

Gestion thermique des batteries Li-ion par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Lucia Ianniciello, Pascal Henry Biwole, Patrick Achard

► **To cite this version:**

Lucia Ianniciello, Pascal Henry Biwole, Patrick Achard. Gestion thermique des batteries Li-ion par l'utilisation de matériaux à changement de phase. XIIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes , May 2017, Saint-Lô, France. <hal-01663060>

HAL Id: hal-01663060

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01663060>

Submitted on 13 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

GESTION THERMIQUE DES BATTERIES LI-ION PAR L'UTILISATION DE MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

Lucia IANNICIELLO ^{a,*}, Pascal Henry BIWOLE ^{a,b}, Patrick ACHARD ^a

^a MINES ParisTech, PSL Research University, PERSEE – Centre procédés, énergies renouvelables et systèmes énergétiques, Sophia Antipolis, France

^b Université Côte d'Azur, Laboratoire J-A Dieudonné, UMR CNRS 7351, Nice, France

RÉSUMÉ

Les batteries lithium-ion nécessitent une gestion thermique pour que soit assuré leur bon fonctionnement. Des systèmes actifs comme un refroidissement par air en convection forcée ou par un liquide de refroidissement sont employés actuellement. L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP), en tant que système passif, représente une alternative intéressante. Dans ce papier une comparaison est proposée entre un système comportant un MCP et un système à air en convection forcée.

Mots Clés : véhicule électrique ; batteries Li-ion ; gestion thermique ; matériaux à changement de phase ; stockage par chaleur latente ; système passif.

NOMENCLATURE

Symboles :

B_0 fonction pour le changement de phase
 B_1 fonction lissée pour le changement de phase
 C_p chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
 D fonction Delta Dirac lissé
 h coefficient de convection forcée, $W.m^{-2}.K^{-1}$
 k conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
 L_F chaleur latente de fusion, $J.kg^{-1}$
 T température, K

T_m température de fusion

T_s température de surface, K

u vitesse, m/s

Lettres grecques :

ΔT différence de température, K

ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$

Indices / Exposants :

liquide phase liquide

solide phase solide

1. INTRODUCTION

L'avenir des véhicules électriques dépend fortement du développement des batteries. En effet, les performances du véhicule électrique sont limitées par celles des batteries Li-ion, les plus utilisées. Les batteries électrochimiques sont chères et ont une durée de vie et une autonomie faibles. De plus, le temps nécessaire pour recharger une batterie est nettement supérieur à celui pour faire le plein d'essence. Les performances des batteries Li-ion pourraient être améliorées par une gestion thermique permettant de garder la température de la batterie entre 15 et 35°C.

Le stockage d'énergie par chaleur latente, ayant recours à l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP), représente une alternative intéressante car elle permet d'avoir un système de gestion thermique passif. Les MCP seraient moins chers à mettre en œuvre et plus simples à utiliser. De plus, ils pourraient permettre d'obtenir une plus grande autonomie et une meilleure durée de vie de la batterie, en la maintenant dans la gamme de température optimale [1].

De nombreuses études ([1], [2], [3], [4]) ont été effectuées sur l'utilisation de MCP pour la gestion thermique des batteries Li-ion. Al-Hallaj and Selman [5] ont introduit l'utilisation de MCP pour les batteries et ont montré que le refroidissement par MCP est plus

* auteur correspondant : lucia.ianniciello@mines-paristech.fr

performant que le refroidissement par air. De plus, les performances des MCP peuvent être améliorées de plusieurs façons : en augmentant « artificiellement » la conductivité des MCP en ajoutant des matériaux conducteurs (ailettes en métal, mousse métallique, graphite, etc.) ; en utilisant plusieurs couches de MCP différents pour absorber la chaleur à différentes températures. Khateeb et al. [1], Somasundaran et al. [6], Li et al. [7], Babapoor et al. [4], Rao et al. [8], Lv. et al. [9], Alipanah et al. [10] et Jiang et al. [11] ont testé des systèmes avec des MCP mélangés avec des métaux ou du graphite. Ramandi et al. [12], Moraga et al. [13] et Nasehi et al. [14] ont travaillé sur des systèmes utilisant plusieurs couches de MCP. Sabbah et al. [15], Kizilel et al. [16] et Hémerly et al. [2] ont comparé l'emploi de MCP et d'air en convection forcée. L'utilisation de MCP permet à chaque fois d'avoir une température plus uniforme au sein de la batterie et dans certains cas même d'obtenir des températures de cellule plus faibles. Cependant dans ces études les températures visées étaient plus élevées, les MCP utilisés avaient pour température de fusion 28°, 40°C jusqu'à 50°C pour certaines études. Dans cette étude, le but étant de maintenir la température en dessous de 25°C, le MCP employé a une température de changement de phase de 21,5°C. De plus, cette étude est effectuée en se basant sur un cycle de sollicitation classique de test pour les véhicules électriques.

Des modèles représentant une cellule de batterie prismatique soumise à un écoulement d'air en convection forcée, d'une part, et entourée de MCP, d'autre part, ont été développés. Les transferts thermoconvectifs ont été résolus numériquement en régime dynamique à l'aide d'éléments finis quadratiques P2. Ces modèles ont été créés dans le but de comparer deux modes de gestion thermique, l'un actif et l'autre passif. Les performances du système actif dépendent fortement de la vitesse de l'air et de la température d'entrée de l'air. En effet, plus la température d'air en entrée est basse et sa vitesse élevée, plus l'échange convectif à la surface est important. Cependant, refroidir l'air en entrée nécessite la mise en place d'un système supplémentaire. De même, les performances du système passif dépendent de la quantité de matériau employée. Plus la quantité employée est importante plus la quantité d'énergie thermique pouvant être stockée est élevée. Ces paramètres déterminent l'efficacité énergétique du système de refroidissement de la batterie. Nous les avons donc fait varier et nous avons comparé la température moyenne de la batterie obtenue dans chacun des cas. Le MCP considéré dans nos modèles est un matériau d'origine végétale avec une température de changement de phase liquide-solide à 21,5°C. Le but de l'étude est de maintenir la température moyenne de la batterie entre 20 et 25°C.

2. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

Les performances des batteries peuvent être améliorées lorsque leur température est maintenue dans une certaine gamme. En effet, lorsque la température de la batterie est comprise entre 15°C et 35°C sa durée de vie est plus longue et son autonomie est moins affectée par le temps [17].

Deux modèles ont été développés. Le premier représente une cellule de batterie prismatique entourée d'une couche de MCP. Le second représente une cellule de batterie prismatique placée dans un écoulement d'air forcé. Les transferts thermoconvectifs ont été résolus numériquement en régime transitoire avec une discrétisation en éléments finis quadratiques.

Les dimensions d'une cellule sont : 147,8 mm x 91 mm x 26,8 mm. La sollicitation de la cellule de batterie est un cycle WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) suivi d'une décharge correspondant à 10 min de conduite sur autoroute. Cette sollicitation est représentée par une quantité de chaleur produite par effet Joule se dégageant de la cellule. Elle est répartie sur l'ensemble de la cellule. Cette quantité de chaleur produite par effet Joule devant être extraite d'une cellule de batterie pendant un cycle est de 15 kJ. Un cycle dure 2500 s (41 min et 40 s). Sans la présence de gestion thermique, la température d'une cellule à la fin d'un seul cycle serait 40°C, en considérant une température initiale de 20°C.

Dans la configuration avec refroidissement à air, cas (a), la cellule de batterie est dans un écoulement d'air forcé. Différents débit d'air sont testés pour cette configuration. Dans la configuration avec le MCP, cas (b), la cellule de batterie est entourée d'une couche de MCP et plusieurs épaisseurs de MCP sont testées. Autour du MCP un transfert de chaleur par convection naturelle est appliqué. Les deux configurations sont représentées en Figure 1.

Le modèle mathématique fait appel aux équations de conservation de l'énergie, de la masse, et à l'équation de diffusion de la chaleur par convection (équations 1, 2 et 3).

Dans le cas (a), la convection forcée aux bornes de la cellule est prise en compte et la convection naturelle négligée ($Gr/Re^2 < 1$). Dans la cellule la conduction est considérée et les échanges radiatifs sont négligés pour tout le système. La température de l'air en convection forcée est de 20°C. Les coefficients de convection forcée calculés pour chaque débit d'air sont regroupés en Tableau 1.

Tableau 1 : Coefficients de convection forcée.

Vitesse (m/s)	1	2,5	5	7,5
h (W.m ⁻² .K ⁻¹)	10	21	36	50

Dans le cas (b), la conduction est résolue dans la cellule, entre la cellule et le MCP et dans le MCP. La convection dans le MCP est négligée au vu de la taille réduite du contenant du MCP. Aux bornes du MCP, la convection naturelle est considérée avec une température ambiante de 20°C. Les échanges radiatifs sont négligés dans tout le système.

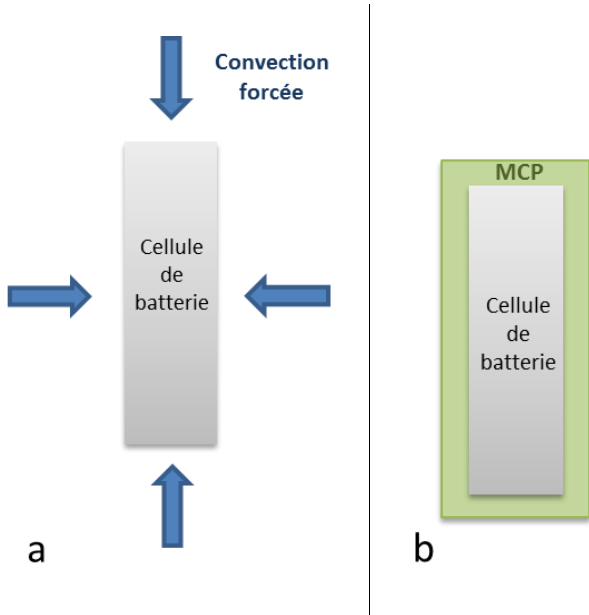


Figure 1 : Représentation : a) Cellule + Air et b) Cellule + MCP

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \nabla T \right) = \nabla (k \nabla T) + h(T_s - T_\infty) + Q \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

$$\varphi_{cv} = h(T_s - T) \quad (3)$$

Pendant le changement de phase du MCP, ses propriétés thermo-physiques évoluent. La méthode utilisée pour modéliser le changement de phase du MCP est celle présentée par Biwolé et al. [18]. Une fonction B_0 , est définie pour représenter la fraction liquide du MCP (équation 4). La fonction B_0 est approximée par une équation, B_1 , qui est deux fois continument dérivable. B_1 est utilisée pour définir la masse volumique et la conductivité thermique du MCP (équations 5 et 6). Une fonction D est définie pour exprimer la capacité thermique du MCP. D est une

fonction Delta Dirac lissée qui permet de répartir équitablement la chaleur latente de fusion autour du point de fusion (équation 7). La capacité thermique du MCP est donc définie à l'aide des fonctions B_1 et D (équation 8).

Le système est discrétisé par un maillage composé d'éléments triangulaires 2D.

$$B_0(T) = \begin{cases} 0, & T < (T_m - \Delta T) \\ \frac{T - T_m + \Delta T}{2\Delta T}, & (T_m - \Delta T) \leq T \leq (T_m + \Delta T) \\ 1, & T > (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho(T) = \rho_{solide} + (\rho_{liquide} - \rho_{solide}) \times B_1(T) \quad (5)$$

$$k(T) = k_{solide} + (k_{liquide} - k_{solide}) \times B_1(T) \quad (6)$$

$$D(T) = \begin{cases} 0, & T < (T_m - \Delta T), T > (T_m + \Delta T) \\ \frac{\exp\left(\frac{-(T - T_m)^2}{(\Delta T / 4)^2}\right)}{\sqrt{\pi(\Delta T / 4)^2}}, & (T_m - \Delta T) \leq T \leq (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (7)$$

$$C_p(T) = C_{p_{solide}} + (C_{p_{liquide}} - C_{p_{solide}}) \times B_1(T) + L_f \times D(T) \quad (8)$$

3. RESULTATS

3.1. Cas a : convection forcée

L'aptitude de l'air en convection forcée à refroidir la batterie est évaluée pour différents débits d'air (1, 2,5, 5 et 7,5 m/s). Plus le débit d'air est important, plus le refroidissement est efficace, cependant, les coûts de fonctionnement sont plus importants. Les résultats représentant la température moyenne de la cellule au cours du temps sont tracés en Figure 3.

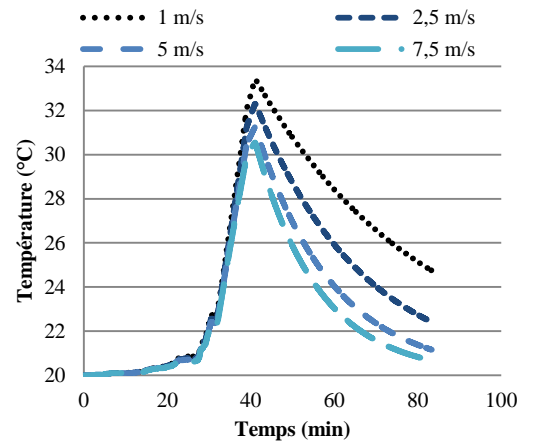


Figure 3 : Température moyenne de la cellule de batterie au cours du temps (cas a)

3.2. Cas b : MCP

Les performances du MCP sont évaluées pour différentes épaisseurs de MCP (2, 3, 4 et 5 mm). Les résultats des simulations donnant la température moyenne de la cellule de batterie sont représentés en Figure 4. Quelle que soit l'épaisseur de MCP, la température maximale de la cellule reste la même. En Figure 5, la fraction liquide du MCP au cours du temps a été tracée. Plus la quantité de MCP est importante moins la fraction liquide est grande en fin de cycle. Cependant, le pack batterie sera d'autant plus lourd que la quantité de MCP par cellule est importante. De plus, la convection naturelle autour du MCP ne permet pas de régénérer le MCP. En effet, il faudrait que la température ambiante soit plus faible.

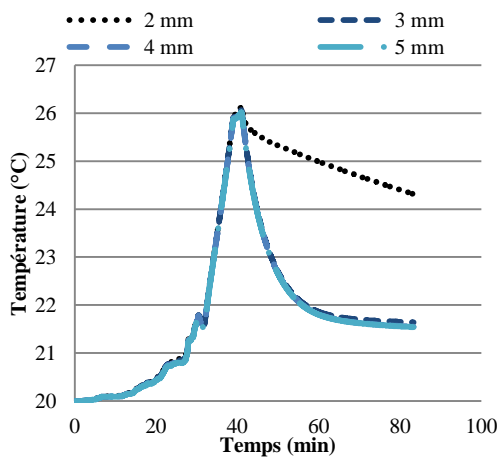


Figure 4 : Température moyenne de la cellule de batterie au cours du temps (cas b)

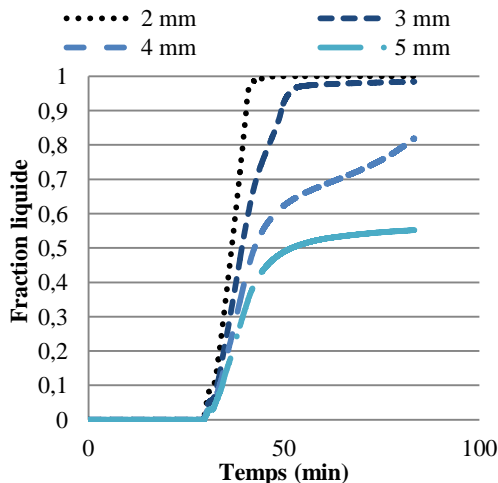


Figure 5 : Fraction liquide du MCP au cours du temps (cas b)

Le Tableau 2 regroupe les valeurs de température moyenne de la cellule au cours du temps pour les deux cas d'étude. Quel que soit le débit d'air, la température

de la cellule reste plus élevée avec cette configuration de refroidissement qu'avec le MCP pour un cycle. Cependant, les résultats en fraction liquide montrent bien qu'avec la plupart des épaisseurs de MCP il serait difficile d'absorber un second pic de puissance étant donné que la convection naturelle avec une température ambiante de 20°C n'a pas pu régénérer le MCP.

Tableau 2 : Température maximale de la cellule pour les cas a et b.

Cas a				
Vitesse (m/s)	1	2,5	5	7,5
Température (°C)	33,4	32,3	31,3	30,6
Cas b				
Épaisseur (mm)	2	3	4	5
Température (°C)	26,2	26,1	26,0	26,0

4. DISCUSSION

Le MCP présente une meilleure aptitude à absorber les pics de puissance et à modérer l'élévation de température et à éviter ainsi l'échauffement des cellules de batterie. Cependant, un des problèmes soulevés par cette étude est la capacité du MCP à pouvoir absorber plusieurs cycles de sollicitation. En effet, le MCP ne peut pas décharger la chaleur absorbée avant le prochain pic de puissance. De plus, on remarque que entre 2 mm et 5 mm d'épaisseur de MCP, l'ajout de MCP n'est pas utile étant donné que la température maximale de la cellule reste la même et que le MCP ne fond pas entièrement. Cela est peut-être dû à la conductivité thermique du MCP trop faible. Il est donc préférable d'avoir une fine couche de MCP.

L'air, en tant que système actif, peut fonctionner pour plusieurs cycles à la suite. Cependant le refroidissement étant moins efficace, la température de la cellule est élevée à la fin du cycle.

Une solution serait d'avoir un système semi-actif pour pouvoir proposer une gestion thermique plus fiable et plus performante [20]. En effet, Javani et al. [21], Fathabadi [22], Ling et al. [20], Rao et al. [23] et Wang et al. [24] ont travaillé sur des systèmes combinant l'utilisation de MCP avec un système actif (air, liquide de refroidissement, caloduc). Cependant, pour que le système reste le plus simple possible, la meilleure option est d'utiliser les MCP avec de l'air en convection forcée. De plus, pour limiter les coûts opératoires liés à la circulation d'air, il faudrait qu'elle ne soit active que pour régénérer le MCP, à la fin de chaque cycle. En effet, comme il a été vu ci-dessus, le MCP est un meilleur candidat lorsqu'il s'agit d'absorber un pic de puissance.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer et de comparer deux systèmes de gestion thermique pour un cycle de sollicitation précis. Le système avec un MCP est plus performant pour absorber les pics de puissance et limiter l'élévation de température, cependant il faut prévoir un système complémentaire pour le régénérer. En effet, avec une température ambiante fixée à 20°C on n'arrive pas à régénérer le MCP. Le refroidissement par air ne présente pas ce problème mais les températures obtenues sont plus élevées et le coût opératoire induit pourrait être plus conséquent. Une solution serait donc de coupler ces deux systèmes pour absorber les pics de puissance de la batterie avec le MCP et régénérer le MCP avec l'air. Ainsi, les coûts opératoires devraient être réduits et la gestion thermique devrait être toujours opérationnelle. Cependant aucune des deux solutions permettent d'atteindre l'objectif de 25°C en température maximale. Il faudrait donc revoir cet objectif ou améliorer la solution. Nous avons vu qu'au-delà de 2 mm d'épaisseur l'ajout de MCP n'est plus utile. Cela est peut être dû à la conductivité thermique du MCP qui est très faible. En modifiant cette conductivité thermique en ajoutant une mousse métallique par exemple une épaisseur de 3, 4 ou 5 mm de MCP pourrait diminuer la température maximale de la cellule. Par la suite, il serait aussi nécessaire d'effectuer une expérience correspondant à cette étude pour pouvoir valider le modèle et les résultats.

RÉFÉRENCES

- [1] S. A. Khateeb, M. M. Farid, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter," *Journal of Power Sources*, vol. 128, no. 2, pp. 292–307, Apr. 2004.
- [2] C.-V. Hémy, F. Pra, J.-F. Robin, and P. Marty, "Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material," *Journal of Power Sources*, vol. 270, pp. 349–358, Dec. 2014.
- [3] Z. Ling, J. Chen, X. Fang, Z. Zhang, T. Xu, X. Gao, and S. Wang, "Experimental and numerical investigation of the application of phase change materials in a simulative power batteries thermal management system," *Applied Energy*, vol. 121, pp. 104–113, May 2014.
- [4] A. Babapoor, M. Azizi, and G. Karimi, "Thermal management of a Li-ion battery using carbon fiber-PCM composites," *Applied Thermal Engineering*, vol. 82, pp. 281–290, May 2015.
- [5] S. Al-Hallaj and J. R. Selman, "Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications," *Journal of Power Sources*, vol. 110, no. 2, pp. 341–348, Aug. 2002.
- [6] K. Somasundaram, E. Birgersson, and A. S. Mujumdar, "Thermal-electrochemical model for passive thermal management of a spiral-wound lithium-ion battery," *Journal of Power Sources*, vol. 203, pp. 84–96, Apr. 2012.
- [7] W. Q. Li, Z. G. Qu, Y. L. He, and Y. B. Tao, "Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials," *Journal of Power Sources*, vol. 255, pp. 9–15, Jun. 2014.
- [8] Z. Rao, Y. Huo, X. Liu, and G. Zhang, "Experimental investigation of battery thermal management system for electric vehicle based on paraffin/copper foam," *Journal of the Energy Institute*, vol. 88, no. 3, pp. 241–246, Aug. 2015.
- [9] Y. Lv, X. Yang, X. Li, G. Zhang, Z. Wang, and C. Yang, "Experimental study on a novel battery thermal management technology based on low density polyethylene-enhanced composite phase change materials coupled with low fins," *Applied Energy*, vol. 178, pp. 376–382, Sep. 2016.
- [10] M. Alipanah and X. Li, "Numerical studies of lithium-ion battery thermal management systems using phase change materials and metal foams," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 102, pp. 1159–1168, Nov. 2016.
- [11] G. Jiang, J. Huang, Y. Fu, M. Cao, and M. Liu, "Thermal optimization of composite phase change material/expanded graphite for Li-ion battery thermal management," *Applied Thermal Engineering*, vol. 108, pp. 1119–1125, Sep. 2016.
- [12] M. Y. Ramandi, I. Dincer, and G. F. Naterer, "Heat transfer and thermal management of electric vehicle batteries with phase change materials," *Heat Mass Transfer*, vol. 47, no. 7, pp. 777–788, Feb. 2011.
- [13] N. O. Moraga, J. P. Xamán, and R. H. Araya, "Cooling Li-ion batteries of racing solar car by using multiple phase change materials," *Applied Thermal Engineering*, vol. 108, pp. 1041–1054, Sep. 2016.
- [14] R. Nasehi, A. Alamatsaz, and M. Salimpour, "Using multi-shell phase change materials layers for cooling a lithium-ion battery," *ResearchGate*, vol. 20, no. 2, pp. 391–403, Jan. 2016.
- [15] R. Sabbah, R. Kizilel, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution," *Journal of Power Sources*, vol. 182, no. 2, pp. 630–638, Aug. 2008.
- [16] R. Kizilel, R. Sabbah, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 2, pp. 1105–1112, Dec. 2009.
- [17] Ahmad Pesaran, "Tools for Designing Thermal Management of Batteries In Electric Drive Vehicles," Pasadena, CA, 04-Feb-2013.
- [18] P. H. Biwole, P. Eclache, and F. Kuznik, "Phase-change materials to improve solar panel's performance," *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 59–67, Jul. 2013.
- [19] A. Mills and S. Al-Hallaj, "Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs," *Journal of Power Sources*, vol. 141, no. 2, pp. 307–315, Mar. 2005.
- [20] Z. Ling, F. Wang, X. Fang, X. Gao, and Z. Zhang, "A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling," *Applied Energy*, vol. 148, pp. 403–409, Jun. 2015.
- [21] N. Javani, I. Dincer, G. F. Naterer, and G. L. Rohrauer, "Modeling of passive thermal management for electric vehicle battery packs with PCM between cells," *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, no. 1, pp. 307–316, Dec. 2014.
- [22] H. Fathabadi, "High thermal performance lithium-ion battery pack including hybrid active-passive thermal management system for using in hybrid/electric vehicles," *Energy*, vol. 70, pp. 529–538, Jun. 2014.
- [23] Z. Rao, Q. Wang, and C. Huang, "Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system," *Applied Energy*, vol. 164, pp. 659–669, Feb. 2016.
- [24] Q. Wang, Z. Rao, Y. Huo, and S. Wang, "Thermal performance of phase change material/oscillating heat pipe-based battery thermal management system," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 102, pp. 9–16, Apr. 2016.