

NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG ỐNG CÓ CÁNH ĐỂ NÂNG CAO KHẢ NĂNG LƯU TRỮ NHIỆT CỦA ẮC QUY NHIỆT BẰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ

NUMERICAL STUDY ON USING FINNED TUBE TO IMPROVE THE HEAT STORAGE CAPACITY OF THERMAL BATTERY

DƯƠNG XUÂN QUANG^{1*}, TRẦN THỂ NAM²

¹Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Phòng Khoa học - Công nghệ, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

Tóm tắt

Bài báo trình bày nghiên cứu mô phỏng việc sử dụng ống có cánh nhằm nâng cao khả năng lưu trữ năng lượng của vật liệu thay đổi pha (PCM) trong các ắc quy nhiệt bằng phương pháp số. Kết quả mô phỏng cho thấy một ắc quy nhiệt đã được thiết kế với kích thước $L \times D = 400(\text{mm}) \times 60(\text{mm})$ sử dụng một ống với 8 cánh có thể lưu trữ được 2kJ với công suất lưu trữ nhiệt là 0,139W cao hơn 173% và 213% so với ống 4 cánh là (0,121W) và ống trơn (0,044W).

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

Abstract

This paper presents a simulation study on the use of finned pipe to improve the capacity for energy storage of phase change materials (PCMs) in thermal accumulators by numerical method. Simulating results show that using finned pipes has the ability to store the heat of 2kJ with heat storage capacity is 0.139W, 173% and 213% higher than the 4 fins - tube (0.121W) and the plain tube (0.044W), respectively.

Keywords: Thermal accumulator, phase change, heat transfer, heat storage, CFD.

1. Mở đầu

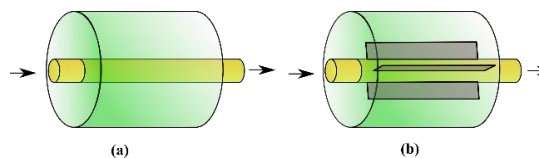
Nguồn năng lượng tái tạo vô hạn như bức xạ mặt trời đã và đang đóng một vai trò quan trọng trong việc tạo nên sự cân bằng tự nhiên và cung cấp cho nhu cầu năng lượng ngày càng tăng của con người trên trái đất. Hiện nay, nguồn năng lượng này thường được khai thác và lưu trữ dưới dạng điện năng và nhiệt năng [1-3]. Trong các nghiên cứu trước đó [4, 5] một mô hình ắc quy nhiệt để lưu trữ nguồn năng lượng nhiệt đã được xây dựng và các nghiên cứu này đã chỉ ra rằng, ở cùng điều kiện làm việc của nguồn nhiệt, ắc quy nhiệt sử dụng vật liệu thay đổi pha (PCM) có khả năng

lưu trữ cao hơn gấp 3 lần bộ lưu trữ nhiệt thông thường.

Tác dụng làm tăng hiệu quả trao đổi nhiệt cho các thiết bị trao đổi nhiệt của việc sử dụng ống có cánh đã được khẳng định và đã được ứng dụng rộng rãi [6]. Tuy nhiên, hiệu quả của việc sử dụng ống có cánh trong lưu trữ nhiệt năng của các ắc quy nhiệt hiện vẫn chưa được nghiên cứu và đánh giá một cách đầy đủ. Trong nghiên cứu này, các tác giả xây dựng mô hình số cho hệ thống ắc quy nhiệt sử dụng ống có cánh và nghiên cứu sự đáp ứng nhiệt của ắc quy nhiệt bằng phương pháp mô phỏng số. Dựa trên kết quả mô phỏng, các phân tích, đánh giá về tính hiệu quả của việc sử dụng ống có cánh so với ống trơn trong các ắc quy nhiệt được thực hiện. Kết quả của nghiên cứu này có thể được sử dụng trong tính toán thiết kế các hệ thống ắc quy nhiệt thực tế.

2. Mô hình ắc quy nhiệt

Một mô hình số của một ắc quy nhiệt có kích thước $L \times D = 400(\text{mm}) \times 60(\text{mm})$, với đường kính ống $d=10\text{mm}$ đã được xây dựng. Nhằm mục đích đánh giá ảnh hưởng của ống có cánh tới khả năng lưu trữ nhiệt, trong nghiên cứu này đã sử dụng các cánh bằng đồng có chiều dày 1mm, chiều cao cánh 25mm gắn dọc theo chiều dài ống như được mô tả trên Hình 1, số cánh được sử dụng lần lượt là 4 cánh và 8 cánh.



Hình 1. Mô hình ắc quy nhiệt sử dụng ống trơn (a) và ống có cánh (b)

Vật liệu thay đổi pha được lựa chọn sử dụng trong ắc quy nhiệt là Sáp nến (Parafin Wax). Các đặc tính nhiệt động học của vật liệu này được đưa ra trong Bảng 1. PCM lỏng được điền đầy vào ắc quy và được

bọc bằng một lớp xốp cách nhiệt Expandable PolyStyrene (EPS).

Bảng 1. 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. Mô hình toán

Khi PCM thay đổi pha, đối lưu tự nhiên được tạo ra do sự chênh lệch về khối lượng riêng giữa pha rắn và pha lỏng và tác động của trọng lực. Để mô phỏng hiện tượng này, phương trình Navier - Stokes và các phương trình năng lượng được giải bằng phương pháp số với một số giả thiết được đưa ra dưới đây:

- Chất lỏng không nén được;
- Tính chất nhiệt động học giữa trạng thái rắn và lỏng không thay đổi và bằng nhau;
- Đề bỏ qua ảnh hưởng của sự giãn nở của PCM giả thiết ác quy nhiệt được điền đầy bằng PCM lỏng và sau đó được làm mát để hóa rắn.

Dựa trên các giả thiết đã đề cập ở trên và sử dụng mô hình Entanpi để tính đến hiện tượng thay đổi pha [4, 5], khối lượng, động lượng và năng lượng của hệ có thể được viết dưới dạng:

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

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

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

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 phương trình (4).

Mối quan hệ giữa enthanpy và nhiệt độ được thể hiện trong các phương trình sau:

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

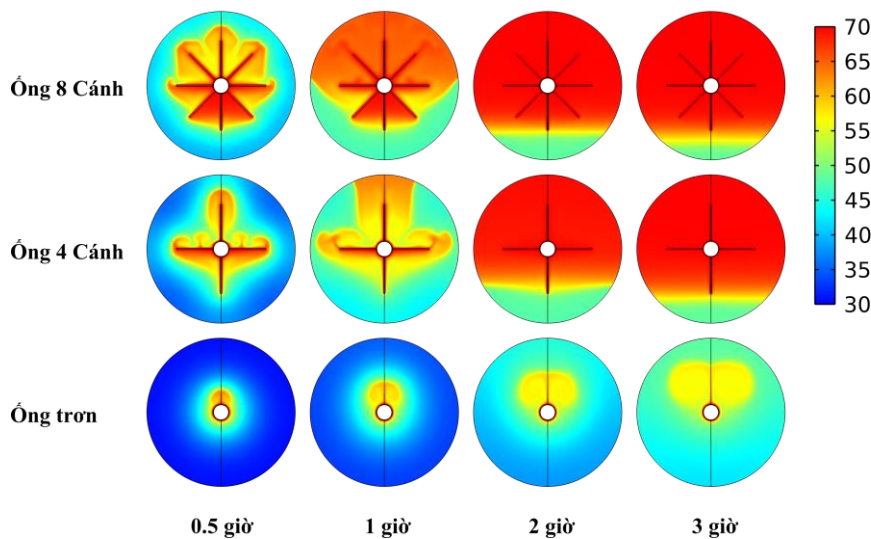
Với MF là hệ số nóng chảy là tỷ số giữa thể tích PCM lỏng và thể tích PCM rắn và được xác định theo công thức (5):

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

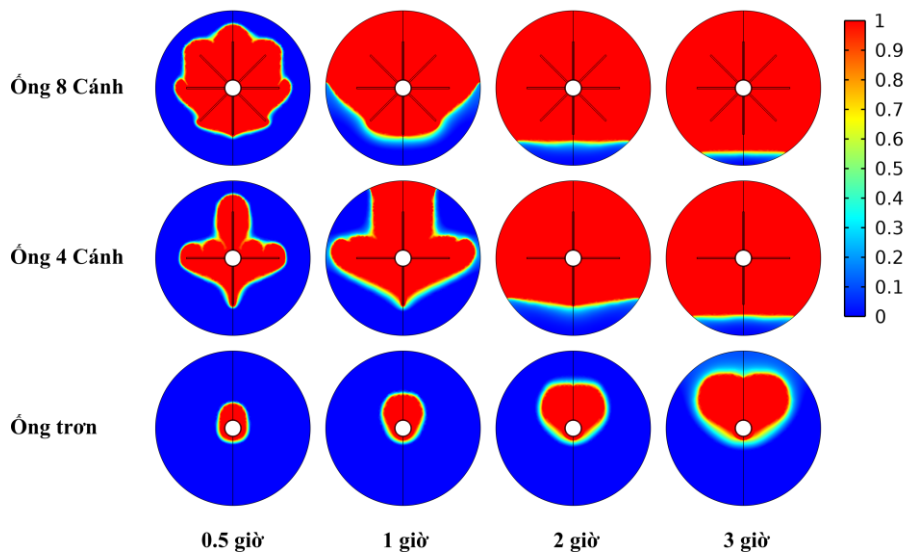
Cân bằng nhiệt chất lỏng với ống:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + h_a (T_f - T) \quad (6)$$

Trong đó, h_a là hệ số trao đổi nhiệt đối lưu, T_f là nhiệt độ của chất lỏng trong ống.



Hình 2. Phân bố nhiệt độ tại mặt cắt 0,5L theo thời gian



Hình 3. Phân bố pha rắn - lỏng của PCM tại mặt cắt 0,5L theo thời gian

Nếu bỏ qua tổn thất nhiệt từ ống quy ra môi trường bên ngoài, thì lượng nhiệt lưu trữ trong ống đúng bằng nhiệt lượng mà nguồn cấp nhiệt truyền cho PCM. Ở điều kiện như vậy thì tốc độ cấp nhiệt được xác định theo công thức:

$$Q = \int_{t_0}^t \left[m_{PCM} C_{p,PCM} (T - T_i) + m_{PCM} MF \Delta H_m \right] dt \quad (7)$$

Trong đó, m_{PCM} là khối lượng của PCM ở thể rắn, $C_{p,PCM}$ là 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

Trong nghiên cứu này, mô hình ống quy nhiệt được đơn giản thành một mặt cắt 2D để giảm thời gian và khối lượng tính toán trong quá trình mô phỏng. Một mô hình 2D của mặt cắt ngang tại vị trí 0,5L được xây dựng trên phần mềm CFD với số phần tử lưới (mesh) lần lượt là 32500; 21500 và 18500; bước thời gian 0,5s, 1s và 2s được thử nghiệm để đánh giá sự hội tụ của mô hình mô phỏng. Từ các kết quả từ các lưới và bước thời gian khác nhau tác giả lựa chọn số phần tử lưới 21500 và bước thời gian là 1s để áp dụng cho mô hình mô phỏng. Nhiệt độ của PCM ở thời điểm ban đầu ($t=0s$) là 30°C lúc này toàn bộ thể tích PCM ở thể rắn. Nhiệt độ tại bề mặt trong của ống lấy theo thí nghiệm là 70°C. Thời gian mô phỏng lấy theo thời gian đã thực hiện trong thí nghiệm là 10 giờ.

Hình 2 và Hình 3 thể hiện sự phân bố nhiệt độ và pha của PCM theo thời gian tương ứng với các trường hợp: Ống 8 cánh, ống 4 cánh, và ống trơn. Kết quả mô phỏng

chỉ ra thấy phần thể tích PCM nằm ở phía trên ống tan nhanh hơn so với phần thể tích PCM ở phía dưới ống. Đây là hệ quả từ dòng đối lưu tự nhiên của PCM lỏng khi khối lượng riêng của nó thay đổi theo nhiệt độ.

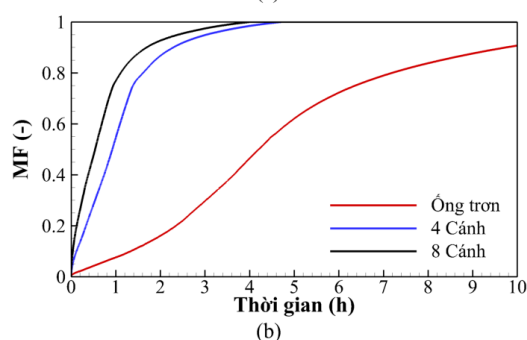
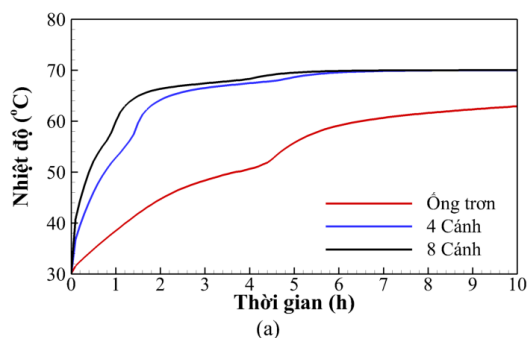
Tại cùng một thời điểm ($t=0,5$ giờ), ở mô hình ống 8 cánh, PCM có nhiệt độ cao hơn và thể tích PCM chuyển từ pha rắn sang pha lỏng cũng nhiều hơn so với các mô hình ống 4 cánh và ống trơn. Thể tích PCM chuyển từ pha rắn sang pha lỏng sau 3 giờ ở mô hình ống 8 cánh là khoảng 95%, trong khi ở mô hình ống 4 cánh và ống trơn thể tích chuyển pha này lần lượt là 90% và 30%.

Các đường nhiệt độ trung bình và hệ số nóng chảy MF của PCM theo thời gian được thể hiện trên Hình 4. Nhiệt độ trung của PCM ở trường hợp ống trơn sau 10h chỉ đạt 60°C, giá trị này thấp hơn so với trường hợp ống 4 cánh và ống 8 cánh. Với ống 4 cánh nhiệt độ của PCM đạt 70°C chỉ sau 6 giờ, trong khi đó để đạt được nhiệt độ này mô hình ống 8 cánh chỉ cần 5 giờ (Hình 4a).

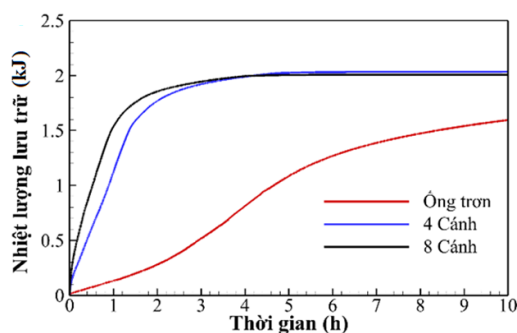
Từ Hình 4b cho thấy sau 10 giờ làm việc với ống trơn chỉ có 90% thể tích PCM chuyển sang pha lỏng, trong khi đó với ống có cánh toàn bộ thể tích PCM chuyển thành pha lỏng sau 4,6 giờ và 4 giờ.

Nhiệt lượng lưu trữ của ống quy nhiệt theo thời gian được thể hiện trên Hình 5. Từ kết quả cho thấy nhiệt lượng lưu trữ được của trường hợp ống trơn sau 10 giờ là 1,6kJ, của trường hợp ống 4 cánh sau 4,6 giờ là 2,0kJ, và của trường hợp ống 8 cánh sau 4 giờ là 2,0kJ. Điều này có nghĩa là khả năng lưu trữ nhiệt của ống quy nhiệt sử dụng ống trơn là 0,044W, sử dụng ống 4 cánh

là 0,121W và sử dụng ống 8 cánh là 0,139W. Như vậy tăng số cánh gắn trên ống từ 4 lên 8 làm tăng khả năng lưu trữ nhiệt của ắc quy nhiệt từ 173% tới 213% so với ắc quy nhiệt sử dụng ống trơn. Do đó, một ắc quy nhiệt sử dụng ống có cánh sẽ cần thời gian “sạc” ngắn hơn so với ống có cánh. Như vậy trong 10 giờ có thể sạc được cho ≈ 02 ắc quy.



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



Hình 5. Nhiệt lượng lưu trữ theo thời gian

5. Kết luận

Nghiên cứu này thực hiện việc xây dựng mô hình mô phỏng số một ắc quy nhiệt sử dụng vật liệu thay đổi pha (PCM) để lưu trữ năng lượng với 3 trường hợp ống trơn, ống 4 cánh và ống 8 cánh.

Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng với số cánh được sử dụng là 4 sẽ làm tăng khả năng lưu trữ nhiệt lên 175% và nếu số cánh là 8 sẽ làm tăng khả năng lưu trữ nhiệt lên 213% so với ống trơn.

Cũng nhận rõ từ Hình 2 và 3 rằng sự khác biệt về

phân bố nhiệt độ và pha rắn - lỏng có nhiều ý nghĩa trong thời gian đầu của quá trình tích nhiệt cho ắc quy, sau khoảng 2 giờ thì sự khác biệt về số cánh không còn rõ ràng như trước đó. Tăng số cánh trên ống sẽ làm tăng chi phí vật liệu, khó khăn cho gia công, lắp đặt, gây nên những tổn thất phụ trong quá trình khai thác. Dựa trên đánh giá các tác động này người thiết kế có thể lựa chọn số cánh phù hợp trong quá trình thiết kế ắc quy nhiệt.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT22-23.42**

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. Rozanna, T. G. Chuah, A. Salmiah, T. S. Y. Choong, và M. Sa'ari (2005), *Fatty Acids as Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage: A Review*, Int J Green Energy, Vol.1(4), pp.495-513.
doi: 10.1081/ge-200038722.
- [2] D. Lefebvre, F. H. Tezel (2017), *A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.67, pp.116-125.
doi: 10.1016/J.RSER.2016.08.019.
- [3] N. Yu, R. Z. Wang, L. W. Wang (2013), *Sorption thermal storage for solar energy*, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.39(5), pp.489-514.
doi: 10.1016/j.pecs.2013.05.004 Review.
- [4] 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, tr.44-48.
- [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, Số 5, tr.24-27.
- [6] E. K. Kalinin, G. A. Dreitzer (1998), *Heat Transfer Enhancement in Heat Exchangers*, Advances in Heat Transfer, Vol.3, pp.159-332.
doi: 10.1016/S0065-2717(08)70242-9.

Ngày nhận bài:	18/12/2022
Ngày nhận bản sửa:	04/01/2023
Ngày duyệt đăng:	09/01/2023