

Une Nouvelle Stratégie de Refroidissement des Batteries Lithium-Ion par Stockage de Chaleur dans des Matériaux à Changement de Phase

Mustapha FARAJI *

GEITHIL-ERDS Laboratory, Renewable Energy and Laser Plasma Group, Physics Department,
Faculty of Sciences Ain Chock, Hassan II University of Casablanca, Morocco

*(Auteur correspondant : farajimustapha@yahoo.fr)

Résumé - Le contrôle thermique des batteries Lithium-Ion est crucial pour le futur des véhicules électriques. Une étude numérique du refroidissement de ces batteries par convection naturelle combinée au stockage de chaleur dans un matériau à changement de phase (MCP) est présentée. Un modèle mathématique basé sur le bilan thermique et la méthode enthalpique est développé. Les équations gouvernantes sont discrétisées par la méthode des volumes de contrôle et résolues par l'algorithme TDMA. Un code de calcul FORTRAN est élaboré pour analyser le comportement du système. Les résultats montrent que l'intégration du MCP permet d'absorber une grande partie de la chaleur générée sous forme de chaleur latente, maintenant ainsi la température de la batterie dans une plage de fonctionnement sécurisée plus longtemps par rapport à un refroidissement purement passif par convection naturelle. L'efficacité du système est analysée pour différents régimes de décharge.

Abstract - Thermal management of Lithium-Ion batteries is crucial for the future of electric vehicles. A numerical study of battery cooling by natural convection combined with heat storage in a phase change material (PCM) is presented. A mathematical model based on the thermal balance and the enthalpy method is developed. The governing equations are discretized by the control volume method and solved using the TDMA algorithm. A FORTRAN code is developed to analyze the system's behavior. The results show that the integration of the PCM allows a significant portion of the generated heat to be absorbed as latent heat, thereby maintaining the battery temperature within a safe operating range for a longer period compared to purely passive cooling by natural convection. The system's efficiency is analyzed for different discharge rates.

Nomenclature

c_p	chaleur spécifique, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	H	hauteur de la cavité, m
e_b	épaisseur de la batterie, m	k	conductivité thermique, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$
e_m	épaisseur du MCP, m	q_g	puissance générée, $W\ m^{-3}$
e_s	épaisseur du substrat, m	S	terme source
f	fraction liquide	t	temps, s
h	enthalpie, $J\ kg^{-1}$	T	température, K
OCV	open circuit voltage, V	V	voltage, V

1. Introduction

Le refroidissement des batteries des véhicules électriques (VE) est crucial pour garantir leur performance, leur sécurité et leur durée de vie. L'efficacité des batteries lithium-ion dépend fortement de la température, car la chaleur interne générée lors des cycles de charge et de décharge peut entraîner une répartition inégale de la température, réduisant ainsi la durée de vie et l'efficacité de la batterie [1]. Les systèmes de refroidissement actifs (air forcé, liquide) sont efficaces mais consomment une partie de l'énergie de la batterie. Le refroidissement liquide, par exemple, utilise des fluides spéciaux pour dissiper la chaleur [2]. De même, le refroidissement par air actif fait l'objet d'optimisations continues, comme le système de type X proposé par Luo et al. [3], qui améliore les performances par rapport à un refroidissement symétrique classique. Une alternative intéressante est le refroidissement passif utilisant des matériaux à changement de phase (MCP). Ces matériaux sont capables d'absorber et de libérer une grande quantité de chaleur lors de leur transition de phase solide-liquide, contribuant ainsi à maintenir une température stable [4]. L'intégration de MCP dans les systèmes de gestion thermique des batteries permet d'atténuer les pics de température, notamment en les combinant à des systèmes actifs (hybrides) [5, 6, 7]. Par exemple, Li et al. [7] ont développé un régulateur thermique passif utilisant des MCP, réduisant significativement la température maximale de la batterie. L'objectif de cette étude est d'évaluer numériquement l'efficacité d'une stratégie de refroidissement entièrement passive, combinant la convection naturelle à un stockage de chaleur par MCP, sans recourir à des systèmes actifs consommateurs d'énergie. La nouveauté réside dans l'analyse de l'impact d'un refroidissement purement passif (sans ventilateur ni refroidissement liquide) pour une cellule de batterie prismatique soumise à différents régimes de décharge.

2. Modèle mathématique

2.1. Description du système physique

La Figure 1 illustre le système étudié. Il s'agit d'une cellule de batterie lithium-ion de type Epec 653446 (1000mAh, 3.7V), de forme prismatique, montée sur un substrat conducteur. L'espace entre les cellules (non représentées) est rempli d'un MCP de type sel hydraté E32. Les dimensions sont détaillées sur la figure. Lors de sa décharge, la batterie génère une puissance thermique volumique q_g . L'originalité de cette approche est l'absence de tout système actif de refroidissement. La chaleur dégagée par la batterie est dissipée passivement lors de la fusion du MCP, qui absorbe la chaleur sous forme de chaleur latente.

2.2. Hypothèses simplificatrices

- Les résistances thermiques aux interfaces entre les différentes couches sont négligées.
- Le MCP est homogène et isotrope.
- Le transfert de chaleur par conduction est bidimensionnel.

- Les propriétés thermophysiques sont supposées constantes dans la gamme de températures étudiée.
- La convection naturelle dans la phase liquide du MCP est négligée (MCP encapsulé). Ceci simplifie le modèle mais peut sous-estimer le transfert thermique réel. Une encapsulation supplémentaire ajouterait en réalité une résistance thermique à l'interface, non prise en compte ici.

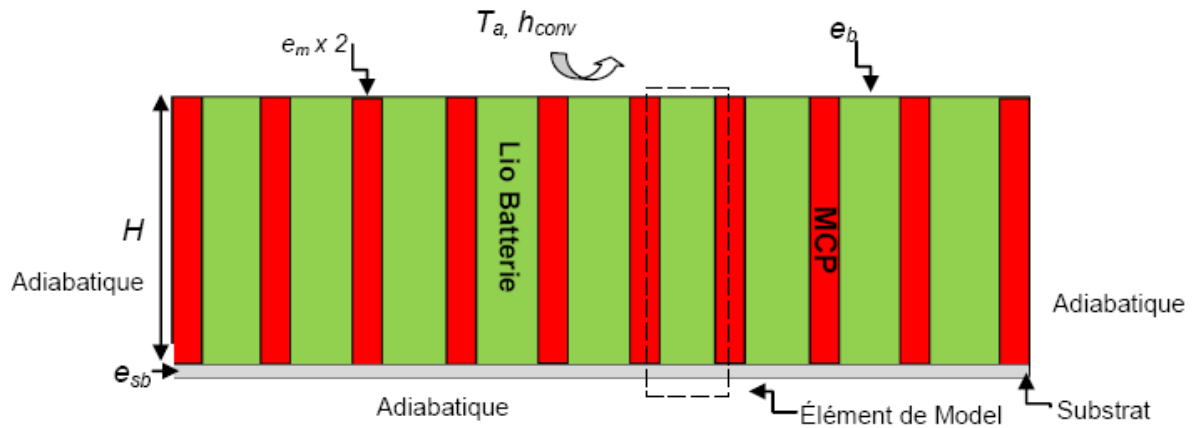


Figure 1: Modèle physique

2.3. Équations gouvernantes

Basé sur la méthode enthalpique [10], l'équation d'énergie s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + S_T \quad (1)$$

avec

$$h = \int_{T_m}^T c_p dT + h(T_m), \quad (h(T_m) = 0) \quad (2)$$

$$S_T = \delta_1 \left(- (1 - \delta_2) \rho \Delta H_f \frac{\partial f}{\partial t} + \delta_2 q_g \right) \quad (3)$$

Les paramètres, $\delta_{1,2}$, et la conductivité thermique, k , intervenant dans l'équation de l'énergie, sont données comme suit:

$$k = \begin{cases} k_m \text{ MCP} \\ k_s \text{ substrat} \\ k_b \text{ batterie} \end{cases}, \quad \delta_1 = \begin{cases} 1 \text{ batterie et MCP} \\ 0 \text{ substrat} \end{cases}, \quad \delta_2 = \begin{cases} 1 \text{ batterie} \\ 0 \text{ MCP} \end{cases} \quad (4)$$

Le second terme de cette dernière équation est un terme source qui tient compte de la chaleur latente associée au changement de phase lorsqu'il est présent. Le terme f représente la fraction liquide donnée par:

$$f = \begin{cases} 1 & \text{si } T > T_m \\ 0 & \text{si } T_m < T \\ 0 < f < 1 & \text{si } T = T_m \end{cases} \quad (5)$$

Propriétés Thermo physique	Batterie, epec 653446 1000mAh 3.7V	MCP Sel hydraté E32	Substrat alumine
(kg/m ³)	2939	1460	3900
c _p (J/kg K)	2400	780	900
k (W/mK)	3	0.51	19.7
ΔH _f (J/kg)	-	186000	-
T _m (°C)	-	32	-

H=5.00 cm, e_b= 0.67 cm, e_m= 0.30 cm , e_s= 0.50 cm

Tableau 1: Propriétés Thermo physiques [8,9]

2.4. Conditions aux limites et initiales:

Les équations précitées sont assujetties aux conditions aux limites et initiale suivantes:

- Interface substrat (s)- batterie (b):

$$T_b = T_s \text{ et } -k_b \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_b = -k_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_s \quad (6)$$

- Interface substrat - MCP

$$T_s = T_{mcp} \text{ et } -k_m \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{mcp} = -k_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_s \quad (7)$$

- Interface MCP - batterie:

$$T_b = T_{mcp} \text{ et } k_b \frac{\partial T}{\partial \eta} \Big|_b = k_m \frac{\partial T}{\partial \eta} \Big|_{mcp} \quad (8)$$

avec, $\eta \perp \text{interface}$.

- à y = H:

$$-k_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=H} = h_{conv} (T_s - T_a) \quad (9)$$

- Sur les parois adiabatiques de la cavité:

$$\frac{\partial T}{\partial \eta} = 0 \text{ avec } \eta \perp \text{frontière} \quad (10)$$

Les propriétés thermo physiques aux interfaces entre deux matériaux différents sont évaluées par les relations suivantes [11]

$$k_i = k_+ \text{ et } k_- \quad (11)$$

Le flux de chaleur au niveau des interfaces entre le MCP et la batterie est évalué comme suit [11]:

$$q_i \approx k \frac{k_+ k_-}{k_+ \delta_+ + k_- \delta_-} (T_+ - T_-) \quad (12)$$

avec δ_+ est la distance séparant l'interface et le premier nœud du matériau '+' et δ_- est la distance séparant l'interface et le premier nœud à l'intérieur du matériau '-'.

- Conditions initiales:

$$T_{ini}=25^{\circ}C, \quad f=0 \quad (13)$$

Les équations gouvernantes sont discrétisées sur un maillage 100x300 en utilisant la méthode des volumes finis [11].

Décharge	Coefficients							
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
1.5 C	119987	465.11	-2.836	0.007	7.732×10^{-6}	4.723×10^{-9}	1.449×10^{-12}	1.70×10^{-16}
1 C	57682	152.02	0.616	9.682×10^{-4}	-7.580×10^{-7}	3.121×10^{-10}	6.460×10^{-14}	$6+5.308 \times 10^{-18}$
0.5 C	21712	16.88	0.048	4.387×10^{-5}	1.914×10^{-8}	4.289×10^{-12}	4.765×10^{-16}	2.084×10^{-20}

Tableau 2: Coefficients des polynômes

2.5. Modèle pour la génération de chaleur au sein de la batterie

La puissance thermique générée dans la batterie consiste en une combinaison entre l'effet de génération interne de chaleur réversible et l'effet de joule comme montrée sur (Eq.15). Pour modéliser la génération de chaleur des batteries de type Epec 653446 (1000mAh3.7V) on a élaboré des corrélations basées sur des résultats publiées par Gümüsu et. al. [12]. Ceci en construisant des polynômes d'ordre 7 donnant la puissance q_g en fonction du temps t pour des vitesses de décharge 0.5 C, 1 C et 1.5 C. Ces fonctions obtenues seront utilisées comme source de chaleur transitoire pour alimenter le code FORTRAN de calcul du transfert de chaleur au sein de la batterie sous convection naturelle.

$$q_g(t) = I \left[(OCV - V) - (T_{bat} \frac{dOCV}{dt}) \right] \quad (15)$$

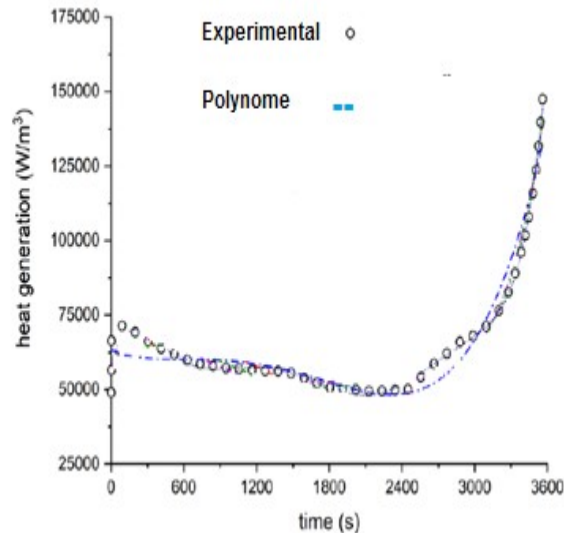


Figure 2: Comparaison entre le polynôme et les résultats expérimentaux [12] pour le cas de décharge 1 C

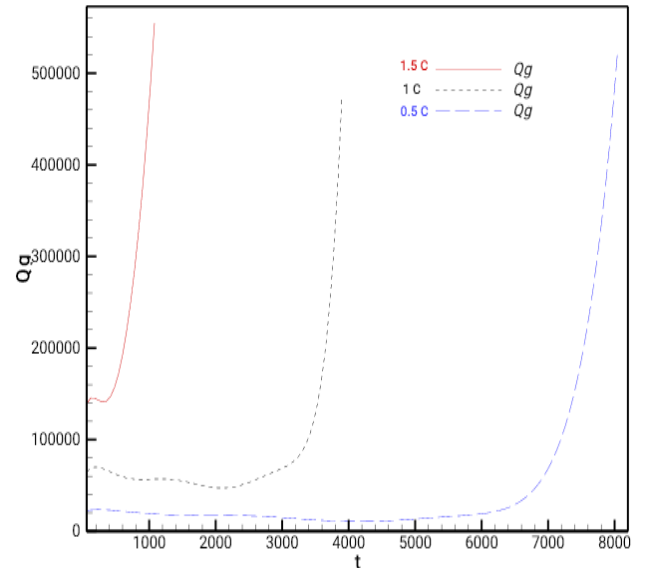


Figure 3: Puissance de chaleur générée en fonction du mode de décharge

L'interpolation polynomiale est retenue pour sa simplicité et elle est adaptée pour représenter le modèle de génération de chaleur de la batterie lors de sa décharge. Les coefficients des polynômes (Eq. 16) obtenues sont regroupés au Tableau 2 selon le mode de décharge 1.5 C, 1 C ou 0.5 C.

$$q_g(t) = a_0 + \sum_{n=1}^7 a_n t^n \quad (16)$$

$q_g(t)$ est la génération de chaleur et t la durée d'usage de la batterie.

La Figure 2 donne une comparaison entre le polynôme d'ordre 7 obtenu avec les résultats expérimentaux publiés par Gümüşsu et. al. [12] pour le cas de décharge 1 C. Cette figure démontre un bon accord entre l'interpolation et les données expérimentales.

La Figure 3 donne l'évolution temporelle de la puissance de chaleur de la batterie pour les différents modes de décharge étudiés. On remarque que la sollicitation des vitesses supérieures de décharge conduit à l'augmentation rapide de la chaleur générée ce qui peut provoquer une surchauffe incontrôlable de la batterie.

3. Résultats et discussion

3.1. Validation numérique

L'étude de maillage (figure 4) montre qu'un maillage 100x300 assure une bonne précision (écart < 0,7% par rapport à un maillage plus fin) pour un temps de calcul acceptable.

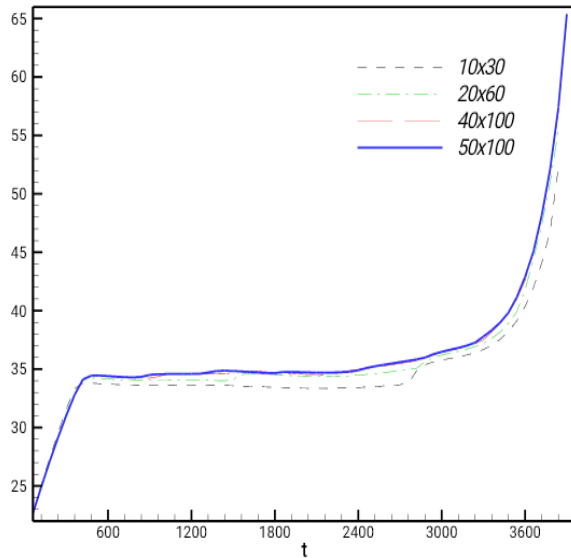


Figure 4: Effet du maillage sur la température maximale de la batterie pour le cas de décharge 1 C

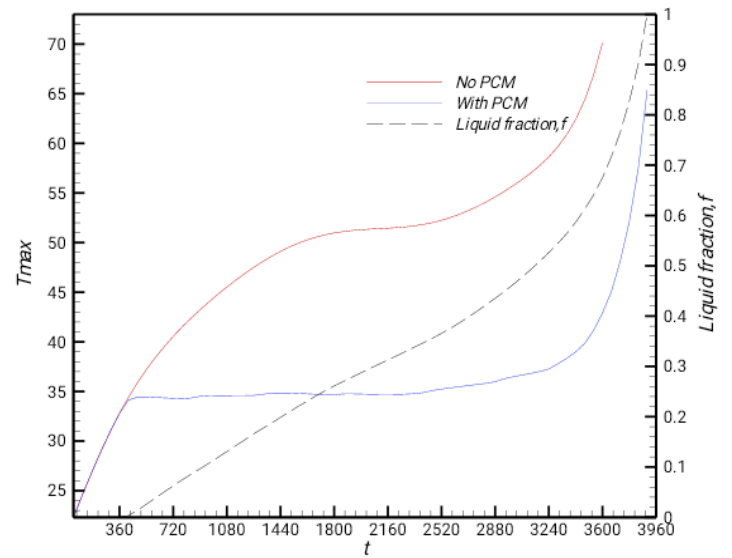


Figure 5: Température de la batterie avec et sans matériaux à changement de phase et fraction liquide du MCP correspondante

3.2. Effet du MCP sur le refroidissement

La Figure 5 compare l'évolution de la température maximale de la batterie avec et sans MCP pour une décharge 1C. Le « cas sans MCP » correspond à un refroidissement uniquement par convection naturelle sur la face supérieure, les faces latérales étant adiabatiques. En l'absence de MCP, la température dépasse rapidement 53°C (seuil critique) après 2200 s. Avec MCP, la température se stabilise autour du point de fusion (32°C) pendant une longue période (~3000 s), grâce à l'absorption de la chaleur latente. Une fois que le MCP est partiellement fondu ($f > 0.4$), la résistance thermique augmente et la batterie se réchauffe, mais reste sous contrôle plus longtemps.

3.3. Effet du régime de décharge

La Figure 6 illustre l'influence du régime de décharge sur la température et la fraction liquide. Pour une décharge rapide (1.5C), la batterie chauffe très vite, le MCP fond rapidement mais la température atteint 72°C après 1000 s, démontrant une insuffisance du système pour ce régime extrême. Pour une décharge lente (0.5C), la batterie reste à une température acceptable (< 35°C) pendant près de 7000 s, ce qui est très favorable.

La Figure 7 montre la répartition entre chaleur sensible (q_{s}) et latente (q_{L}) stockée par le MCP. On observe clairement que pour les régimes 1C et 0.5C, une grande partie de l'énergie est stockée sous forme latente, ce qui explique le maintien de la température. Le régime 1.5C, bien que stockant aussi une quantité importante de chaleur latente (220 kJ), est marqué par une surchauffe rapide due à l'intensité de la génération de chaleur.

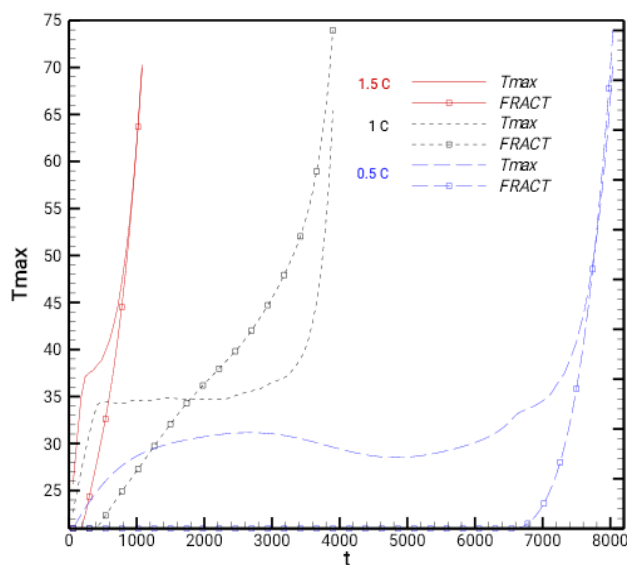


Figure 6: Effet de la vitesse de décharge sur la température de la batterie et sur la fraction liquide

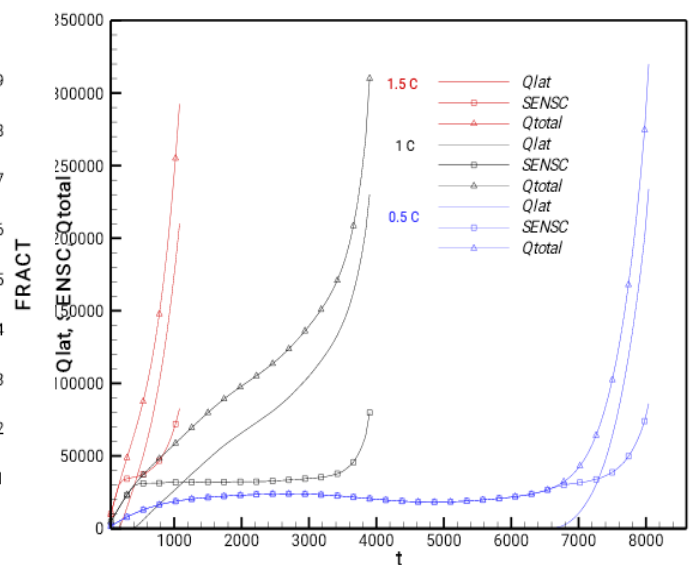


Figure 7: Effet de la vitesse de décharge sur la variation temporelle du stockage de la chaleur

4. Conclusion

Cette étude a évalué numériquement l'efficacité d'un système de refroidissement passif pour batteries lithium-ion, utilisant un matériau à changement de phase. Les résultats montrent que l'intégration d'un MCP permet un contrôle thermique efficace en limitant la montée en température de la batterie grâce à l'absorption de chaleur latente. L'efficacité du système dépend fortement du régime de décharge : elle est très satisfaisante pour des décharges modérées (0.5C, 1C) mais insuffisante pour des décharges très rapides (1.5C) dans la configuration étudiée. Cependant, cette étude repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices (absence de convection dans le MCP fondu, conductivité thermique constante, géométrie 2D) qui peuvent influencer la précision des résultats. Une validation expérimentale est nécessaire pour confirmer ces tendances. Les perspectives de ce travail incluent : (i) l'optimisation de la quantité de MCP pour minimiser le poids et l'encombrement tout en assurant une protection efficace, (ii) l'utilisation de MCP à conductivité thermique améliorée (nano-MCP) pour accélérer le transfert de chaleur, et (iii) la conception de systèmes hybrides combinant ce stockage passif avec un refroidissement actif à faible consommation pour les régimes de forte sollicitation.

Références

- [1] Li, K.; Sun, C.; Zhang, M.; et al. A Study of the Thermal Management and Discharge Strategies of Lithium-Ion Batteries in a Wide Temperature Range. *Energies* 2024, 17, 2319.
- [2] Luo, Y.; Qiu, X.; Wang, S.; Jia, Z. Optimizing a direct flow cooling battery thermal management with bod baffles for electric vehicles: An experimental and simulation study. *J. Energy Storage* 2023, 74, 109410.
- [3] Luo, L.; Liu, Y.; Liao, Z.; Zhong, J. Optimal structure design and heat transfer characteristic analysis of X-type air-cooled battery thermal management system. *J. Energy Storage* 2023, 67, 107681.
- [4] Faraji, M.; Faraji, H.; Elami, M. Numerical Study of the Transient Melting Of Nano-Enhanced Phase Change Material. *Heat Transfer Engineering* 2019, DOI: 10.1080/01457632.2019.1692496.
- [5] Suo, Y.; Tang, C.; Jia, Q.; Zhao, W. Influence of PCM configuration and optimization of PCM proportion on the thermal management of a prismatic battery with a combined PCM and air cooling structure. *J. Energy Storage* 2024, 80, 110340.
- [6] Wang, Y.; Gao, T.; Zhou, L.; Gong, J.; Li, J. A parametric study of a hybrid battery thermal management system that couples PCM with wavy microchannel cold plate. *Appl. Therm. Eng.* 2023, 219, 119625.
- [7] Li, K.; Yao, X.; Li, Z.; et al. Thermal management of Li-ion batteries with passive thermal regulators based on composite PCM materials. *J. Energy Storage* 2024, 89, 111661.
- [8] Spinner, N.S.; Mazurick, R.; Brandon, A.; et al. Analytical, Numerical and Experimental Determination of Thermophysical Properties of Commercial 18650 Lithium-Ion Battery. *J. Electrochem. Soc.* 2015, 162, A2789-A2795.
- [9] Mills, A.; Al-Hallaj, S. Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs. *J. Power Sources* 2005, 141, 307-315.
- [10] Voller, V. R.; Cross, M.; Markatos, N. C. An enthalpy method for convection/diffusion phase change. *Int. J. Num. Meth. Engng* 1987, 24, 271-284.
- [11] Patankar, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*; Hemisphere, 1980.
- [12] Gümüßsu, E.; Ekici, Ö.; Köksal, M. 3-D CFD modeling and experimental testing of thermal behavior of a Li-Ion battery. *Appl. Therm. Eng.* 2017, 120, 484-495.