

NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP LÀM MÁT CHO MÔ-ĐUN PIN LI-ION 5S4P DÙNG CHO THIẾT BỊ CẦM TAY BẰNG VẬT LIỆU THAY ĐỔI PHA (PCM)

COOLING SOLUTION FOR A 5S4P LI-ION BATTERY MODULE IN HANDHELD DEVICES USING PHASE CHANGE MATERIALS (PCM)

TRẦN THẾ NAM¹, VŨ HỒNG DƯƠNG², DƯƠNG XUÂN QUANG^{3*}

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

²Viện kỹ thuật Hải Quân

³Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.2025.i84.876>

Tóm tắt

Bài báo này nghiên cứu và so sánh hiệu quả quản lý nhiệt của mô-đun pin Li-ion 5S4P cho thiết bị cầm tay giữa hai phương pháp: làm mát bằng không khí và làm mát bằng vật liệu chuyển pha (PCM). Mô hình nhiệt của mô-đun được xây dựng và mô phỏng trong điều kiện xả dòng cao. Kết quả cho thấy làm mát bằng không khí không thể hạn chế sự gia tăng nhiệt, với nhiệt độ cực đại vượt 49°C, gây nguy cơ giảm tuổi thọ và hiệu suất pin. Trong khi đó, làm mát bằng PCM giúp giảm nhiệt độ cực đại từ 8-10°C và làm chậm quá trình tăng nhiệt nhờ cơ chế hấp thụ nhiệt ẩn khi chuyển pha. Nghiên cứu khẳng định PCM là giải pháp quản lý nhiệt thụ động hiệu quả cho pin Li-ion công suất cao trong ứng dụng cầm tay, đồng thời có tiềm năng kết hợp với các phương pháp tản nhiệt chủ động để tối ưu hiệu quả làm mát.

Từ khóa: Pin Li-ion 5S4P, quản lý nhiệt, vật liệu thay đổi pha, thiết bị cầm tay, mô phỏng nhiệt.

Abstract

This paper investigates and compares the thermal management performance of a 5S4P Li-ion battery module for handheld devices using two cooling approaches: Air cooling and phase change material (PCM) cooling. A thermal model of the module was developed and simulated under high-discharge conditions. The results show that air cooling cannot effectively limit the rapid temperature rise, with the maximum cell temperature exceeding 49°C, posing risks of reduced lifespan and performance degradation. In contrast, PCM cooling lowers the peak temperature by 8-10°C and slows down the temperature increase due to its latent heat

absorption during phase transition. The study demonstrates that PCM is an effective passive thermal management solution for high-power Li-ion battery modules in handheld applications, with potential for further enhancement when combined with active cooling methods.

Keywords: 5S4P Li-ion battery, thermal management, phase change material, handheld devices, thermal simulation.

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây, pin Lithium-ion (Li-ion) đã trở thành nguồn lưu trữ năng lượng chủ đạo cho các thiết bị điện cầm tay nhờ mật độ năng lượng cao, tuổi thọ dài và đặc tính xả ổn định [1]. Cấu hình 5S4P (gồm 4 hàng ghép song song từ 5 cell pin nối tiếp) được ứng dụng rộng rãi trong các dụng cụ điện, thiết bị y tế di động và máy móc đo lường, nhờ khả năng cung cấp điện áp danh định khoảng 18,5V cùng dung lượng lớn, đáp ứng được cả nhu cầu công suất và thời gian hoạt động (Hình 1). Tuy nhiên, khi hoạt động ở tải cao và trong môi trường nhiệt độ khắc nghiệt, nhiệt lượng sinh ra từ các cell có thể vượt quá giới hạn an toàn, gây ra suy giảm hiệu suất, giảm tuổi thọ và tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn [2], [3].



Hình 1. Mô-đun pin Li-ion 5S4P sử dụng cell 18650

Hệ thống quản lý nhiệt (Thermal Management System - TMS) đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì nhiệt độ của mô-đun pin trong khoảng vận hành tối ưu, thường từ 20-40°C [4]. Các giải pháp truyền thống như quạt gió hoặc tản nhiệt kim loại tuy có hiệu quả nhưng lại làm tăng kích thước, trọng lượng và tiêu thụ năng lượng của hệ thống, điều này không phù hợp với các thiết bị cầm tay vốn yêu cầu tính gọn nhẹ và di động cao [5].

Trong bối cảnh đó, vật liệu thay đổi pha (Phase Change Material - PCM) nổi lên như một giải pháp tiềm năng nhờ khả năng hấp thụ và giải phóng nhiệt thông qua quá trình chuyển pha rắn-lỏng, giúp duy trì nhiệt độ ổn định mà không cần tiêu thụ năng lượng bổ sung [6]. Việc tích hợp PCM vào mô-đun pin 5S4P cho thiết bị cầm tay có thể giảm thiểu sự tăng nhiệt độ đột ngột trong quá trình xả dòng cao, đồng thời kéo dài tuổi thọ và đảm bảo an toàn vận hành.

Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện có chủ yếu tập trung vào mô-đun pin quy mô lớn hoặc cho xe điện [7], trong khi nghiên cứu chuyên sâu về tối ưu hóa giải pháp quản lý nhiệt bằng PCM cho module pin 5S4P trong thiết bị cầm tay vẫn còn hạn chế. Do đó, bài báo này được thực hiện nhằm phân tích, mô phỏng và đánh giá hiệu quả của việc tích hợp PCM vào mô-đun pin Li-ion 5S4P, qua đó đề xuất giải pháp quản lý nhiệt phù hợp cho các ứng dụng di động hiệu suất cao.

2. Mô hình mô phỏng

Mô hình mô phỏng được thiết lập dựa trên một cụm gồm 20 cell pin hình trụ chuẩn 18650, được bố trí theo ma trận 4×5, lắp đặt trong khung nhựa định vị (cell holder). Khoảng trống giữa các cell được lấp đầy bằng không khí (trường hợp cơ sở) hoặc bằng vật liệu chuyển pha (PCM - paraffin) để đánh giá hiệu quả làm mát.

Mỗi cell được mô hình hóa như một hình trụ đặc, đường kính 18mm và chiều cao 65mm. Lớp vỏ kim loại (nhôm) bao quanh pin có độ dày 0,3mm và được giả định đồng chất. Cấu trúc hình học ba chiều được xây dựng trong môi trường phần mềm mô phỏng CFD được mô tả như trong Hình 2. Lưới phần tử được chia mịn tại các vùng có gradient nhiệt lớn như bề mặt pin và vùng tiếp xúc với môi chất làm mát.

2.1. Điều kiện biên và giả định

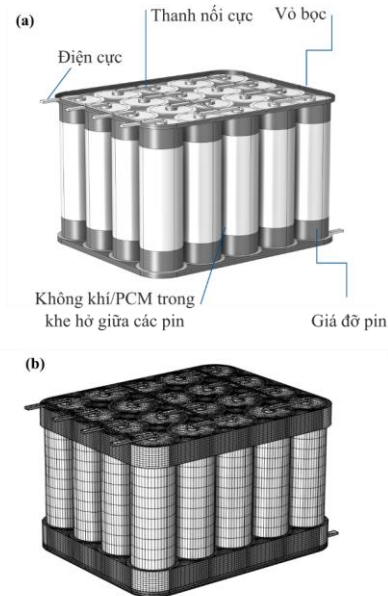
Mô hình giả định các điều kiện sau:

- Các pin phát nhiệt đồng đều trong suốt quá trình mô phỏng, với nhiệt sinh là đồng đều.
- Trao đổi nhiệt với môi trường ngoài thông qua đối lưu tự nhiên với hệ số trao đổi nhiệt $h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$,

tại nhiệt độ môi trường $T_\infty = 25^\circ\text{C}$.

- Ảnh hưởng của bức xạ nhiệt được bỏ qua do đóng góp không đáng kể trong điều kiện vận hành nghiên cứu.

- Trong trường hợp làm mát bằng PCM, hiệu ứng chuyển pha được mô hình hóa bằng phương pháp enthalpy, với khoảng nhiệt độ nóng chảy từ 35°C đến 42°C.



Hình 2. Mô hình mô phỏng 3D (a) và mô hình chia lưới (b) của mô-đun pin Li-ion 5S4P

2.2. Mô hình toán học

Đối với cả hai cấu hình làm mát, quá trình truyền nhiệt được mô tả bởi phương trình truyền nhiệt dạng phổ quát:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_{gen} \quad (1)$$

Trong đó:

ρ : Là khối lượng riêng (kg/m^3),

c_p : Là nhiệt dung riêng ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$),

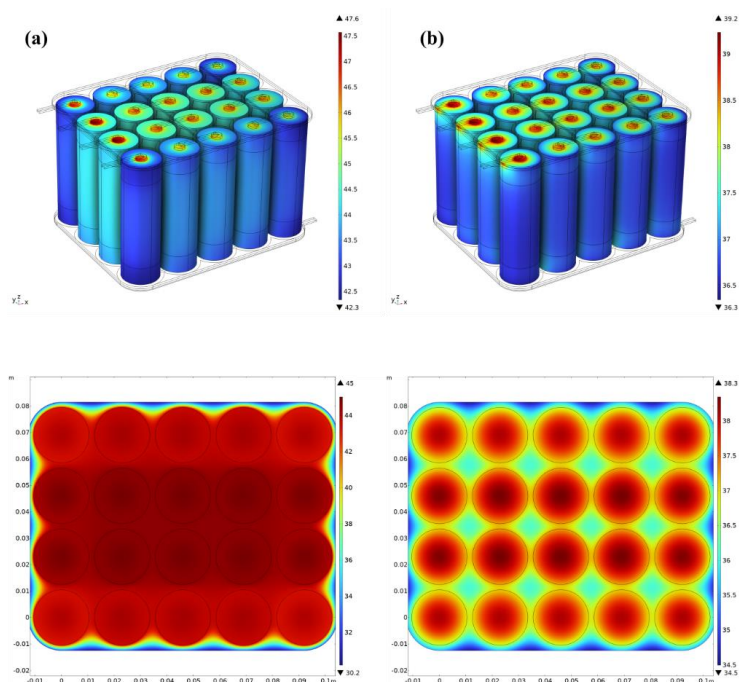
k : Là hệ số dẫn nhiệt ($\text{W/m}\cdot\text{K}$),

T : Là nhiệt độ (K),

q_{gen} : Là mật độ công suất nhiệt bên trong pin (W/m^3). Lượng nhiệt sinh ra trong quá trình hoạt động của pin được xác định theo công thức sau [8]:

$$q_{gen}(t) = I(t) [V(t) - OCV(t)] \quad (2)$$

Trong đó, $I(t)$ và $V(t)$ lần lượt là dòng điện và điện áp cực có thể đo được. $OCV(t)$ là điện áp mạch trung bình của pin có thể thu được từ thử nghiệm chuẩn độ gián đoạn tĩnh điện và là một hàm của trạng



Hình 3. Phân bố nhiệt độ của các cell pin và tại mặt cắt ngang của mô-đun sau 0,15h cho phương pháp làm mát bằng không khí (a) và làm mát bằng PCM (b)

thái sác (SoC) đo được thông qua việc đo thực nghiệm đã được bày trong [9].

Đối với trường hợp sử dụng PCM, phương trình năng lượng được biểu diễn dưới dạng enthalpy để mô tả hiệu ứng chuyển pha:

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

Trong đó $h(T)$ là enthalpy tổng:

$$h(T) = c_p T + L \cdot f(T) \quad (4)$$

Với: L : Nhiệt ẩn chuyển pha (J/kg),

$f(T)$: Hàm phân bố pha, có giá trị từ 0 đến 1 trong khoảng nhiệt độ chuyển pha.

Mô phỏng được thực hiện trong COMSOL Multiphysics với các module Heat Transfer in Solids và Phase Change Material. Phép giải sử dụng phương pháp sai phân ngược (backward Euler) với bước thời gian cố định 0,1 giây, tổng thời gian mô phỏng là 0,2 giờ (720 giây) - tương ứng với dòng sạc/ xả 4 C. Điều kiện ban đầu giả định nhiệt độ đồng đều trong toàn bộ hệ thống là 25°C.

3. Kết quả và thảo luận

Kết quả mô phỏng cho thấy sự khác biệt về phân bố và biến thiên nhiệt độ trong mô-đun pin khi áp dụng hai phương pháp làm mát: làm mát bằng không

khí và làm mát bằng vật liệu chuyển pha (PCM) tại thời điểm $t = 0,15h$ được thể hiện ở Hình 3.

Từ Hình 3, có thể nhận thấy rằng khi mô-đun được làm mát bằng không khí nhiệt độ cực đại trong các cell pin tăng nhanh, đạt xấp xỉ 47,6°C sau 0,2 giờ vận hành. Trong khi đó, khi sử dụng PCM, nhiệt độ cực đại trong pin chỉ vào khoảng 39,2°C, tức giảm gần 8,4°C so với phương án làm mát bằng không khí. Ngoài ra, nhiệt độ trung bình trong pin cũng giảm từ khoảng 41,5°C (với không khí) xuống 38,3°C (với PCM).

Môi trường PCM thể hiện khả năng điều hoà nhiệt vượt trội khi chỉ đạt mức nhiệt độ trung bình khoảng 36,2°C, thấp hơn đáng kể so với không khí - vốn đạt tới khoảng 41°C tại thời điểm tương ứng. Điều này cho thấy vật liệu PCM có khả năng hấp thu nhiệt tốt hơn nhờ vào cơ chế hấp thu nhiệt ẩn trong quá trình chuyển pha.

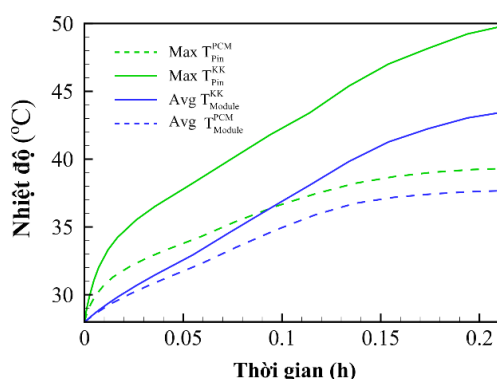
Sự khác biệt rõ rệt này cho thấy khả năng phân bố nhiệt đều và giảm thiểu điểm có nhiệt độ cao (hotspot) của hệ thống làm mát bằng PCM, từ đó góp phần hạn chế biến dạng nhiệt và tăng độ tin cậy của pin trong quá trình hoạt động dài hạn.

Hình 4 so sánh sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian của mô-đun pin. Với phương pháp làm mát bằng không khí, nhiệt độ của các cell pin tăng nhanh ngay từ giai đoạn đầu vận hành. Sau khoảng 0,2h, nhiệt độ cực đại

Bảng 1. Các thông số vật lý của vật liệu sử dụng trong mô phỏng

Tham số	Cell Pin	Không khí	PCM (parafin)
Khối lượng riêng, ρ (kg/m ³)	2700	1,225	900
Nhiệt dung riêng, c_p (J/kgK)	900	1005	2000
Hệ số dẫn nhiệt, k (W/mK)	1,5	0,026	0,2
Nhiệt ẩn hoá lỏng, L (kJ/kg)	-	-	200
Nhiệt độ nóng chảy, T_L (°C)	-	-	42
Nhiệt độ hoá rắn, T_s (°C)	-	-	35
Dung lượng (mAh)	5000		
Điện áp danh định (V)	21		
Điện áp ngắt sạc (V)	25		
Điện áp ngắt xả (V)	18		
Đường kính (mm)	18,5 ± 0,2		
Chiều cao (mm)	64,5 ± 0,5		

của mô-đun đạt xấp xỉ 50°C đối với nhiệt độ cao nhất (đường màu xanh lá), trong khi các nhiệt độ trung bình của các cell pin thấp hơn cũng vượt ngưỡng 40°C. Điều này cho thấy phương pháp làm mát bằng không khí có hiệu quả hạn chế trong việc duy trì nhiệt độ ổn định khi mô-đun hoạt động ở mật độ công suất cao.



Hình 4. So sánh nhiệt độ của pin và mô-đun giữa làm mát bằng không khí và làm mát bằng PCM

Ngược lại, với phương pháp làm mát bằng PCM, sự gia tăng nhiệt độ diễn ra chậm hơn đáng kể. Các đường nét đứt biểu thị cho các trường hợp có PCM cho thấy nhiệt độ tối đa giảm ~10°C so với phương pháp làm mát bằng không khí. Cụ thể, nhiệt độ cao nhất của cell và nhiệt độ trung bình của mô-đun pin chỉ đạt khoảng 36,2-39,5°C, tương ứng với biên độ nhiệt là 3,4°C - giảm gần 55% so với làm mát bằng không khí. thấp hơn rõ rệt so với trường hợp không có PCM. Hiệu quả này đến từ khả năng hấp thụ nhiệt ẩn của PCM trong quá trình chuyển pha rắn-lỏng, giúp trì hoãn sự tăng nhiệt và phân bố lại nhiệt lượng trong mô-đun.

Các thông số đặc trưng so sánh hai phương pháp làm mát được trình bày trong Bảng 2. Kết quả cho thấy,

phương pháp sử dụng vật liệu chuyển pha (PCM) mang lại hiệu quả vượt trội so với làm mát bằng không khí, thể hiện ở việc giảm đáng kể nhiệt độ cực đại, hạ thấp nhiệt độ trung bình và thu hẹp biên độ nhiệt độ giữa các cell. Điều này khẳng định tính khả thi của PCM trong việc duy trì sự ổn định nhiệt cho cụm pin lithium-ion công suất cao, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu mật độ năng lượng lớn và thời gian vận hành liên tục như xe điện, hệ thống lưu trữ năng lượng, hoặc nguồn điện dự phòng (UPS).

Bảng 2. Tổng hợp các thông số chính để so sánh hai phương pháp làm mát

Tiêu chí	Làm mát bằng không khí	Làm mát bằng PCM
Nhiệt độ cực đại trong pin	~49,4°C	~39,5°C
Nhiệt độ trung bình trong pin	~44,5°C	~37,7°C
Biên độ nhiệt độ trong pin	~7,5°C	~3,8°C
Nhiệt độ trung bình môi chất	~40,4°C	~36,3°C

Mặc dù cho thấy ưu thế rõ rệt, hệ thống quản lý nhiệt sử dụng PCM cũng tồn tại những hạn chế nhất định. Cụ thể, độ dẫn nhiệt thấp có thể dẫn đến hiện tượng tích nhiệt sau nhiều chu kỳ vận hành; hiệu quả phụ thuộc chặt chẽ vào nhiệt độ chuyển pha được lựa chọn; ngoài ra, chi phí cũng như yêu cầu thiết kế cơ học để tích hợp PCM thường phức tạp hơn so với giải pháp làm mát bằng không khí.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã so sánh hiệu quả quản lý nhiệt của mô-đun pin Li-ion 5S4P giữa hai phương pháp: Làm mát bằng không khí và làm mát bằng vật liệu thay đổi pha (PCM). Kết quả cho thấy, phương pháp làm mát bằng không khí chỉ đạt hiệu quả hạn chế, đặc biệt ở điều kiện tải cao, khi nhiệt độ cực đại có thể vượt 49 °C trong thời gian ngắn, tiềm ẩn nguy cơ suy giảm hiệu suất và tuổi thọ pin.

Ngược lại, việc tích hợp PCM giúp giảm đáng kể tốc độ gia tăng nhiệt độ và hạ thấp nhiệt độ cực đại trung bình từ 8~10°C so với phương pháp làm mát bằng không khí. Điều này xuất phát từ khả năng hấp thụ nhiệt ẩn trong quá trình chuyển pha của PCM, giúp ổn định nhiệt độ mô-đun và nâng cao độ an toàn khi vận hành.

Kết quả nghiên cứu khẳng định tiềm năng ứng dụng PCM như một giải pháp quản lý nhiệt thụ động hiệu quả, phù hợp cho các mô-đun pin Li-ion công suất cao trong thiết bị cầm tay, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu tối ưu hóa cấu trúc và loại PCM nhằm nâng cao hơn nữa hiệu quả tản nhiệt trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. M. Tarascon và M. Armand (2001), *Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries*, Nature, Vol.414, 6861p, pp.359-367.
doi: 10.1038/35104644;KWRD=SCIENCE.
- [2] Đ. V. Hà (2022), *Nghiên cứu hệ thống quản lý nhiệt của pin Lithium-ion trên ô tô điện*, Tạp chí Giao thông vận tải, Số 1, tr.94-98.
- [3] T. M. Bandhauer, S. Garimella, và T. F. Fuller (2011), *A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries*, J. Electrochem. Soc., Vol.158(3).
doi: 10.1149/1.3515880/XML.
- [4] E. Pilali, M. Soltani, M. Hatefi, S. Shafiei, M. Salimi, và M. Amidpour (2025), *Passive thermal management systems with phase change material-based methods for lithium-ion batteries: A state-of-the-art review*, J. Power Sources, Vol.632, 236345p.
doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2025.236345.
- [5] T. Bội Châu và T. Thế Nam (2024), *Nghiên cứu quá trình trao đổi nhiệt trong module pin lithium 18650 sử dụng trên xe điện bằng phương pháp số*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 79 (8/2024), tr.52-56.
- [6] D. X. Quang và Đ. V. Trường (202), *“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.
- [7] Z. Ling, Z. Zhang, G. Shi, X. Fang, và c.s. (2014), *Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules*, Renew. Sustain. Energy Rev., Vol.31, pp.427-438.
doi: 10.1016/J.RSER.2013.12.017.
- [8] K. Uddin, L. Somerville, A. Barai, M. Lain, và c.s. (2017), *The impact of high-frequency-high-current perturbations on film formation at the negative electrode-electrolyte interface*, Electrochim. Acta, Vol.233, pp.1-12.
doi: 10.1016/j.electacta.2017.03.020.
- [9] W. Allafi, K. Uddin, C. Zhang, R. Mazuir Raja Ahsan Sha, và J. Marco (2017), *On-line scheme for parameter estimation of nonlinear lithium ion battery equivalent circuit models using the simplified refined instrumental variable method for a modified Wiener continuous-time model*, Appl. Energy, Vol.204, pp.497-508
doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.030.

Ngày nhận bài:	15/08/2025
Ngày nhận bản sửa:	17/09/2025
Ngày duyệt đăng:	18/09/2025