

NGHIÊN CỨU QUÁ TRÌNH TRAO ĐỔI NHIỆT TRONG MODULE PIN LITHIUM 18650 SỬ DỤNG TRÊN XE ĐIỆN BẰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ

RESEARCH ON HEAT EXCHANGE PROCESS IN LITHIUM 18650 BATTERY MODULE USED IN ELECTRIC VEHICLES BY NUMERICAL METHOD

THẨM BỘI CHÂU¹, 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: chautb.vck@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo trình bày mô hình mô phỏng nhiệt của một module pin Lithium-ion bằng phương pháp số. Nhiệt độ của các cell pin ảnh hưởng lẫn nhau khi được lắp ghép trong module. Cell pin ở giữa module có nhiệt độ cao hơn so với các cell pin nằm phía ngoài. Trong điều kiện không được làm mát, nhiệt độ của các cell pin tăng lên đến 40 °C sau một chu kỳ sạc 0,2 giờ. Việc tăng hiệu quả quá trình trao đổi nhiệt đối lưu giúp cho nhiệt độ giảm xuống đến 35 °C nhiệt độ này nằm trong giới hạn làm việc cho phép của pin.

Từ khóa: Pin lithium-ion, truyền nhiệt, làm mát, module.

Abstract

This article has presented a thermal simulation model of a Lithium-ion battery module using numerical methods. The temperature of the battery cells affects each other when assembled in the module. The battery cells in the middle of the module have a higher temperature than the battery cells located on the outside. In uncooled conditions, the temperature of the battery cells increases to 40 °C after a 0.2 hour charging cycle. Increasing the efficiency of the convection heat transfer helps reduce the battery cell temperature to 35 °C, which is within the allowable working limit of the battery.

Keywords: Lithium-ion battery, heat transfer, cooling, numerical analysis, module.

1. Mở đầu

Như đã được chứng minh từ thực tế, hiện nay pin lithium đang là lựa chọn số một cho nguồn cung cấp năng lượng trên các thiết bị giao thông vận tải (xe đạp điện, xe máy điện, xe ô tô điện - EV, xe ô tô lai điện - HEV), các thiết bị điện tử di động và thậm chí là cả các thiết bị lưu trữ năng lượng cho lưới điện. Có được một vị trí như vậy là do pin Lithium-ion (Li-ion) có mật độ năng lượng cao, vòng đời dài và tỷ lệ tự phóng điện thấp. Mặc dù nhiều ưu điểm như vậy nhưng pin Li-ion cũng có một hạn chế quan trọng là nhạy cảm

với các nhiệt độ rất thấp hoặc rất cao. Khi một bộ pin Li-ion trở nên quá nóng hoặc quá lạnh do các yếu tố môi trường hoặc do tốc độ sạc hoặc xả cao của chính nó, thì hiệu suất và vòng đời của pin bị giảm đáng kể. Thực nghiệm đã chứng tỏ rằng, khi bộ pin bị nóng lên hoặc lạnh đi ngoài phạm vi nhiệt độ tối ưu (20°C đến 40°C), thì khi nhiệt độ thay đổi chỉ một độ (1°C) cũng có thể tạo ra sự khác biệt lớn về độ an toàn, khả năng sạc và độ tin cậy việc quản lý pin. Việc nghiên cứu sự sinh nhiệt và trao đổi nhiệt trong quá trình sạc - xả của các pin lithium đơn lẻ bằng phương pháp số đã được thực hiện và công bố trong [1]. Trong các ứng dụng thực tế, nguồn cung cấp năng lượng điện yêu cầu một số lượng lớn pin, và các pin này thường được tổ chức thành từng khối gọi là các module. Khi được ghép lại thành module trường nhiệt của các pin sẽ ảnh hưởng qua lại và kết quả là trường nhiệt và trao đổi nhiệt của module pin sẽ khác so với các pin đơn lẻ. Từ đó việc nghiên cứu trường nhiệt và trao đổi nhiệt của module pin cũng như khối pin là cần thiết để đảm bảo rằng các module pin và các bộ nguồn luôn hoạt động an toàn và tin cậy. Khái quát về các phương pháp làm mát bộ pin cũng như các tiêu chí đánh giá hệ thống quản lý nhiệt bộ pin sử dụng trên xe điện đã được trình bày trong [2-5].

Bài báo trình bày việc mô phỏng trường nhiệt trong module pin cỡ nhỏ, ảnh hưởng của điều kiện làm mát tới sự phân bố nhiệt độ của module pin bằng phương pháp số. Dựa trên các kết quả mô phỏng, đề xuất phương pháp làm mát phù hợp cho module pin.

2. Mô hình mô phỏng Module pin Lithium-ion

Một dạng thường gặp của tổ hợp các cell pin Lithium là module 6S2P được hình thành từ 12 cell pin 18650 (đường kính 18mm, cao 65mm) sắp xếp thành hai hàng, mỗi hàng 6 cell như được thể hiện trên Hình 1. Các thanh dẫn điện bằng nhôm liên kết các điện cực của các cell pin với nhau. Toàn bộ module pin giả thiết được bọc trong plastic, tạo thành một miền không khí bao quanh module pin. Giả sử một dung lượng định mức cho module pin 6S2P là 5000mAh/126Wh tương ứng với một điện áp định mức là 24V.



Hình 1. Module pin Li-ion 18650 cấu hình 6S2P

Để nghiên cứu quá trình sinh nhiệt và truyền nhiệt cho module pin người ta sử dụng mô hình truyền nhiệt đơn giản hóa tham số gộp (Lumped) cho từng cell pin. Cân bằng nhiệt lượng cho các cell pin Li-ion là phương trình cân bằng giữa lượng nhiệt sinh ra, lượng nhiệt tỏa ra môi trường và lượng nhiệt tích tụ trong cell pin như sau:

$$c \frac{dT}{dt} = \lambda \nabla^2 T + Q_{gen}(t) - Q_{loss}(t), \quad (1)$$

Phương trình (1) mô tả sự thay đổi nhiệt độ của cell pin (T) theo thời gian. Trong đó, $c = \rho C_p$ là nhiệt dung của pin, với ρ là mật độ khối [kg/m^3]; C_p là nhiệt dung riêng [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]; $Q_{gen}(t)$ là tốc độ sinh nhiệt trong pin [W] và $Q_{loss}(t)$ nhiệt lượng trao đổi với môi trường xung quanh, được xác định dựa trên tổng các hệ số truyền nhiệt đối lưu. Nhiệt lượng trao đổi bằng đối lưu được biểu diễn dưới dạng của định luật Newton là:

$$Q_{loss}(t) = h_c [T(t) - T_{amb}], \quad (2)$$

Trong đó $T_{amb}(t)$ là nhiệt độ môi trường và $h_c = hA$, trong đó h là hệ số truyền đối lưu [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] và A là diện tích truyền nhiệt [m^2].

Có bốn nguồn sinh nhiệt trong pin Lithium ion trong quá trình sạc/xả: Nhiệt sinh ra từ sự tiêu tán công suất trên điện trở (sinh nhiệt Joule), nhiệt sinh ra từ sự tăng entropy, nhiệt sinh ra từ phản ứng cell pin, và nhiệt do phản ứng phụ sinh ra. Mô hình nhiệt - điện hóa của cell pin Lithium đã được trình bày trong nghiên cứu trước đó của tác giả [1] và các công trình khác. Theo Uddin và cộng sự [6], trong quá trình hoạt động của pin, hệ thống gia nhiệt Joule chi phối quá trình sinh nhiệt. Về mặt vật lý, sự sinh nhiệt này thể hiện sự tiêu tán công suất trên điện trở không thuận nghịch gây ra bởi độ chênh lệch của điện thế bề mặt, đó là sự chênh lệch giữa điện thế pha rắn $Q_s(t)$ và điện thế pha của dung dịch điện phân $Q_e(t)$, so với

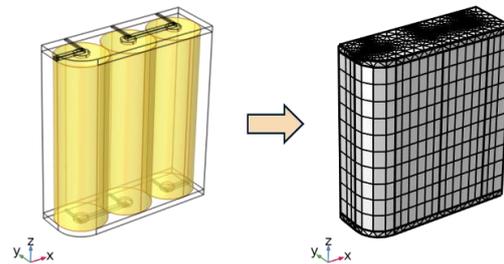
điện áp mạch trung bình (OCV) trên điện trở có dòng điện (I) đi qua và được biểu thị bằng:

$$Q_{gen}(t) = I(t) [V(t) - OCV(t)] \quad (3)$$

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 thái sạc (SoC) đo được thông qua việc đo thực nghiệm đã được bày trong [7].

3. Kết quả và thảo luận

Sự đối lưu trong miền chứa đầy không khí tĩnh bao quanh module pin bị bỏ qua. Module pin được làm mát bằng điều kiện đối lưu thông qua các ranh giới bên ngoài của module pin. Mô hình truyền nhiệt của module pin 6S2P chỉ rõ rằng có hai mặt phẳng đối xứng (không có dòng nhiệt truyền qua) trong module pin. Do đó để tối ưu quá trình phân tích chỉ cần xây dựng và phân tích mô hình cho một góc phần tư module đồng thời sử dụng các điều kiện biên đối xứng phẳng bên trong. Hình 2 thể hiện góc phần tư module pin cấu hình 6S2P và mô hình phân tích của nó.



Hình 2. Mô hình mô phỏng module pin

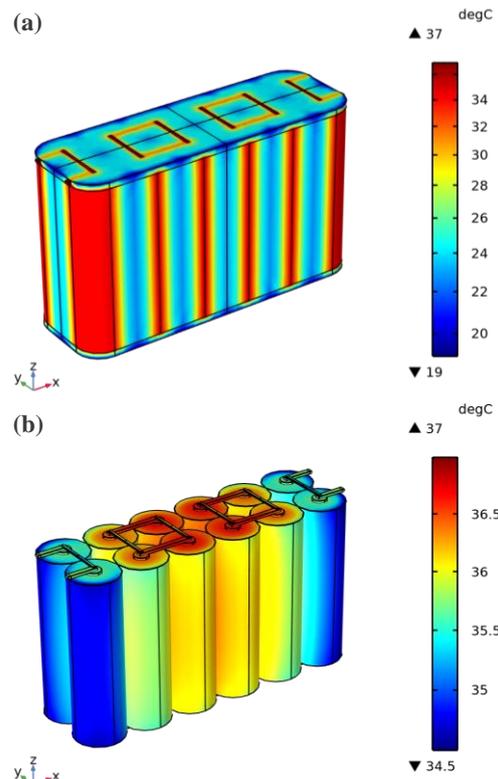
Trong nghiên cứu này điều kiện làm mát module pin được giả định ở các chế độ làm mát khác nhau tương ứng với các hệ số trao đổi nhiệt đối lưu lần lượt là $h_c = 0, 10, 20$ và $30 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Các giá trị $h_c = 0$ tương ứng với pin được bọc cách nhiệt. Để đạt được các giá trị $h_c = 10, 20$ và $30 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ tương ứng ta đặt module pin trong một kênh dẫn với các chế độ gió thổi làm mát khác nhau. Các thông số cơ bản của module pin lithium trong nghiên cứu này được trình bày trong Bảng 1. Các thông số này được lấy từ các kết quả đo đạc thực nghiệm trên module pin.

Sử dụng phần mềm mô phỏng CFD và thư viện vật liệu của chúng [8], [9] để mô phỏng và phân tích module pin Lithium 6S2P. Các kết quả nhận được sẽ được đánh giá và thảo luận chi tiết dưới đây.

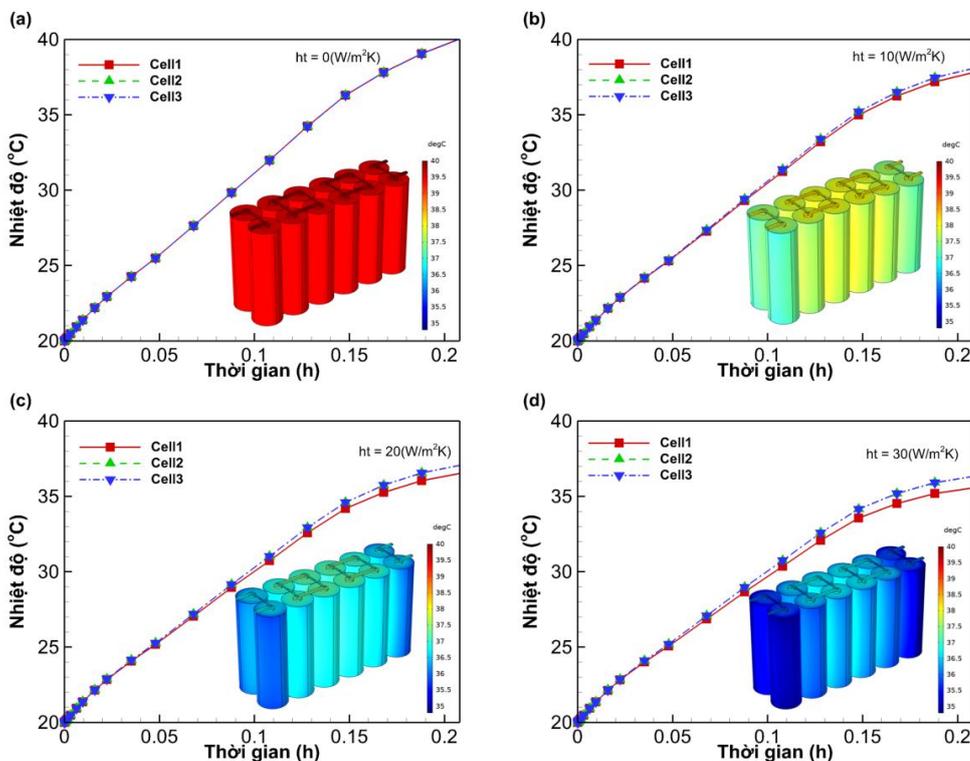
Bảng 1. Các thông số vật lý của module 6S2P sử dụng cell Pin Lithium-ion 18650 [10]

Tham số	Giá trị
Dung lượng (mAh)	5000
Điện áp danh định (V)	24
Điện áp ngắt sạc (V)	25.5
Điện áp ngắt xả (V)	18
Vật liệu điện cực dương	Li[NiCoAl]O ₂
Vật liệu điện cực âm	LixC ₆ MCMB
Dung dịch điện phân	LiPF ₆ /EC:EMC(3:7)
Đường kính (mm)	18,5 ± 0,2
Chiều cao (mm)	64,5 ± 0,5

Hình 3a mô tả phân bố của trường nhiệt độ trên vỏ ngoài lớp áo bọc bằng plastic của module pin ứng với trường hợp module pin được làm mát với hệ số trao đổi nhiệt đối lưu $h_c=30W/m^2K$. Các kết quả phân tích cho thấy phân bố nhiệt độ tại các vị trí khác nhau của module pin là không đồng đều. Nhiệt độ thấp nhất là 20°C bằng nhiệt độ môi trường, nằm trên vỏ bọc module tại những nơi không tiếp xúc trực tiếp với vỏ cell pin. Nhiệt độ cao nhất là 36°C, nằm ở tại vùng lớp



Hình 3. Phân bố nhiệt độ của (a) module pin và (b) từng cell pin



Hình 4. Nhiệt độ trung bình theo giờ gian của các cell pin

vỏ plastic tiếp xúc trực tiếp với vỏ các cell pin nằm ở giữa module. Hình 3b thể hiện phân bố của trường nhiệt độ trên vỏ các cell pin trong module. Các kết quả cho thấy nhiệt độ trên các cell pin nằm ở giữa module cao nhất và bằng 37°C còn nhiệt độ trên các cell pin ở phía ngoài module thấp hơn khoảng 34°C. Trường nhiệt độ giảm dần từ tâm của module pin ra phía cạnh ngoài là do kết quả của việc làm mát module pin thông qua trao đổi nhiệt đối lưu.

Hình 4 biểu diễn sự phân bố nhiệt độ trong module pin và sự thay đổi nhiệt độ của các cell pin theo thời gian ở các chế độ làm mát khác nhau, lần lượt tương ứng với các giá trị của hệ số trao đổi nhiệt đối lưu $h_c=0,10,20$ và $30W/m^2K$. Hình 4a chỉ ra rằng nhiệt độ của tất cả các cell pin trong module đều đạt đến 40°C sau một chu kỳ sạc 0,2 giờ và không có trao đổi nhiệt đối lưu. Ở điều kiện này nhiệt độ của pin đạt tới nhiệt độ làm việc tối hạn của cell pin. Ở nhiệt độ tuổi thọ và khả năng làm việc của pin bị suy giảm nghiêm trọng. Hình 4b, c, d mô tả nhiệt độ của các cell pin khi module được làm mát với hệ số trao đổi nhiệt lần lượt là $h_c = 10, 20$ và $30W/m^2K$. Khi được làm mát nhiệt độ của các cell pin giảm xuống. Nhiệt độ của cell pin phía ngoài thấp hơn đáng kể so với nhiệt độ của cell pin ở giữa module. Nhiệt độ lớn nhất của các cell pin đạt 38°C, 36°C và 35°C khi hệ số trao đổi nhiệt đối lưu lần lượt là $10W/m^2K$, $20W/m^2K$ và $30W/m^2K$. Nhiệt độ này nằm trong giới hạn làm việc cho phép của các cell pin.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày mô hình mô phỏng quá trình trao đổi nhiệt giữa các cell pin trong module pin Lithium-ion bằng phương pháp số. Sự thay đổi nhiệt độ của module được phân tích trên khía cạnh nhiệt sinh ra trong tế bào pin và tản nhiệt ra môi trường. Từ kết quả nghiên cứu rút ra những kết luận sau:

(1) Nhiệt độ của các cell pin ảnh hưởng lẫn nhau khi được lắp ghép thành module. Cell pin ở giữa module có nhiệt độ cao hơn so với các cell pin nằm phía ngoài.

(2) Trong điều kiện không được làm mát, nhiệt độ của các cell pin tăng lên đến 40°C (nhiệt độ làm việc giới hạn) sau một chu kỳ sạc 0,2 giờ.

(3) Tất cả các khối pin nhằm mục đích cung cấp hay lưu trữ năng lượng đều phải được làm mát để đảm bảo nhiệt độ trên các cell pin luôn nằm trong giới hạn làm việc cho phép.

(4) Làm mát bằng không khí đơn giản, khi cần các hệ số truyền nhiệt cao chỉ cần tăng tốc độ dòng không khí thổi qua bộ pin. Tuy nhiên đi kèm với phương pháp này là các hạn chế (tạo nên tiếng ồn ở các vận tốc không khí cao, gây khó khăn cho khả năng chịu

nước của bộ pin,...). Vì vậy với các bộ pin dung lượng lớn, sử dụng ở công suất lớn cần nghiên cứu thêm các giải pháp làm mát như sử dụng vật liệu thay đổi pha (PCM), sử dụng chất lỏng để làm mát cho bộ pin.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT23-24.41**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Thảm Bội Châu và Nguyễn Văn Hải (2023), *Nghiên cứu mô hình nhiệt động học của pin lithium-ion 18650 bằng phương pháp số*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 74, tr.36-40.
- [2] Yuxuan Tan, Yue Li, Yueqing Gu, Wenjie Liu, Juan Fang, and Chongchao Pan (2024), *Numerical Study on Heat Generation Characteristics of Charge and Discharge Cycle of the Lithium-Ion Battery*, *Energies*, Vol.17(1). doi: 10.3390/en17010178.
- [3] Yue Chen (2023), *Research on energy-saving conventional submarine air-conditioning system based on heat and humidity load calculation*, Vol.56, pp407-414.
- [4] Wenjun Xu and Peng Hu (2020), *Numerical study on thermal behavior and a liquid cooling strategy for lithium-ion battery*, *Int. J. Energy Res.*, Vol.44(9), pp.7645-7659. doi: 10.1002/er.5496.
- [5] A. Mallco Carpio, M. Cortes Carmona (2017), *Simulation and Design of Lithium Ion Battery Packs for the Altitude Conditions in Northern Chile*, COMSOL Conference in Rotterdam.
- [6] Kotub Uddin, Limhi Somerville, Anup Barai, Michael Lain, T. R. Ashwin, Paul Jennings, and James Marco (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.
- [7] Walid Allafi, Kotub Uddin, Cheng Zhang, Raja Mazuir Raja Ahsan Sha, and James 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.

- [8] Comsol, *Battery Design Module Application Library*, 2021.
[Online]. Available at:
www.comsol.com/trademarks.
- [9] Comsol, *Thermal Modeling of a Cylindrical Lithium-Ion Battery in 3D*, 2021.
[Online]. Available at:
www.comsol.com/trademarks.
- [10] Yang Shi, Xueli Nie, Bei Zhang, Dan Zhou, Jiakai Wang, and Zhimin Wang (2011), *Design and experimental investigation on a 150K auto-cascade refrigeration system*, ICMREE2011 - Proc. 2011 Int. Conf. Mater. Renew. Energy Environ., Vol.2, pp.1240-1244.
doi: 10.1109/ICMREE.2011.5930561.

Ngày nhận bài:	08/04/2024
Ngày nhận bản sửa:	18/04/2024
Ngày duyệt đăng:	23/04/2024