



# Temperature control of smartphone batteries using nanocomposites of phase change materials

Sina Yaghoubi<sup>1</sup>, Hassan Seddighi<sup>1</sup>, Ali Biglary<sup>1</sup>, Majid Saeidi<sup>1</sup>, Aziz Babapoor<sup>2\*</sup>

1- Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate Professor, Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran,

\*P.O.B. 179 Ardabil, Iran, babapoor@uma.ac.ir

Received: 4 November 2022 Accepted: 27 February 2023

## Abstract

Environmental concerns and the scarcity of fossil fuels led to the rapid development of rechargeable battery technologies. It has been proven that the performance of lithium-ion batteries is susceptible to temperature, and temperature significantly affects the capacity and power of batteries. Therefore, building battery thermal management systems is necessary to ensure the battery operates at safe temperatures. Utilizing PCMs in lithium-ion batteries' thermal management systems can be an exciting option, and several researchers have investigated them. In order to achieve widespread utilization of PCM-based BTMS systems, problems related to the poor thermal conductivity of PCMs must be addressed. Many studies are available in this field which proposed different types of metal fins (pinned fins, circular fins, triangular fins, and longitudinal fins), metal-based foams (nickel, copper, and aluminum foams), metal-based meshes, and carbon-based nanomaterials to solve issues related to the poor thermal conductivity of PCMs. Some researchers proposed composite nanomaterials prepared using carbon, like expanded graphite, carbon nanotubes, and carbon fiber. In this article, recent developments and new methods of temperature control and performance optimization of lithium-ion batteries have been reviewed.

**Keywords:** Phase change materials; lithium-ion battery; battery thermal management system; nanocomposite phase change materials; Smartphone

## 1. Introduction

Environmental concerns and the scarcity of fossil fuels have recently led to the rapid development of rechargeable battery technologies. Lithium batteries are considered one of the primary sources of electricity storage due to their high reliability, large capacity, and no memory effect problem [1-3]. It has been proven that the performance of lithium-ion batteries is susceptible to temperature, which also significantly affects the battery's capacity and power [4]. The narrowing of electronic devices, such as smartphones, has caused there to be little space around the batteries of these devices, and this causes that when using batteries due to the lack of proper ventilation, the temperature of the internal components of the battery will increase sharply, the suitable working temperature range for batteries is 20 to 45 degrees Celsius [5-7]. Therefore, building battery thermal management systems (BTMS) is necessary to ensure the battery operates at safe temperatures [8]. Many efforts have been made to develop efficient BTMSs, which can be divided into two active and passive methods [9]. In passive methods, the BTMS system operates without external energy consumption, which makes this method interesting as a heat control method [10, 11]. One of the

most effective passive methods is using phase change materials (PCMs). Internal and external management systems can control heat generation in lithium-ion batteries. Heat generation can be internally controlled using different measures, like using internal battery components consisting of anodes and cathodes made of different materials or implementing electrodes with different thicknesses. Heat generation management through external measures consists of cooling systems which utilize airflow, two-phase cooling rings, cooling circuits, and PCMs to improve the dissipation of heat generated inside battery cells. Using external heat management technologies in BTMS is more effective and, as a result, more prevalent. PCMs can store or dissipate heat in such systems thanks to their high latent heat [12].

## 2. Lithium-ion batteries

Lithium-ion cells are devices that store energy electrochemically using chemical reactions. Lithium-ion batteries harness the movement of Li<sup>+</sup> ions from the anode to the cathode or reverse to induce the movement of electrons. Lithium-ion batteries are one of the essential sources of electrical energy for electronic

devices due to their features, such as being powerful and having exceptional life cycles compared to other batteries.

## 2.1. Complications and dangers of heat generation in batteries

High temperature destroys the internal components of batteries. Keeping the battery at temperatures higher than 40 degrees Celsius strongly affects the life of the battery. This issue reduces the battery's energy storage capacity. Another concern is the chemical instability of the electrolytes generally used in lithium-ion batteries in the battery's anode. Charging a new battery cell induces irreversible reactions inside the electrolyte. Such reactions induce the formation of a thin layer of metallic lithium, alkyl carbonate, polymers, and gaseous products on the anode creating hazards [13]. Solid electrolytes in lithium-ion batteries exothermically decompose at temperatures higher than 85 °C. At temperatures higher than 110 °C, the protective coating of the electrodes decomposes, leading to the corrosion of electrodes by the electrolyte, producing inorganic carbonates, significantly reducing the maximum capacity and power of cells. Violent decomposition reactions occur inside the battery at 200 °C producing combustible gas products and creating fire hazards [14].

## 3. Using PCM nanocomposites for heat dissipation in batteries

Utilizing PCMs in lithium-ion batteries' thermal management systems can be an exciting option, and several researchers have investigated them. Thermal energy can be stored using latent heat, reversible chemical reactions, and sensible heat [15-17]. Latent heat can be used to store considerable amounts of thermal energy. PCMs store the thermal energy as latent heat of fusion during the melting process. Due to the favorable properties of PCMs, like having high latent and specific heats, small changes in volume during phase change, high chemical stability, and being lightweight, non-toxic, and non-corrosive, they are used in thermal management or energy storage applications. Also, PCMs are widely used in such applications due to solidification without supercooling, favorable phase change temperature (PCT), and being readily and cheaply [18-21]. Despite the advantages of using PCMs, some limiting factors adversely affect PCM-based BTMS, including the low thermal conductivity of PCMs, the difficulty of preventing leakage of molten PCMs, and the safe disposal of PCMs after the end of their useful life [12]. In recent years, the use of PCMs in BTMS systems of electric vehicles has been heavily studied. Utilizing such

systems in electric vehicles aims to ensure the safety and stability of the batteries during charging and discharging cycles.

## 4. Types of PCMs and essential parameters in choosing PCMs in BTMS systems

Phase change materials can be divided into solid-liquid, liquid-gas, solid-gas, and solid-solid based on the phase change they perform. Solid-liquid PCMs are classified into organic, inorganic, and eutectic materials. PCMs based on organic materials are classified into paraffinic and non-paraffinic materials. The classification of different types of PCMs is presented in Figure 1 [12].

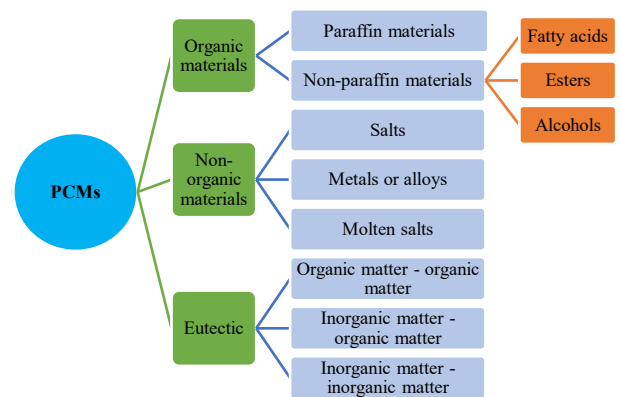
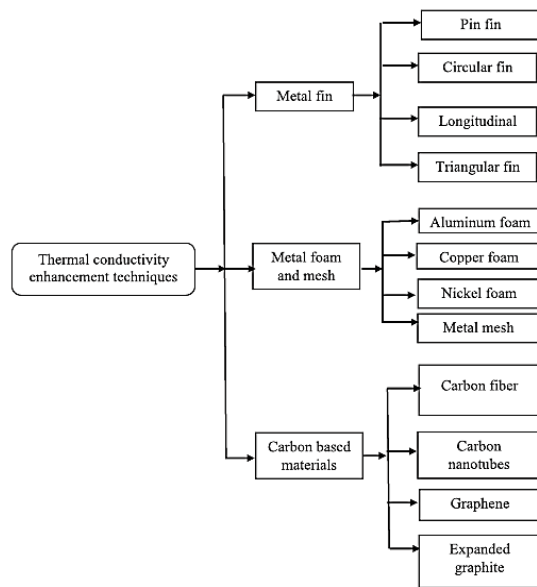


Figure 1. Classification of PCMs [12].

## 5. Methods of increasing heat transfer in PCMs

In order to achieve widespread utilization of PCM-based BTMS systems, problems related to the poor thermal conductivity of PCMs must be addressed. Many studies are available in this field which proposed different types of metal fins (pinned fins, circular fins, triangular fins, and longitudinal fins), metal-based foams (nickel, copper, and aluminum foams), metal-based meshes, and carbon-based nanomaterials to solve issues related to the poor thermal conductivity of PCMs. Some researchers proposed composite nanomaterials prepared using carbon, like expanded graphite, carbon nanotubes, and carbon fiber [12]. Figure 2 shows various methods that can be used to improve the thermal conductivity of PCMs.



**Figure 2.** Methods of improving the thermal conductivity of PCMs in BTMS systems [12].

## 6. Conclusion

One of the critical issues in lithium-ion batteries is the problem of controlling the heat created in these batteries. Battery heat control methods are divided into two active and passive types, which do not require energy consumption in the passive type. One of the passive heat control methods is using PCMs. PCMs store the thermal energy as latent heat of fusion during the melting process, but almost all conventional PCMs, except for metals, have poor thermal conductivity. For this reason, some researchers have suggested adding different materials and making nanocomposites of PCMs to improve the conductivity of such materials in heat control systems. Some researchers have succeeded in synthesizing stable forms of phase change nanocomposites by combining paraffin as PCM with nanoparticles of CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, or graphene in the presence of sodium dodecyl sulfate (as a coating). These nanoparticles are uniformly distributed in the PCM. Adding nanoparticles to paraffin reduces the melting temperature thanks to the high thermal conductivity of nanoparticles, but doing so also reduces the latent heat of phase change.

## 7. References

- [1] Z. Liu, J. Huang, M. Cao, G. Jiang, Q. Yan, and J. Hu, Experimental study on the thermal management of batteries based on the coupling of composite phase change materials and liquid cooling, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 185, pp. 116415, 2021.
- [2] R. Yang, R. Xiong, S. Ma, and X. Lin, Characterization of external short circuit faults in electric vehicle Li-ion battery packs and prediction using artificial neural networks, *Applied Energy*, Vol. 260, pp. 114253, 2020.
- [3] L. Zhou, L. He, Y. Zheng, X. Lai, M. Ouyang, and L. Lu, Massive battery pack data compression and reconstruction using a frequency division model in battery management systems, *Journal of Energy Storage*, Vol. 28, pp. 101252, 2020.
- [4] W. Wu, W. Wu, X. Qiu, and S. Wang, Low-temperature reversible capacity loss and aging mechanism in lithium-ion batteries for different discharge profiles, *International journal of energy research*, Vol. 43, No. 1, pp. 243-253, 2019.
- [5] S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, and M. Fowler, Experimental temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at varying conditions, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 71, pp. 35-43, 2016.
- [6] W. Cao, C. Zhao, Y. Wang, T. Dong, and F. Jiang, Thermal modeling of full-size-scale cylindrical battery pack cooled by channeled liquid flow, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 138, pp. 1178-1187, 2019.
- [7] T. Deng, G. Zhang, Y. Ran, and P. Liu, Thermal performance of lithium ion battery pack by using cold plate, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 160, pp. 114088, 2019.
- [8] Z. Jiang and Z. Qu, Lithium-ion battery thermal management using heat pipe and phase change material during discharge-charge cycle: A comprehensive numerical study, *Applied Energy*, Vol. 242, pp. 378-392, 2019.
- [9] W. Wu, S. Wang, W. Wu, K. Chen, S. Hong, and Y. Lai, A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management, *Energy conversion and management*, Vol. 182, pp. 262-281, 2019.
- [10] S. Al Hallaj and J. Selman, A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 147, No. 9, pp. 3231, 2000.
- [11] M. Hao, J. Li, S. Park, S. Moura, and C. Dames, Efficient thermal management of Li-ion batteries with a passive interfacial thermal regulator based on a shape memory alloy, *Nature Energy*, Vol. 3, No. 10, pp. 899-906, 2018.
- [12] S. B. Sanker and R. Baby, Phase change material based thermal management of lithium ion batteries: A review on thermal performance of various thermal conductivity enhancers, *Journal of Energy Storage*, Vol. 50, pp. 104606, 2022.
- [13] S. Arora, Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies, *Journal of Power Sources*, Vol. 400, pp. 621-640, 2018.
- [14] R. Spotnitz and J. Franklin, Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells, *Journal of power sources*, Vol. 113, No. 1, pp. 81-100, 2003.
- [15] G. Alva, Y. Lin, and G. Fang, An overview of thermal energy storage systems, *Energy*, Vol. 144, pp. 341-378, 2018.
- [16] A. Safari, R. Saidur, F. Sulaiman, Y. Xu, and J. Dong, A review on supercooling of Phase Change Materials in thermal energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, pp. 905-919, 2017.

- [17] G. Wei, G. Wang, C. Xu, X. Ju, L. Xing, X. Du, and Y. Yang, Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change materials for thermal energy storage: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 1771-1786, 2018.
- [18] Y.-J. Chen, D.-D. Nguyen, M.-Y. Shen, M.-C. Yip, and N.-H. Tai, Thermal characterizations of the graphite nanosheets reinforced paraffin phase-change composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 44, pp. 40-46, 2013.
- [19] N. I. Ibrahim, F. A. Al-Sulaiman, S. Rahman, B. S. Yilbas, and A. Z. Sahin, Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 74, pp. 26-50, 2017.
- [20] Y. Lin, Y. Jia, G. Alva, and G. Fang, Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 82, pp. 2730-2742, 2018.
- [21] J. Chen, S. Kang, E. Jiaqiang, Z. Huang, K. Wei, B. Zhang, H. Zhu, Y. Deng, F. Zhang, and G. Liao, Effects of different phase change material thermal management strategies on the cooling performance of the power lithium ion batteries: A review, *Journal of Power Sources*, Vol. 442, pp. 227228, 2019.

## کنترل دمای باتری های تلفن های هوشمند با استفاده از نانوکامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده

سینا یعقوبی<sup>1</sup>، حسن صدیقی<sup>1</sup>، علی بیگلری<sup>1</sup>، مجید سعیدی<sup>1</sup>، عزیز باباپور<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

2- دانشیار، مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

\* اردبیل، 179، babapoor@uma.ac.ir

## چکیده

نگرانی های زیست محیطی و کمبود سوخت های فسیلی باعث پیشرفت سریع فناوری باتری های قابل شارژ شده است. نتایج نشان داده است که عملکرد باتری های لیتیوم-یونی نسبت به دما بسیار حساس است و دما به طور قابل توجهی بر ظرفیت و توان باتری تأثیر دارد. بنابراین، ساخت یک سیستم مدیریت حرارتی باتری کارآمد برای حفظ دمای عملیاتی باتری در محدوده ایمن ضروری است. استفاده از PCMها می تواند گزینه جالبی برای مدیریت حرارتی باتری های لیتیوم-یونی باشد و مطالعات متعددی در مورد استفاده از PCMها در سیستم های مدیریت حرارت باتری های لیتیوم-یونی انجام شده است. بزرگترین چالش در سیستم های BTMS مبتنی بر PCM، غلبه بر مسائل مربوط به هدایت حرارتی ضعیف PCMها است. محققان متعددی که در این زمینه فعالیت کرده اند، استفاده از انواع مختلف باله های فلزی (باله های پین دار، باله ای مدور، باله ای طولی و باله ای مثلثی)، فوم های فلزی (فوم های آلومینیوم، مس و نیکل)، مش های فلزی و نانو مواد بر پایه ی کربن را برای افزایش رسانایی حرارتی در سیستم های BTMS مبتنی بر PCMها پیشنهاد کرده اند که برخی از این نانو مواد کامپوزیتی مبتنی بر کربن عبارتند از گرافیت منبسط شده، نانو لوله های کربنی و فیبر کربن. در این مقاله پیشرفت های اخیر و روش های نوین کنترل حرارت و بهینه سازی باتری های لیتیوم-یونی بررسی شده است.

**کلیدواژگان:** مواد تغییر فاز دهنده، باتری لیتیوم-یونی، سیستم مدیریت حرارت باتری، نانو کامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده، تلفن هوشمند

## Temperature control of smartphone batteries using nanocomposites of phase change materials

Sina Yaghoubi<sup>1</sup>, Hassan Seddighi<sup>1</sup>, Ali Biglary<sup>1</sup>, Majid Saedi<sup>1</sup>, Aziz Babapoor<sup>2\*</sup>

1-Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2-Associate Professor, Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

\* P.O.B. 179 Ardabil, Iran, babapoor@uma.ac.ir

Received: 4 November 2022 Accepted: 27 February 2023

## Abstract

Environmental concerns and the scarcity of fossil fuels have led to the rapid development of rechargeable battery technologies. It has been proven that the performance of lithium-ion batteries is susceptible to temperature, and temperature significantly affects the capacity and power of batteries. Therefore, it is necessary to build an efficient battery thermal management system to maintain the battery's operating temperature in a safe range. Utilizing PCM.s can be an exciting option in thermal management systems of lithium-ion batteries, and several studies have been conducted about them. The biggest challenge in PCM-based BTMS systems is to overcome the problems related to the poor thermal conductivity of PCMs. Many researchers in this field proposed different types of metal fins (pinned fins, circular fins, longitudinal fins, and triangular fins), metal foams (aluminum, copper, and nickel foam), metal meshes, and carbon-based nanomaterials to increase the thermal conductivity in PCM-based BTMS systems. Some proposed carbon-based composite nanomaterials are expanded graphite, carbon nanotubes, and carbon fiber. In this article, recent developments and new methods of thermal management and performance optimization of lithium-ion batteries have been reviewed.

**Keywords:** Phase change materials, lithium-ion battery, battery thermal management system, nanocomposite phase change materials, Smartphone

به دلیل اثر ژول متناسب با جریان شارژ و دشارژ است. همچنین بستگی به وضعیت شارژ<sup>3</sup> (SOC) و عمق تخلیه<sup>4</sup> (DOD) دارد. این مقادیر به ترتیب درصد انرژی باقی مانده در باتری در زمان شارژ و انرژی تخلیه شده از باتری هستند. سایر عوامل موثر بر تولید گرما عبارتند از:

(1) مقاومت اهمی در برابر جریان الکتریکی

(2) مقاومت‌های الکتروشیمیایی برای:

- نفوذ یون‌های Li
- انتقال بار بین مواد وارد شده و الکترولیت.

تولید گرما در باتری‌ها فرایند پیچیده‌ای است که با زمان و دما، با توجه به سرعت واکنش‌های الکتروشیمیایی، تغییر می‌کند. همچنین نحوه توزیع شارژ در باتری‌های بزرگ باید معین باشد. سرعت تولید گرما در یک سلول را می‌توان از رابطه‌ی (1) که توسط برناردی و همکارانش و گو و همکارانش پیشنهاد شده است، به دست آورد [12، 13].

$$q = 1 \times (U - V) - 1 \times (T \frac{dU}{dT}) \quad (1)$$

در رابطه‌ی (1)، پارامتر  $q$  جریان خروجی گرما از حجم باتری است. سمت راست رابطه‌ی (1) تولید گرمای برگشت‌ناپذیر را نشان می‌دهد. در رابطه‌ی (1)،  $U$  نشان‌دهنده ولتاژ مدار باز و  $V$  نشان‌دهنده ولتاژ سلول است. جمله‌ی  $(U-V)$ ، تولید گرمای برگشت‌پذیر یا آنتروپی نامیده می‌شود و جمله‌ی  $T \frac{dU}{dT}$  مربوط به فاکتور آنتروپی است که به چگالی و دمای سلول بستگی دارد. این جمله در صورت عدم وجود جریان برابر با صفر می‌شود. سرعت‌های پایین دشارژ شدن (C-rate) منجر به تولید گرمای برگشت‌پذیر می‌شود، در حالی که C-rate بالا منجر به تولید گرمای برگشت‌ناپذیر می‌شود [9]. بنابراین، ساخت یک سیستم مدیریت حرارتی باتری<sup>5</sup> (BTMS) کارآمد برای حفظ دمای عملیاتی باتری در محدوده‌ی ایمن ضروری است [14]. تلاش‌های زیادی برای توسعه BTMS‌های کارآمد انجام شده است که می‌توان آن‌ها را به دو روش فعال و غیرفعال<sup>6</sup> تقسیم کرد [15]. به طور کلی، هزینه‌ی اضافی مرتبط با تامین انرژی در روش‌های فعال به ایجاد جریان اجباری هوا و به گردش انداختن مایع درون سیستم مربوط می‌شود [16، 17]. در روش‌های غیرفعال، سیستم BTMS بدون مصرف انرژی خارجی عمل می‌کند که این موضوع باعث می‌شود که این روش، به عنوان یک روش کنترل حرارت، مورد توجه باشد [18، 19]. یکی از مؤثرترین روش‌های غیرفعال، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده<sup>7</sup> (PCMs) است. PCMs توانایی خوبی در ذخیره کردن انرژی دارند و به همین دلیل در کنترل دمای ساخت و ساز بناها [20، 21]، مدیریت حرارتی باتری‌ها و به طور کلی برای کنترل کردن دما، استفاده می‌شوند. مواد خنک‌کننده‌ی PCM که برای مدیریت حرارت ایجاد شده در

## 1- مقدمه

اخیراً، نگرانی‌های زیست محیطی و کمبود سوخت‌های فسیلی باعث پیشرفت سریع فناوری‌های باتری‌های قابل شارژ شده است. باتری‌های لیتیومی به دلیل قابلیت اطمینان بالا و ظرفیت زیاد و نداشتن مشکل اثر حافظه<sup>1</sup>، به عنوان یکی از منابع اصلی ذخیره‌سازی الکتریسیته در نظر گرفته می‌شوند [1-3]. ثابت شده است که عملکرد باتری‌های لیتیوم-یونی نسبت به دما بسیار حساس است و دما به طور قابل توجهی بر ظرفیت و توان باتری تأثیر دارد [4]. باریک شدن دستگاه‌های الکترونیکی، مانند تلفن‌های هوشمند، باعث شده است که فضای کمی در اطراف باتری‌های این دستگاه‌ها وجود داشته باشد و این موضوع باعث می‌شود که در هنگام استفاده از باتری‌ها، به دلیل عدم تهویه مناسب، دمای اجزای درونی باتری به شدت افزایش پیدا کند. مشخص شده است که محدوده دمای کاری مناسب برای باتری‌ها 20 تا 45 درجه سانتی‌گراد است [5-7]. دمای بالای محیط نه تنها بر عملکرد باتری تأثیر می‌گذارد، بلکه در موارد شدید باعث ایجاد پدیده‌ی فرار حرارتی<sup>2</sup> می‌شود [8]. در جدول 1 تعدادی از اشکالات که احتمال دارد در دماهای بالا برای باتری‌های لیتیوم-یونی اتفاق بیفتد، آورده شده است.

جدول 1 اشکالات احتمالی ناشی از افزایش دما در باتری‌های Li-ion [9، 10]

اجزای تحت تأثیر و نوع تغییر نامطلوب	دمای سلول باتری (°C)	ایراد ناشی از افزایش دما
تجزیه‌ی لایه‌ی میانی الکترولیت جامد	90 تا 120 درجه	افزایش سریع دما و آزاد شدن گرما
تخریب و تجزیه‌ی الکتروود منفی و حلال‌های آلی	بالای 120 درجه	رخ دادن واکنش جانبی منجر به تولید گازهای قابل احتراق
ذوب شدن جدا کننده	130 درجه	از کار افتادن سلول
تجزیه‌ی مواد تشکیل دهنده کاتد	150 تا 265 درجه	آزاد شدن گاز اکسیژن
تجزیه‌ی الکترولیت	200 تا 300 درجه	آزاد شدن گازهای قابل اشتعال
تجزیه‌ی بایندر و مواد تشکیل دهنده‌ی آند	بالای 260 درجه	آزاد شدن گاز اکسیژن
اکسایش و کاهش نامطلوب کاتد و آند	بالا تر از 300 درجه	افزایش سریع دما و رخ دادن فرار حرارتی

دو منبع اصلی گرمای تولید شده در داخل باتری عبارتند از: (الف) اثر ژول و (ب) وقوع واکنش‌های الکتروشیمیایی گرمازا [11]. گرمای تولید شده

3. State of charge  
4. Depth of discharge  
5. Battery thermal management system  
6. Active & passive methods  
7. Phase change materials

1. Memory effect  
2. Thermal runaway

دمای باتری در این شرایط به سرعت افزایش می‌یابد [32]. دفع گرما در PCM‌های مذاب دشوار است، و این باعث می‌شود که از دفع گرمای باتری جلوگیری شود. در مقایسه با PCM‌ها، خنک‌کننده‌های مایع یک روش مدیریت حرارت کارآمدتر در باتری‌ها هستند که می‌تواند با شرایط شارژ و دشارژ با سرعت بالا سازگار شوند. جیاکانگ و همکارانش [33] تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد کنترل دمای باتری‌ها در یک سیستم خنک‌کننده مایع را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که تعداد لوله‌های موجود در صفحه‌ی سرد بیشترین تأثیر را بر میانگین دمای باتری دارد و ارتفاع لوله‌ها نیز کمترین تأثیر را دارد. جیاتنگ ژائو [34] یک سیستم خنک‌کننده‌ی استوانه‌ای شکل جدید مبتنی بر سیلندر خنک‌شده با مایع میکروکانالی برای استفاده در باتری‌ها پیشنهاد کردند و تأثیر تعداد کانال‌ها، جریان جرمی و جهت جریان را بر عملکرد اتلاف گرما از طریق محاسبات عددی مورد مطالعه قرار داد. اگر چه می‌توان با استفاده از خنک‌کننده‌های مایع به طور موثر حداکثر دمای باتری‌ها را کنترل کرد، با این حال یکنواختی دما در این سیستم‌ها ضعیف است [35]. بنابراین برآوردن استانداردهای حداکثر اختلاف دما در بحث مدیریت حرارت باتری‌ها در این گونه سیستم‌ها دشوار است. برای بهبود یکنواختی دمای باتری‌ها، زونگو رائو [36] یک سیستم خنک‌کننده‌ی مایع مبتنی بر BTMS به همراه سطح تماس متغیر طراحی کرد و دریافت که یکنواختی دمای چنین سیستمی بهتر از سیستم با سطح تماس ثابت است. با این حال سیستم پیشنهادی زونگو رائو، ساختار مکانیکی پیچیده‌ای دارد و این در حالی است که استفاده از خنک‌کننده‌های مبتنی بر ترکیب PCM‌ها و خنک‌کننده‌های مایع ساختار سیستم‌های خنک‌کننده را ساده‌تر می‌کند. همانطور که اشاره شد، هدف اصلی یک BTMS نگر داشتن باتری‌ها در محدوده‌ی دمای مجاز با یک توزیع دمای یکنواخت در داخل سلول و بسته‌ی باتری است. مدیریت افزایش دما در BTMS ضروری است. به طور کلی، دو روش عمده برای کاهش گرمای تولید شده توسط باتری‌های لیتیوم-یونی در دسترس است که عبارتند از سیستم‌های مدیریت داخلی و مدیریت خارجی. در سیستم‌های مدیریت داخلی، تولید گرما را می‌توان با تمهیدات مختلفی مانند استفاده از مواد مختلف به عنوان کاتد و آند و همچنین استفاده از ضخامت‌های مختلف الکتروود کاهش داد. سیستم‌های مدیریت خارجی برای بهبود دفع حرارت سلول‌های باتری‌ها از جریان هوا، مدارهای خنک‌کننده، حلقه‌های خنک‌کننده دو فازی و مواد تغییر فاز دهنده بهره می‌گیرند. استفاده از فناوری‌های مدیریت حرارت خارجی در BTMS‌ها موثرتر و گسترده‌تر است. PCM‌ها قادر به جمع‌آوری انرژی حرارتی به شکل گرمای نهان هستند [9]. جزئیات PCM ها، انواع مختلف مواد تغییر فاز دهنده، مزیت‌ها و مضرات PCM‌های آلی و معدنی، معیارهای انتخاب PCM‌ها در بخش‌های بعدی به تفصیل ارائه می‌شود.

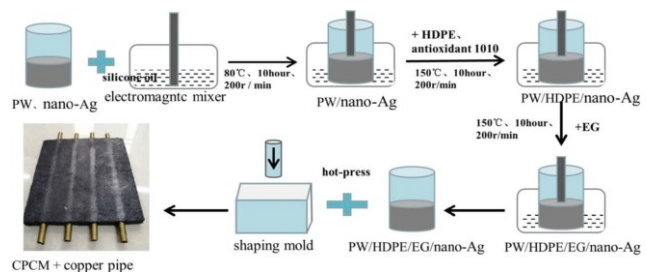
## 2- باتری‌های لیتیوم-یونی<sup>۴</sup>

سلول لیتیوم-یونی، یک دستگاه ذخیره‌ی انرژی الکتروشیمیایی است که در آن انرژی الکتریکی با استفاده از واکنش‌های شیمیایی ذخیره می‌شود. باتری لیتیوم-یونی یک باتری قابل شارژ است که در آن یون‌های لیتیوم از سمت

باتری‌ها به کار می‌روند دارای ساختاری ساده هستند [22، 23] و می‌تواند مقدار زیادی گرمای نهان را بدون تغییر دما در طول فرآیند تغییر فاز جذب کند [1، 24]. روش‌های آماده‌سازی و نوع ترکیب مواد PCM متنوع است [25، 26]. برای تهیه‌ی مواد تغییر فاز دهنده‌ی کامپوزیتی<sup>۱</sup> (CPCM) می‌توان از ترکیب پارافین (PA یا PW) با گرافیت منبسط شده<sup>۲</sup> (EG)، پلی‌اتیلن با چگالی بالا<sup>۳</sup> (HDPE) و نانو ذرات نقره (nano-Ag) استفاده کرد. شکل 1 مواد مختلفی که در ساخت CPCM‌ها به کار می‌روند را نشان می‌دهد. شکل 2 مراحل تهیه‌ی CPCM‌ها را نشان می‌دهد.



شکل 1 موادی که برای ساخت CPCM‌ها به کار می‌روند [1]



شکل 2 مراحل تهیه‌ی CPCM‌ها [1]

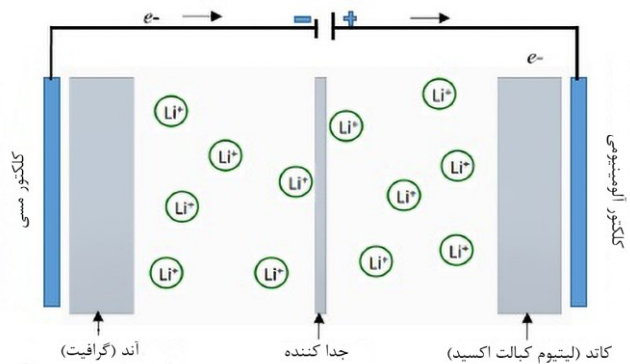
پارافین (PA)، با ترکیب  $C_nH_{2n+2}$ ، یکی از رایج‌ترین انواع PCM است که در کنترل حرارت باتری‌ها از آن استفاده می‌شود. علت استفاده از PA کم هزینه بودن، عدم جداسازی فاز، آنتالپی امکان‌پذیر و دمای انتقال فاز متغیر در پارافین است. با این حال، تکنولوژی‌های پیشرفته‌ی بسته‌بندی برای جلوگیری از نشت PA ذوب شده مورد نیاز است [27، 28]. جینگه‌ی لی و همکارانش [29] یک CPCM که کامپوزیتی از PA و گرافیت منبسط شده (EG) به همراه  $SiO_2$  بود را به عنوان خنک‌کننده‌ی باتری تهیه و استفاده کردند. این ماده نشت پارافین پایین و رسانایی حرارتی بالایی را در طول کار باتری از خود نشان داد. لوفو لو و همکارانش [30] یک CPCM بهبود یافته بر اساس مواد نانو سیلیس تهیه کردند که توانایی مقاومت در برابر تغییرات حجم را دارد و نشان دادند که این CPCM در طول فرآیند شارژ و دشارژ باتری، این عملکردی عالی در مدیریت حرارت ایجاد شده دارد. آشیما ورما و همکارانش [31] مزایا و معایب استفاده از مخلوط دکانونیک اسید و پارافین به عنوان یک ترکیب تغییر فاز دهنده را بررسی کردند و تأثیر ضخامت PCM بر عملکرد کنترل دمای باتری را مورد بررسی قرار دادند. هنگامی که یک چرخه‌ی شارژ-دشارژ باتری با سرعت بالا تکمیل می‌شود، CPCM‌ها ذوب می‌شوند و اثر تنظیم حرارتی خود را از دست می‌دهند و

1. Composite phase change materials
2. Expanded Graphite
3. High-density polyethylene

							(W.h/kg)	آند به کاتد حرکت می‌کنند که این حرکت یون‌ها باعث ایجاد جریان الکتریسیته می‌شوند. باتری‌ها به طور کلی به دو دسته‌ی اولیه و ثانویه طبقه‌بندی می‌شوند. باتری‌های اولیه یک بار مصرف و غیرقابل شارژ هستند. نوع ثانویه قابل شارژ است. امروزه انواع مختلفی از باتری‌های قابل شارژ به صورت تجاری در دسترس هستند که شامل باتری‌های نیکل-فلز هیدریدی، سربی اسیدی، لیتیوم-پلیمر، نیکل-کادمیم و لیتیوم-یونی هستند [9, 37-39]. باتری‌های لیتیوم-یونی به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مانند توان بالا و چرخه‌ی عمر بالاتر نسبت به سایر باتری‌ها، یکی از مهم‌ترین منابع تامین انرژی الکتریکی برای دستگاه‌های الکترونیکی هستند.
150	100	300	300	200	200	250	توان مخصوص	
						150	(kW.h/kg)	
1/7	1/2	3/6	3/6	1/2	1.2	2	ولتاژ اسمی سلول (V)	
							تعداد چرخه در طول عمر (80%)	
300	2000	500-300	>1000	1000-500	200-500	700-200		
							شارژ)	
.....	.....	2-4	2-3	1	1	8	زمان شارژ شدن (h)	
							% تخلیه‌ی شارژ (بعد از یک ماه)	
30	-40/20	10	10	30	20	5		

## 1-2- اجزای باتری‌های لیتیوم-یونی

سلول‌های لیتیوم-یونی از لایه‌ای از مواد درهم تنیده ساخته شدند، که شامل الکترولیت، جداکننده و دو کلکتور جریان هستند. کاتد باتری‌های لیتیوم-یونی معمولاً از جنس لیتیوم کبالت اکسید ( $\text{LiCoO}_2$ ) و آند از جنس  $\text{LiC}_6$  است. جداکننده، یک عایق است که کاتد با بار مثبت و آند با بار منفی را از هم جدا می‌کند و امکان حرکت یون‌ها را فراهم می‌کند. کلکتورهای جریان عموماً به ترتیب از مس به عنوان الکتروود منفی و آلومینیوم به عنوان الکتروود مثبت ساخته می‌شوند. شماتیک یک باتری لیتیوم-یونی در شکل 3 نشان داده شده است. الکترولیت این باتری‌ها معمولاً به صورت مایع است و محلولی از لیتیوم هگزا فلوروفسفات ( $\text{LiPF}_6$ ) در آلکیل کربنات است [10]. آلکیل کربنات محلولی از  $\text{LiPF}_6$  است که مخلوطی از دی اتیل کربنات و اتیلن کربنات را دارا است.



شکل 3 نمای شماتیک یک باتری لیتیوم-یونی [9]

در جدول 2 باتری‌های مختلف تجاری و باتری‌های لیتیوم-یونی با هم مقایسه شده‌اند.

جدول 2 خواص و ویژگی‌های باتری‌های مختلف [40]

باتری	باتری	باتری	باتری	باتری	باتری	باتری	پارامتر
سربی	نیکل -	نیکل -	لیتیوم -	لیتیوم -	لیتیوم -	سربی	انرژی مخصوص
اسیدی	کادمیوم	فلز هیدریدی	یونی	پلیمری	نیکل - آهن	اسیدی	
-40	-80	-12	-180	130	70	اسیدی	
25	45	60	110	100	50	اسیدی	

## 2-2- عوارض و خطرات تولید گرما در باتری‌ها

دمای بالا باعث تخریب اجزای داخلی باتری‌ها می‌شود. نگهداری باتری در دماهای بالاتر از 40 درجه‌ی سانتی‌گراد به شدت بر عمر باتری تأثیر می‌گذارد. این موضوع منجر به کاهش ظرفیت نگهداری انرژی در باتری می‌شود. الکترولیت‌هایی که به طور معمول در باتری‌های لیتیوم-یونی استفاده می‌شوند به دلیل پتانسیل ولتاژ، از نظر شیمیایی در آند باتری پایدار نیستند. هنگامی که سلول یک باتری جدید برای اولین بار شارژ می‌شود، واکنش‌های برگشتناپذیری رخ می‌دهند که در آن الکترولیت با یون‌های لیتیوم موجود در باتری واکنش می‌دهند و یک لایه‌ی نازک از مواد غیر پایدار مانند لیتیوم آلکیل کربنات، پلیمرها و محصولات گازی روی آند تولید می‌کند [41]. در طول چرخه شارژ و دشارژ اگر دما از 85 درجه سانتی‌گراد بالاتر رود، الکترولیت جامد موجود روی الکتروودها تجزیه می‌شود و این واکنش، گرمازا است. در دمای بالای 110 درجه سانتی‌گراد، فیلم ثانویه‌ای که روی الکتروودها است نیز تجزیه می‌شود و این باعث می‌شود که سطوح آند در معرض خوردگی توسط الکترولیت قرار گیرند، که منجر به تشکیل کربنات معدنی و همچنین منجر به کاهش قابل توجه ظرفیت و توان سلول‌ها در ذخیره‌ی انرژی می‌شود. دمای بالای 200 درجه سانتی‌گراد باعث تجزیه الکترولیت می‌شود و محصولات گازی قابل احتراق در این دما آزاد می‌شوند که این گازها همراه با اکسیژن تولید شده، که حاصل واکنش تجزیه الکترولیت‌ها است، می‌توانند منجر به ایجاد آتش‌سوزی شوند [42]. فنگ و همکارانش [43] وقوع پدیده‌ی فرار حرارتی را در باتری‌های لیتیوم-یونی 25 آمپر ساعتی مشاهده و گزارش کردند. نتایج آزمایشات نشان داده است که پدیده‌ی فرار حرارتی در دماهای 870 درجه سانتی‌گراد یا بیشتر گزارش شده است [9]. می‌توان به مسئله‌ی آتش گرفتن و انفجار تلفن هوشمند Galaxy Note 7 شرکت سامسونگ به عنوان یک نمونه‌ی واقعی از مشکلات و خطرات ایجاد





شکل 4 متورم شدن باتری لیتیوم-یونی یک تلفن هوشمند بر اثر تولید گاز درون باتری [46]

### 2-5- رخ دادن اتصال کوتاه در اجزای داخلی

اتصال کوتاه ممکن است به دلیل آسیب فیزیکی باتری، طراحی معیوب سیستم شارژر، نامناسب بودن الکتروود و یا خراب بودن جداکننده رخ دهد. رخ دادن اتصال کوتاه باعث تخلیه‌ی خود به خودی شارژر باتری در طول زمان همراه با گرم شدن سریع و موضعی باتری می‌شود [9].

### 3- استفاده از نانوکامپوزیت‌های PCM برای دفع حرارت باتری‌ها

استفاده از PCM ها می‌تواند گزینه‌ی جالبی برای مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یونی باشد و مطالعات متعددی در مورد استفاده از PCM ها در سیستم‌های مدیریت حرارت باتری‌های لیتیوم-یونی انجام شده است. ذخیره‌ی انرژی حرارتی به سه شکل می‌تواند انجام شود: ذخیره به صورت گرمای نهان، ذخیره‌ی انرژی توسط واکنش‌های شیمیایی برگشت‌پذیر و ذخیره‌ی انرژی به صورت گرمای محسوس [47-49]. در بین سه نوع روش ذخیره‌سازی حرارت، با ذخیره‌ی انرژی به صورت گرمای نهان می‌توان بیشترین مقدار انرژی را ذخیره کرد. با افزایش دمای محیط، PCM ها می‌توانند انرژی را با دریافت گرما از محیط مجاور خود بگیرند و با ذوب شدن در خود ذخیره کنند. هنگامی که دمای محیط به زیر دمای تغییر فاز<sup>3</sup> (PCT) کاهش می‌یابد، انرژی حرارتی توسط PCM آزاد می‌شود و ماده‌ی PCM به حالت اولیه باز می‌گردد [50]. به همین دلیل PCM ها برای گرم نگه داشتن باتری در محیط سرد نیز مفید هستند [9]. PCM ها به دلیل ویژگی‌های ذاتی خود مانند داشتن گرمای نهان و گرمای ویژه‌ی بالا، تغییر حجم کم در طول تغییر فاز، نسبتاً سبک بودن، پایداری از نظر شیمیایی، غیر سمی و غیر خورنده به طور گسترده برای کاربردهای مختلف استفاده می‌شوند. دمای مناسب تغییر فاز (PCT)، انجماد بدون نیاز به فوق سردسازی، و در دسترس بودن در مقادیر زیاد و با هزینه‌ی معقول [51-54] باعث محبوبیت استفاده از PCM ها شده است. با وجود مزایای فراوان، از عوامل بازدارنده‌ای که کاربرد BTMS مبتنی بر PCM را محدود می‌کند می‌توان به هدایت حرارتی کمتر PCM ها، سخت بودن جلوگیری از نشت PCM ها و دفع ایمن PCM ها بعد از پایان عمر مفید آن‌ها اشاره کرد. PCM ها در سیستم‌های کنترل حرارت به دو منظور استفاده می‌شوند: (الف) برای به حداقل رساندن تولید یا جابجایی گرما یا سرمای تولید شده در دستگاه برای افزایش ایمنی حرارتی و (ب) ذخیره

شده‌ی ناشی از گرم شدن باتری‌های لیتیوم-یونی در تلفن‌های هوشمند اشاره کرد که منجر به فراخوانی تمامی تلفن‌های تولید شده از این مدل توسط شرکت سامسونگ شد. تحقیقات انجام شده در مورد باتری به کار رفته در این تلفن هوشمند به موارد زیر به عنوان عوامل گرم شدن و آتش گرفتن باتری این تلفن هوشمند اشاره کرده‌اند:

- ❖ اتصال کوتاه داخلی<sup>1</sup> (ISC) در گوشه سمت راست و بالای سلول‌ها
- ❖ تغییر شکل مکرر جداکننده در گوشه‌های سلول باتری
- ❖ عدم وجود نوار عایق روی زبانه‌ی کاتدها
- ❖ جاگذاری نادرست اجزای باتری
- ❖ شارژ شدن ناهمگن باتری
- ❖ استفاده از جداکننده‌ی نازک‌تر در مقایسه با دستگاه‌های قبلی [44].

### 2-3- فرار حرارتی

یکی از حالت‌هایی که خرابی در باتری را به همراه خواهد داشت، فرار حرارتی است. در این زمینه تحقیقات متعددی انجام شده است و علت اصلی این موضوع و راه‌های پیشگیری از آن را ارائه داده‌اند. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که یک واکنش گرمازا از کنترل خارج می‌شود؛ یعنی به دلیل افزایش دما، سرعت واکنش افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش بیشتر دما و در نتیجه افزایش بیشتر سرعت واکنش را به همراه خواهد داشت و موجب انفجار خواهد شد که در دمای بالای 80 درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. فرار حرارتی در باتری‌های لیتیوم-یونی ناشی از وقوع واکنش‌های گرمازا بین الکتروولیت، آند و کاتد است که با افزایش دما و فشار، در نهایت منجر به از هم گسیختگی باتری می‌شود [10]. پدیده‌ی فرار حرارتی عامل رخ دادن واکنش‌های گرمازای نامطلوب در باتری‌های لیتیوم-یونی است که باعث خراب شدن باتری می‌شوند. پدیده‌ی فرار حرارتی در باتری‌های لیتیوم-یونی در اثر اعمال بار اضافه (بیش از اندازه شارژ کردن یا با شدت تخلیه کردن باتری)، اتصال کوتاه و گرم شدن بیش از حد باتری در اثر عوامل خارجی رخ می‌دهد [45].

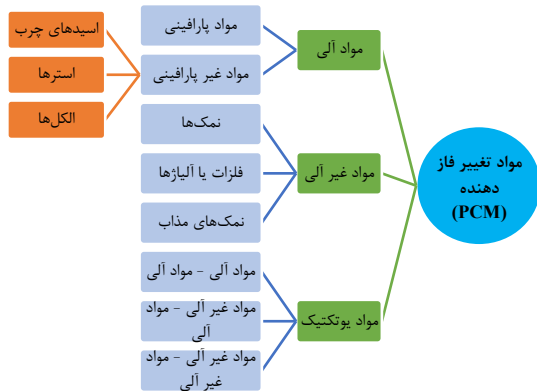
### 2-4- شارژ کردن بیش از اندازه‌ی باتری

عملکرد نامناسب شارژر باتری یا طراحی معیوب سیستم BTMS دستگاه‌های الکترونیکی ممکن است منجر به شارژ شدن بیش از حد باتری شوند. ضخامت لایه‌ی جامد رابط الکتروولیت<sup>2</sup> (SEI)، که در قسمت بالایی آند وجود دارد، هنگامی که باتری بیش از اندازه شارژ شود، افزایش می‌یابد. همچنین شارژ بیش از اندازه باعث آزاد شدن گازهایی مانند کربن دی‌اکسید و بخار آب می‌شود که این موضوع منجر به متورم شدن باتری می‌شود [9].

1. Internal short circuit  
2. Solid electrolyte interface

3. Phase change temperature

در حالی که PCM های معدنی شامل آب، فلزات و آلیاژهای آن‌ها، نمک‌های هیدرات‌دار و نمک‌های مذاب هستند [53]. مخلوط‌های یوتکتیک (کلمه Eutectic از زبان یونانی گرفته شده است و از دو کلمه «Eu» به معنی آسان و «Teksis» به معنای ذوب شدن تشکیل شده است) از دو یا چند جزء تشکیل شده‌اند که با درصدهای مشخص با هم مخلوط شده‌اند و تقریباً بدون جداسازی فاز، ذوب و منجمد می‌شوند [58]. جزئیات طبقه‌بندی و انواع مختلف PCM ها در شکل 5 آورده شده است [9].



شکل 5 طبقه‌بندی مواد PCM [9]

مزیت اصلی استفاده از PCM های آلی، خورنده نبودن و پایداری شیمیایی آن‌ها است. از طرفی برای اکثر PCM های معدنی به غیر قابل اشتعال بودن، گرمای نهان بالا و به وفور در دسترس بودن با هزینه‌ای مناسب می‌توان به عنوان مزایا اشاره کرد. متأسفانه همه‌ی اشکال PCM های خالص موجود به جز PCM های فلزی، رسانایی حرارتی پایینی دارند. نقطه ضعف کلیدی PCM های آلی رسانایی حرارتی کم آن‌ها است که در محدوده 0/15 تا 0/21 W/m.K است [59]. رسانایی حرارتی PCM های معدنی در مقایسه با PCM های آلی به طور جزئی بالاتر است [9]. خواص مطلوبی که PCM های آلی، معدنی و یوتکتیک باید دارا باشند تا بتوان از آن‌ها در سیستم‌های BTMS استفاده کرد در شکل 6 به صورت خلاصه آورده شده است. مهم‌ترین نگرانی در ساخت سیستم‌های مدیریت حرارت باتری مبتنی بر PCM ها نحوه-ی انتخاب PCM مناسب است. انتخاب مواد معمولاً باید بر اساس معیارهای سینتیکی و شیمیایی، حرارتی، فیزیکی و اقتصادی انجام شود [58].

انرژی حرارتی که هدف این مورد، حفظ انرژی حرارتی است که دستگاه تولید می‌کند [9]. در سال‌های اخیر، استفاده از PCM ها در سیستم‌های BTMS باتری خودروهای برقی مورد توجه قرار گرفته است. هدف، ایمن‌سازی و تثبیت حرارتی باتری‌ها در طول چرخه شارژ و دشارژ آن‌ها است. در سال 2000، الحلاجی و سلمان [18] ایده مدیریت حرارتی غیرفعال را با استفاده از موم پارافین (مخلوطی از پنتاکوسان<sup>1</sup> و هگزاکوسان<sup>2</sup>) با دمای ذوب 56 درجه سانتی‌گراد برای ماژول باتری 10 تا 18650 آمپر ساعتی ارائه کردند که متشکل از هشت سلول بود. بررسی‌های عددی انجام شده نشان دادند که وجود PCM توزیع دما را در سلول‌های باتری یکنواخت‌تر می‌کند. دوان و ناتر [55] مدیریت حرارتی باتری‌ها با استفاده از PCM ها را بررسی کردند. آن‌ها دو طرح مختلف، با ژاکت PCM و بدون ژاکت را برای سیستم مدیریت حرارت باتری پیشنهاد کردند. در این مطالعه از یک هیتر برقی به عنوان منبع گرما در باتری استفاده شد. اثربخشی سیستم مدیریت حرارتی PCM تحت نرخ‌های گرمایش و دماهای مختلف محیط مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر شناوری در طول ذوب PCM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که هر دو طرح عملکرد خوبی در حفظ دمای باتری در محدوده‌ی مجاز کاری دارند. وی و چاب [56] یک فناوری خنک‌کننده ترکیبی را توسعه دادند که شامل خنک‌کننده‌ی هوایی، خنک‌کننده‌ی مایع و PCM است. مطالعات تجربی برای ارزیابی اثربخشی روش خنک‌سازی هیبریدی توسعه داده شده توسط وی و چاب [56] برای یک باتری لیتیوم-یون 26650 آمپر ساعتی انجام شد. سیستم خنک‌کننده‌ی هیبریدی در نهایت با حالت‌های عدم خنک‌سازی، استفاده از خنک‌کننده‌ی هوایی و خنک‌کننده‌ی آبی، مقایسه شد. سیستم خنک‌سازی ترکیبی پیشنهادی توانست دمای پیک را نسبت به حالت‌های عدم خنک‌سازی، استفاده از خنک‌کننده‌ی هوایی و خنک‌کننده‌ی آبی به ترتیب به میزان 82/9، 69/6 و 57/3 درصد برای یک قسمت یکسان در هر سلول کاهش دهد. جوآنی و همکارانش [57] اثر خنک‌کنندگی یک سیستم مدیریت حرارتی غیرفعال جدید که از PCM (n-octadecane) استفاده می‌کرد را به صورت عددی در نرخ‌های تولید حرارت حجمی 6/885، 22/8، 63/97 و 200 کیلووات بر متر مکعب بررسی کردند. باتری و سیستم خنک‌کننده‌ی آن شامل چهار سلول Li-ion بود که فوم‌ها و صفحات خنک‌کننده در بین آن‌ها قرار داشتند. مشاهدات نشان داد که حداکثر دما در سلول‌ها به ترتیب به مقدار 0/17، 0/68، 5/80 و 13/33 کلوین در نرخ‌های تولید گرمای حجمی 6/885، 22/8، 63/97 و 200 کیلووات بر متر مکعب کاهش یافت [9].

### 3-1- انواع مواد PCM و پارامترهای مهم در انتخاب PCM ها در سیستم‌های BTMS

مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان بر اساس تغییر فازی که انجام می‌دهند به جامد-مایع، مایع-گاز، جامد-گاز و جامد-جامد تقسیم‌بندی کرد. PCM های جامد-مایع به سه نوع آلی، معدنی و یوتکتیک طبقه‌بندی می‌شوند. PCM های آلی به دو دسته اصلی پارافینی و غیرپارافینی طبقه‌بندی می‌شوند. PCM های غیر پارافینی شامل اسیدهای چرب، استر و پلی الکل‌ها می‌شوند،

1. Pentacosane  
2. Hexacosane

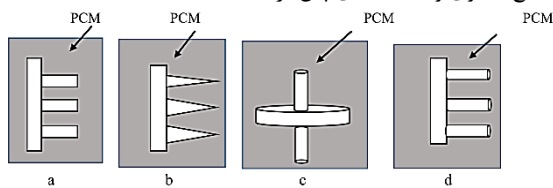
شکل 7 روش‌های بهبود رسانایی حرارتی PCMها در سیستم‌های BTMS [9]

#### 4- مقایسه‌ی سایر روش‌های دفع حرارت باتری‌ها با سیستم‌های PCM

استفاده از مواد تغییر فاز دهنده گزینه‌ی جالبی برای مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیوم-یونی است. مطالعات زیادی در مورد ادغام PCMها برای اطمینان از کنترل شدن حرارت تولید شده توسط باتری‌های لیتیوم-یونی انجام شده است. ذخیره‌ی انرژی حرارتی به سه گونه گرمای نهان، واکنش‌های شیمیایی برگشت‌پذیر و حرارت محسوس طبقه‌بندی می‌شود [47]. در بین سه نوع روش ذخیره‌سازی انرژی، بیش‌ترین مقدار انرژی به صورت گرمای نهان قابل ذخیره‌سازی است. با افزایش دما، PCM می‌تواند انرژی را با دریافت گرما از محیط مجاور و با استفاده از فرایند ذوب، ذخیره کند. با کاهش دما به زیر دمای تغییر فاز، انرژی حرارتی ذخیره شده آزاد می‌شود و PCM به حالت اولیه باز می‌گردد. استفاده از سیستم‌های مبتنی PCMها همچنین برای گرم نگه‌داشتن باتری در محیط‌های سرد نیز می‌تواند مفید واقع شوند [9، 50]. چالش در BTMSهای مبتنی بر PCM، استراتژی‌های غلبه بر مسائل مربوط به هدایت حرارتی ضعیف PCMها است. محققان متعددی، علاوه بر کربن، با استفاده از باله‌های فلزی، فوم‌های فلزی (فوم‌های آلومینیوم، مس و نیکل)، مش‌های فلزی، تکنیک‌های مختلف افزایش هدایت حرارتی در BTMSهای مبتنی بر PCM را پیشنهاد کرده‌اند. برخی از مواد کربنی که برای بهبود هدایت حرارتی مواد مبتنی بر PCM پیشنهاد شده‌اند عبارتند از: گرافیت منبسط شده، نانو لوله‌های کربنی و فیبر کربن. تکنیک‌های بهبود هدایت حرارتی در شکل 7 خلاصه شده‌اند [9].

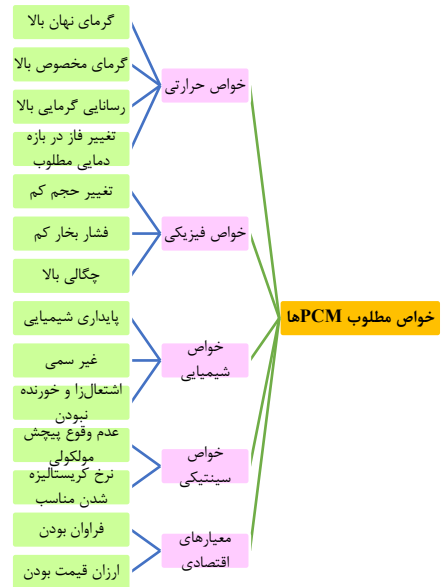
#### 4-1- باله‌های فلزی تعبیه شده با PCM

سطح یا باله کشیده به‌طور کلی به سطح جامدی گفته می‌شود که برای افزایش انتقال حرارت از طریق هدایت با استفاده از اصول همرفت استفاده می‌شود. برای افزایش سطح انتقال حرارت، می‌توان پره‌ها را به دو صورت نصب کرد: (الف) قرار دادن پره‌ها در PCM (ب) قرار دادن پره‌ها روی سطح PCM. علاوه بر این، مطابق با شکل 8، پره‌هایی که معمولاً در BTMS مبتنی بر PCM استفاده می‌شوند عبارتند از: (a) باله‌های مستقیم با سطح مقطع یکنواخت (b) باله مستقیم با سطح مقطع غیر یکنواخت (c) باله‌های با سطح مقطع حلقوی و (d) باله‌های پین‌دار [9].



شکل 8 انواع مختلف باله‌های مورد استفاده در BTMSهای مبتنی بر PCM (a) باله‌های مستقیم با سطح مقطع یکنواخت (b) باله‌های مستقیم با سطح مقطع غیر یکنواخت (c) بال‌های با سطح مقطع حلقوی و (d) باله‌های پین‌دار [9]

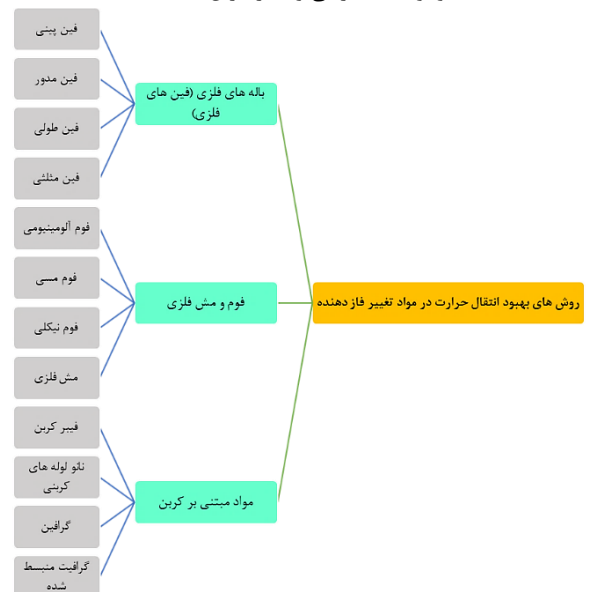
محمدیان و ژانگ [60] برای بررسی رفتار حرارتی بسته‌ی باتری لیتیوم-یونی (هشت سلول منشوری 15 آمپر ساعت) نوع خاصی از سینک‌های حرارتی پین‌دار باله‌ای را معرفی کردند. تجزیه و تحلیل‌ها نشان دادند که



شکل 6 خواص مطلوب مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های مدیریت حرارت باتری [9]

#### 3-2- روش‌های افزایش انتقال حرارت در PCMها

بزرگ‌ترین چالش در سیستم‌های BTMS مبتنی بر PCM، غلبه بر مسائل مربوط به هدایت حرارتی ضعیف PCMها است. محققان متعددی که در این زمینه فعالیت کرده‌اند، استفاده از انواع مختلف باله‌های فلزی<sup>1</sup> (باله‌های پین-دار، باله‌ی مدور، باله‌ی طولی و باله‌ی مثلثی)، فوم‌های فلزی (فوم‌های آلومینیوم، مس و نیکل)، مش‌های فلزی و نانو مواد بر پایه‌ی کربن را برای افزایش رسانایی حرارتی در سیستم‌های BTMS مبتنی بر PCMها پیشنهاد کرده‌اند. برخی از نانو مواد کامپوزیتی مبتنی بر کربن عبارتند از: گرافیت منبسط شده، نانو لوله‌های کربنی و فیبر کربن [9].



1. Metal fins

نتایج نشان دادند که استفاده از کامپوزیت PCM/فوم آلومینیوم باعث کاهش قابل توجه دما در حدود 50 درصد نسبت به هدایت طبیعی و تضمین توزیع یکنواخت دما در داخل باتری خواهد شد [9].

#### 3-4- مواد مبتنی بر کربن و PCM

مواد کربنی به دلیل خواص برتر یعنی هدایت حرارتی بالا و چگالی کم، از بهترین مواد پرکننده برای بهبود هدایت حرارتی هستند. مقالات متعددی در مورد روش‌های افزایش هدایت حرارتی با استفاده از مواد مبتنی بر کربن مانند فیبر کربن، نانو لوله‌های کربنی، گرافن و گرافیت منبسط شده در دسترس است. تحقیقات زیادی در مورد تهیه مواد کامپوزیتی PCM با الیاف کربن انجام شده است. باباپور و همکارانش [62] تأثیر طول الیاف و کسر جرمی بر هدایت حرارتی را در BTMS های مبتنی بر PCM کامپوزیت فیبر کربن/PCM را مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه تجربی در کسرهای جرمی مختلف فیبر کربن 0/32، 0/46، 0/56 و 0/69 درصد و طول‌های مختلف الیاف 2، 3، 5 و 8 میلی‌متر انجام شد. سرعت اتلاف حرارت سیستم‌های مطالعه شده به ترتیب 2 وات و 4 وات محاسبه شد. مشاهده شد که کسر جرمی 0/46 درصد هم برای کاهش دما و هم برای یکنواختی دما بهینه است. همچنین فیبر کربن به طول 2 میلی‌متر برای کاهش دما، در میان سایر طول‌های فیبر کربن، مؤثرترین است، در حالی که الیاف با طول 5 میلی‌متر برای یکنواختی دما مفیدترین طول است. مطالعه عددی دیگری توسط سامیمی و همکارانش [63] برای مدیریت حرارتی باتری‌های استوانه‌ای با کامپوزیت پارافین/فیبر کربن با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی<sup>1</sup> (CFD) انجام شد. نتایج نشان دادند که افزودن الیاف کربن، رسانایی حرارتی را در BTMS های مبتنی بر PCM به میزان 105 درصد افزایش می‌دهد. در صورت استفاده از ترکیب PCM و الیاف کربن به جای PCM خالص، دمای باتری نیز 2 درجه سانتی‌گراد کمتر خواهد بود [9].

#### 4-4- نانو PCM های بهبود یافته

به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی عالی، سطح ویژه بزرگ، نسبت تصویر بالا و رسانایی حرارتی بالا، نانو PCM های تقویت شده نیز برای مدیریت حرارتی باتری مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده استفاده می‌شوند. اخیراً استفاده از گرافن مورد توجه محققان قرار گرفته است. گلی و همکارانش [64] یک سیستم متشکل از شش باتری لیتیوم-یون استوانه‌ای 3 آمپر ساعتی را که در یک بسته باتری آلومینیومی استاندارد با استفاده از افزودنی‌های گرافن در موم پارافین بکر قرار داده شده بود مورد مطالعه قرار دادند. رسانایی حرارتی موم پارافین بدون گرافن برابر با 0/25 W/m.K است و با گرافن به مقدار 0/45 W/m.K می‌رسد. مشاهده شد که استفاده از PCM هیبریدی تقویت شده با گرافن منجر به هدایت حرارتی دو برابری در مقایسه با PCM خالص می‌شود. مالک و همکارانش [65] صفحات PCM کامپوزیتی متشکل از ترکیبی از پارافین و گرافن برای خنک کردن سلول باتری پیشنهاد کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در هنگام دشارژ با نرخ تغییر دمای 4 درجه سانتی-گراد، دمای سلول باتری منشوری از 5/56 درجه سانتی‌گراد به 5/36 درجه سانتی‌گراد کاهش یافت [9]. کیانی و همکارانش [66] یک سیستم خنک-

استفاده از باله‌های پین‌دار به کاهش دمای کلی کمک می‌کنند و باعث یکنواختی دما می‌شوند. لووی و همکارانش [23] یک BTMS نوآورانه برای یک سیستم متشکل از 24 باتری لیتیوم-یون 18650 تجاری (قطر 18 میلی‌متر و ارتفاع 65 میلی‌متر)، با ظرفیت 2 آمپر ساعت که به صورت شش سلول سری و چهار سلول موازی به هم متصل شده بودند پیشنهاد دادند. آن‌ها ترکیب یک PCM مرکب با باله‌ها را به عنوان یک BTMS یکپارچه بررسی کردند. PCM مرکب از ترکیب EG، پلی اتیلن سبک و پارافین تهیه شد. مواد تغییر فاز دهنده بین سلول باتری و پره در قسمت بالایی و پایینی مجموعه‌ی باتری‌ها قرار گرفت. نتایج نشان دادند که مواد تغییر فاز دهنده‌ی کامپوزیتی از نظر سختی و استحکام خمشی دارای خواص مکانیکی بسیار خوبی هستند. سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده‌ی ترکیبی عملکردی عالی در کنترل دما ارائه می‌دهند و این سیستم‌ها می‌توانند دمای ماژول باتری را پایین نگه دارند [9].

#### 2-4- فوم‌های فلزی با PCM

فوم فلزی، یک ماده متخلخل با ساختار سلولی حاوی منافذ است. این منافذ معمولاً با سیالات پر می‌شوند. معمولاً به بخش اسکلت این مواد، ماتریس گفته می‌شود. ماتریس یک فوم فلزی به طور تصادفی در داخل این فوم توزیع می‌شود. توزیع پیوسته ساختار سلولی در PCM ها، فرآیند شارژ (ذوب) و تخلیه (انجماد) را یکنواخت می‌کند. فوم‌های فلزی در تخلخل‌ها و اندازه‌های منافذ مختلف موجود هستند. تخلخل و اندازه‌ی منافذ فوم‌های فلزی بر سرعت انتقال حرارت تأثیر می‌گذارند. منظور از تخلخل، میزان حفره‌های داخل مواد است که می‌تواند از 0 تا 100 درصد متغیر باشد. دو نوع فوم فلزی به طور گسترده استفاده می‌شوند.

الف) فوم‌های فلزی سلول باز

ب) فوم‌های فلزی سلول بسته

نوع فوم تا حد زیادی به این بستگی دارد که منافذ مهر و موم شده باشند یا به هم متصل. یکی از کمبودهای عمده‌ی BTMS های مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده، رسانایی حرارتی پایین آن‌ها است. بیشتر فوم‌های فلزی به دلیل رسانایی حرارتی بالا، عمدتاً برای افزایش هدایت حرارتی در BTMS های مبتنی بر PCM استفاده می‌شوند. توانایی اختلاط بالا، ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی پایدار، تخلخل بالا، چگالی کم، وزن کم، استحکام ویژه بالا و نسبت بالای سطح به حجم از دلایل استفاده از این مواد است [9]. انواع مختلفی از فوم‌های فلزی مورد استفاده برای BTMS وجود دارند برخی از انواع فوم‌ها عبارتند از: فوم‌های آلومینیوم، مس و نیکل. کاتب و همکارانش [61] آزمایشاتی را روی باتری‌های لیتیوم-یون اسکوترهای برقی انجام دادند. در این مطالعه، عملکرد چهار روش اتلاف حرارت مختلف در دو ماژول باتری، که هر یک از 18 سلول 18650، با ظرفیت 2/2 آمپر ساعت تشکیل شده بودند، مورد بررسی قرار گرفت. چهار روش اتلاف حرارت بررسی شده عبارتند از: الف) جابجایی طبیعی (به تنهایی)، ب) اتلاف حرارت فقط با استفاده از فوم AI (سلول با فوم AI)، ج) اتلاف حرارت فقط با PCM خالص (سلولی با PCM)، د) اتلاف حرارت با استفاده از ترکیبی از آفوم و کامپوزیت PCM.

1. Computational fluid dynamics

P	پارافین (مینا)	-
Cu-1	پارافین + SDS + CuO	1
Cu-2	پارافین + SDS + CuO	2
Cu-3	پارافین + SDS + CuO	3
Ti-1	پارافین + SDS + TiO <sub>2</sub>	1
Ti-2	پارافین + SDS + TiO <sub>2</sub>	2
Ti-3	پارافین + SDS + TiO <sub>2</sub>	3
Al-1	پارافین + SDS + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1
Al-2	پارافین + SDS + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2
Al-3	پارافین + SDS + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3
G-1	پارافین + گرافن + SDS	1
G-2	پارافین + گرافن + SDS	2
G-3	پارافین + گرافن + SDS	3

#### 5- استفاده از نانو اسکرول‌های متخلخل VO<sub>x</sub>/C

شکل 9 روش ساخت نانو اسکرول‌های متخلخل توخالی VO<sub>x</sub>/C را نشان می‌دهد. برای تهیه این نوع مواد، ابتدا نانو اسکرول‌های VO<sub>x</sub>/ODA<sup>3</sup> با استفاده از آمونیوم متوانادات (NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub>) به‌عنوان پیش‌ساز، با روش حل ODA-آب دوفازی سنتز می‌گردند. در دمای اتاق، ODA، که جامدی سفید رنگ است، به همراه NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub> به آب اضافه می‌شوند. پس از گرم شدن، ODA به حالت مایع ذوب می‌شود و روی محلول آبی NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub> شناور می‌گردد و یک سیستم دوفازی را تشکیل می‌دهد. سپس گونه‌های املاح وانادیوم از آب به ODA ذوب شده منتقل شده و توسط مولکول‌های آب به صورت وانادیوم اکسید هیدرولیز خواهند شد. مشابه مکانیسم تشکیل بسیاری از نانو اسکرول‌های وانادیوم اکسید گزارش شده، سه مرحله شامل 1) تشکیل یک کامپوزیت وانادیوم اکسید/ODA، 2) کاهش V<sup>5+</sup> و 3) راه‌اندازی فرایند پیمایش به دلیل تعامل بین آمین‌ها و ورقه‌های وانادیوم اکسید، باید طی شود. در نهایت، یک محصول جامد سیاه مومی شناور بر روی سطح آب و شفاف را می‌توان به دست آورد. ODA اضافی با شستشو قابل حذف است و باقیمانده‌ی فرایند شستشو، نانو اسکرول‌های VO<sub>x</sub>/ODA است. در تصویر 9 فرایند سنتز و ساختار نانو اسکرول‌ها ارائه شده است [71-74].

کننده‌ی غیرفعال متشکل از فوم مس خیس‌مانده شده در پارافین به عنوان PCM را به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. سیستم غیرفعال با یک سیستم خنک‌کننده فعال متشکل از نانوسیال آلومینا ترکیب شد. این مطالعه به منظور تعیین اثر خنک‌سازی نانوسیال بر رفتار حرارتی باتری در دشارژ با توان کم و بالا، به ترتیب 41 و 65 وات، انجام شد. مشاهده شد که هنگام استفاده از نانوسیال برای خنک‌سازی در مقایسه با خنک‌کننده‌های آبی، زمان کارکرد باتری برای غلظت نانوسیال 1 و 2 درصد به ترتیب 4 و 29 درصد افزایش یافت. مرتضوی و همکارانش [67] رویکردهای مدل‌سازی چند مقیاسی را برای بررسی اثربخشی ساختارهای کامپوزیت پارافینی در مدیریت حرارتی باتری‌های قابل شارژ توسعه دادند. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که نانو فیلم‌های h-BN<sup>1</sup> (افزودنی‌های نانو ورق بور نیتريد شش ضلعی) رسانایی حرارتی پارافین را بیشتر از نانو صفحات گرافن بهبود می‌بخشند؛ زیرا رسانایی حرارتی سطحی بهتری با اتم‌های مولکول پارافین دارند [9]. کیانی و همکارانش [68] آزمایش‌هایی را روی سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری لیتیوم-یون کیسه‌ای انجام دادند که متشکل از روش‌های خنک‌سازی فعال و غیرفعال هستند. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مشاهده شد که راندمان خنک‌کننده‌ی سیستم مبتنی بر نانو سیال‌ها بسیار بهتر است. در مقایسه با سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری مبتنی بر آب خالص، حداکثر دمای باتری با استفاده از نانوسیال نقره اکسید در آب با غلظت حجمی 2 درصد، 4/1 کلون کاهش یافت [9].

#### 4-5- سنتز PCM تثبیت شده با شکل

با توجه به آزمایشاتی که توسط کریمی و همکارانش [69] انجام گرفت، نوعی از نانوکامپوزیت‌های PCM تغییر یافته سنتز شدند. در این نوع از PCM پارافین جامد و مایع برای رسیدن به محدوده‌ی دمای ذوب 53 تا 57 درجه سانتی‌گراد با هم مخلوط شدند. سپس سدیم دودسیل سولفات<sup>2</sup> (SDS) و نانوذرات مس (II) اکسید، آلومینیوم اکسید، تیتانیوم (IV) اکسید و گرافن برای بهبود خواص حرارتی PCM مورد استفاده قرار گرفتند. در این آزمایش، ابتدا PCM پایه با مخلوط کردن پارافین جامد و مایع برای رسیدن به نقطه ذوب مورد نظر برای اهداف مدیریت حرارتی تهیه شد. پارافین جامد تا دمای کمی بالاتر از نقطه ذوب خود حرارت داده شد و سپس با نسبت وزنی مورد نیاز پارافین مایع مخلوط شد تا به نقطه ذوب مورد نظر برسد. نانو ذرات SDS و پارافین به نسبت لازم مخلوط شده و به مدت 120 دقیقه در دستگاهی با توانایی چرخاندن مخلوط با سرعت 100 دور بر دقیقه کاملاً مخلوط شدند. نانو ذرات با استفاده از امواجی با فرکانس 22 کیلوهرتز و در دمای بالاتر از نقطه ذوب در کامپوزیت‌ها پراکنده شدند تا یک کامپوزیت همگن به‌دست آید. سپس این کامپوزیت برای استفاده، در دمای اتاق خنک شد. جدول 3 فهرست نانوکامپوزیت‌های سنتز شده را نشان می‌دهد [70].

جدول 3 لیستی از نانوکامپوزیت‌های سنتز شده [70]

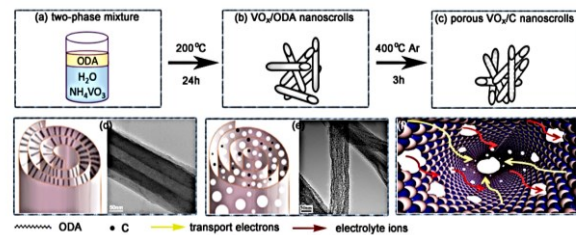
درصد وزنی نانوذرات	نانو کامپوزیت‌ها	نمونه
--------------------	------------------	-------

1. hexagonal boron-nitride nanosheet additives  
2. Sodium Dodecyl Sulfate

روش‌های کنترل حرارت باتری به دو نوع فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند که در نوع غیرفعال نیاز به مصرف انرژی نیست. یکی از روش‌های غیرفعال کنترل حرارت، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد. مواد تغییر فاز دهنده توانایی دریافت و ذخیره‌ی حرارت به صورت گرمای نهان هستند ولی تقریباً تمام مواد تغییر فاز دهنده‌ی مرسوم، به غیر از فلزات، رسانایی حرارتی ضعیفی دارند. به همین دلیل برخی از محققان، برای بهبود رسانایی مواد تغییر فاز دهنده‌ای که در سامانه‌های کنترل حرارت به کار می‌روند، افزودن مواد مختلف و ساخت نانو کامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده را پیشنهاد داده‌اند. برخی از محققان موفق شده‌اند اشکال پایدار نانوکامپوزیت‌های تغییر فاز دهنده را با ترکیب پارافین به‌عنوان PCM با نانوذرات  $\text{CuO}$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{TiO}_2$  و یا گرافن در حضور سدیم دودسیل سولفات (به عنوان پوشش) سنتز کنند. این نانوذرات به طور یکنواخت در PCM توزیع می‌شوند. با مقایسه آنتالپی نانوکامپوزیت‌ها در طی فرایند ذوب شدن، دریافت می‌شود که نانوکامپوزیت  $\text{TiO}_2$  (2 درصد وزنی) با آنتالپی 179/8846 ژول بر گرم و نانوکامپوزیت گرافن (1 درصد وزنی) با آنتالپی 120/38 ژول بر گرم به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین توانایی ذخیره‌ی انرژی را دارا هستند. افزودن نانوذرات به پارافین، دمای ذوب را به دلیل هدایت حرارتی نانوذرات کاهش می‌دهد اما با این حال گرمای نهان کامپوزیت‌های PCM همزمان کاهش پیدا می‌کند. ساخت نانواسکرول‌های متخلخل  $\text{VO}_x/\text{C}$  با روشی دو مرحله‌ای انجام می‌شود. یک مرحله‌ی آن، حل دو فاز آبی-ODA و دیگری فرایند بازپخت است. این نانو اسکرول‌ها پس از سنتز بازپخت می‌شوند. این مواد ظرفیت و پایداری خوبی دارند. رفتار الکتروشیمیایی عالی را به این ساختارهای متخلخل توخالی که کمی کریستالی هستند، می‌توان نسبت داد.

#### 8- مراجع

- [1] Z. Liu, J. Huang, M. Cao, G. Jiang, Q. Yan, and J. Hu, Experimental study on the thermal management of batteries based on the coupling of composite phase change materials and liquid cooling, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 185, pp. 116415, 2021.
- [2] R. Yang, R. Xiong, S. Ma, and X. Lin, Characterization of external short circuit faults in electric vehicle Li-ion battery packs and prediction using artificial neural networks, *Applied Energy*, Vol. 260, pp. 114253, 2020.
- [3] L. Zhou, L. He, Y. Zheng, X. Lai, M. Ouyang, and L. Lu, Massive battery pack data compression and reconstruction using a frequency division model in battery management systems, *Journal of Energy Storage*, Vol. 28, pp. 101252, 2020.
- [4] W. Wu, W. Wu, X. Qiu, and S. Wang, Low-temperature reversible capacity loss and aging mechanism in lithium-ion batteries for different discharge profiles, *International journal of energy research*, Vol. 43, No. 1, pp. 243-253, 2019.
- [5] S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, and M. Fowler, Experimental temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at varying conditions, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 71, pp. 35-43, 2016.
- [6] W. Cao, C. Zhao, Y. Wang, T. Dong, and F. Jiang, Thermal modeling of full-size-scale cylindrical battery pack cooled by channeled liquid flow, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 138, pp. 1178-1187, 2019.
- [7] T. Deng, G. Zhang, Y. Ran, and P. Liu, Thermal performance of lithium ion battery pack by using cold plate, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 160, pp. 114088, 2019.
- [8] Z. Liao, S. Zhang, K. Li, G. Zhang, and T. G. Habetler, A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of



شکل 9 (a-c) تصویری از ساخت نانواسکرول‌های متخلخل توخالی  $\text{VO}_x/\text{C}$  (d) ساختار نانواسکرول‌های  $\text{VO}_x/\text{ODA}$  (e) ساختار نانواسکرول‌های  $\text{VO}_x/\text{C}$  (f) انتشار الکترولیت و انتقال بار در نانواسکرول‌های  $\text{VO}_x/\text{C}$  [75]

منبع وانادیوم، محلول  $\text{NH}_4\text{VO}_3$  که به عنوان پیش ماده در سنتز انتخاب می‌شود است و معمولاً از  $\text{V}_2\text{O}_5$  یا وانادیم آلکوکسید استفاده نمی‌شود [74]. علاوه بر این، لایه‌ی حاوی ODA یک سیستم دو فازي تقلیل دهنده است. نانواسکرول‌های  $\text{VO}_x/\text{ODA}$  باید در دمای 400 درجه سانتی‌گراد به مدت 3 ساعت تحت اتمسفر گاز آرگون بازپخت شوند. پس از عملیات حرارتی، ODA در نانواسکرول‌های  $\text{VO}_x/\text{ODA}$  به انواع مختلفی از گازها و مقادیر کمی کربن تجزیه خواهد شد که گازهای آزاد شده مسئول ایجاد یک ساختار متخلخل در دیواره نانواسکرول هستند. کربن باقیمانده بین لایه‌های وانادیوم اکسید متخلخل باقی میماند و ساختار نانومتری متخلخل جدید را تشکیل می‌دهد [75، 77، 78].

#### 6- مواد تغییر فاز دهنده در باتری‌های موبایل

همان‌طور که گفته شد، فرایند دشارژ باتری یک فرآیند گرمازا است و زمانی که گرمای تولید شده حذف نشود، منجر به تجمع گرما در باتری می‌شود. بنابراین در محیط‌هایی که گرمتر هستند و یا شرایط آب و هوایی گرمتری دارند، تجمع گرما به مراتب شدیدتر خواهد بود و در نتیجه فرار حرارتی را به دنبال خواهد داشت. مواد تغییر فاز دهنده با داشتن مقدار زیادی انرژی نهفته در تغییرات دمایی کم، می‌توانند برای جذب و ذخیره‌ی گرمای تولید شده توسط باتری‌ها و یا به حداقل رساندن تغییرات دمایی در باتری‌ها استفاده شوند [63].

#### 7- نتیجه‌گیری

اخیراً نگرانی‌های زیست محیطی و کمبود سوخت‌های فسیلی باعث شده‌اند که نیاز به توسعه‌ی روش‌های تجدیدپذیر و دوست‌دار محیط‌زیست برای تولید الکتریسته احساس شود. یکی از مباحث مورد توجه در این زمینه، ذخیره-سازی الکتریسته‌ی تولید شده توسط روش‌های تجدیدپذیر به کمک باتری‌ها است. رشد سریع فناوری باتری‌های لیتیوم-یونی و به این خاطر که این نوع باتری‌ها دارای ظرفیت و اطمینان‌پذیری بالاتری نسبت به سایر باتری‌ها هستند باعث شده است که این نوع از باتری‌ها به طور گسترده در تجهیزات الکترونیکی قابل حمل نظیر تلفن‌های هوشمند به کار روند. یکی از مسائل مهم در باتری‌های لیتیوم-یونی، مسئله‌ی کنترل حرارت ایجاد شده در این باتری‌ها است. به دلیل استفاده از مواد قابل اشتعال در ساخت باتری‌های لیتیوم-یونی و اهمیت افزایش طول عمر مفید باتری در دستگاه‌های هوشمند، کنترل حرارت تولید شده در باتری‌های لیتیوم-یونی اهمیت ویژه‌ای دارد.

- [26] S. T. Latibari, M. Mehrali, M. Mehrali, T. M. I. Mahlia, and H. S. C. Metselaar, Synthesis, characterization and thermal properties of nanoencapsulated phase change materials via sol-gel method, *Energy*, Vol. 61, pp. 664-672, 2013.
- [27] W. Li, Z. Qu, Y. He, and Y. 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, 2014.
- [28] P. Qin, M. Liao, D. Zhang, Y. Liu, J. Sun, and Q. Wang, Experimental and numerical study on a novel hybrid battery thermal management system integrated forced-air convection and phase change material, *Energy Conversion and Management*, Vol. 195, pp. 1371-1381, 2019.
- [29] J. Li, J. Huang, and M. Cao, Properties enhancement of phase-change materials via silica and Al honeycomb panels for the thermal management of LiFeO<sub>4</sub> batteries, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 131, pp. 660-668, 2018.
- [30] Y. Lv, W. Situ, X. Yang, G. Zhang, and Z. Wang, A novel nanosilica-enhanced phase change material with anti-leakage and anti-volume-changes properties for battery thermal management, *Energy conversion and management*, Vol. 163, pp. 250-259, 2018.
- [31] A. Verma, S. Shashidhara, and D. Rakshit, A comparative study on battery thermal management using phase change material (PCM), *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 11, pp. 74-83, 2019.
- [32] Z. Ling, W. Lin, Z. Zhang, and X. Fang, Computationally efficient thermal network model and its application in optimization of battery thermal management system with phase change materials and long-term performance assessment, *Applied Energy*, Vol. 259, pp. 1141-120, 2020.
- [33] E. Jiaqiang, D. Han, A. Qiu, H. Zhu, Y. Deng, J. Chen, X. Zhao, W. Zuo, H. Wang, and J. Chen, Orthogonal experimental design of liquid-cooling structure on the cooling effect of a liquid-cooled battery thermal management system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 508-520, 2018.
- [34] J. Zhao, Z. Rao, and Y. Li, Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery, *Energy conversion and management*, Vol. 103, pp. 157-165, 2015.
- [35] L. Song, H. Zhang, and C. Yang, Thermal analysis of conjugated cooling configurations using phase change material and liquid cooling techniques for a battery module, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 133, pp. 827-841, 2019.
- [36] Z. Rao, Z. Qian, Y. Kuang, and Y. Li, Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, pp. 1514-1522, 2017.
- [37] A. Awasthi, K. K. Saxena, and V. Arun, Sustainable and smart metal forming manufacturing process, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 44, pp. 2069-2079, 2021.
- [38] S. M. A. S. Bukhari, J. Maqsood, M. Q. Baig, S. Ashraf, and T. A. Khan, Comparison of Characteristics--Lead Acid, Nickel Based, Lead Crystal and Lithium Based Batteries, in *2015 17th UKSim-AMSS International Conference on Modelling and Simulation (UKSim)*, 2015: IEEE, pp. 444-450.
- [39] J. Larminie and J. Lowry, *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons, 2012.
- [40] N. J. Vickers, Animal communication: when i'm calling you, will you answer too?, *Current biology*, Vol. 27, No. 14, pp. R713-R715, 2017.
- [41] S. Arora, Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies, *Journal of Power Sources*, Vol. 400, pp. 621-640, 2018.
- [42] R. Spotnitz and J. Franklin, Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells, *Journal of power sources*, Vol. 113, No. 1, pp. 81-100, 2003.
- [43] X. Feng, M. Fang, X. He, M. Ouyang, L. Lu, H. Wang, and M. Zhang, Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry, *Journal of power sources*, Vol. 255, pp. 294-301, 2014.
- lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, Vol. 436, pp. 226879, 2019.
- [9] S. B. Sanker and R. Baby, Phase change material based thermal management of lithium ion batteries: A review on thermal performance of various thermal conductivity enhancers, *Journal of Energy Storage*, Vol. 50, pp. 104606, 2022.
- [10] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun, and C. Chen, Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery, *Journal of power sources*, Vol. 208, pp. 210-224, 2012.
- [11] A. R. M. Siddique, S. Mahmud, and B. Van Heyst, 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*, Vol. 401, pp. 224-237, 2018.
- [12] D. Bernardi, E. Pawlikowski, and J. Newman, A general energy balance for battery systems, *Journal of the electrochemical society*, Vol. 132, No. 1, pp. 5, 1985.
- [13] W. Gu and C. Wang, Thermal-electrochemical modeling of battery systems, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 147, No. 8, pp. 2910, 2000.
- [14] Z. Jiang and Z. Qu, Lithium-ion battery thermal management using heat pipe and phase change material during discharge-charge cycle: A comprehensive numerical study, *Applied Energy*, Vol. 242, pp. 378-392, 2019.
- [15] W. Wu, S. Wang, W. Wu, K. Chen, S. Hong, and Y. Lai, A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management, *Energy conversion and management*, Vol. 182, pp. 262-281, 2019.
- [16] K. Chen, W. Wu, F. Yuan, L. Chen, and S. Wang, Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern, *Energy*, Vol. 167, pp. 781-790, 2019.
- [17] M. Shen and Q. Gao, System simulation on refrigerant-based battery thermal management technology for electric vehicles, *Energy Conversion and Management*, Vol. 203, pp. 112176, 2020.
- [18] S. Al Hallaj and J. Selman, A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 147, No. 9, pp. 3231, 2000.
- [19] M. Hao, J. Li, S. Park, S. Moura, and C. Dames, Efficient thermal management of Li-ion batteries with a passive interfacial thermal regulator based on a shape memory alloy, *Nature Energy*, Vol. 3, No. 10, pp. 899-906, 2018.
- [20] N. Putra, S. Rawi, M. Amin, E. Kusriani, E. A. Kosasih, and T. M. I. Mahlia, Preparation of beeswax/multi-walled carbon nanotubes as novel shape-stable nanocomposite phase-change material for thermal energy storage, *Journal of Energy Storage*, Vol. 21, pp. 32-39, 2019.
- [21] M. Amin, N. Putra, E. A. Kosasih, E. Prawiro, R. A. Luanto, and T. Mahlia, Thermal properties of beeswax/graphene phase change material as energy storage for building applications, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 112, pp. 273-280, 2017.
- [22] Y. Xie, J. Tang, S. Shi, Y. Xing, H. Wu, Z. Hu, and D. Wen, Experimental and numerical investigation on integrated thermal management for lithium-ion battery pack with composite phase change materials, *Energy Conversion and Management*, Vol. 154, pp. 562-575, 2017.
- [23] 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, 2016.
- [24] W. Wu, J. Liu, M. Liu, Z. Rao, H. Deng, Q. Wang, X. Qi, and S. Wang, An innovative battery thermal management with thermally induced flexible phase change material, *Energy Conversion and Management*, Vol. 221, pp. 113145, 2020.
- [25] M. Mehrali, S. T. Latibari, M. Mehrali, T. M. I. Mahlia, H. S. C. Metselaar, M. S. Naghavi, E. Sadeghinezhad, and A. R. Akhiani, Preparation and characterization of palmitic acid/graphene nanoplatelets composite with remarkable thermal conductivity as a novel shape-stabilized phase change material, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 61, No. 2, pp. 633-640, 2013.

- [62] 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, 2015.
- [63] F. Samimi, A. Babapoor, M. Azizi, and G. Karimi, Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers, *Energy*, Vol. 96, pp. 355-371, 2016.
- [64] P. Goli, S. Legedza, A. Dhar, R. Salgado, J. Renteria, and A. A. Balandin, Graphene-enhanced hybrid phase change materials for thermal management of Li-ion batteries, *Journal of Power Sources*, Vol. 248, pp. 37-43, 2014.
- [65] M. Malik, I. Dincer, M. Rosen, and M. Fowler, Experimental investigation of a new passive thermal management system for a Li-ion battery pack using phase change composite material, *Electrochimica Acta*, Vol. 257, pp. 345-355, 2017.
- [66] M. Kiani, M. Ansari, A. A. Arshadi, E. Houshfar, and M. Ashjaee, Hybrid thermal management of lithium-ion batteries using nanofluid, metal foam, and phase change material: an integrated numerical-experimental approach, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 141, No. 5, pp. 1703-1715, 2020.
- [67] B. Mortazavi, H. Yang, F. Mohebbi, G. Cuniberti, and T. Rabczuk, Graphene or h-BN paraffin composite structures for the thermal management of Li-ion batteries: A multiscale investigation, *Applied energy*, Vol. 202, pp. 323-334, 2017.
- [68] M. Kiani, S. Omiddezyani, E. Houshfar, S. R. Miremadi, M. Ashjaee, and A. M. Nejad, Lithium-ion battery thermal management system with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AgO/CuO nanofluids and phase change material, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 180, pp. 115840, 2020.
- [69] G. Karimi, M. Azizi, and A. Babapoor, Experimental study of a cylindrical lithium ion battery thermal management using phase change material composites, *Journal of Energy Storage*, Vol. 8, pp. 168-174, 2016.
- [70] A. Haghighi, A. Babapoor, M. Azizi, Z. Javanshir, and H. Ghasemzade, Optimization of the thermal performance of PCM nanocomposites, *Journal of Energy Management and Technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 14-19, 2020.
- [71] H. J. Muhr, F. Krumeich, U. P. Schönholzer, F. Bieri, M. Niederberger, L. J. Gauckler, and R. Nesper, Vanadium oxide nanotubes—a new flexible vanadate nanophase, *Advanced Materials*, Vol. 12, No. 3, pp. 231-234, 2000.
- [72] F. Krumeich, H.-J. Muhr, M. Niederberger, F. Bieri, B. Schnyder, and R. Nesper, Morphology and topochemical reactions of novel vanadium oxide nanotubes, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 121, No. 36, pp. 8324-8331, 1999.
- [73] G. R. Patzke, F. Krumeich, and R. Nesper, Oxidic nanotubes and nanorods—anisotropic modules for a future nanotechnology, *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 41, No. 14, pp. 2446-2461, 2002.
- [74] N. Steunou and J. Livage, Rational design of one-dimensional vanadium (v) oxide nanocrystals: an insight into the physico-chemical parameters controlling the crystal structure, morphology and size of particles, *CrystEngComm*, Vol. 17, No. 36, pp. 6780-6795, 2015.
- [75] B.-R. Jia, M.-L. Qin, Z.-L. Zhang, S.-M. Li, D.-Y. Zhang, H.-Y. Wu, L. Zhang, X. Lu, and X.-H. Qu, Hollow Porous VO<sub>x</sub>/C Nanoscrolls as High-Performance Anodes for Lithium-Ion Batteries, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 8, No. 39, pp. 25954-25961, 2016.
- [76] F. Liu, P. Ning, H. Cao, Z. Li, and Y. Zhang, Solubilities of NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub> in the NH<sub>3</sub>-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Cl<sup>-</sup>-H<sub>2</sub>O System and Modeling by the Bromley-Zemaitis Equation, *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 58, No. 5, pp. 1321-1328, 2013.
- [77] X. Wu, Y. Tao, L. Dong, and J. Hong, Synthesis and characterization of self-assembling (NH<sub>4</sub>)<sub>0.5</sub>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanowires, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 14, No. 5, pp. 901-904, 2004.
- [78] L. Mai, C. Lao, B. Hu, J. Zhou, Y. Qi, W. Chen, E. Gu, and Z. Wang, Synthesis and electrical transport of single-crystal NH<sub>4</sub>V<sub>3</sub>O<sub>8</sub> nanobelts, *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 110, No. 37, pp. 18138-18141, 2006.
- [44] M. J. Loveridge, G. Remy, N. Kourra, R. Genieser, A. Barai, M. J. Lain, Y. Guo, M. Amor-Segan, M. A. Williams, and T. Amietszajew, Looking deeper into the Galaxy (Note 7), *Batteries*, Vol. 4, No. 1, pp. 3, 2018.
- [45] D. H. Doughty and E. P. Roth, A general discussion of Li ion battery safety, *The Electrochemical Society Interface*, Vol. 21, No. 2, pp. 37, 2012.
- [46] Swollen battery? How to remove it. <https://www.fixshop.eu/blog-new/swollen-battery-how-remove-it/> (accessed 2022).
- [47] G. Alva, Y. Lin, and G. Fang, An overview of thermal energy storage systems, *Energy*, Vol. 144, pp. 341-378, 2018.
- [48] A. Safari, R. Saidur, F. Sulaiman, Y. Xu, and J. Dong, A review on supercooling of Phase Change Materials in thermal energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, pp. 905-919, 2017.
- [49] G. Wei, G. Wang, C. Xu, X. Ju, L. Xing, X. Du, and Y. Yang, Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change materials for thermal energy storage: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 1771-1786, 2018.
- [50] M. Malik, I. Dincer, and M. A. Rosen, Review on use of phase change materials in battery thermal management for electric and hybrid electric vehicles, *International Journal of Energy Research*, Vol. 40, No. 8, pp. 1011-1031, 2016.
- [51] Y.-J. Chen, D.-D. Nguyen, M.-Y. Shen, M.-C. Yip, and N.-H. Tai, Thermal characterizations of the graphite nanosheets reinforced paraffin phase-change composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 44, pp. 40-46, 2013.
- [52] N. I. Ibrahim, F. A. Al-Sulaiman, S. Rahman, B. S. Yilbas, and A. Z. Sahin, Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 74, pp. 26-50, 2017.
- [53] Y. Lin, Y. Jia, G. Alva, and G. Fang, Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 2730-2742, 2018.
- [54] J. Chen, S. Kang, E. Jiaqiang, Z. Huang, K. Wei, B. Zhang, H. Zhu, Y. Deng, F. Zhang, and G. Liao, Effects of different phase change material thermal management strategies on the cooling performance of the power lithium ion batteries: A review, *Journal of Power Sources*, Vol. 442, pp. 227228, 2019.
- [55] X. Duan and G. Naterer, Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 23-24, pp. 5176-5182, 2010.
- [56] Y. Wei and M. Agelin-Chaab, Experimental study of a thermal cooling technique for cylindrical batteries, *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, Vol. 17, No. 2, 2020.
- [57] N. Javani, I. Dincer, and G. Naterer, Numerical modeling of submodule heat transfer with phase change material for thermal management of electric vehicle battery packs, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 7, No. 3, pp. 031005, 2015.
- [58] S. Landini, J. Leworthy, and T. O'Donovan, A review of phase change materials for the thermal management and isothermalisation of lithium-ion cells, *Journal of Energy Storage*, Vol. 25, pp. 100887, 2019.
- [59] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable energy reviews*, Vol. 13, No. 2, pp. 318-345, 2009.
- [60] S. K. Mohammadian and Y. Zhang, Thermal management optimization of an air-cooled Li-ion battery module using pin-fin heat sinks for hybrid electric vehicles, *Journal of Power Sources*, Vol. 273, pp. 431-439, 2015.
- [61] S. A. Khateeb, S. Amiruddin, M. Farid, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation, *Journal of power sources*, Vol. 142, No. 1-2, pp. 345-353, 2005.



