

PHÂN TÍCH ĐA VẬT LÝ NHIỆT - CƠ CỦA PIN LITHIUM-ION HÌNH TRỤ SAMSUNG INR21700-40T DƯỚI CHẾ ĐỘ XẢ DÒNG CAO

THERMO-MECHANICAL MULTIPHYSICS ANALYSIS OF A SAMSUNG INR21700-40T CYLINDRICAL LITHIUM-ION BATTERY UNDER HIGH-RATE DISCHARGE

Nguyễn Danh Phương^{1,*}, Nguyễn Long Hải¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huiv5804.2026.167>

TÓM TẮT

Pin lithium-ion hình trụ công suất cao ngày càng được sử dụng rộng rãi trong hệ thống lưu trữ năng lượng và xe điện, tuy nhiên vận hành ở chế độ xả dòng lớn làm gia tăng nguy cơ quá nhiệt và phát sinh ứng suất nhiệt trong cấu trúc cell pin. Nghiên cứu này xây dựng mô hình mô phỏng đa vật lý nhằm phân tích đồng thời các trường điện hóa, nhiệt và cơ học của cell pin Samsung INR21700-40T trong điều kiện xả dòng cao. Mô hình được thiết lập trong miền 2D đối xứng trục, tích hợp các mô-đun điện hóa, truyền nhiệt và cơ học đàn hồi tuyến tính để đánh giá phân bố nhiệt độ, ứng suất Von Mises và biến dạng vỏ pin dưới các điều kiện làm mát khác nhau. Kết quả cho thấy chế độ đối lưu tự nhiên có thể dẫn đến vượt ngưỡng nhiệt an toàn, trong khi làm mát cưỡng bức giúp giảm đáng kể nhiệt độ nhưng làm gia tăng gradient nhiệt và ứng suất nhiệt cục bộ. Nghiên cứu làm rõ mối quan hệ đánh đổi giữa hiệu quả quản lý nhiệt và đáp ứng cơ học, cung cấp cơ sở định lượng cho thiết kế và tối ưu hóa hệ thống làm mát pin công suất lớn.

Từ khóa: Pin lithium-ion; mô phỏng đa vật lý; xả dòng cao; ứng suất nhiệt; pin hình trụ.

ABSTRACT

High-power cylindrical lithium-ion batteries are extensively employed in energy storage systems and electric vehicles; however, high-rate discharge operation significantly increases the risk of overheating and thermally induced mechanical stress. This study develops a multiphysics simulation framework to simultaneously investigate the electrochemical, thermal, and mechanical behaviors of a Samsung INR21700-40T cell under high-current discharge conditions. The model is implemented in a two-dimensional axisymmetric domain, integrating electrochemical heat generation, heat transfer in solids, and linear elastic structural mechanics to evaluate temperature distribution, Von Mises stress, and casing deformation under different cooling scenarios. The results indicate that natural convection may lead to temperature levels exceeding recommended safety limits, whereas forced convection effectively suppresses the peak temperature but intensifies radial thermal gradients, resulting in increased thermally induced stress in the casing. The study elucidates the intrinsic trade-off between thermal management effectiveness and mechanical response, providing a quantitative basis for the design and optimization of cooling strategies in high-power lithium-ion battery systems.

Keywords: Lithium-ion battery; multiphysics modeling; high-rate discharge; thermal stress; cylindrical battery cell.

¹Trường Đại học Thành Đông

*Email: phuongnd@thanhdong.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/3/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

DANH MỤC KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa	C_p	J/(kg·K)	Nhiệt dung riêng tại áp suất không đổi
ρ	kg/m ³	Khối lượng riêng của vật liệu	T	K	Nhiệt độ tuyệt đối

Q_{gen}	W/m ³	Nguồn nhiệt sinh ra trên một đơn vị thể tích
Q_{ohm}	W/m ³	Nhiệt Joule do tổn hao Ohmic
Q_{rxn}	W/m ³	Nhiệt phản ứng điện hóa
Q_{rev}	W/m ³	Nhiệt entropy khả nghịch
q	W/m ²	Vector mật độ dòng nhiệt
k	W/(m·K)	Tensor độ dẫn nhiệt
k_r	W/(m·K)	Tensor độ dẫn nhiệt hướng kính
k_z	W/(m·K)	Tensor độ dẫn nhiệt hướng trục
∇T	K/m	Gradient nhiệt độ
h	W/(m ² ·K)	Hệ số truyền nhiệt đối lưu
T_{surf}	K	Nhiệt độ bề mặt pin
T_{amb}	K	Nhiệt độ môi trường
T_{ref}	K	Nhiệt độ tham chiếu
σ	Pa	Tensor ứng suất Cauchy
F_v	N/m ³	Lực khối
i_{loc}	A/m ²	Mật độ dòng điện cục bộ
i_0	A/m ²	Mật độ dòng trao đổi
α_a	–	Hệ số truyền điện tích tại anode
α_c	–	Hệ số truyền điện tích tại cathode
F	C/mol	Hằng số Faraday
η	V	Quá điện thế
R	J/(mol·K)	Hằng số khí lý tưởng
ε	–	Tensor biến dạng
ε_{th}	–	Biến dạng nhiệt
α	1/K	Hệ số giãn nở nhiệt
E	Pa	Module đàn hồi Young
ν	–	Hệ số Poisson
u	m	Vector chuyển vị
σ_{VM}	Pa	Ứng suất Von Mises
I	A	Dòng điện tải
Q_{nom}	Ah	Dung lượng danh định
t	s	Thời gian
h_{cell}	mm	Chiều cao pin
D_{cell}	mm	Đường kính pin

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Thuật ngữ tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
EV	Electric Vehicle	Xe điện
SOC	State of Charge (Trạng thái nạp)	Trạng thái nạp của pin
SEI	Solid Electrolyte Interphase	Lớp giao diện điện phân rắn
FEM	Finite Element Method	Phương pháp phần tử hữu hạn

PDE	Partial Differential Equation	Phương trình vi phân đạo hàm riêng
RVE	Representative Volume Element	Phần tử thể tích đại diện
DOF	Degree of Freedom	Bậc tự do
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide	Ôxit Niken-Coban-Nhôm Liti

1. GIỚI THIỆU

Cell pin lithium-ion hình trụ định dạng 21700 (đường kính 21mm, chiều dài 70mm) ngày càng được sử dụng rộng rãi trong hệ thống lưu trữ năng lượng và xe điện nhờ mật độ năng lượng cao và khả năng chịu tải dòng lớn. So với định dạng 18650, cell pin 21700 có dung lượng và công suất cải thiện đáng kể. Cell pin Samsung INR21700-40T sử dụng vật liệu cực dương NCA là một trong những dòng pin hiệu năng cao, cho phép xả liên tục tới 35 A.

Tuy nhiên, vận hành ở chế độ xả dòng lớn làm gia tăng mật độ sinh nhiệt, có thể dẫn đến quá nhiệt nếu không được kiểm soát hiệu quả. Phân bố nhiệt độ không đồng đều trong cấu trúc cuộn gây giãn nở nhiệt khác biệt giữa lõi và vỏ kim loại, hình thành ứng suất nhiệt và ảnh hưởng đến độ bền cơ học của cell.

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào phân tích điện - nhiệt và dự báo trường nhiệt độ trong quá trình sạc/xả [1, 2], trong khi các phân tích cơ học thường được thực hiện ở cấp độ vi mô của vật liệu điện cực [3]. Mối quan hệ định lượng giữa trường nhiệt độ do xả dòng cao và đáp ứng cơ học vĩ mô của vỏ pin vẫn chưa được khảo sát đầy đủ, đặc biệt đối với dòng Samsung INR21700-40T [4].

Trong nghiên cứu này, mô hình đa vật lý 2D đối xứng trục được xây dựng trên nền tảng COMSOL Multiphysics nhằm phân tích đồng thời đặc tính điện hóa, nhiệt và cơ học của pin ở chế độ xả 20 A (5C). Khác với các nghiên cứu trước chủ yếu dừng ở phân tích điện-nhiệt, nghiên cứu này định lượng ảnh hưởng của chiến lược làm mát đến ứng suất vỏ pin và làm rõ cơ chế hình thành gradient nhiệt bán kính gây gia tăng ứng suất nhiệt cục bộ. Kết quả cung cấp cơ sở cho đánh giá an toàn nhiệt - cơ và tối ưu hóa hệ thống làm mát pin công suất lớn. Trong nghiên cứu này, thuật ngữ 'cell pin' được sử dụng thống nhất để chỉ một phần tử pin hình trụ đơn lẻ Samsung INR21700-40T nhằm phân biệt với cấp module hoặc pack pin.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Mô hình mô phỏng được xây dựng dựa trên sự liên kết đa vật lý (Multiphysics coupling), giải đồng thời các

phương trình vi phân đạo hàm riêng (PDE) mô tả quá trình truyền nhiệt và biến dạng cơ học. Các phương trình chi phối cho từng hiện tượng vật lý được trình bày dưới đây.

2.1. Mô hình truyền nhiệt

Sự phân bố nhiệt độ T bên trong cấu trúc pin theo không gian và thời gian được xác định dựa trên phương trình bảo toàn năng lượng, áp dụng cho cấu trúc pin hình trụ [2].

Đối với hệ tọa độ đối xứng trục, phương trình truyền nhiệt trong chất rắn được biểu diễn như sau:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q_{gen} \quad (1)$$

Trong đó: ρ (kg/m^3): Khối lượng riêng của vật liệu, C_p ($J/kg \cdot K$): Nhiệt dung riêng tại áp suất không đổi, T (K): Nhiệt độ tuyệt đối, Q_{gen} (W/m^3): Nguồn nhiệt sinh ra trên một đơn vị thể tích, $\mathbf{q}$ (W/m^2): Mật độ dòng nhiệt, tuân theo định luật Fourier về dẫn nhiệt:

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (2)$$

Đối với vùng vật liệu hoạt tính (Active Material Domain) của cell pin 21700, do cấu trúc cuộn "jelly-roll", độ dẫn nhiệt k mang tính chất dị hướng (anisotropic). Do đó, tensor độ dẫn nhiệt được xác định bởi hai thành phần: Độ dẫn nhiệt theo phương bán kính (k_r) và theo phương dọc trục (k_z), với $k_z \gg k_r$ do các lá kim loại dẫn nhiệt tốt theo chiều cuộn:

$$k = \begin{bmatrix} k_r & 0 \\ 0 & k_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

Tại bề mặt ngoài của vỏ pin, điều kiện biên đối lưu nhiệt tự nhiên (Natural Convection) được áp dụng theo định luật làm lạnh Newton:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{surf} - T_{amb}) \quad (4)$$

Trong đó: h là hệ số truyền nhiệt đối lưu (W/m^2K), T_{surf} là nhiệt độ bề mặt pin và T_{amb} là nhiệt độ môi trường.

2.2. Mô hình cơ học

Sự biến dạng của pin dưới tác động của nhiệt độ (giãn nở nhiệt) và áp lực nội tại được mô tả bằng các phương trình cân bằng cơ học cho vật liệu đàn hồi tuyến tính [5] như sau:

Phương trình cân bằng tĩnh học (bỏ qua lực quán tính) được viết dưới dạng tensor:

$$\nabla \cdot \sigma + F_v = 0 \quad (5)$$

Trong đó, σ là tensor ứng suất Cauchy và F_v là lực khối.

Mối quan hệ giữa ứng suất (σ) và biến dạng (ϵ) tuân theo định luật Hooke tổng quát, có tính đến biến dạng nhiệt:

$$\sigma = \mathbf{C} : (\epsilon_{total} - \epsilon_{th}) \quad (6)$$

Trong đó:

$\mathbf{C}$: Tensor độ cứng (Stiffness tensor), phụ thuộc vào Module đàn hồi Young (E) và hệ số Poisson (ν), ϵ_{total} : Tổng biến dạng của vật thể, ϵ_{th} : Biến dạng nhiệt (Thermal strain).

Biến dạng nhiệt được tính toán dựa trên hệ số giãn nở nhiệt (α) và độ chênh lệch nhiệt độ so với nhiệt độ tham chiếu (T_{ref}):

$$\epsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref}) \quad (7)$$

Trong mô hình này, sự liên kết đa vật lý (Multiphysics Coupling) được thực hiện một chiều: trường nhiệt độ T tính toán từ phương trình năng lượng sẽ được sử dụng làm đầu vào để tính toán biến dạng nhiệt ϵ_{th} trong phương trình cơ học, từ đó xác định trường chuyển vị (Displacement) và ứng suất Von Mises trên vỏ pin.

2.3. Mô hình điện hóa

Động học điện hóa tại điện cực trong mô hình cell pin Lithium-ion Samsung INR21700-40T được mô tả bằng phương trình Butler-Volmer [9, 10], xác định mật độ dòng phản ứng cục bộ i_{loc} . Phương trình này biểu diễn quá trình chuyển tải điện tích tại giao diện giữa điện cực và điện giải như sau:

$$i_{loc} = i_0 \left(\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right) \quad (8)$$

Trong đó, i_0 là mật độ dòng trao đổi, α_a và α_c lần lượt là hệ số truyền điện tích tại anode và cathode, F là hằng số Faraday, η là quá điện thế, R là hằng số khí lý tưởng, và T là nhiệt độ tuyệt đối.

Nguồn nhiệt sinh ra Q_{gen} trong phương trình truyền nhiệt được xác định như tổng của ba thành phần gồm: nhiệt Joule Q_{ohm} , phát sinh do trở kháng Ohmic trong vật liệu dẫn điện và chiếm ưu thế ở dòng xả cao; nhiệt phản ứng Q_{rxn} , xuất phát từ quá trình phản ứng điện hóa liên quan trực tiếp đến i_{loc} ; và nhiệt entropy Q_{rev} , thành phần khả nghịch do sự thay đổi entropy trong phản ứng điện hóa, được tính theo biểu thức $Q_{rev} = T \frac{\partial E}{\partial T} i$.

Tổng hợp các thành phần này $Q_{gen} = Q_{ohm} + Q_{rxn} + Q_{rev}$ cung cấp nguồn nhiệt đối với mô hình nhiệt, đóng vai trò giải thích sự gia tăng nhiệt độ bề mặt pin lên đến 75,8°C khi xả ở dòng 20A.

3. THIẾT LẬP MÔ HÌNH MÔ PHỎNG

Mô hình số được xây dựng và giải trên nền tảng phần mềm COMSOL Multiphysics, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để phân tích tương tác đa vật lý. Quá

trình thiết lập bao gồm ba giai đoạn chính: Xây dựng hình học và vật liệu, thiết lập điều kiện biên, và rời rạc hóa lưới.

3.1. Mô hình hình học và Vật liệu

Đối tượng khảo sát là cell pin Lithium-ion Samsung 21700-40T. Để tối ưu hóa tài nguyên tính toán, mô hình được xây dựng trong không gian 2D đối xứng trục (2D Axisymmetric) với kích thước danh định chiều cao $H = 70\text{mm}$ và bán kính $R = 10,5\text{mm}$.

Miền tính toán được chia thành 3 vùng vật lý riêng biệt theo phương bán kính r , phản ánh cấu trúc thực tế của pin:

Trục cuộn (Mandrel - Domain 1): Lõi định hình nằm tại trục đối xứng ($r = 0$).

Vùng vật liệu hoạt tính (Active Material - Domain 2): Miền đồng nhất hóa đại diện cho cấu trúc cuộn "jelly-roll" (Cực dương NCA, Cực âm Graphite-Si, màng ngăn).

Vỏ pin (Battery Case - Domain 3): Lớp bảo vệ ngoài cùng.

Bảng 1. Thông số vật liệu đầu vào

Thông số	Ký hiệu	Trục cuộn & Vỏ (Thép AISI 4340)	Vật liệu hoạt tính (Active Material)	Đơn vị
Khối lượng riêng	ρ	7850	2600	kg/m^3
Nhiệt dung riêng	C_p	475	1100	$\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$
Độ dẫn nhiệt theo phương hướng kính	k_r	44.5	1,0	$\text{W/(m}\cdot\text{K)}$
Độ dẫn nhiệt theo chiều trục	k_z	44.5	30,0	$\text{W/(m}\cdot\text{K)}$
Module đàn hồi	E	205	20	GPa
Hệ số Poisson	ν	0.28	0,3	-

Các thông số vật liệu đầu vào được thiết lập trên bảng 1. Trong đó, Trục cuộn và Vỏ pin sử dụng thép hợp kim AISI 4340 nhờ độ bền cơ học cao, mô đun đàn hồi lớn và khả năng chịu ứng suất nhiệt tốt [11].

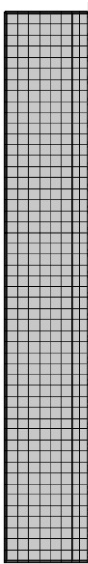
3.2. Chia lưới phần tử hữu hạn

Hệ thống lưới phần tử hữu hạn được tối ưu hóa nhằm cân bằng giữa độ chính xác mô phỏng và thời gian tính toán. Mô hình sử dụng các phần tử tam giác tự do (Free Triangular Elements) có mật độ tinh chỉnh cao tại vùng vật liệu hoạt tính và biên tiếp xúc.

- Kết quả thống kê kê lưới:
- Tổng số phần tử miền: 2442 phần tử.
- Chất lượng phần tử trung bình (Average quality) đạt giá trị cao là 0,9416 trên thang đo chuẩn 0 - 1.

Số bậc tự do (DOF) được đảm bảo đủ để mô phỏng với độ phân giải không gian thích hợp, cho phép ghi nhận chính xác gradient nhiệt độ và chuyển vị biến dạng.

Tăng số phần tử lưới lên 16,38% làm tăng nhiệt độ lên 0,1% do đó lưới hiện tại đảm bảo độ chính xác.



Hình 1. Kết quả chia lưới mô hình

3.3. Điều kiện biên và chu trình tải

Để mô phỏng kịch bản vận hành khắc nghiệt, các điều kiện biên và tải trọng được thiết lập như sau:

- Chu trình tải dòng điện (Current Load):
 - Dòng điện áp đặt $I_{app}(t)$ được điều khiển bởi hàm sóng vuông (wv1) nhằm mô phỏng quá trình xả – nạp liên tục với cường độ lớn 20 A:
- $$I_{app}(t) = 20 [A] \times wv1(t) \tag{9}$$

Trong đó, chu kỳ mô phỏng kéo dài $t = 720s$ được phân chia thành:

- $0 < t \leq 360s$: dòng điện dương (+20A), tương ứng quá trình Xả (Discharge).
- $360s < t \leq 720s$: dòng điện âm (-20A), tương ứng quá trình Nạp (Charge).

- Điều kiện biên nhiệt:
- Áp dụng điều kiện đối lưu nhiệt tự nhiên (Natural Convection) tại bề mặt ngoài cùng của vỏ pin ($r = R$). Hệ số tỏa nhiệt đối lưu được thiết lập là $h \approx 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, với nhiệt độ môi trường $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$.

- Điều kiện biên cơ học:
- Ràng buộc cố định (Fixed Constraint) được áp dụng tại mặt đáy của trục cuộn ($z = 0$) nhằm ngăn chuyển động tịnh tiến của vật thể rắn, đồng thời cho phép pin giãn nở nhiệt tự do theo phương dọc trục và phương bán kính.

3.4. Các giả định khoa học

Vật liệu được xem là đàn hồi tuyến tính (linear elastic) để đơn giản hóa tính toán ứng suất tức thời, bỏ qua tính chất nhớt (viscoelastic) của polyme.

Nghiên cứu chuyển đổi bài toán vật lý thực tế phức tạp thành mô hình số khả giải dựa trên các giả định hợp lý sau đây, phù hợp với các nghiên cứu mô phỏng pin Lithium-ion đa vật lý [1, 2].

Tính đồng nhất vật liệu: Vùng hoạt tính (jelly-roll) gồm nhiều lớp mỏng (cực NCA, Graphite-Si, màng ngăn) được xem như vật chất liên tục đồng nhất với tính chất trung bình thể tích ($\rho = 2600\text{kg/m}^3$, $k_r = 1\text{W/mK}$, $k_z = 30\text{W/mK}$). Giả định này phổ biến trong mô hình P2D, giảm độ phức tạp tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác nhiệt - điện hóa [3].

Tính đối xứng trục: Mô hình 2D axisymmetric giả định cấu trúc trụ đồng tâm, bỏ qua sai lệch hình học xoắn ốc của jelly-roll. Sai số hình học < 5% phù hợp cho phân tích trục r-z [2].

Vật liệu đàn hồi tuyến tính: Các thành phần tuân theo định luật Hooke tuyến tính ($E = 205\text{GPa}$ cho thép, $E = 20\text{GPa}$ cho active material), không xét biến dạng dẻo/rão/nứt. Mặc dù jelly-roll thực tế có tính chất "clay-like" (viscoelastic-plastic), giả thiết tuyến tính hợp lý cho ứng suất tức thời (< 100°C, chu kỳ ngắn 720s), đánh giá thấp biến dạng dư nhưng xác định chính xác điểm tập trung ứng suất Von Mises cực đại [3, 4].

Liên kết lý tưởng: Không trượt/tách lớp tại tiếp xúc, truyền nhiệt/ứng suất liên tục giữa mandrel-active material-case.

Bỏ qua bức xạ nhiệt $\epsilon\sigma T^4$ do $T < 100^\circ\text{C}$ (đóng góp < 1% so với đối lưu) [5].

Các giả định này giảm bậc tự do, tăng tốc hội tụ FEM, đảm bảo độ chính xác phù hợp thực nghiệm (sai số điện áp < 5%).

Bảng 2. Thông số kỹ thuật cho mô phỏng cell pin Samsung 21700-40T [6]

Phân loại	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1. Hình học & vận hành	Chiều cao pin	H_{cell}	70	mm
	Đường kính pin	D_{cell}	21	mm
	Dòng điện xả/nạp cực đại	I_{max}	20	A
	Dung lượng danh định	Q_{nom}	4,0	Ah
	Nhiệt độ môi trường	T_{amb}	20 (293,15)	°C (K)
	Thời gian chu kỳ	t_{cycle}	720	s

2. Vật liệu: Vỏ & Trục (Thép AISI 4340)	Khối lượng riêng	ρ_{st}	7850	kg/m ³
	Độ dẫn nhiệt	k_{st}	44,5	W/(m·K)
	Nhiệt dung riêng	$C_{p,\text{st}}$	475	J/(kg·K)
	Mô đun đàn hồi Young	E_{st}	205	GPa
	Hệ số Poisson	ν_{st}	0,28	–
	Hệ số giãn nở nhiệt	α_{st}	$12,3 \times 10^{-6}$	1/K
3. Vật liệu: Lõi hoạt tính (Homogenized)	Khối lượng riêng trung bình	ρ_{batt}	2600	kg/m ³
	Nhiệt dung riêng trung bình	$C_{p,\text{batt}}$	1100	J/(kg·K)
	Độ dẫn nhiệt (bán kính)	k_r	1	W/(m·K)
	Độ dẫn nhiệt (dọc trục)	k_z	30	W/(m·K)
	Mô đun đàn hồi Young	E_{batt}	20	GPa
	Hệ số Poisson	ν_{batt}	0,3	–
4. Điều kiện biên	Hệ số giãn nở nhiệt	α_{batt}	$34,0 \times 10^{-6}$	1/K
	Hệ số đối lưu nhiệt (vỏ)	h	10	W/(m ² ·K)

3.5. Thiết lập khảo sát tham số

Để phân tích ảnh hưởng của cường độ dòng điện lên đặc trưng nhiệt - cơ của pin, nghiên cứu áp dụng phương pháp Quét tham số (Parametric Sweep) trong COMSOL Multiphysics [7]. Thay vì chỉ mô phỏng một chế độ vận hành cố định, việc quét tham số cho phép lặp lại bài toán với nhiều giá trị dòng điện đầu vào (p_C_rate), từ đó đánh giá toàn diện tác động ở các mức độ tải khác nhau. Dòng điện áp đặt vào mô hình được khai báo dưới dạng:

$$I_{\text{app}}(t) = p_C_rate \cdot wv1(t) \cdot (t \leq t_{\text{stop}}) \quad (10)$$

Trong đó, p_C_rate là tham số quét đại diện cho giá trị dòng xả/nạp, $wv1(t)$ là hàm sóng vuông mô phỏng chu trình xả - nạp theo thời gian, còn $(t \leq t_{\text{stop}})$ giới hạn thời gian tác dụng của tải cho từng kịch bản mô phỏng. Như vậy, biểu thức trên vừa điều khiển biên độ dòng, vừa quy định dạng tải theo chu kỳ và thời lượng làm việc của pin trong mỗi trường hợp khảo sát.

Trong bài báo, các trường hợp khảo sát được lựa chọn là 4 mức dòng xả/nạp $I(A)$ là 5, 10, 15 và 20A, tương ứng với 4 chu kỳ thời gian T_{cycle} (s) là 720, 960, 1440 và 2880s, với công thức $T_{\text{cycle}} = Q_{\text{nom}}/I$.

Việc quét tham số như vậy cho phép xác định được mối quan hệ giữa tốc độ xả/nạp và nhiệt độ phát tán, cung cấp cơ sở định lượng đánh giá an toàn nhiệt của pin khi hoạt động ở các mức tải khác nhau, từ đó hỗ trợ so sánh hoặc tối ưu hóa các phương án vận hành.

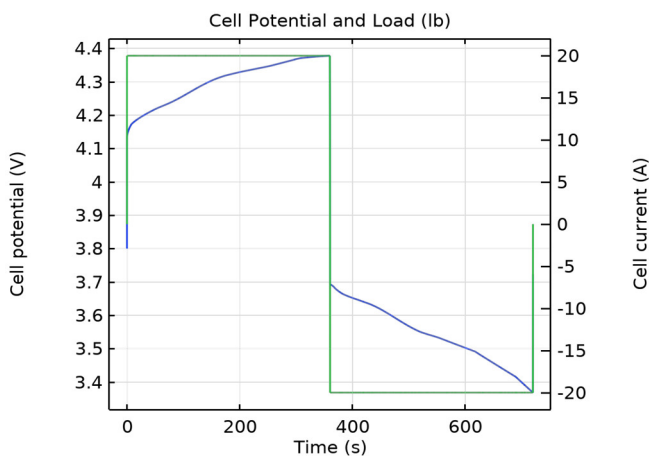
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Dựa trên mô hình số đã thiết lập, nghiên cứu tiến hành phân tích các đặc tính hoạt động của pin Samsung

INR21700-40T. Các kết quả mô phỏng bao gồm sự biến thiên của điện áp, nhiệt độ, ứng suất và biến dạng cơ học theo thời gian và theo không gian. Đặc biệt, ảnh hưởng của cường độ dòng xả đến an toàn nhiệt được làm rõ thông qua phân tích quét tham số với kịch bản làm mát tự nhiên.

4.1. Kiểm chứng mô hình điện hóa

Đường cong điện áp xả - nạp tại dòng 20A (5C) mô phỏng khớp tốt với dữ liệu danh định của nhà sản xuất¹⁹. Sự sụt áp ban đầu và quá trình hồi phục điện áp phản ánh chính xác nội trở và động học ion, đảm bảo nguồn nhiệt đầu vào (Q_{gen}) là tin cậy.



Hình 2. Đặc tính điện áp và dòng điện của pin trong chu kỳ xả - nạp ở chế độ dòng cao (20A)

Kết quả mô phỏng chu trình xả - nạp với dòng điện không đổi 20A (tương đương 5C) cho thấy sự đáp ứng động học của điện thể pin theo thời gian (hình 2).

Điện thế tế bào (Cell Potential): Khi bắt đầu quá trình xả ($t = 0$ đến $t = 360s$), điện áp của pin sụt giảm nhanh chóng từ mức điện áp hở mạch ban đầu do sụt áp Ohmic và phân cực nồng độ, sau đó giảm tuyến tính theo thời gian xả. Ngược lại, trong quá trình nạp ($t > 360s$), điện áp tăng dần để hồi phục dung lượng. Để kiểm chứng độ tin cậy của mô hình, đường cong điện áp mô phỏng trong chu kỳ Nạp - Xả được đối sánh với đặc tính danh định của cell pin Samsung INR21700-40T [4]. Hình 2 cho thấy đáp ứng điện áp tại dòng tải lớn 20A (5C): Giai đoạn nạp (0 - 360s) điện áp tăng dần từ 3,8 đến 4,38V và giai đoạn xả (360 - 720s) điện áp sụt giảm nhanh do quá thế Ohmic và nồng độ. Dạng đường cong và biên độ sụt áp phù hợp tốt với dữ liệu nhà sản xuất, xác nhận độ chính xác của các tham số điện hóa đầu vào.

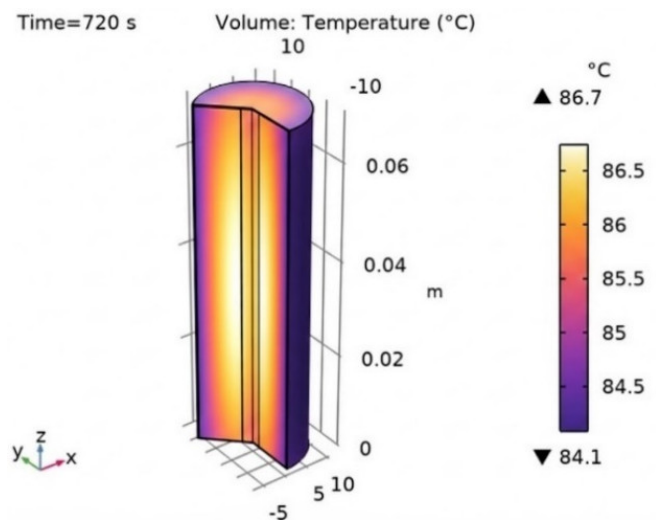
Trạng thái nạp (SOC): Biểu đồ trạng thái nạp biến thiên tuần hoàn phù hợp với chu kỳ dòng điện áp đặt, xác nhận tính chính xác của mô hình điện hóa.

Khi khảo sát quét tham số với các mức dòng điện khác nhau (5A, 10A, 15A, 20A), độ dốc của đường cong điện áp và SOC thay đổi rõ rệt. Dòng xả càng lớn, tốc độ giảm điện áp càng nhanh, dẫn đến thời gian đạt đến ngưỡng điện áp cắt (cut-off voltage) càng ngắn.

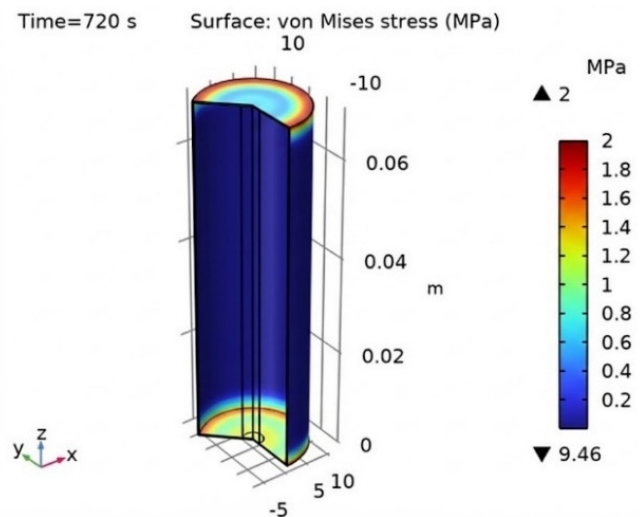
4.2. Phân tích nhiệt và cơ học (chế độ làm mát tự nhiên)

Mặc dù nghiên cứu chưa thực hiện đo nhiệt độ trực tiếp, kết quả nhiệt độ cực đại 86,7°C tại dòng 5C là hoàn toàn tương đồng với các công bố thực nghiệm trước đây trên dòng pin 21700 tương tự [8], qua đó củng cố độ tin cậy của mô hình nhiệt.

Tại dòng xả 20A với $h = 10W/m^2K$:



Hình 3. Trường phân bố nhiệt độ khi dòng xả 20A

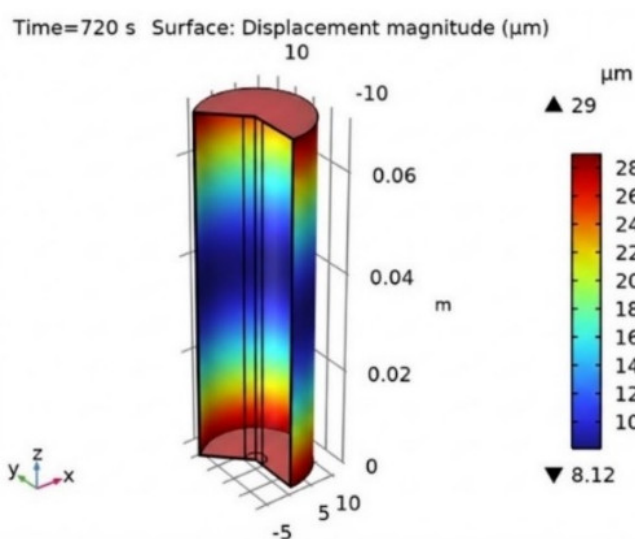


Hình 4. Trường phân bố ứng suất khi dòng xả 20A

Nhiệt độ: Nhiệt độ cực đại T_{max} đạt 86,7°C, tập trung tại vùng trung tâm của cell pin. Mức nhiệt này vượt ngưỡng an toàn khuyến cáo (80°C), tiềm ẩn nguy cơ phân hủy lớp giao diện điện cực - điện ly rắn (SEI) hoặc dẫn đến hiện tượng ngắn mạch nhiệt (hình 3).

Ứng suất: Ứng suất Von Mises cực đại đạt 2,0MPa, thấp hơn đáng kể so với giới hạn chảy của vật liệu vỏ thép. Điều này cho thấy vỏ pin vẫn đảm bảo an toàn về mặt cơ học trong điều kiện tải tĩnh (hình 4).

Biến dạng: Do lõi pin có hệ số giãn nở nhiệt (α) lớn hơn so với vỏ thép, quá trình gia nhiệt tạo ra áp suất nội tại làm vỏ cell giãn nở với độ dịch chuyển cực đại đạt 29 μ m. Mặc dù giá trị này chỉ tương ứng khoảng 0,13% đường kính cell pin, song trong các cụm pin có mật độ sắp xếp cao, sự biến dạng này có thể gây ra ứng suất cơ khí hoặc chèn ép giữa các cell pin lân cận (hình 5).



Hình 5. Trường phân bố biến dạng khi dòng xả 20A

4.3. Ảnh hưởng của dòng tải (Quét tham số)

Kết quả tổng hợp từ quá trình quét tham số được trình bày trên bảng 3.

Bảng 3. Bộ tham số quét đầu vào

Dòng xả I(A)	20A-5C	15A-3,75C	10A-2,5C	5A-1,25C
Thời gian chu kỳ (s)	720	960	1440	2880
Nhiệt độ lớn nhất của pin T (°C)	86,7	58,1	43,5	30,4
Ứng suất lớn nhất (MPa)	2,0	1,98	1,1	0,318
Biến dạng lớn nhất (μm)	29	16	9,95	4,51

Kết quả bảng 3 cho thấy mối quan hệ phi tuyến: Dòng điện tăng gấp 4 lần (5A lên 20A) làm nhiệt độ tăng gấp 2,8 lần và biến dạng tăng gấp 6,4 lần. Điều này khẳng định sự cần thiết của quản lý nhiệt chủ động ở chế độ xả cao.

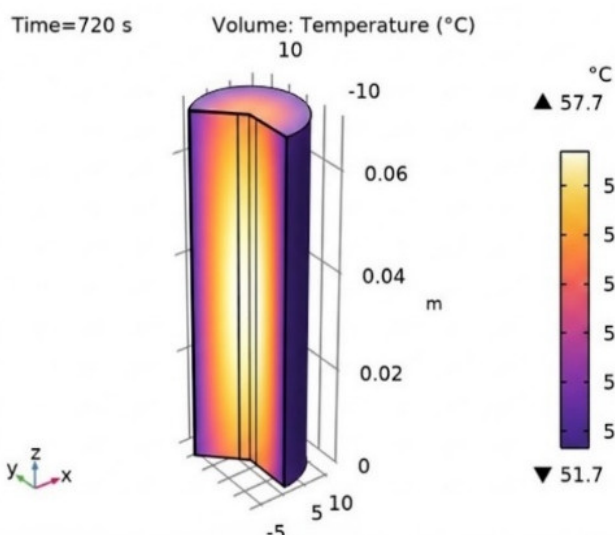
Đánh đổi thời gian - nhiệt độ

Ở I = 5A, thời gian phóng điện đạt 2880s với nhiệt độ ổn định 30,4°C (cao hơn môi trường 5°C). Tại I = 20A, thời gian giảm còn 720s nhưng nhiệt độ tăng vọt lên 86,7°C.

Tăng nhiệt phi tuyến

Nhiệt độ cực đại tăng theo hàm mũ, tuân thủ định luật Joule ($Q = I^2R$): từ 5A lên 10A tăng 13°C; từ 15A lên 20A tăng 28,6°C. Ở chế độ phóng điện cao, quản lý nhiệt trở nên cấp thiết.

Tác động cơ học

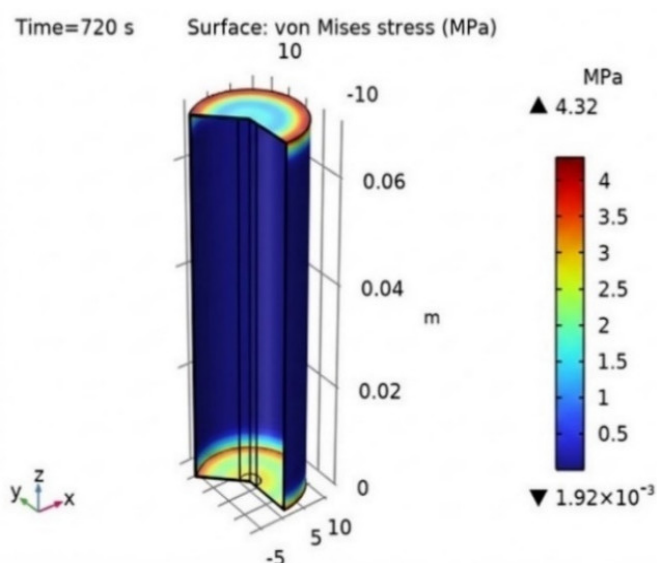


Hình 6. Trường phân bố nhiệt độ khi dòng xả ở chế độ 5C với đối lưu cưỡng bức

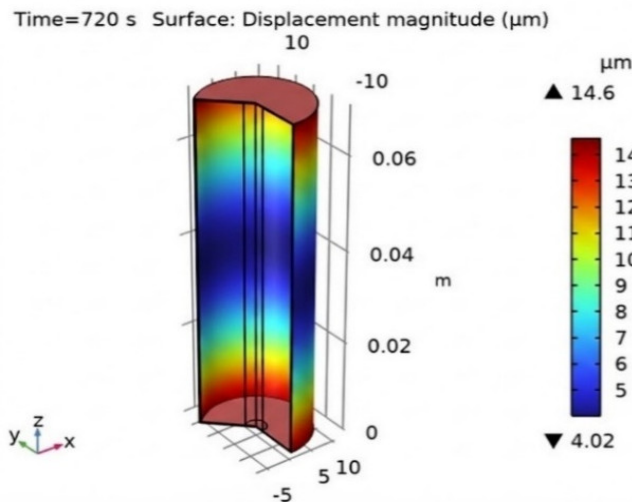
Ứng suất Von Mises đạt 2MPa và biến dạng vỏ 29 μ m tại I = 20A, vẫn trong giới hạn đàn hồi của thép AISI 4340, chủ yếu do giãn nở nhiệt.

Nhận xét:

Các chế độ 1,25C, 2,5C, 3,75C có công suất thấp hơn so với chế độ 5C nhưng đảm bảo nằm trong vùng vận hành khi không sử dụng làm mát cưỡng bức.



Hình 7. Trường phân bố ứng suất khi dòng xả ở chế độ 5C với đối lưu cưỡng bức



Hình 8. Trường phân bố biến dạng khi dòng xả ở chế độ 5C với đối lưu cưỡng bức

Chế độ 5C tối ưu công suất nhưng tiếp cận giới hạn nhiệt ($86,7^{\circ}\text{C}$), đòi hỏi tản nhiệt chủ động như làm mát chất lỏng hoặc vật liệu chuyển pha. Tiến hành mô phỏng với điều kiện hệ số đối lưu nhiệt $h = 50\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, hình 6 trình bày trường phân bố nhiệt độ khi dòng xả ở chế độ 5C với đối lưu cưỡng bức, hình 7 và 8 trình bày trường phân bố ứng suất và biến dạng khi mô phỏng làm mát cưỡng bức cho chế độ 5C.

So sánh các kết quả phân tích nhiệt độ, ứng suất và biến dạng lớn nhất giữa 2 trường hợp sử dụng làm mát cưỡng bức và không làm mát cưỡng bức trong cùng trường hợp sử dụng pin ở chế độ 5C được trình bày trên bảng 4.

Bảng 4. So sánh kết quả mô phỏng

Thông số	Sử dụng làm mát cưỡng bức	Mát tự nhiên
Nhiệt độ lớn nhất của pin $T (^{\circ}\text{C})$	57,7	86,7
Ứng suất lớn nhất (MPa)	4,32	2,0
Biến dạng lớn nhất (μm)	14,6	29

Kết quả so sánh định lượng giữa hai chế độ làm mát được trình bày tại bảng 4 đã làm sáng tỏ mối quan hệ đánh đổi (trade-off) đặc trưng giữa hiệu quả quản lý nhiệt và ứng suất cơ học trong vận hành pin công suất lớn.

Về phương diện nhiệt động học, giải pháp làm mát cưỡng bức với hệ số đối lưu $h = 50\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ thể hiện hiệu quả vượt trội khi giảm nhiệt độ cực đại (T_{max}) từ $86,7^{\circ}\text{C}$ xuống $57,7^{\circ}\text{C}$. Việc duy trì nhiệt độ trong vùng vận hành an toàn này có ý nghĩa thiết yếu trong việc ngăn chặn nguy cơ phân hủy lớp giao diện chất điện ly rắn (SEI) và hạn chế các phản ứng phụ gây lão hóa nhiệt. Đồng thời, biến dạng nhiệt tổng thể của cấu trúc pin giảm đáng kể,

từ $29\mu\text{m}$ xuống $14,6\mu\text{m}$, góp phần đảm bảo độ ổn định kích thước hình học cho module pin.

Về phương diện đáp ứng cơ học, kết quả mô phỏng ghi nhận sự gia tăng ứng suất cực đại trên vỏ pin từ $2,0\text{MPa}$ lên $4,32\text{MPa}$ khi áp dụng đối lưu cưỡng bức. Cơ chế vật lý của hiện tượng này bắt nguồn từ sự hình thành gradient nhiệt độ lớn theo phương bán kính. Trong quá trình làm mát nhanh, bề mặt vỏ pin tiếp xúc trực tiếp với môi trường nên bị giảm nhiệt và co ngót tức thời. Ngược lại, vùng lõi trung tâm – với đặc tính dẫn nhiệt thấp theo phương kính ($k_r \approx 1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) vẫn duy trì nhiệt độ cao và trạng thái giãn nở. Sự giãn nở nhiệt không đồng bộ này sinh ra trường nội lực tương tác: Lớp vỏ chịu ứng suất kéo bị kìm hãm bởi lõi chịu ứng suất nén. Hệ quả là giá trị ứng suất cực bộ tại vỏ tăng gấp 2,16 lần so với điều kiện làm mát tự nhiên.

Đánh giá về độ bền kết cấu:

Cần nhấn mạnh rằng, giá trị ứng suất cực đại $4,32\text{MPa}$ vẫn nằm sâu trong giới hạn đàn hồi của vật liệu vỏ thép AISI 4340 (Theo ASM Handbook, giới hạn chảy của thép AISI 4340 thường nằm trong khoảng $470 - 710\text{MPa}$ tùy trạng thái nhiệt luyện [11], do đó ứng suất cực đại $4,32\text{MPa}$ vẫn nằm sâu trong miền đàn hồi an toàn), do đó rủi ro phá hủy vĩ mô kết cấu vỏ là không đáng kể. Tuy nhiên, sự gia tăng ứng suất vĩ mô này đóng vai trò là một chỉ dấu (indicator) phản ánh trạng thái ứng suất nội tại phức tạp bên trong cấu trúc cuộn (jelly-roll). Trong thực tế vận hành, các ứng suất nhiệt này có thể đủ lớn để kích hoạt các cơ chế hư hỏng vĩ mô như nứt vỡ hạt vật liệu hoạt tính (particle cracking) hoặc tách lớp (delamination) giữa màng điện cực và bộ thu dòng, dẫn đến suy giảm dung lượng pin theo chu kỳ.

Bên cạnh đó, mô hình hiện tại áp dụng giả thiết vật liệu đàn hồi tuyến tính (linear elastic). Trong thực tế, tính chất nhớt đàn hồi (viscoelastic) của màng ngăn polymer cho phép giải tỏa một phần ứng suất theo thời gian (stress relaxation). Vì vậy, kết quả $4,32\text{MPa}$ có thể được xem là giới hạn trên (upper bound) hay ước lượng bảo thủ, đảm bảo hệ số an toàn tin cậy cho các tính toán thiết kế kỹ thuật.

Nghiên cứu này sử dụng giả thuyết vật liệu đàn hồi tuyến tính cho vùng vật liệu hoạt tính (jelly-roll). Trong thực tế, cấu trúc này mang tính chất nhớt đàn hồi (viscoelastic), cho phép ứng suất tự giải tỏa (relax) theo thời gian. Do đó, giá trị ứng suất vỏ $4,32\text{MPa}$ tính toán được trong nghiên cứu này nên được xem là giới hạn trên (upper bound). Giá trị thực tế có thể thấp hơn, nghĩa là hệ số an toàn của vỏ pin thực tế sẽ cao hơn so với kết quả

mô phỏng. Ngoài ra, mô hình giả định trục cuốn (mandrel) là thép đặc để đơn giản hóa lưới tính toán. Do miền trục cuốn chỉ chiếm tỷ lệ thể tích nhỏ so với vùng hoạt tính jelly-roll, ảnh hưởng của giả thiết này đến trường nhiệt toàn cục được xem là thứ cấp. Đối với các loại pin thương mại sử dụng trục rỗng để thoát khí, khả năng tản nhiệt ở tâm có thể khác biệt nhẹ làm giảm nhẹ nhiệt độ cực đại tại vùng lõi, tuy nhiên xu hướng phân bố nhiệt độ và vị trí điểm nóng (hotspot) vẫn không làm thay đổi đáng kể đặc trưng phân bố nhiệt tổng thể.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã mô phỏng thành công quá trình tương tác đa vật lý của cell pin Samsung 21700-40T. Các kết luận chính bao gồm:

Vận hành ở dòng 20A trong điều kiện không có tản nhiệt chủ động dẫn đến hiện tượng quá nhiệt (86,7°C), gây nguy cơ mất an toàn cho pin.

Việc áp dụng hệ thống làm mát cưỡng bức giúp kiểm soát nhiệt độ hiệu quả và giảm biến dạng cấu trúc, nhưng đồng thời làm gia tăng ứng suất nhiệt lên 2,16 lần do sự chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và vỏ pin.

Do đó, quá trình thiết kế hệ thống pin cần xem xét sự đánh đổi này: làm mát quá nhanh có thể gây ra sốc nhiệt cục bộ. Hướng nghiên cứu tiếp theo nên tập trung vào tối ưu hóa chiến lược làm mát theo từng giai đoạn (step-cooling) nhằm đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả hạ nhiệt và hạn chế ứng suất dư.

<https://www.dnkpowers.com/wpcontent/uploads/2019/02/SAMSUNGINR21700-40TDatasheet.pdf> (Accessed date 10 January 2026).

[5]. COMSOL Multiphysics, *Structural Mechanics Module User's Guide*. COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2023.

[6]. Wang W., Yang S., Lin C., "Clay-like mechanical properties for the jellyroll of cylindrical Lithium-ion cells," *Applied Energy*, 196, 249-258, 2017.

[7]. Pryor R. W., *Multiphysics modeling using COMSOL 5 and MATLAB* (2nd ed.). Mercury Learning and Information, 2022.

[8]. G. Kovács, S. K. Szürke, S. Fischer, "Investigation of Convective and Radiative Heat Transfer of 21700 Lithium-Ion Battery Cells," *Batteries*, 11, 7, 246, 2025. <https://doi.org/10.3390/batteries11070246>

[9]. Newman J., Thomas-Alyea K. E., *Electrochemical Systems* (3rd ed.). John Wiley & Sons, 2004.

[10]. Bard A. J., Faulkner L. R., *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (2nd ed.). Wiley, 2001.

[11]. ASM International, *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. ASM International, 1990.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Danh Phuong, Nguyen Long Hai

Thanh Dong University, Vietnam

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Yu H., Zhang H., Shi J., Liu S., Yi Z., Xu S., Wang X., "Thermal parameters of cylindrical power batteries: Quasi-steady state heat guarding measurement and thermal management strategies," *Applied Thermal Engineering*, 231, 120959, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120959> (Accessed date 05 January 2026).

[2]. Wu Q., Huang R., Yu X., "Measurement of thermophysical parameters and thermal modeling of 21,700 cylindrical battery," *Journal of Energy Storage*, 65, 107338, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107338> (Accessed date 07 January 2026).

[3]. Mendecka B., et al., "Experimental and numerical electro-thermal characterization of lithium-ion cells for vehicle battery pack applications," *SAE Technical Paper 2023-24-0159*, 2023. <https://doi.org/10.4271/2023-24-0159> (Accessed date 08 January 2026).

[4]. Samsung SDI, INR21700-40T Datasheet. DNK Power, 2019.