

PHÂN TÍCH NHIỆT ĐỘNG LỰC HỌC ẮC QUY NHIỆT BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG CFD

ANALYSIS OF THERMAL BATTERY BY CFD SIMULATION

Dương Xuân Quang*, Nguyễn Mạnh Chiêu
Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu mô phỏng một ắc quy nhiệt sử dụng vật liệu thay đổi pha (PCM) để lưu trữ năng lượng bằng phương pháp CFD. Kết quả mô phỏng được so sánh với mô hình thực nghiệm đã được chế tạo tại phòng thí nghiệm. Ắc quy nhiệt được thiết kế có thể lưu trữ được 6865 (kJ), với công suất 0,2 kW.

Từ khóa: Ắc quy nhiệt; Thay đổi pha; Truyền nhiệt; Lưu trữ nhiệt; CFD.

ABSTRACT

The article presents the simulation of a thermal battery using phase change material (PCM) by using CFD method to store energy. Simulation results are compared with experimental models built in the laboratory. The thermal battery designed can store 6865 (kJ) with a capacity of 0.2 kW.

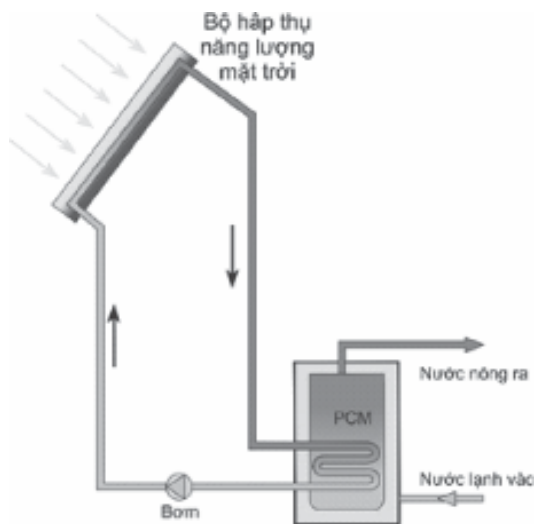
Keywords: Thermal battery; Phase change; Heat transfer; Heat storage; CFD.

1. MỞ ĐẦU

Năng lượng mặt trời là một trong những nguồn năng lượng tái tạo có triển vọng hiện nay, nó đáp ứng được các mục tiêu phát triển bền vững và có thể được khai thác trên toàn thế giới. Một số nhà khoa học đã xem xét các ứng dụng nhiệt mặt trời trong các tòa nhà, giải quyết các vấn đề quan trọng liên quan đến các rào cản kiến trúc, thiết kế và lắp đặt hệ thống và tiết lộ xu hướng của các công nghệ nhiệt mặt trời cần thiết trong tương lai [1–4]. Tuy nhiên, do năng lượng mặt trời không ổn định và không liên tục, nên bộ lưu trữ nhiệt là một thành phần không thể thiếu để đảm bảo hoạt động đáng tin cậy và

hiệu quả của hệ thống nước nóng bằng năng lượng mặt trời. Để lưu trữ năng lượng mặt trời, phương pháp truyền thống là chuyển đổi năng lượng mặt trời thành năng lượng điện và lưu trữ trong hệ thống các ắc quy điện [5]. Trong thời gian gần đây, một giải pháp thay thế đã được đề xuất và nghiên cứu là sử dụng “ắc quy nhiệt” để lưu trữ năng lượng mặt trời mà trong đó các chất thay đổi pha (PCM) được sử dụng [6, 7]. Trong các ắc quy nhiệt này, năng lượng mặt trời được chuyển đổi thành nhiệt năng và lưu trữ vào các khoang chứa vật liệu thay đổi pha thông qua nhiệt ẩn hóa lỏng và nhiệt hiện của vật liệu này.

Sơ đồ nguyên lý của ắc qui nhiệt được mô tả trong Hình 1. Quá trình lưu trữ nhiệt (quá trình sạc) vào ắc qui được thực hiện khi có ánh sáng mặt trời. Bức xạ từ mặt trời truyền tới ống hấp thụ nhiệt của bộ thu năng lượng mặt trời làm tăng nhiệt độ của chất tải nhiệt (HTF). Trong quá trình sử dụng (quá trình xả) chất tải nhiệt được bơm qua ắc qui. PCM cung cấp phần nhiệt hiện trong nó cho chất tải nhiệt phục vụ cho nhu cầu sử dụng.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống ắc qui nhiệt

Sự phân bố nhiệt độ của ắc qui nhiệt năng lượng mặt trời là chìa khóa cho việc thiết kế và vận hành hệ thống sưởi ấm bằng năng lượng mặt trời và các mô hình toán học là cần thiết để phân tích sự phân bố nhiệt độ trong bể chứa nhiệt.

Mục tiêu của nghiên cứu này tập trung vào việc mô tả phương pháp tính toán mô phỏng số quá trình (và được xác thực với dữ liệu thực nghiệm) để dự đoán sự truyền nhiệt giữa HTF và PCM của một đơn vị lưu trữ nhiệt của ắc qui nhiệt; từ các kết quả mô phỏng và thực nghiệm nhận được đưa ra các đánh giá ban đầu về hiệu quả của phương án thiết kế và chế tạo ắc qui nhiệt trong thực tế.

2. MÔ TẢ HỆ THỐNG

Nhóm tác giả đã thiết kế và xây dựng một mô hình thực nghiệm ắc qui nhiệt, trong mô hình này nguồn nhiệt từ bộ thu năng lượng mặt trời được thay thế bởi một nguồn cấp nước nóng có nhiệt độ ổn định như được thể hiện trong Hình 2a [8]. Với kích thước $L \times B \times D = 0,4(m) \times 0,3(m) \times 0,3(m)$, đường kính ống $d = 10$ (mm), tổng chiều dài ống $L_t = 5$ (m). Vật liệu thay đổi pha được lựa chọn sử dụng cho thí nghiệm là Sáp nến (Parafin Wax). Các đặc tính nhiệt động học được xác định trong Bảng 1. PCM được điền đầy vào ắc qui với 85% thể tích bình chứa (Hình 2b). Ắc qui được bọc cách nhiệt với môi trường 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)	900-970	kg/m ³
Nhiệt dung riêng (C_p)	2,0-2,9	kJ/kgC
Nhiệt nóng chảy (Δh_m)	190-210	kJ/kg
Hệ số dẫn nhiệt (k)	0,22-0,24	W/mC

2.1. Mô hình toán

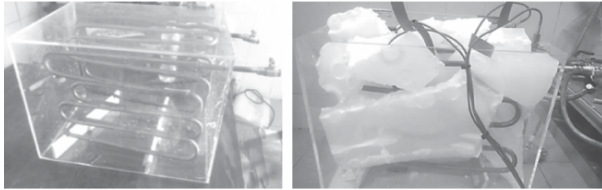
Khi PCM thay đổi pha, đối lưu tự nhiên được tạo ra do sự khác biệt giữa mật độ rắn và lỏng và tác động của trọng lực. Để mô phỏng hiện tượng này, Navier-Stokes và các phương trình năng lượng được giải phương pháp số. Một số giả thiết được đưa ra ở đây là:

- Chất lỏng không nén được.



- Mật độ được coi là không đổi (Boussinesq approximation).

- Tính chất nhiệt động học giữa trạng thái rắn và lỏng không thay đổi và bằng nhau.



Hình 2. Mô hình thí nghiệm ắc qui nhiệt (a) trước và (b) sau khi điền đầy PCM

Dựa trên các giả thuyết đã đề cập ở trên và sử dụng mô hình entanpi để tính đến hiện tượng thay đổi pha [6,10], khối lượng, động lượng và năng lượng của hệ có thể được viết dưới dạng:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p_d + \mu \nabla^2 \vec{u} - \rho \vec{g} \beta (T - T_0) \vec{j} - S \vec{u} \quad (2)$$

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

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. $S \vec{u}$ thể hiện sự tồn tại của chất rắn trong các thể tích.

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

$$h - h_{ref} = C_p (T - T_{ref}), \quad T < T_{sl} \quad (4)$$

$$h - h_{ref} = C_p (T - T_{ref}) + L, \quad T > T_{sl} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} h - h_{ref} &= (1 - f) h_{sol} + f h_{liq} - h_{ref} \\ &= C_p (T_{sol} - T_{ref}) + f L \quad T = T_{sl} \end{aligned} \quad (6)$$

với

$$f = \frac{m_{liq}}{m_{liq} + m_{sol}} = \frac{h_{int} - h_{sol}}{h_{liq} - h_{sol}} \quad (7)$$

Trong đó: f là tỷ lệ khối lượng chất lỏng/rắn, có giá trị nằm trong khoảng từ 0 (chất rắn nguyên chất) đến 1 (chất lỏng nguyên chất). h_{ref} và T_{ref} lần lượt là entanpi tham chiếu và nhiệt độ tham chiếu; T_{sl} là nhiệt độ thay đổi pha; h_{sol} và h_{liq} cho biết entanpi của các pha rắn và lỏng có trong cùng một thể tích (khi xảy ra sự thay đổi pha).

Nếu bỏ qua tổn thất nhiệt từ ắc qui ra môi trường bên ngoài, lượng nhiệt lưu trữ trong ắc qui 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:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_{p,HTF} (T_{in} - T_{out}) \quad (8)$$

Trong đó, $\dot{m}$ là lưu lượng khối lượng của nước, $C_{p,HTF}$ là nhiệt dung riêng trung bình của nước, T_{in} và T_{out} là nhiệt độ của nước vào và ra khỏi ắc qui.

Tổng nhiệt lượng lưu trữ được trong ắc qui được xác định theo công thức:

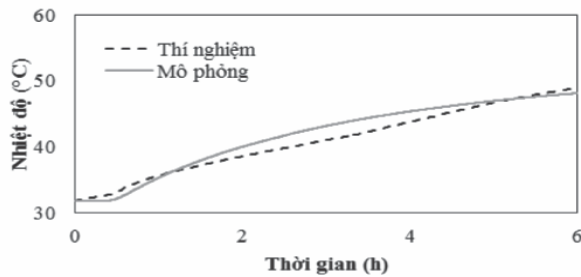
$$Q = \int_0^t \dot{m} C_{p,HTF} (T_{in} - T_{out}) \quad (9)$$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

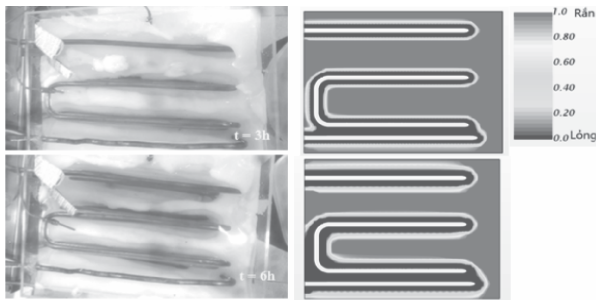
Mô hình mô phỏng được xây dựng trên phần mềm CFD với số phần tử là 140.000 phần tử. Ở thời điểm ban đầu PCM đặt ở 31°C (toàn bộ thể tích PCM ở thể rắn), nhiệt độ vào của nước nóng lấy theo thí nghiệm là 66°C, lưu

lượng 2 lít/phút. Với bước thời gian (timestep) là 10s.

Các profile nhiệt độ của PCM theo thời gian được biểu diễn trên Hình 3. Từ đồ thị cho thấy, nhiệt độ của PCM theo kết quả mô phỏng và thực nghiệm sát nhau.



Hình 3. Nhiệt độ của PCM thay đổi theo thời gian



Hình 4. Trạng thái của PCM tại thời điểm $t = 3$ giờ và $t = 6$ giờ

Hình 4, mô tả kết quả thực nghiệm và kết quả mô phỏng sự tan chảy của PCM sau 3h và 6h làm việc. Nhiệt lượng lưu trữ được 6865 (kJ) với công suất 0,2 kW.

Qua kết quả có thể khẳng định mô hình mô phỏng hoàn toàn phù hợp với mô hình vật lý thực tế. Từ đó có thể sử dụng kết quả mô phỏng để đánh giá hiệu quả của ắc qui nhiệt khi thay đổi các phương án thiết kế.

4. KẾT LUẬN

Ở nghiên cứu này, xây dựng mô hình

mô phỏng một ắc qui nhiệt sử dụng vật liệu thay đổi pha (PCM) để lưu trữ năng lượng và tiến hành so sánh với mô hình thực nghiệm đã được chế tạo phòng thí nghiệm.

Kết quả thí nghiệm cho thấy, có thể khẳng định mô hình mô phỏng hoàn toàn phù hợp với mô hình vật lý thực tế. Từ đó có thể sử dụng kết quả mô phỏng để đánh giá hiệu quả của ắc qui nhiệt khi thay đổi các phương án thiết kế.

Kết quả của bài báo có thể sử dụng để tham khảo khi thiết kế, tối ưu ắc qui nhiệt. ❖

Ngày nhận bài: 15/4/2022

Ngày phản biện: 28/4/2022

Tài liệu tham khảo:

- [1]. W.S. Chang, C.C. Wang, C.C. Shieh, *Design and performance of a solar-powered heating and cooling system using silica gel/water adsorption chiller*, Applied Thermal Engineering. (29) 2100–2105, 2009.
- [2]. D. Rozanna, T.G. Chuah, A. Salmiah, T.S.Y. Choong, M. Sa'ari, *Fatty Acids as Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage: A Review*, International Journal of Green Energy (1) 495–513, 2005.
- [3]. D. Lefebvre, F.H. Tezel, *A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews (67) 116–125, 2017.
- [4]. N. Yu, R.Z. Wang, L.W. Wang, *Sorption thermal storage for solar energy*, Progress in Energy and Combustion Science (39) 489–514, 2013.
- [5]. Q. Li, Y. Liu, S. Guo, H. Zhou, *Solar energy storage in the rechargeable batteries*, Nano Today. (16) 46–60, 2017.
- [6]. N. Azimi Fereidani, E. Rodrigues, A.R. Gaspar, *A review of the energy implications of passive building design and active measures under climate change in the Middle East*, Journal of Cleaner Production (305), 2021.
- [7]. M.H. Kim, X.Q. Duong, J.D. Chung, *Performance enhancement of fin attached ice-on-coil type thermal storage tank for different fin orientations using constrained and unconstrained simulations*, Heat and Mass Transfer. (53) 1005–1015, 2017.
- [8]. Dương Xuân Quang, Đặng Văn Trường; *Nghiên cứu thử nghiệm quá trình lưu trữ nhiệt của ắc qui nhiệt sử dụng vật liệu thay đổi pha*, Khoa học Công nghệ Hàng Hải. (68) 44 – 48, 2021.