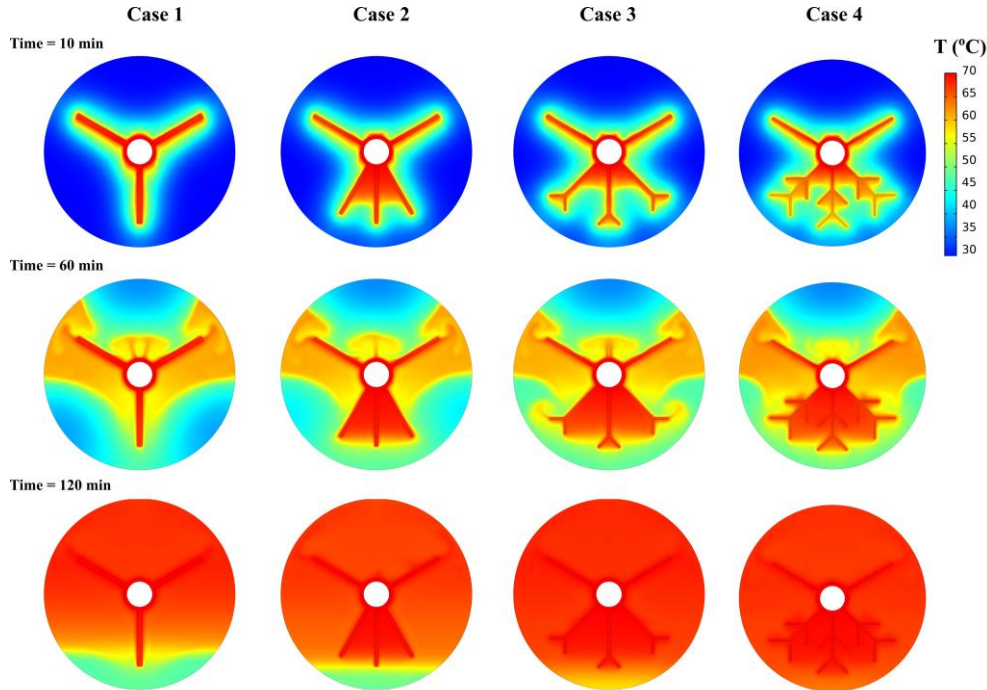
Quá trình trao đổi nhiệt và sự thay đổi pha của vật liệu PCM được mô tả bằng các phương trình toán học gồm: Navier-Stokes và các phương trình năng lượng. Các phương trình này giải gần đúng bằng phương pháp số. Một số giả thiết được đưa ra ở đây là:

- Chất lỏng không nén được;
- Sự giãn nở thể tích của PCM khi chuyển pha là không đáng kể;
- Tính chất nhiệt động học giữa trạng thái rắn và lỏng không thay đổi và bằng nhau.

Theo giả thiết trên các phương trình của định luật bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng của hệ có thể được viết dưới dạng:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) + S \vec{u} = -\vec{\nabla} p_d + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g} \quad (2)$$



Hình 2. Phân bố nhiệt độ theo thời gian

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} C_{pl} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

Trong đó $\vec{u}$ là vận tốc của hỗn hợp chất lỏng-rắn, được định nghĩa là vận tốc chất lỏng trung bình trên một thể tích đại diện có thể chứa cả pha lỏng và pha rắn.

Entanpi h bao gồm cả các thành phần nhiệt hiện và nhiệt ẩn xác định theo công thức (4) sau đây:

Mối quan hệ giữa enthalpy và nhiệt độ được thể

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \text{ và } \Delta h = f_l \Delta H_m \quad (4)$$

Với MF - hệ số nóng chảy là tỷ lệ thể tích PCM chất lỏng/thể tích PCM rắn xác định theo công thức (5).

$$MF = \begin{cases} 0 & \text{Khi } T < T_{sl} \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{Khi } T_s < T < T_l \\ 1 & \text{Khi } T_l < T \end{cases} \quad (5)$$

Nhiệt lượng lưu trữ trong PCM được xác định theo công thức:

$$Q = \int_{t_0}^t \left[m_{PCM} C_{p,PCM} (T - T_i) + m_{PCM} MF \Delta H_m \right] dt \quad (6)$$

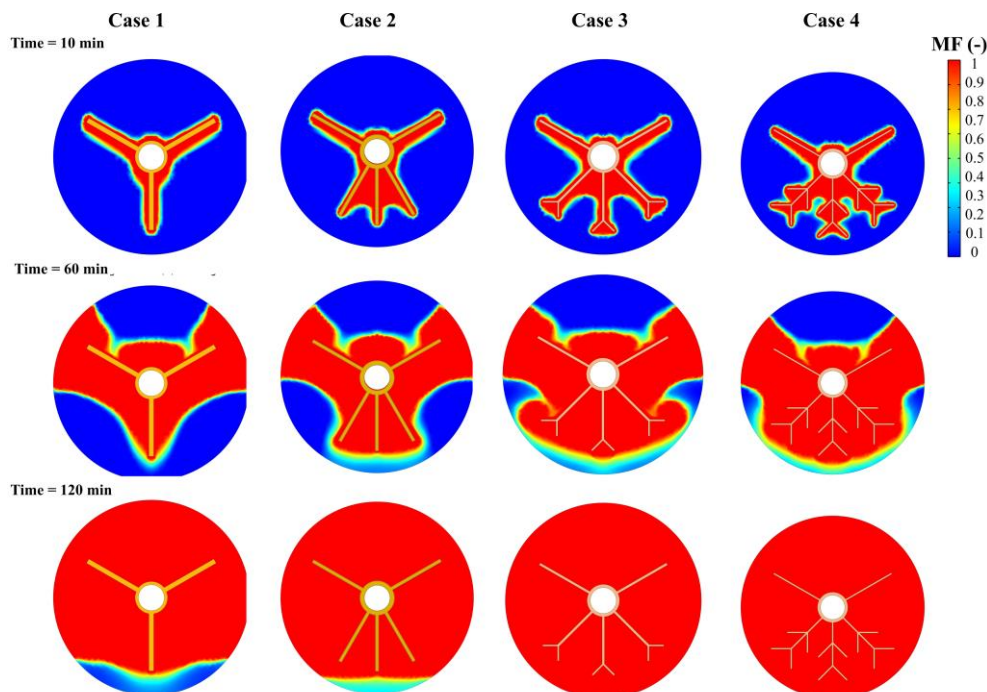
Với m_{PCM} , $C_{p,PCM}$ lần lượt là khối lượng và nhiệt dung riêng của PCM, T_i và T là nhiệt độ ban đầu và nhiệt độ tại thời điểm t của PCM.

3. Kết quả và thảo luận

Mô hình ác quy nhiệt được mô phỏng dưới dạng mặt cắt hai chiều (2D) nhằm tối ưu hóa thời gian và khối lượng tính toán trong phần mềm CFD. Cách tiếp cận này giúp giảm chi phí tính toán đáng kể mà vẫn đảm bảo độ chính xác nhờ tính đối xứng của hệ thống. Điều kiện nhiệt độ ban đầu của PCM là 30°C và nhiệt độ bề mặt trong của ống duy trì ở 70°C theo điều kiện thực nghiệm.

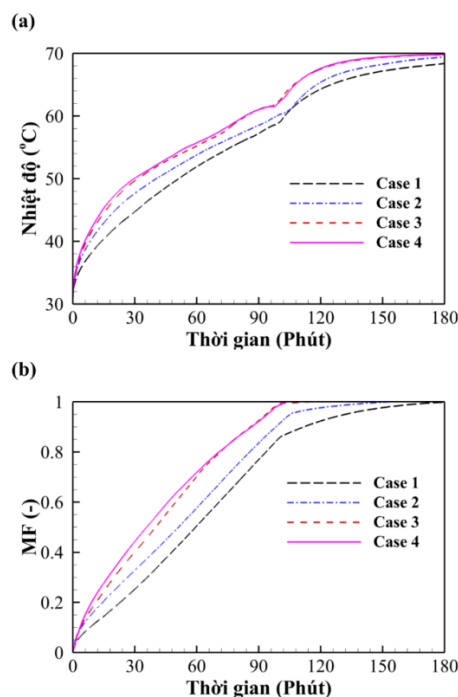
Để đảm bảo tính chính xác của mô phỏng, chúng tôi đã thực hiện phân tích hội tụ lưới bằng cách kiểm tra kết quả với các số phần tử khác nhau (24000, 28500, 32000, 36000) và các bước thời gian (0,1s; 0,5s; 1s; 2s) khác nhau. Khi số phần tử vượt quá 28500, sự sai lệch trong nhiệt độ và tốc độ truyền nhiệt nhỏ hơn 0,5%, cho thấy kết quả đã đạt độ hội tụ ổn định. Việc tiếp tục tinh chỉnh lưới không cải thiện đáng kể độ chính xác nhưng làm tăng chi phí tính toán. Do đó, 28500 phần tử được chọn làm cấu hình tối ưu. Bước thời gian mô phỏng là 1s để đảm bảo độ tin cậy và hiệu quả tính toán.

Bốn thiết kế cánh tản nhiệt khác nhau (Case 1, Case 2, Case 3 và Case 4) được phân tích để đánh giá mức độ ảnh hưởng đến quá trình truyền nhiệt và chuyển pha của PCM theo thời gian.



Hình 3. Phân bố pha rắn - lỏng của PCM theo thời gian

Hình 2 và Hình 3 trình bày sự tiến triển của quá trình nóng chảy và phân bố nhiệt độ của PCM theo thời gian tại các mốc 10 phút, 60 phút và 120 phút cho bốn trường hợp thiết kế (Case 1 đến Case 4). Sau 10 phút, vùng PCM nóng chảy chỉ tập trung ở gần bề mặt tiếp xúc với ống nhiệt, với sự phát triển chủ yếu về phía trên do ảnh hưởng của đối lưu tự nhiên. Sau 60 phút, thể tích PCM nóng chảy mở rộng đáng kể, đặc biệt ở các trường hợp có cánh tản nhiệt, cho thấy sự phân bố nhiệt độ đồng đều hơn. Đến 120 phút, sự khác biệt giữa các trường hợp càng trở nên rõ ràng, khi Case 4 có mức độ nóng chảy cao nhất và đồng đều nhất, trong khi Case 1 vẫn còn một lượng PCM chưa hoàn toàn chuyển pha, phản ánh hiệu suất truyền nhiệt kém hơn. Ở Case 1, sự đối lưu tự nhiên của PCM lỏng khi khối lượng riêng thay đổi theo nhiệt độ đã dẫn đến sự phát triển không đồng đều của vùng nóng chảy, tập trung chủ yếu ở phần trên của ống trong khi phần dưới tan chảy chậm hơn. Ngược lại, Case 2 với sự bổ sung của hai cánh tản nhiệt ở phía dưới giúp tăng diện tích trao đổi nhiệt, dẫn đến sự nóng chảy đồng đều hơn giữa hai nửa trên và dưới của ống chứa PCM. Xu hướng này tiếp tục được cải thiện ở Case 3 và Case 4, khi các cấu trúc tản nhiệt phức tạp hơn giúp tối ưu hóa quá trình truyền nhiệt, làm tăng tốc độ nóng chảy và cải thiện sự đồng nhất của phân bố nhiệt.



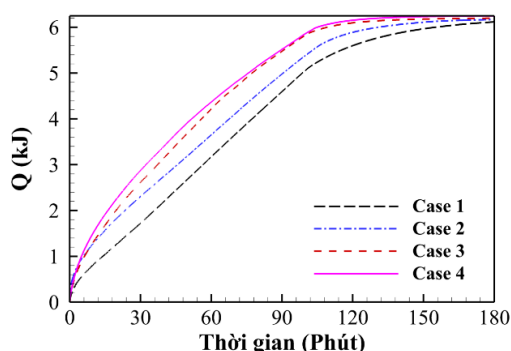
Hình 4. Nhiệt độ (a) và MF (b) theo thời gian

Hình 4 mô tả sự thay đổi của nhiệt độ trung bình và tỉ lệ tan chảy của PCM (MF). Từ đồ thị MF, có thể thấy rằng Case 1 có tốc độ nóng chảy chậm nhất, trong khi Case 4 đạt trạng thái nóng chảy hoàn toàn trong thời gian ngắn nhất. Đặc biệt, sau 60 phút, Case 4 đã nóng chảy hơn 80%, trong khi Case 1 chỉ

đạt khoảng 60%. Điều này chứng tỏ rằng việc bổ sung các cánh tản nhiệt đóng vai trò quan trọng trong việc thúc đẩy quá trình truyền nhiệt trong PCM.

Bên cạnh đó, đồ thị nhiệt độ trung bình của PCM phản ánh rõ ràng tác động của các cánh tản nhiệt trong việc cải thiện hiệu suất nhiệt. Sau 90 phút, nhiệt độ trung bình của PCM ở Case 4 cao hơn Case 1 khoảng 6°C, trong khi Case 3 cao hơn 4,5°C. Điều này nhấn mạnh vai trò của việc mở rộng diện tích trao đổi nhiệt trong việc nâng cao hiệu quả lưu trữ và truyền nhiệt của hệ thống. Các thiết kế có cánh tản nhiệt không chỉ giúp nâng cao tốc độ gia nhiệt mà còn đảm bảo sự phân bố nhiệt đồng đều hơn trong khối PCM, giảm thiểu hiện tượng chênh lệch nhiệt độ giữa các vùng khác nhau.

Hình 5 thể hiện lượng nhiệt lưu trữ trong PCM. Xét về tổng lượng nhiệt hấp thụ (Q), các trường hợp có cánh tản nhiệt mở rộng (Case 3 và Case 4) cho thấy khả năng lưu trữ năng lượng cao hơn. Cụ thể, lượng nhiệt hấp thụ của Case 4 cao hơn khoảng 18% so với Case 1, trong khi Case 3 đạt mức tăng khoảng 14%. Điều này chứng tỏ rằng việc mở rộng diện tích trao đổi nhiệt có tác động đáng kể đến khả năng tích trữ năng lượng của hệ thống.



Hình 5. Nhiệt lượng lưu trữ của PCM theo thời gian

5. Kết luận

Từ các phân tích trên, có thể kết luận rằng việc bổ sung cánh tản nhiệt giúp cải thiện hiệu suất truyền nhiệt đáng kể trong hệ thống ắc quy nhiệt sử dụng PCM, đặc biệt trong điều kiện cấp nhiệt cụ thể được xem xét trong nghiên cứu này. Các thiết kế Case 3 và Case 4 cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc tăng tốc độ nóng chảy, giảm thời gian đạt trạng thái cân bằng nhiệt, đồng thời nâng cao khả năng lưu trữ năng lượng của hệ thống.

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng những kết luận này chủ yếu áp dụng cho điều kiện biên của ống cấp nhiệt như đã thiết lập trong nghiên cứu. Trong trường hợp công suất nhiệt đầu vào không đổi, cánh tản nhiệt có

thể không làm tăng hiệu suất tổng thể mà chủ yếu giúp đồng đều nhiệt độ trong pin tốt hơn. Do đó, để đánh giá toàn diện hơn, các nghiên cứu trong tương lai có thể mở rộng phạm vi điều kiện biên, bao gồm cả các kịch bản cấp nhiệt khác nhau để kiểm chứng hiệu quả của cánh tản nhiệt trong các tình huống thực tế đa dạng hơn.

Kết quả nghiên cứu này cung cấp cơ sở quan trọng cho việc phát triển và tối ưu hóa các hệ thống lưu trữ năng lượng nhiệt sử dụng PCM. Đặc biệt, ứng dụng của các phát hiện này có thể được triển khai trong hệ thống lưu trữ nhiệt cho năng lượng mặt trời hoặc các hệ thống điều hòa không khí sử dụng nguồn nhiệt thải.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.49**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, D. Buddhi (2009), *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.13(2), pp.318-345.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- [2] C. Suresh, R. P. Saini (2020), *Review on solar thermal energy storage technologies and their geometrical configurations*, International Journal of Energy Research, Vol.44(6), pp.4163-4195.
<https://doi.org/10.1002/er.5143>.
- [3] K. A. R. Ismail et al. (2022), *New potential applications of phase change materials: A review*, Journal of Energy Storage, Vol.53.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105202>.
- [4] Dương Xuân Quang và Trần Thế Nam (2023), *Nghiên cứu sử dụng ống có cánh để nâng cao khả năng lưu trữ nhiệt của ắc quy nhiệt bằng phương pháp số*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 73 (01/2023), tr.19-22.
- [5] Dương Xuân Quang và Nguyễn Mạnh Chiêu (2022), *Phân tích nhiệt động lực học ắc quy nhiệt bằng phương pháp mô phỏng CFD*, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, No.5, tr.24-27.
- [6] Dương Xuân Quang và Đặng Văn Trường (2021), *Nghiên cứu thử nghiệm quá trình lưu trữ nhiệt của ắc quy nhiệt sử dụng vật liệu thay đổi pha*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 68 (11/2021), tr.44-48.

- [7] J. M. Mahdi, S. Lohrasbi, D. D. Ganji, E. C. Nsofor (2018), *Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.124, pp.663-676.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.095>.
- [8] M. Khan, N. Zhao, T. Xu (2019), *Numerical Assessment on Fin Design Parameters Employed for Augmentation of Natural Convection and Fluid Flow in a Horizontal Latent Heat Thermal Energy Storage Unit*, Engineering, Vol.11, No.7, pp.407-428.
<https://doi.org/10.4236/eng.2019.117029>.
- [9] A. M. Abdulateef, J. Abdulateef, K. Sopian, S. Mat, A. Ibrahim (2019), *Optimal fin parameters used for enhancing the melting and solidification of phase-change material in a heat exchanger unite*, Case Studies in Thermal Engineering, Vol.14.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100487>.

Ngày nhận bài:	14/02/2025
Ngày nhận bản sửa:	01/03/2025
Ngày duyệt đăng:	01/03/2025