

کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در مدیریت حرارتی باتری‌ها

مهسا سالاری¹، مهدیه ابوالحسنی^{2*}، ندا عظیمی³

¹دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

²دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران (m.abolhasani@semnan.ac.ir)

³مرکز تحقیقات پیشرفته مهندسی شیمی، دانشکده نفت و پتروشیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده. امروزه با افزایش جمعیت، تقاضا برای مصرف انرژی و محدودیت سوخت‌های فسیلی، موضوع ذخیره انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است. در عین حال با رشد سریع فناوری در زمینه خودروهای هیبریدی و استفاده بهینه از انرژی، کنترل حرارتی و طراحی نسل جدید باتری در این خودروها اهمیت روزافزونی یافته است. دمای باتری یک عامل حیاتی است، بنابراین در این نوع باتری‌ها استفاده از یک سیستم مدیریت حرارتی، امری ضروری است. مدیریت حرارتی مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده برای مدیریت دمای باتری‌های لیتیومی در خودروهای الکتریکی بسیار توصیه شده است. هدف از این مقاله، بررسی مطالعات انجام شده در رابطه با اصول عملکرد سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم یون مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده است.

واژه‌های کلیدی: باتری، سیستم مدیریت حرارتی، مواد تغییر فاز دهنده، دمای بهینه

1. مقدمه

امروزه عرضه انرژی یکی از چالش‌های بزرگ در سطح جهانی محسوب می‌شود [1]. در سال‌های اخیر کاهش میزان مصرف انرژی‌های فسیلی به دلیل بی‌ثبات بودن این منابع و جایگزینی آن‌ها با انرژی‌های تجدید پذیر باعث حفظ محیط‌زیست شده است. در چند دهه اخیر منابع انرژی جدید از جمله باتری‌های شیمیایی به شدت توسعه یافته‌اند [2]. باتری‌ها، به عنوان منبع اصلی انرژی، عامل کلیدی تأثیرگذار بر عملکرد قدرت خودروهای برقی و هیبریدی هستند. در میان باتری‌ها، باتری‌های لیتیوم یونی¹ (LIBs) به دلیل ویژگی‌های برتر از جمله انرژی بالا، قدرت عملیاتی بالا، زمان شارژ کم، خود تخلیه شونده² پایین، عمر طولانی و ویژگی‌های سازگار با محیط‌زیست گزینه امیدوارکننده‌ای برای وسایل نقلیه هستند [3, 4]. با وجود این مزایا، گسترش بازار باتری‌های لیتیوم یونی در بازار خودرو به دلیل موانع متعددی مانند هزینه بالا و مسائل مربوط به دما با مشکل مواجه شده است [5]. دمای باتری، یک عامل حیاتی است که بر عملکرد نیرو، ایمنی و عمر مفید وسایل نقلیه باتری دار تأثیر می‌گذارد [3]. بنابراین حفظ دمای کار باتری‌های لیتیوم یون در محدوده 25°C تا 50°C ضروری است و روی عمر مفید وسایل نقلیه باتری دار تأثیر می‌گذارد. همچنین حداکثر اختلاف دما در ماژول باتری کمتر از 5°C است [6, 7]. اطمینان از دمای عملکرد بسته باتری³ در محدوده ایمن به منظور ارتقای ایمنی باتری‌ها و جلوگیری از تخریب عملکرد آن‌ها و همچنین طراحی یک سیستم

¹ Lithium-Ion Batteries

² Self-discharge

³ Battery pack

کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در مدیریت حرارتی باتری‌ها

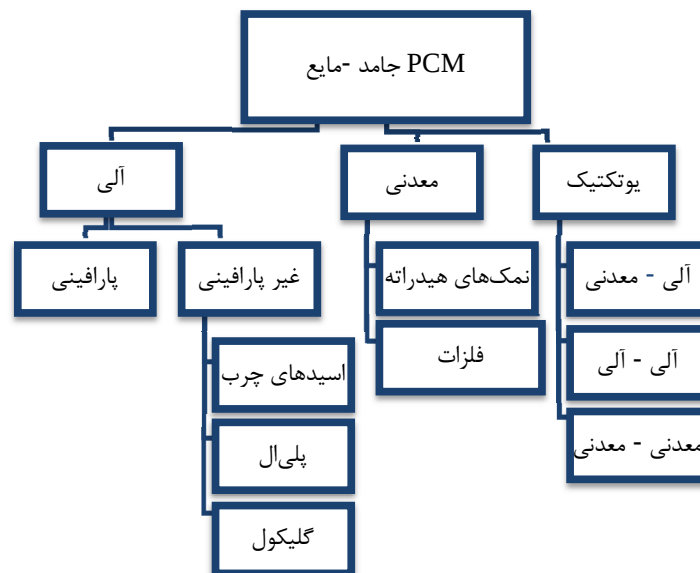
مدیریت حرارتی باتری⁴ (BTMS) علمی و معقول، ضروری است [2]. سیستم مدیریت حرارتی باید فشرده، سبک‌وزن، با قابلیت جایگیری آسان در خودرو، قابل‌اعتماد و کم‌هزینه باشد [3, 8]. بطور عمده خنک کاری باتری‌ها به سه روش انجام می‌گیرد. اگر در خنک کاری از نیروی محرک خارجی برای به گردش درآوردن سیال عامل استفاده شود، به آن روش فعال گفته می‌شود. برای به حرکت درآوردن سیال خنک کننده (آب یا هوا) معمولاً از پمپ و فن که انرژی مصرف می‌کند، استفاده می‌شود. در روش دوم، برای خنک کردن نیازی به نیروی محرکه نیست، یعنی در این حالت می‌توان از موادی مانند مواد تغییر فاز دهنده⁵ (PCM) برای خنک کاری استفاده کرد [9]. در حالت سوم که خنک کاری ترکیبی یا هیبریدی است، مزایای هر دو روش ذکر شده، بکار گرفته می‌شود [6]. روش‌هایی که در آن‌ها از PCM استفاده شده است تأثیر بسزایی در کاهش دمای باتری داشته‌اند [10, 11].

2. مواد تغییر فاز دهنده

اهمیت کاربرد مواد تغییر فاز در خنک‌سازی باتری، علاوه بر مسائل زیست محیطی و فنی، در توجیه اقتصادی آن است. PCM ها که به‌عنوان مواد ذخیره گرمای نهان نیز شناخته می‌شوند، گرمای نهان را با تغییر حالت ماده در دمای ثابت جذب یا آزاد می‌کنند، که بهره‌گیری مناسب از آن‌ها افزایش کارایی و طول عمر مفید باتری را به دنبال خواهد داشت [4].

1.1. طبقه بندی مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده عمدتاً به صورت جامد - جامد، جامد - مایع، جامد - گاز و مایع - گاز هستند، که در بین آن‌ها PCM های جامد-مایع مناسب‌تر هستند. مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع به سه گروه آلی (پارافین‌ها و غیر پارافین‌ها)، معدنی (نمک‌های هیدراته و فلزات)، و یوتکتیک‌ها (مطابق شکل 1) تقسیم‌بندی می‌شوند [2].



شکل 1. طبقه بندی مواد تغییر فاز دهنده [2].

⁴ Battery Thermal Management System

⁵ Phase Change Material

2.2. خواص PCM ها

قوانین انتخاب PCM ها عمدتاً شامل جنبه‌های زیر است [2]:

1. دمای تغییر فاز PCT^6 در محدوده موردنظر
2. توانایی بالا برای جذب گرما و دریافت گرمای نهان
3. هدایت حرارتی خوب
4. از نظر شیمیایی پایدار، مقاوم در برابر خوردگی شیمیایی، غیرقابل اشتعال و غیرقابل انفجار
5. کم‌هزینه، تهیه آسان

3.2. بهبود مواد تغییر فاز دهنده

معمولاً PCM های خالص نمی‌توانند تمام الزامات کاربردی را برآورده کنند، زیرا بخشی از آن‌ها دارای معایبی مانند هدایت حرارتی پایین و ناپایداری شیمیایی هستند. در نتیجه این چنین سیستم‌هایی با عدم توجه اقتصادی مناسب روبرو می‌باشند. تکنیک‌های متنوع و گوناگونی برای ارتقای کارایی و بهبود رسانایی حرارتی PCM ها استفاده می‌شود [2].

3.2.1. مواد پرکننده

هدایت گرمایی مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند با کمک پرکننده‌های فلزی، نانوالیاف کربن و غیره، تقویت شود [2]. کریمی و همکاران [12] در سال 2016، برای مدیریت حرارتی باتری لیتیوم یونی به کمک PCM، با افزودن ماتریس فلزی و نانو ذرات فلزی به پارافین، قابلیت انتقال حرارت آن را بهبود بخشیدند. مطابق نتایج، کامپوزیت حاوی نانو ذرات نقره بهترین عملکرد را در کنترل افزایش دمای سطح باتری داشت. دومین عملکرد برتر PCM با ماتریس فلزی و به دنبال آن کامپوزیت‌های حاوی مس و Fe_3O_4 به دست آمد که هر دو عملکرد مشابه داشتند. Wang و همکارانش [13] در سال 2017، یک کامپوزیت (پارافین/گرافیت منبسط شده/اپوکسی) برای مدیریت حرارتی ماژول باتری لیتیوم یون مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزودن گرافیت منبسط شده به دلیل هدایت حرارتی بالا و ساختار متخلخل آن، حداکثر دمای ماژول باتری کاهش می‌یابد و اپوکسی به‌عنوان یک نرم‌کننده می‌تواند پارافین ذوب‌شده را اصلاح کند و با افزایش تعداد چرخه باتری از نشت PCM جلوگیری کند، بنابراین ایمنی ماژول باتری را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. با توجه به نتایج، بهترین عملکرد را کامپوزیت شامل 3% گرافیت منبسط شده، 47% اپوکسی و 50% پارافین دارا بود.

3.2.2. پره‌ها

قرار دادن پره‌های فلزی در PCM نیز یک راه موثر برای افزایش عملکرد انتقال حرارت است. پره‌ها به‌طور گسترده‌ای در فناوری خنک‌سازی به دلیل مزایایی مانند ساختار ساده، ساخت آسان و بهبود قابل توجه عملکرد انتقال حرارت استفاده می‌شوند. تأثیر پره‌ها بر عملکرد اتلاف حرارت BTMS مبتنی بر PCM عمدتاً توسط مواد، تعداد پره، طول، ساختار و سایر پارامترها تعیین می‌شود [2].

⁶ Phase Change Temperature

کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در مدیریت حرارتی باتری‌ها



شکل 2. پره های رایج در BTMS [2]

Lv و همکاران [14] در سال 2016 برای غلبه بر چالش‌های PCM، بر فناوری مدیریت حرارتی باتری مبتنی بر مواد کامپوزیتی سه‌تایی شامل گرافیت منبسط‌شده، پارافین و پلی‌اتیلن با چگالی کم⁷ (LDPE) همراه با پره‌های کوتاه پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پلی‌اتیلن کم‌چگالی باعث بهبود خواص مکانیکی شده است و گرافیت منبسط شده از نشت پارافین جلوگیری می‌کند. همچنین، کامپوزیت PCM همراه پره کوتاه عملکرد اتلاف حرارت بهتری نسبت به کامپوزیت PCM بدون پره دارد.

4.2. سیستم هیبرید

مولایی منش و حکمت [6] در سال 2018 بر روی طراحی و ساخت یک ماژول باتری و سیستم مدیریت حرارتی هیبرید، به‌وسیله‌ی لوله‌های آب-خنک و مواد تغییر فاز دهنده (پلی‌اتیلن گلیکول 1000) مطالعه کردند. نتایج حاصل نشان دادند که در درازمدت و در طی افزایش دما، مطابق جدول 1 استفاده از لوله‌های آب-خنک می‌تواند دما را به $30/5^{\circ}\text{C}$ برساند و گزینه مناسبی برای دفع حرارت از مواد تغییر فاز دهنده باشند. Putra و همکاران [15] در سال 2020 عملکرد سیستم‌های خنک‌کننده با مواد تغییر فاز دهنده و لوله حرارتی را به عنوان سیستم خنک‌کننده برای وسایل نقلیه الکتریکی بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای شناسایی PCM بهینه، عملکرد Rubitherm RT 44 HC نسبت به موم زنبورعسل برتر است و دمای باتری بیشتر از 38°C نمی‌شود و همچنین سیستم‌های هیبریدی در طولانی مدت بازده بهتری نسبت به سیستم PCM خالص دارد.

جدول 1. مقایسه میانگین تغییرات دمای سلول‌ها در سه حالت آزمایش انجام شده توسط مولایی منش و حکمت [6].

بدون خنک کاری	مواد تغییر فاز دهنده	مواد تغییر فاز دهنده و لوله آب خنک	
57 °C	32 °C	30/4 °C	ماکزیمم دمای باتری در طول شارژ
54 °C	31/5 °C	30 °C	ماکزیمم دمای میانگین باتری در طول شارژ
7 °C	1/4 °C	1 °C	بالاترین اختلاف دمای بین سلول‌ها

3. نتیجه‌گیری

⁷ Low-density polyethylene

دمای باتری یک عامل حیاتی است که بر قدرت، ایمنی و عمر مفید وسایل نقلیه دارای باتری تأثیر می‌گذارد. روش‌های زیادی جهت کنترل و کاهش دمای باتری وجود دارد که به‌طور عمده به سه روش (فعال، غیرفعال و هیبریدی) تقسیم می‌شود. داشتن مناسب‌ترین دمای تغییر فاز، گرمای نهان و ضریب انبساط حرارتی یکی از مهم‌ترین عوامل در پیدا کردن بهترین PCM است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، نتیجه‌گیری‌ها و نکات زیر بیان می‌شود:

- ساختار BTMS با PCM باید بهینه شود تا از ایمنی بسته باتری اطمینان حاصل شود. درعین حال، هزینه تولید و حجم واقعی باید کاهش یابد تا بتواند ایمنی باتری را به‌طور مؤثر بهبود بخشد.
- با استفاده از PCM به دلیل توانایی بالای آنها برای دریافت مقدار زیادی از حرارت مازول باتری و ذخیره انرژی طی یک فرایند تغییر فاز در دمای تقریباً ثابت، می‌توان به افزایش راندمان آن‌ها کمک کرد.
- رسانایی حرارتی PCM با پر کردن یا افزودن مواد افزودنی مانند نانو مواد به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

مراجع

1. Tariq, S. L., Ali, H. M., Akram, M. A., Janjua, M. M., & Ahmadlouydarab, M. (2020). Nanoparticles enhanced phase change materials (NePCMs)-A recent review. *Applied Thermal Engineering*, 176, 115305.
2. Liu, C., Xu, D., Weng, J., Zhou, S., Li, W., Wan, Y., Jiang, S., Zhou, D., Wang, J. & Huang, Q. (2020). Phase change materials application in battery thermal management system: a review. *Materials*, 13(20), 4622.
3. Shen, Z. G., Chen, S., Liu, X., & Chen, B. (2021). A review on thermal management performance enhancement of phase change materials for vehicle lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111301.
4. Fang, M., Zhou, J., Fei, H., Yang, K., & He, R. (2022). Porous-material-based composite phase change materials for a lithium-ion battery thermal management system. *Energy & Fuels*, 36 (8), 4153-4173.
5. Wang, Z., Li, X., Zhang, G., Lv, Y., He, J., Luo, J., Yang, C., & Yang, C. (2017). Experimental study of a passive thermal management system for three types of battery using copper foam saturated with phase change materials. *RSC advances*, 7(44), 27441-27448.
6. حکمت، شهریار & مولایی منش، غلامرضا. (2019). بررسی تجربی عملکرد یک سیستم مدیریت حرارتی هیبرید آب-خنک و ماده تغییر فاز دهنده در یک مازول باتری لیتیومی مورد استفاده در یک خودروی الکتریکی. نشریه مهندسی مکانیک /میرکبیر، 51 (4)، 21-30.
7. Kong, D., Peng, R., Ping, P., Du, J., Chen, G., & Wen, J. (2020). A novel battery thermal management system coupling with PCM and optimized controllable liquid cooling for different ambient temperatures. *Energy conversion and management*, 204, 112280.
8. Buidin, T. I. C., & Mariasiu, F. (2021). Battery thermal management systems: Current status and design approach of cooling technologies. *Energies*, 14(16), 4879.
9. Yu, Y., Zhang, J., Zhu, M., Zhao, L., Chen, Y., & Chen, M. (2023). Experimental Investigation on the Thermal Management for Lithium-Ion Batteries Based on the Novel Flame Retardant Composite Phase Change Materials. *Batteries*, 9(7), 378.

کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در مدیریت حرارتی باتری‌ها

10. Lv, Y., Liu, G., Zhang, G., & Yang, X. (2020). A novel thermal management structure using serpentine phase change material coupled with forced air convection for cylindrical battery modules. *Journal of Power Sources*, 468, 228398.
11. Siddique, A. R. M., Mahmud, S., & Van Heyst, B. (2018). A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations. *Journal of Power Sources*, 401, 224-237.
12. Karimi, G., Azizi, M., & Babapoor, A. (2016). Experimental study of a cylindrical lithium ion battery thermal management using phase change material composites. *Journal of Energy Storage*, 8, 168-174.
13. Wang, Z., Li, X., Zhang, G., Lv, Y., Wang, C., He, F., Yang, C., & Yang, C. (2017). Thermal management investigation for lithium-ion battery module with different phase change materials. *RSC advances*, 7(68), 42909-42918.
14. Lv, Y., Yang, X., Li, X., Zhang, G., Wang, Z., & Yang, C. (2016). 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*, 178, 376-382.
15. Putra, N., Sandi, A. F., Ariantara, B., Abdullah, N., & Mahlia, T. M. I. (2020). Performance of beeswax phase change material (PCM) and heat pipe as passive battery cooling system for electric vehicles. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100655.

الزامات اخلاقی نگارش مقاله

نویسنده / ارسال کننده مقاله خانم مهدیه ابوالحسنی متعهد می شود:

- مقاله ارسالی حاصل کار پژوهشی ایشان (و همکاران) بوده و در مواردی که از دستاوردهای تحقیقاتی دیگران استفاده شده، مطابق ضوابط و رویه معمول، مشخصات منابع مورد استفاده درج شده است.
- مقاله ارسالی (یا ترجمه آن) و مقاله‌ای با همپوشانی قابل توجه با این مقاله قبلاً در هیچ مجله و یا کنفرانسی ارائه نشده و به طور همزمان نیز در حال ارزیابی در مجله یا کنفرانس دیگری نیست.
- همه نویسندگان مقاله از کلیه محتویات علمی و نیز ترتیب قرارگیری نام و مشخصات و وابستگی شغلی خود در مقاله آگاهی و رضایت کامل دارند.
- چنانچه هر زمان خلاف موارد فوق و یا بروز هرگونه تقلب یا تخلف پژوهشی در رابطه با این مقاله اثبات شود، عواقب ناشی از آن متوجه نویسنده مقاله است و دبیرخانه کنفرانس مجاز است با ایشان (و همکاران) مطابق با ضوابط و مقررات رفتار نموده و هیچ‌گونه ادعایی قابل قبول نخواهد بود.

محل امضا

