ISSN: 2476-6909; Modares. Mech. Eng. *2025;25(07):429-438.*

Modares Mechanical Engineering

DOI: 10.48311/MME.25.7.429
journal homepage: mme.modares.ac.ir

Experimental Evaluation of Phase Change Materials Performance on the Thermal Management Enhancement of a Battery Pack in an Electric Motorcycle

Mohammad Bagher Montazeri, Gholam Reza Molaeimanesh*

[1] Department of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: February 14, 2025
Revised: June 03, 2025
Accepted: June 27, 2025
ePublished: September 12, 2025

ABSTRACT

Nowadays, electric motorcycles face several safety, performance and operational challenges, especially in hot climates. The increasing demand for thermal management of lithium-ion batteries to avoid potential concerns of thermal runaway due to high temperatures and the typical plastic housing of the battery pack is the main challenge. This paper introduces and investigates the performance of a high-power electric motorcycle battery pack considering the cooling system comprising PCM and conducting elements for tropical regions, for the first time. Also, six types of pure and hybrid thermal management systems including the use of phase change materials, aluminum rods, aluminum plates and their simultaneous use in pairs for battery cooling are considered. By experimentally evaluating the combination of phase change materials and metal parts, and focusing on the performance in tropical climates, this research provides a practical solution to improve thermal management and extend the battery life of electric motorcycles. The results of this research show that all systems except the use of aluminum rods contribute to the cooling of the battery pack. The best performance is associated with the combination of phase change material and aluminum plate, which improves the maximum temperature by 11.3% compared to the case without thermal management. This is followed by the combination of phase change material and aluminum rod and phase change material, which provide a maximum temperature reduction of 10.1% and 9.5%, respectively. Finally, the use of phase change material is recommended in all cases, as it can reduce the operating temperature of the battery by 12.4% and increase its life.

Keywords: Li-Ion Battery, Thermal Management System (TMS), Electric Motorcycle, Phase Change Material (PCM)

How to cite this article
Montazeri M B and Molaeimanesh G R, Experimental Evaluation of Phase Change Materials Performance on the Thermal Management Enhancement of a Battery Pack in an Electric Motorcycle. Modares Mechanical Engineering; *2025;25(07):429-438.*

*Corresponding author's email: molaeimanesh@iust.ac.ir
*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-2292-7830

Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

شاپا: ۷۹۰۹-۲۴۷۶؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۴۳۸-۴۲۹:(۰۷)۲۵؛۱۴۰۴

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/MME.25.7.429

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir

ارزیابی تجربی عملکرد مواد تغییرفازدهنده در بهبود مدیریت حرارتی یک پک باتری موتورسیکلت الکتریکی

محمدباقر منتظری، غلامرضا مولائی‌منش*

گروه قوای محرکه، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله
دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۲۱

چکیده

امروزه موتورسیکلت‌های الکتریکی با چالش‌های ایمنی، عملکردی و عملیاتی متعددی به‌ویژه در شرایط آب و هوایی گرم مواجه هستند. افزایش تقاضا برای مدیریت حرارتی باتری لیتیوم یونی برای جلوگیری از نگرانی‌های بالقوه ناشی از فرار حرارتی به دلیل دماهای بالا و محفظه پلاستیکی معمولی بسته باتری چالش اصلی است. این مقاله به معرفی و بررسی عملکرد یک بسته باتری موتورسیکلت الکتریکی توان بالا با در نظر گرفتن سیستم خنک‌کاری برای مناطق گرمسیر می‌پردازد. همچنین شش نوع سیستم مدیریت حرارتی خالص و ترکیبی شامل استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، راد آلومینیومی، صفحه آلومینیومی و استفاده همزمان دو به دو آنها جهت خنک‌کاری باتری‌ها درنظر گرفته شده است. این پژوهش با ارزیابی تجربی ترکیب مواد تغییر فازدهنده و المانهای رسانای فلزی، و تمرکز بر عملکرد در اقلیم گرمسیری، راهکاری عملی برای بهبود مدیریت حرارتی موتورسیکلت‌های الکتریکی برای اولین بار ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تمام سیستم‌ها بجز استفاده از راد آلومینیومی به خنک شدن بسته باتری کمک می‌کنند. بهترین عملکرد مربوط به ترکیب مواد تغییر فاز دهنده و صفحه آلومینیومی است که حداکثر دما را ۱۱/۳ % نسبت به حالت بدون مدیریت حرارتی بهبود می‌دهد. پس از آن ترکیب مواد تغییر فاز دهنده و راد آلومینیومی و مواد تغییر فاز دهنده است که به ترتیب ۱۰/۱ % و ۹/۵ % کاهش بیشینه دما را به همراه دارند. در نهایت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در تمام حالت‌ها توصیه می‌شود، چرا که می‌تواند دمای عملکردی باتری را ۱۲/۴ % کاهش داده و عمر آن را افزایش دهد.

کلیدواژه‌ها: باتری لیتیوم یون، سیستم مدیریت حرارتی، موتورسیکلت برقی، مواد تغییر فاز دهنده

نحوه ارجاع به این مقاله

منتظری محمد باقر و مولائی‌منش غلامرضا، ارزیابی تجربی عملکرد مواد تغییرفازدهنده در بهبود مدیریت حرارتی یک پک باتری موتورسیکلت الکتریکی، مهندسی مکانیک مدرس. ۴۳۸-۴۲۹:(۰۷)۲۵؛۱۴۰۴

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: molaeimanesh@iust.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۰۰۰۰-۰۰۰۲-۲۲۹۲-۷۸۳۰

Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

بر اساس گزارش سازمان بین‌المللی انرژي، ۱۲% از انتشار گاز گلخانه‌ای دي‌اکسیدکربن در سال ۲۰۱۹، مربوط به وسایل نقلیه است. همچنین میزان تقاضا و تولید سوخت فسیلی از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲٦، حکایت از کاهش میزان سوخت توليدي از سال ۲۰۱٤ دارد؛ درحالیکه همچنان بر تقاضاي مصرف آن افزوده می‌شود [1]. راهکارهاي مختلفی براي مقابله با تشدید آلودگی محیط‌زیست و کمبود انرژي پیشنهاد شده است. با بحران آلایندگی شهرهای بزرگ و کمبود سوخت‌های فسیلی، جایگزینی خودروهای سنگین و پر مصرف با خودروهای کوچک‌تر برای حمل و نقل داخل شهری یکی از راه حل‌های مبارزه با این معضلات می‌باشد.

وسایل نقلیهٔ دوچرخ بیش از ۵۰٪ کل وسایل نقلیهٔ موتوري را در بسیاري از کشورهاي آسیایی تشکیل می‌دهند. در سال ۲۰۰۰، در آسیا حدود ٤۰ میلیون موتورسیکلت موجود بوده که این عدد با نرخ رشد سالیانه ۱۸٪ درحال افزایش است [2]. بازده زیاد، مسافت قابل پیمایش طولانی طی یک بار شارژ، ایمنی مطلوب و قیمت رقابتی با خودروهاي احتراقی، ازجمله ویژگی‌هاي داراي اهمیت براي خودروهاي الکتریکی است. موتورسیکلت الکتریکی یکی از وسایل حمل و نقل با انرژي پاك است و در بسیاري از کشورها پتانسیل استفاده از آن زیاد است.

باتری‌های لیتیوم یونی که دارای مزایای بیشماری اعم از انرژی ویژه بالا، ولتاژ عملیاتی نسبتاً بالا، عمر چرخه طولانی، نرخ خود تخلیه کم و اندازه کوچک می‌باشند، به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین دستگاه‌های ذخیره انرژی در نظر گرفته می‌شوند [3-5]. با این حال، اگر دمای عملیاتی آنها بالا باشد و خروج گرما به موقع صورت نگیرد، منجر به خرابی حرارتی، کاهش عمر مفید باتری و مشکلات ایمنی مانند آتش‌سوزی و انفجار می‌شود [6, 7]. باتری و سیستم ذخیره انرژی یکی از چالش‌های توسعه هر وسیله برقی، از جمله موتور سیکلت است. قیمت بالای باتری سهم زیادی از قیمت کلی موتور سیکلت را تشکیل می دهد. اما پیش از آنکه قیمت اولیه باتری مهم باشد، تعداد تعویض‌های مورد نیاز باتری در طول مدت کارکرد آن است که به عنوان یک قطعه یدکی هزینه زیادی را به صاحب آن متحمل می‌کند. مشکل اساسی باتری‌ها عمر کوتاه آنهاست، که کنترل حرارتی باتری‌ها، یکی از راه حل‌های بهبود سیستم ذخیره انرژی در آنها می‌باشد. از سال ۲۰۰۸ میلادی با توجه به پیشرفت فناوری باتری‌ها، مدیریت شبکه برق، نگرانی‌ها در خصوص قیمت نفت و نیاز به کاهش گازهای گلخانه‌ای، تحول اساسی در تولید موتورسیکلت الکتریکی صورت گرفته است. در انتخاب باتری باید به نکاتی چون ابعاد، وزن و هزینه‌ی حداقل، تأمین ولتاژ مورد نیاز برای سیستم پیش‌رانش، داشتن بالاترین میزان شارژ ممکن توجه کرد [8].

مدیریت حرارتی بسته باتری موتورسیکلت برقی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا دمای نامناسب می‌تواند باعث کاهش عملکرد، کاهش عمر باتری و حتی خطرات ایمنی مانند فرار حرارتی شود [9]، به‌ویژه در شهرهایی مانند تهران که دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم است. در تابستان‌های تهران، افزایش دمای بیش از حد می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد باتری داشته باشد، در حالی که در زمستان‌های سرد، مشکل کاهش شارژپذیری مطرح می‌شود [10]. روش‌های مدیریت حرارتی مانند خنک‌سازی فعال و غیرفعال و گرمایش پالس دوطرفه می‌توانند عملکرد باتری را در چنین شرایطی بهبود ببخشند، اما این فناوری‌ها با چالش‌هایی همچون افزایش پیچیدگی سیستم، هزینه‌های بالا و محدودیت‌های فضایی و وزنی همراه هستند [11]. با این وجود، استفاده از موتورسیکلت برقی در تهران مزایای چشمگیری دارد، از جمله کاهش آلودگی هوا، کاهش هزینه‌های سوخت و کاهش ترافیک که از معضلات اصلی این شهر محسوب می‌شوند [12]. با توجه به آلودگی شدید هوای تهران و مشکلات ناشی از سوخت‌های فسیلی، گسترش موتورسیکلت‌های برقی و توسعه سیستم‌های مدیریت حرارتی کارآمد می‌تواند تأثیر قابل توجهی در بهبود کیفیت زندگی، افزایش ایمنی و بهره‌وری انرژی داشته و به پذیرش گسترده‌تر این وسایل نقلیه کمک کند [13].

در حین عملکرد پرقدرت، بسته‌های باتری ممکن است بیش از حد گرم شوند، که نیاز به مکانیزم‌های خنک‌کننده کارآمد دارند. مطالعاتی که سیستم‌های خنک‌کننده فعال (بر پایه تبرید) و غیرفعال (بر پایه هوا) را مقایسه کرده‌اند، نشان داده‌اند که انتخاب روش خنک‌سازی به کارایی، کاهش اندازه و توان خروجی در شرایط محیطی مختلف بستگی دارد [11]. فراتر از استراتژی‌های گرمایش و خنک‌سازی، سیستم‌های کنترلی پیشرفته و طراحی بهینه باتری نقش مهمی در بهبود عملکرد حرارتی دارند.

در سال‌های اخیر، محققان دریافته‌اند که مواد تغییر فاز دهنده عملکرد بسیار خوبی در مدیریت حرارتی باتری‌ها از خود نشان می‌دهند [14]، زیرا دارای چگالی ذخیره‌سازی بالا جدا از بسیاری از مزایای دیگر هستند [15, 16]. سیستم مدیریت حرارتی باتری به کمک مواد تغییرفازدهنده ابتدا توسط الهالج و سلمان [17] و جانکواسکی و همکاران [18]، مورد آزمایش قرار گرفت و توزیع انتقال حرارت در ۷٤۰ نوع مواد تغییرفازدهنده را طبقه‌بندی کرده و مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آنها از روش ضریب آنتروپی برای شبیه‌سازی بسته باتری استفاده کردند و نتایج نشان داد که استفاده از این مواد می‌تواند عملکرد سیستم را به طور قابل‌توجهی بهبود بخشد و دمای عملیاتی را زیر ۵۵ درجه سانتیگراد، حتی در نرخ تخلیه بالا، نگه دارد. صباح و همکاران [19] در مقایسه اثربخشی مواد تغییرفازدهنده خنک شده توسط گردش هوای اجباری، به وسیله شبیه‌سازی عددی و آزمایش، نشان دادند که خنک‌کاری مواد تغییرفازدهنده می‌تواند درجه حرارت را زیر ۵۵ درجه سلسیوس در نرخ ثابت دشارژ ٦/٦۷C (سلول ۱۰ آمپر ساعت) نگه دارد. دوان و همکاران [20]، مطالعات عددی و تجربی را بر روی انتقال حرارت

مواد تغییر فاز دهنده انجام دادند و دریافتند که آنها پتانسیل بالایی در مدیریت حرارتی به دلیل ذخیره انرژی بالقوه و پایداری دمای قابل کنترل دارند. عزیزی و همکاران [21]، از یک ماده تغییر فاز دهنده و مواد کامپوزیتی متشکل از صفحات مشبک آلومینیومی برای مدیریت حرارتی بسته باتری لیتیوم فسفات آهن در محیطی با دمای بالا استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و سیم آلومینیومی می‌تواند به طور قابل توجهی دمای سطح باتری ها را کاهش دهد و عملکرد بسته باتری را بهبود بخشد. در کار حاضر به بررسی تجربی چند مدل سیستم خنک‌کاری به صورت جدا و ترکیبی پرداخته می‌شود. در گام نخست، برای یک بسته باتری موتورسیکلت الکتریکی، چند نمونه سیستم مدیریت حرارتی مبتنی بر رسانش حرارتی طراحی و ساخته شده است. بدین منظور، از صفحات آلومینیومی، راد و مواد تغییر فاز دهنده جهت تولید شش عدد نمونه سیستم مدیریت حرارتی استفاده گردید. پس از آن، این نمونه سیستم‌های مدیریت حرارتی مورد ارزیابی تجربی بر روی یک موتورسیکلت الکتریکی قرار گرفته‌اند تا با در نظر گرفتن نتایج آزمایش‌ها بتوان مقایسه مناسبی از عملکرد سیستم‌های مدیریت حرارتی مختلف داشت. این تحقیق با ارائه یک ارزیابی تجربی از ترکیب مواد تغییر فازدهنده و المانهای فلزی در مدیریت حرارتی باتری موتورسیکلت الکتریکی، رویکردی نوآورانه ارائه می‌دهد. تمرکز بر عملکرد در شرایط آب‌وهوایی گرم این مطالعه را از تحقیقات قبلی متمایز کرده است. همچنین معرفی ترکیب بهینه PCM و صفحه آلومینیومی بر پایه نتایج عملی، یک راهکار کاربردی برای بهبود ایمنی و عمر باتری پیشنهاد می‌کند.

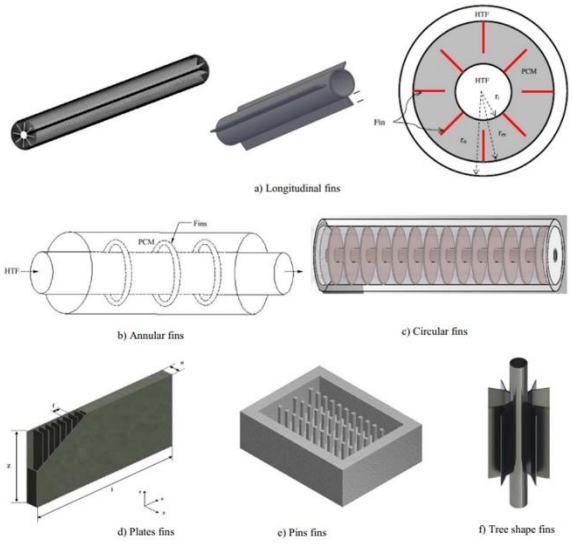
۲- مقایسه با کارهای پیشین

سیستم مدیریت حرارتی بسته باتری به کمک مواد تغییر فازدهنده در گذشته مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. بدین منظور به طور مختصر نیز به بررسی این حوزه و سیستم‌های ترکیبی بر پایه مواد تغییر فازدهنده پرداخته می‌شود. جدول ۱ به طور کلی اطلاعات مربوط به این حوزه را در بر گرفته است.

۳- مواد و روش ساخت بسته باتری

سلول‌های باتری مورد استفاده از نوع لیتیوم یون استوانه‌ای ۱۸۶۵۰ با ولتاژ ۳/۶ ولت و ظرفیت ۲۶۰۰ میلی آمپر ساعت می‌باشد. سلول‌ها در هر ماژول به صورت ۲۰ عدد سری در ۷ عدد موازی نصب می‌شوند. دو ماژول نیز با یکدیگر موازی شده‌اند و در کل ولتاژ ۷۲ ولت از مجموع آنها بدست می‌آید. مواردی که باید به آنها توجه شود این است که سلول‌های باتری لیتیوم یون ۱۸۶۵۰ مورد استفاده دارای قابلیت نرخ دشارژ ماکزیمم 3C می‌باشند و سلول‌ها به صورت یک میلی ولت - یک میلی اهم دسته‌بندی شده‌اند. برای قرارگیری باتری‌ها در فاصله معین تعدادی براکت نگهدارنده باتری تهیه شده است. برای اتصال سلول‌ها به یکدیگر و جهت سری و موازی کردن آنها از نوار نیکل استفاده شده است. برای جلوگیری از ضربه و محافظت از سلول‌ها و اجزای آن از یک محفظه فلزی استفاده شده است. طول و عرض و ارتفاع محفظه به ترتیب ۴۵، ۲۵ و ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. شکل (۲) نحوه چینش و قرارگیری سلول‌های بسته باتری را به خوبی مشخص می‌کند.

شکل (۱) نمونه‌های مختلف از نحوه قرارگیری پره‌های خنک‌کننده در سیستم‌های ترکیبی با مواد تغییر فاز دهنده را مشخص کرده است. با توجه به کارهای پیشین استفاده از مواد تغییرفاز دهنده و ترکیب آن با روش‌های دیگر مورد توجه بوده، اما این کار با صفحه و راد آلمینیومی برای پک باتری موتورسیکلت الکتریکی صورت نگرفته است که این مورد کار حاضر را متمایز از دیگر پژوهش‌ها می‌نماید.



شکل ۱ پیکربندی‌های مختلف پره‌های مورد استفاده در سیستم‌های خنک-کاری ترکیبی با مواد تغییر فاز دهنده [35]

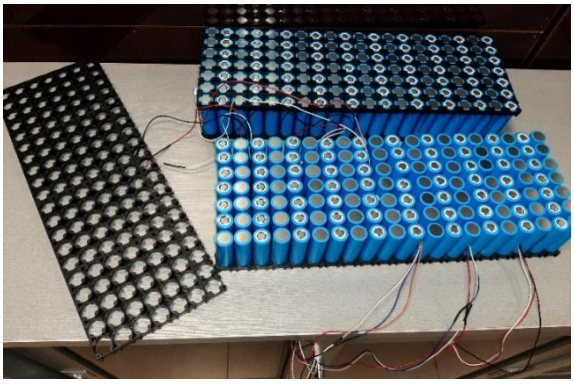
Fig. 1 Different configurations of fins used in hybrid cooling systems with phase change materials [35]

همچنین برای اندازه‌گیری دمای باتری‌ها از ۴۰ عدد سنسور دما که در نقاط مختلف در بسته باتری قرارگرفته‌اند، استفاده شده است. سنسور مورد استفاده در داخل بسته از نوع تماسی ال‌ام۳۵ (LM35) بوده و محدوده اندازه گیری آن ۵۵- تا ۱۲۵+ درجه سلسیوس و با زمان پاسخ ۷۵۰ میلی‌ثانیه می‌باشد. سنسورهای نصب شده روی سلول‌ها در وسط سلول و به وسیله چسب سیلیکون به هم متصل شده‌اند. هنگام دشارژ نیاز به برد الکترونیکی‌ای است که با استفاده از برنامه‌نویسی بر روی آن بتوان دمای سنسورهای داخل پک استخراج گردد.

جدول ۱ مقایسه پژوهش‌های صورت گرفته برای سیستم مدیریت حرارتی بسته باتری ترکیبی بر پایه مواد تغییر فاز دهنده

Table 1 Comparison of research conducted for thermal management system of hybrid battery pack based on phase change materials

Thermal Management Method	Reference	Method Description	Advantages	Disadvantages
PCM + Air Cooling	Singh et al. [22]	Added a 1 mm thin PCM layer on top of the cells; average temperature reduced 45 K at 5C rate.	Improved heat dissipation; Simple implementation	Limited performance at higher C-rates
PCM + Air Cooling	Akourt et al. [23]	Laminar flow simulation; best result at 10 cm spacing.	Better temperature control by varying spacing	Requires more space
PCM + Copper Mesh + Air Cooling	Lazrek et al. [24]	Used copper meshes in PCM with fan ventilation.	Enhanced heat transfer	More complex fabrication
PCM + Air Cooling	Bamdej et al. [25]	Studied 18 cases with varying cell arrangements, module compactness, and PCM thickness.	Max ΔT = 1.5 °C	Increased thickness leads to higher ΔT
PCM + Air Cooling + Fins	Sajjadi et al. [26]	Effect of fin structure on hybrid active/passive systems; best performance with spiral fins in active mode.	Suitable for long-term, low-energy strategies	Relatively large temperature difference
PCM + Liquid Cooling	Hekmat et al. [27]	Counter-flow liquid channels with PCM; reduced ΔT by 0.7 °C.	Excellent temperature uniformity	High cost and complexity
PCM + Liquid Cooling	Labrohi et al. [28]	Simplified electro-thermal model; cell temperature reduced by up to 20 °C.	Significant temperature reduction	Requires precise inlet temperature control
Segmented PCM Matrix + Liquid	Chen et al. [29]	Segmented PCM matrix improved performance and reduced energy use by 32%.	High performance with lower energy consumption	More complex design
PCM + Thermoelectric (TEC)	Liao et al. [30]	Hybrid active/passive (CPCM+TEC); max ΔT below 3 K.	Simultaneous cooling and heating	TEC performance decreases with thick CPCM
PCM + Thermoelectric (TEC)	Sang et al. [31]	Continuous battery cooling/heating in base stations; stable under varying environments.	Stable under different ambient conditions	High system complexity
PCM + Heat Pipe	Chen et al. [32]	Compared HP vs. HP+PCM; reduced max cell temperature and ΔT by up to 30%.	Reduced cell temperature difference	Requires precise optimization
PCM + Heat Pipe	Huang et al. [33]	Combined HP with liquid cooling; maintained peak temperature at 50 °C under 3C discharge.	Excellent temperature control	Needs additional liquid cooling system
PCM + Microchannel + Fins	Hekmat et al. [34]	Investigated fin structures in hybrid cooling; wavy fins were most effective.	Improved cooling efficiency	Smaller surface area compared to normal fins



شکل ۲ نحوه آرایش و قرارگیری سلول‌های بسته باتری

Fig. 2 How to arrange and place battery pack cells

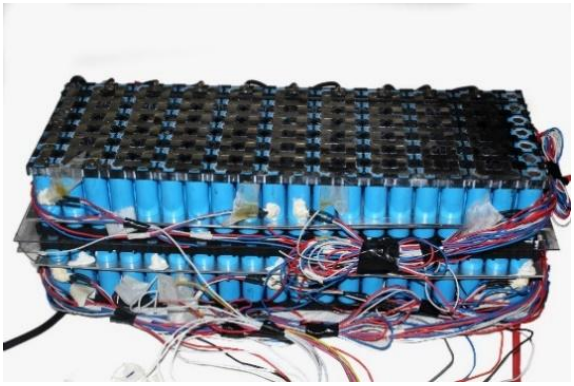
برای مدیریت باتری از یک دستگاه مدیریت باتری که نقش کنترل باتری را بر عهده دارد استفاده می‌شود. این سیستم ولتاژ و جریان ورودی/ خروجی به بسته باتری و همچنین دمای داخل آن و اعمال بالانسینگ بین سلول‌ها را کنترل می‌کند و در صورت هر گونه مشکل با قطع کردن، جریان باتری را کنترل می‌نماید. برای شارژ بسته باتری از یک شارژر ۷۲ ولت ۵ آمپر استفاده می‌شود. این شارژر دارای قطع کن اتوماتیک می‌باشد که ولتاژ ورودی آن ۲۲۰ ولت و فرکانس ورودی آن ۵۰ هرتز، ولتاژ خروجی۷۲ ولت با توان ۲۳۰ وات می‌باشد.

۴- انجام آزمایش

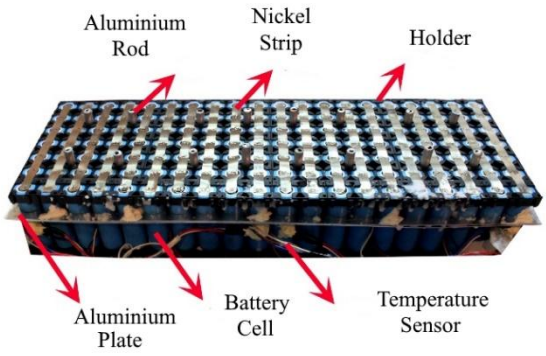
برای مدیریت حرارتی بسته باتری از شش حالت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، صفحه آلومینیومی و راد آلومینیومی و استفاده همزمان دو به دو آنها در بسته باتری استفاده شده است. در این صورت هفت مورد آزمایشی شامل تست عملکرد واقعی موتور و بسته باتری بدون سیستم مدیریت حرارتی و تست عملکرد واقعی موتور و بسته باتری با سیستم مدیریت حرارتی مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده، صفحه آلومینیومی، لوله آلومینیومی، ترکیب مواد تغییر فاز دهنده و صفحه آلومینیومی، ترکیب مواد تغییر فاز دهنده و لوله آلومینیومی و ترکیب صفحه و لوله آلومینیومی می‌شود.

برای آزمایش از مواد تغییر فاز دهنده پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ استفاده شده است که محدوده ذوب آن ۳۰ تا ٤٠ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و درحالت مایع شفاف است. برای سیستم‌های مبتنی بر این مواد، پنج کیلوگرم مواد تغییر فاز دهنده در بسته باتری به طور یکسان پخش شده است. در بسته باتری چهار عدد صفحه آلومینیومی با ضخامت دو میلی‌متر استفاده شده است و با استفاده از لیزر و با دقت بسیار بالا سوراخ‌کاری شده است و در داخل بسته نصب شده‌اند. طول صفحات ٤٢ میلی‌متر و عرض آن ١٦میلی‌متر و ضخامت آن ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. در شکل (۳) جانمایی و نحوه قرارگیری این صفحات دیده می‌شود.

برای خنک‌کاری سلول‌ها، رادهای آلومینیومی به موازات محور سلول‌ها قرار گرفته‌اند. محل قرارگیری آنها در بین سلول‌ها و به صورت تماسی در محل‌ها مختلف بسته باتری است که از بالا و پایین به براکت‌های نگهدارنده متصل می‌شوند. قطر خارجی رادها ٦ میلی‌متر و ضخامت آنها ۲ میلی‌متر و طول آنها ۷۰ میلی‌متر است. تعداد ١٦ لوله آلومینیومی با مشخصات ذکر شده بین سلول‌ها قرار گرفته است. همانطور که در شکل (٤) مشخص شده است، نحوه جانمایی و قرارگیری رادهای آلومینیومی، سنسورها و صفحات آلومینیومی در بسته باتری قابل تشخیص می‌باشد.



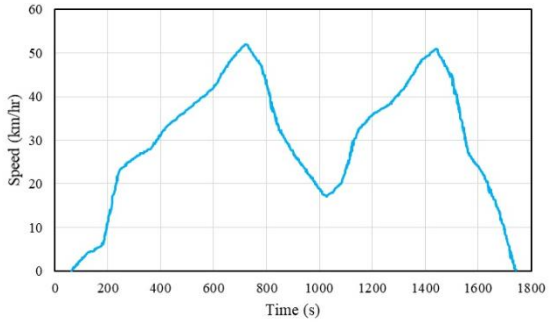
شکل ۳ نحوه قرارگیری صفحات آلومینیومی بین سلول‌ها در بسته باتری
Fig. 3 Aluminum plates placed between cells in a battery pack



شکل ۴ نحوه قرارگیری رادها و صفحات آلومینیومی بین سلول‌ها در بسته باتری
Fig. 4 Aluminum rods and plates placed between cells in a battery pack

موتورسیکلت الکتریکی استفاده شده برای انجام آزمایش با نام تجاری Vectrix VX-2 شناخته می‌شود. این موتورسیکلت توسط شرکت موتورسیکلت سازی Nanjing Vmoto چین تولید می‌شود. در ایران این موتورسیکلت توسط شرکت جهانرو و با نام تجاری ای جهانرو عرضه می‌شود که توان آن چهار کیلووات می‌باشد. حداکثر سرعت قابل دسترسی در این موتور ۷۲ کیلومتردرساعت بوده و باطری استفاده شده در آن لیتیوم یون ۷۲ ولت ۴۰ آمپر می‌باشد. از دیگر مشخصات این موتور می‌توان به زمان شارژ ۸ تا ۹ ساعت، ترمز جلو وعقب دیسکی، جعبه‌دنده اتوماتیک، وزن ۱۳۴ کیلوگرم، پیمایش ۸۰ تا ۹۰ کیلومتر با هر بار شارژ، امکان شیب‌روی ۱۴ درجه، مشخصات تایر ۶۰/۱۳۰-۱۳، فاصله دو محور ۱۴۱ سانتی‌متر و فاصله از زمین ۱۵ سانتی‌متر اشاره نمود. تصویر این موتور در شکل (۵) مشخص شده است. این موتورسیکلت برقی به عنوان یک انتخاب ایده‌آل برای استفاده در شهری مانند تهران در نظر گرفته شده است. برای یکسان‌سازی شرایط آزمایش برای تمامی سناریوهای تعریف شده از یک چرخه رانندگی مخصوص به موتورسیکلت استفاده شده است. شکل (۶) نمودار سرعت - زمان مربوط به چرخه رانندگی انتخابی را مشخص می‌کند. افزایش سرعت ممتد و پرفشار موتور باعث افزایش دمای بسته باتری می‌گردد تا بتوان عملکرد سیستم مدیریت حرارتی مورد نظر را به خوب تحلیل نمود. لازم به ذکر است دمای محیط در تمامی سناریوها ۱±۳۲ و ثابت بوده است.

شکل ۵ موتورسیکلت الکتریکی Vectric VX-2 استفاده شده در آزمایش
Fig. 5 Vectric VX-2 electric motorcycle used in the test



شکل ۶ نمودار سرعت - زمان چرخه رانندگی آزمایش شده
Fig. 6 Speed – Time chart of driving cycle

سناریوهای تعریف شده شامل موارد زیر می‌باشد:
نمونه اول پک باتری بدون خنک‌کاری مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. برای پی بردن به تأثیر سیستم خنک‌کاری بر بسته باتری، ابتدا باید بسته باتری بدون داشتن سیستم خنک‌کاری بررسی شود تا مقایسه این نمونه با نمونه‌های دارای سیستم خنک‌کاری معیار مناسبی برای اندازه‌گیری نتایج آزمایش باشد. نمونه دوم شامل اضافه کردن مواد تغییرفازدهنده به پک باتری است. در این نمونه از مواد تغییر فازدهنده استفاده می‌شود. در بررسی این نمونه، هدف مشخص شدن نقش مواد تغییر فازدهنده به تنهایی در خنک‌کاری بسته می‌باشد.
نمونه سوم استفاده از صفحات آلومینیومی در بسته باتری است. در این نمونه از چهار عدد صفحه آلومینیومی با ضخامت دو میلی‌متر عمود بر سلول‌ها استفاده شده است. در این آزمایش به وسیله صفحات آلومینیومی انتقال حرارت انجام می‌شود و میزان خنک‌کاری باتری‌ها اندازه‌گیری می‌شود. نمونه چهارم شامل استفاده از راد آلومینیومی می‌گردد. رادهای آلومینیومی میله‌های آلومینیومی هستند که در موازات سلول‌های باتری به باتری‌ها چسبیده‌اند و عمل خنک‌کاری را انجام خواهند داد.

نمونه پنجم شامل استفاده از صفحات آلومینیومی و مواد تغییر فازدهنده به صورت ترکیبی است. در این نمونه از هر دو عامل صفحات آلومینیومی و مواد تغییر فاز دهنده در داخل بسته استفاده می‌شود تا تأثیر این دو به همراه یکدیگر در خنک کاری بسته باتری مشاهده شود. نمونه ششم استفاده از راد و مواد تغییر فاز دهنده است. در این نمونه، لوله‌های آلومینیومی به همراه مواد تغییر فازدهنده داخل بسته قرار می‌گیرند و تأثیر این دو به همراه یکدیگر در خنک کاری بررسی می‌شود. و در نهایت نمونه هفتم، استفاده از صفحه و راد آلومینیومی به صورت همزمان است. در این نمونه از ۱۶ عدد لوله آلومینیومی به موازات سلول‌ها و همچنین از صفحه آلومینیومی نیز استفاده شده است که تأثیر این دو به همراه یکدیگر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

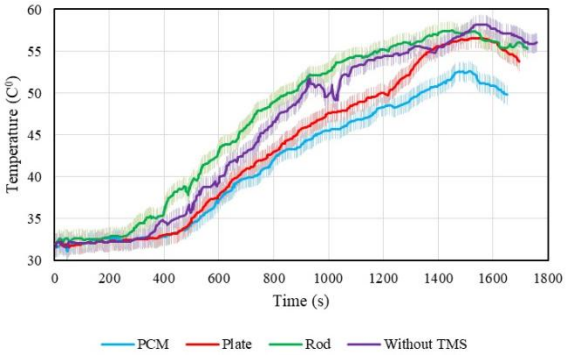
۴-۱- تحلیل خطا

برای کالیبراسیون سنسورهای استفاده شده، مخلوط آب مقطر و یخ تهیه شده و اندازه‌گیری تا ۵ بار تکرار انجام شد و دمای خوانده شده از سنسورها ۰/۵درجه سانتی گراد بوده است. در این پژوهش، برای اندازه‌گیری دمای سلول‌های باتری از سنسور حرارتی با دقت ±۰/۵ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. خطاهای ناشی از دستگاه خوانش داده و تأثیرات محیطی و خطای انسانی به طور محافظه‌کارانه ±۱ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده‌است. عدم قطعیت ترکیبی اندازه‌گیری دما با استفاده از روش ریشه مجموع مربعات محاسبه شده و برابر با ۱/۱۲ ± درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. این عدم قطعیت در تحلیل نتایج و ارزیابی عملکرد سیستم‌های مدیریت حرارتی لحاظ شده است.

۵- بررسی نتایج

با توجه به هفت سناریو تعریف شده برای بررسی سیستم‌های مدیریت حرارتی مختلف بسته باتری موتور سیکلت الکتریکی، می‌توان ارائه نتایج را به دو بخش مقایسه سیستم‌های مدیریت حرارتی خالص و ترکیبی تقسیم نمود.

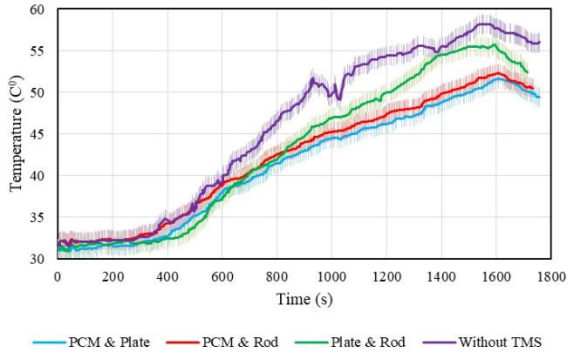
در شکل (۷) نمودار دمای متوسط بسته باتری در حالت بدون سیستم خنک‌کاری و سیستم‌های خنک‌کاری خالص مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از رادهای آلمینیومی به طور کلی شرایط به مرتب بدتری را برای دمای بسته باتری بوجود آورده است. در حالت بدون سیستم مدیریت حرارتی باتری حداکثر دمای بسته باتری ۵۸/۱۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، این در حالی است که سیستم مدیریت حرارتی مبتنی بر ماده تغییر فاز دهنده، صفحه و راد آلومینیومی به ترتیب مقادیر ۵۲/۶۲، ۵۶/۵۱ و ۵۷/۴۶ درجه سانتی‌گراد را به ثبت رسانده‌اند. همانطور که مشخص می‌باشد، بهترین عملکرد را ماده تغییر فاز دهنده داشته که توانسته است در تمام مدت افزایش دما بسته نرخ تغییرات را با شیب کم‌تری هدایت کند و دمای حداکثر کم‌تری را نسبت به بقیه سیستم‌های مدیریت حرارتی ثبت کند. صفحات آلومینیومی هم به واسطه جذب حرارت تولید شده توسط سلول‌ها شرایط عملکرد بسته باتری را بهبود بخشیده‌اند.



شکل ۷ نمودار مقایسه دمای متوسط بسته باتری برای سیستم‌های مدیریت حرارتی خالص

Fig. 7 Comparison of average battery pack temperature for pure thermal management systems

اما مقایسه بین سیستم‌های مدیریت حرارتی ترکیبی می‌تواند کار حاضر را تکمیل کند. همانطور که در شکل (۸) مشخص شده‌است، نمودار میانگین دما بسته باتری برای سیستم‌های مدیریت حرارتی ترکیبی مشخص می‌کند که بهترین عملکرد برای سیستم مبتنی بر ترکیب مواد تغییر فاز دهنده و صفحات آلومینیومی است.



شکل ۸ نمودار مقایسه دمای متوسط بسته باتری برای سیستم‌های مدیریت حرارتی ترکیبی

Fig. 8 Comparison of average battery pack temperature for hybrid thermal management systems

حداکثر دما میانگین بسته باتری برای سیستم‌های ترکیبی ماده تغییر فاز دهنده و صفحه آلومینیومی، ماده تغییر فاز دهنده و راد آلومینیومی و صفحه و راد آلومینیومی به ترتیب ۵۱/۶۱، ۵۲/۲۵ و ۵۵/۷۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این در حالی است که نحوه عملکرد ترکیب هر کدام از صفحه یا راد آلمینیومی با ماده تغییر فاز دهنده تقریبا به یک شکل می‌باشد. با توجه به نمودار مشخص می‌گردد وجود ماده تغییر فاز دهنده تغییرات ناگهانی دما را کاهش می‌دهد و شرایط مطلوب‌تری را برای باتری فراهم می‌سازد.

۶- جمع‌بندی

امروزه موتورسیکلت‌های الکتریکی با چالش‌های قابل توجهی در زمینه ایمنی، کارایی و قابلیت استفاده به ویژه در شرایط آب و هوایی گرم مواجه هستند. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، افزایش نیاز به مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم یونی است. این موضوع برای جلوگیری از نگرانی‌هایی که ممکن است به دلیل گرما و استفاده از محفظه‌های پلاستیکی متداول در بسته‌های باتری به وجود بیاید، بسیار حیاتی است. در این مقاله، به معرفی و ارزیابی یک بسته باتری با توان بالا برای موتورسیکلت‌های الکتریکی پرداخته می‌شود. همچنین، سیستم‌های مدیریت حرارتی مناسب برای مناطق گرمسیری مورد بررسی قرار گرفت. این بسته باتری شامل سلول‌های استوانه‌ای ۱۸۶۵۰ است و به علاوه، شش نوع سیستم مدیریت حرارتی شامل گزینه‌های خالص و ترکیبی در نظر گرفته شده است. این سیستم‌ها شامل مواد تغییر فاز دهنده، رادهای آلومینیومی، صفحات آلومینیومی و همچنین ترکیب این مواد به صورت دو به دو می‌باشند تا به بهبود کارایی خنک‌سازی باتری‌ها کمک کنند.

با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته و نتایج حاصل شده نکات زیر قابل ذکر می‌باشد:

- پس از بررسی نمونه بدون سیستم مدیریت حرارتی می‌توان به این نتیجه رسید که سلول‌های لیتیومی در شرایط واقعی عملکرد، میزان قابل توجهی حرارت تولید می‌کنند و این مسئله در عملکرد باتری‌ها در طولانی مدت بسیار تأثیرگذار می‌باشد. این مهم ضرورت به کارگیری یک سیستم مدیریت حرارتی برای بسته‌های باتری در موتورسیکلت‌های الکتریکی را بیش از پیش نمایان می‌سازد.
- سیستم مدیریت حرارتی متشکل از راد آلومینیومی نمی‌تواند تأثیر بسزایی در خنک نمودن باتری‌ها داشته باشد و حتی منجر به گرم‌تر شدن میانگین دمای بسته باتری نیز می‌شود. همچنین استفاده از صفحه آلومینیومی، می‌تواند تأثیر خنک‌کاری بیشتری نسبت به راد داشته باشد و صفحه آلومینیومی می‌تواند تا حد خوبی اختلاف دمای بین سلول‌ها را نیز کنترل کند.
- در سیستم‌های مدیریت حرارتی خالص مورد بررسی به ترتیب ماده تغییر فاز دهنده با ۹/۵۷٪ و صفحه آلومینیومی با ۲/۸۸٪ کاهش حداکثر دمای میانگین بسته باتری بهترین عملکرد را داشتند. برای سیستم‌های با مدیریت حرارتی ترکیبی به ترتیب سیستم مبتنی بر ماده تغییر فازدهنده و صفحه آلومینیومی با ۱۱/۳۰٪، سیستم مبتنی بر ماده تغییر فاز دهنده و راد آلومینیومی با ۱۰/۱۹٪ و سیستم مبتنی بر صفحه و راد آلومینیومی با ٤/۲٤٪ کاهش حداکثر دمای میانگین بسته باتری بهترین عملکرد را داشته‌اند.
- نتایج آزمایش‌هایی که با استفاده از مواد تغییرفازدهنده انجام شد، نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده می‌تواند گرمای تولیدی توسط باتری‌ها را تا حد زیادی در خود حفظ کند و انتقال دما را بهبود بخشد. در نهایت می‌توان گفت، استفاده از مواد تغییرفازدهنده در خنک کردن سلول‌ها به صورت ترکیبی با صفحه آلومینیومی می‌تواند به خوبی عمل خنک کاری را انجام دهد. همچنین این سیستم بهتر از سایر سیستم‌ها می‌تواند اختلاف دماهای سلول‌ها نسبت به یکدیگر را نیز کنترل کند.
- مواد تغییرفازدهنده جهت یک خنک‌کاری بدون صرف انرژی حداقل در کوتاه مدت و میان مدت بهترین انتخاب است، اما از آنجایی که مواد تغییرفازدهنده در دراز مدت قادر به خنک‌کاری سلول‌ها نیستند و پس از مایع شدن عملکرد قبل را نیز ندارند و علاوه بر این مدت زیادی زمان خواهد برد که به حالت جامد خود برگردند، در این صورت وجود یک سیستم خنک‌کاری فعال مانند هوا-خنک در کنار مواد تغییر فاز دهنده توصیه می‌شود.
- با توجه به اینکه واضح است هر چه میزان تعداد یا ضخامت صفحات افزایش یابد تأثیر خنک‌کاری آنها نیز بیشتر خواهد بود، پیشنهاد می‌شود جهت افزایش سطح تماس از تعداد بیشتر صفحات استفاده شود. در این صورت با افزایش سطح تماس می‌توان بدون مصرف انرژی، به بالاترین میزان خنک‌کاری مواد تغییرفازدهنده و در نهایت، سلول‌های در درون این بسته باتری موتورسیکلت پرداخت.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و محدودیت‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده موارد زیر مدنظر قرار گیرد:

- استفاده از مواد با دمای ذوب متفاوت یا ترکیب چند نوع PCM برای بهینه‌سازی محدوده دمای کاری باتری‌ها می‌تواند کارایی سیستم مدیریت حرارتی را بیشتر بهبود بخشد.
- مطالعه رفتار حرارتی باتری در شرایط عملیاتی واقعی شامل شارژ و دشارژ متناوب و بارهای دینامیک می‌تواند داده‌های ارزشمندتری فراهم کند.
- ارزیابی عملکرد سیستم‌های خنک‌کننده بر روی پک‌های باتری با تعداد سلول‌های بیشتر می‌تواند به بررسی اثرات تجمع گرما و چالش‌های جدید کمک کند.
- مطالعات طولانی‌مدت برای بررسی تأثیر خنک‌کاری بر نرخ تخریب و ظرفیت باقی‌مانده باتری، اهمیت بالایی برای کاربردهای صنعتی دارد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

[1] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, and M. Smyth, "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)," Renewable and sustainable energy reviews, vol. 14, no. 2, pp. 615-628, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.10.015.

[2] J. Bauman and M. Kazerani, "A comparative study of fuel-cell–battery, fuel-cell–ultracapacitor, and fuel-cell–battery–ultracapacitor vehicles," IEEE transactions on vehicular technology, vol. 57, no. 2, pp. 760-769, 2008, doi: 10.1109/TVT.2007.906379.

[3] X. Li, F. He, and L. Ma, "Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation," Journal of power sources, vol. 238, pp. 395-402, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.04.073.

[4] D. Ouyang et al., "Effect of high temperature circumstance on lithium-ion battery and the application of phase change material," Journal of The Electrochemical Society, vol. 166, no. 4, p. A559, 2019.

[5] J. Weng, X. Yang, D. Ouyang, M. Chen, G. Zhang, and J. Wang, "Comparative study on the transversal/lengthwise thermal failure propagation and heating position effect of lithium-ion batteries," Applied Energy, vol. 255, p. 113761, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113761.

[6] P. Cicconi, D. Landi, and M. Germani, "Thermal analysis and simulation of a Li-ion battery pack for a lightweight commercial EV," Applied energy, vol. 192, pp. 159-177, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.02.008.

[7] H. Maleki, G. Deng, A. Anani, and J. Howard, "Thermal stability studies of Li-ion cells and components," Journal of The electrochemical society, vol. 146, no. 9, p. 3224, 1999, doi: 10.1149/1.1392458.

[8] D.-G. Shao, Y.-B. Li, X.-Y. Wang, and J.-Z. Jiang, "A matlab-based simulation for hybrid electric motorcycle," Journal of Shanghai University (English Edition), vol. 7, pp. 178-184, 2003, doi: 10.1007/s11741-003-0088-6.

[9] A. Samba, "Battery electrical vehicles-analysis of thermal modelling and thermal management," LUSAC (Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg , 2015.

[10] M. Han et al., "Safe bidirectional pulse heating method for the lithium-ion battery pack on a high-power electric motorcycle," Journal of Energy Storage, vol. 92, p. 111866, 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.111866.

[11] J. Jeffs and T. Dinh, "Thermal management of a high performance electric motorcycle: Active vs passive cooling," in 2020 3rd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA), 2020: IEEE, pp. 180-185, doi: 10.1109/ICPEA49807.2020.9280126.

[12] F.-A. LeBel, L. Pelletier, P. Messier, and J. P. Trovao, "Battery pack sizing method-case study of an electric motorcycle," in 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2018: IEEE, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2018.8604955.

[13] I. Rushadiawan, J. Arifwardana, D. Tjahjana, M. Nizam, and M. Putra, "Analysis of Li-Ion Battery Pack Performance Air Cooling Battery Compartment on a Swappable Battery of Electric Motorcycle," in 2022 7th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), 2022: IEEE, pp. 185-188, doi: 10.1109/ICEVT55516.2022.9924957.

[14] K. Du, J. Calautit, Z. Wang, Y. Wu, and H. Liu, "A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges," Applied energy, vol. 220, pp. 242-273, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.005.

[15] R. Kandasamy, X.-Q. Wang, and A. S. Mujumdar, "Application of phase change materials in thermal management of electronics," Applied Thermal Engineering, vol. 27, no. 17-18, pp. 2822-2832, 2007, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.12.013.

[16] Z. Rao and S. Wang, "A review of power battery thermal energy management," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 9, pp. 4554-4571, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.096.

[17] 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, 2002, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00196-9.

[18] N. R. Jankowski and F. P. McCluskey, "A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering," Applied energy, vol. 113, pp. 1525-1561, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.026.

[19] R. Sabbah, R. Kizilel, J. 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, 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.03.082.

[20] X. Duan and G. Naterer, "Thermal protection of a ground layer with phase change materials," 2010, doi: 10.1115/1.3194764.

[21] Y. Azizi and S. Sadrameli, "Thermal management of a LiFePO4 battery pack at high temperature environment using a composite of phase change materials and aluminum wire mesh plates," Energy Conversion and Management, vol. 128, pp. 294-302, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.09.081.

[22] L. K. Singh, A. K. Gupta, and A. Sharma, "Hybrid thermal management system for a lithium-ion battery module: Effect of cell arrangement, discharge rate, phase change material thickness and air velocity," Journal of Energy Storage, vol. 52, p. 104907, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104907.

[23] N. Akkurt, S. Aghakhani, M. Z. Mahmoud, and E. M. T. El Din, "RETRACTED: The influence of battery distance on a hybrid air-cooled cylindrical lithium-ion

battery phase change material thermal management system for storing solar energy," ed: Elsevier, 2022doi: 10.1016/j.est.2022.104873.
[24] A. Lazrak, J.-F. Fourmigué, and J.-F. Robin, "An innovative practical battery thermal management system based on phase change materials: Numerical and experimental investigations," Applied Thermal Engineering, vol. 128, pp. 20-32, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.172.
[25] M. Bamdezh and G. Molaeimanesh, "Impact of system structure on the performance of a hybrid thermal management system for a Li-ion battery module," Journal of Power Sources, vol. 457, p. 227993, 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.227993.
[26] S. Sajedi and G. Molaeimanesh, "Employing extended surfaces for a hybrid battery thermal management system comprising PCM and refrigerated cooling air: An experimental investigation," Applied Thermal Engineering, vol. 248, p. 123200, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123200.
[27] S. Hekmat, M. Bamdezh, and G. Molaeimanesh, "Hybrid thermal management for achieving extremely uniform temperature distribution in a lithium battery module with phase change material and liquid cooling channels," Journal of Energy Storage, vol. 50, p. 104272, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104272.
[28] B. E. Lebrouhi, B. Lamrani, M. Ouassaid, M. Abd-Lefdil, M. Maaroufi, and T. Kousksou, "Low-cost numerical lumped modelling of lithium-ion battery pack with phase change material and liquid cooling thermal management system," Journal of Energy Storage, vol. 54, p. 105293, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105293.
[29] X. Chen, F. Zhou, W. Yang, Y. Gui, and Y. Zhang, "A hybrid thermal management system with liquid cooling and composite phase change materials containing various expanded graphite contents for cylindrical lithium-ion batteries," Applied Thermal Engineering, vol. 200, p. 117702, 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117702.
[30] G. Liao, K. Jiang, F. Zhang, L. Liu, J. Chen, and E. Leng, "Thermal performance of battery thermal management system coupled with phase change material and thermoelectric elements," Journal of Energy Storage, vol. 43, p. 103217, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103217.
[31] W. Song, F. Bai, M. Chen, S. Lin, Z. Feng, and Y. Li, "Thermal management of standby battery for outdoor base station based on the semiconductor thermoelectric device and phase change materials," Applied Thermal Engineering, vol. 137, pp. 203-217, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.072.
[32] K. Chen, J. Hou, M. Song, S. Wang, W. Wu, and Y. Zhang, "Design of battery thermal management system based on phase change material and heat pipe," Applied Thermal Engineering, vol. 188, p. 116665, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116665.
[33] Q. Huang, X. Li, G. Zhang, J. Zhang, F. He, and Y. Li, "Experimental investigation of the thermal performance of heat pipe assisted phase change material for battery thermal management system," Applied Thermal Engineering, vol. 141, pp. 1092-1100, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.048.
[34] S. Hekmat, P. Tavana, and G. Molaeimanesh, "A novel compact battery thermal management system comprising phase change material, mini-channels, and fins suitable for EV battery packs," Journal of Energy Storage, vol. 82, p. 110392, 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.110392.
[35] A. M. Abdulateef, S. Mat, J. Abdulateef, K. Sopian, and A. A. Al-Abidi, "Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 1620-1635, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.009.