Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(7) (2021) 1037-1040
DOI: 10.22060/mej.2021.18825.6897

Investigation on the effect of addition of nano-titanium oxide particles to phase change material in a hybrid system for battery cooling under constant heat flux

M. Malekipour[1], M. Sabzpooshani[1*] , E. Houshfar[2]

[1] Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
[2] School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT: Increasing lithium-ion batteries temperature is known as a challenge. In this research, by completing a hybrid heat management system, the effect of adding Nano-titanium oxide particles to paraffin phase change material was investigated on the cooling performance of battery in two constant heat flux, 4.5 and 14 Watts. The hybrid system consists of nano-paraffin and copper metal foam with two working fluids as air and water. For air as working fluid, battery temperature in pure paraffin and nano-paraffins 1, 2, 3 and 4% became 56.2°C, 51.8°C, 50.7°C, 49.3°C and 48°C, respectively. From investigated cases, nano-paraffin 4% had the most decreasing temperature comparing to pure paraffin which was about 17%. Hybrid system with copper foam, nano-paraffin and working fluid as pure water tested in Reynolds numbers 420, 600 and 720. It is shown that the battery temperature reached stable temperatures of 48°C, 46°C and 44°C respectively, which comparing to the pure paraffin case, temperatures reduced by 11%, 12% and 12.5% respectively. Therefore, due to the low thermal conductivity of paraffin, the addition of nanoparticles to phase change materials is beneficial.

Review History:

Received: Aug. 04, 2020
Revised: Dec. 06, 2020
Accepted: Dec. 24, 2020
Available Online: Jan. 30, 2021

Keywords:

Heat transfer
Nano-paraffin
Lithium-ion batteries
Experimental method

1. INTRODUCTION

Lithium-ion batteries are widely used in industry due to their high heat capacity, long life cycle, and low spontaneous discharge rate. But the issue of thermal stability, including challenges such as degradation capacity and even explosion due to overheating and non-uniform heat distribution, has caused many problems in their use. Therefore, using a suitable battery thermal management system that is able to meet the necessary conditions is one of the essential points in designing this type of battery [1]. In order to meet these conditions of thermal management and placing the battery in safe conditions, various strategies such as air cooling, liquid cooling, heat pipe and the use of phase change materials Used. To improve the heat transfer and cooling of lithium-ion batteries in the passive battery system, the use of phase change materials as well as metal foams and their combination has been suggested by some researchers. In an experimental study, Kiani et al. [2] designed a combined thermal management system. The designed system includes the combination of paraffin as the PCM, copper foam as the passive system and the use of alumina nanofluid as the working fluid in the active system part. Their results showed that the use of hybrid system reduced the battery temperature and also delayed the melting time of paraffin. Mashayekhi et al. [3] used nanofluid for the active part of the hybrid system and paraffin and copper foam in the embedded micro channels for the passive part and reported the positive effect of this hybrid system on the thermal management of the battery. One of the negative properties of paraffin is its low thermal conductivity, which has encouraged researchers to use materials with high thermal conductivity such as metal foams and nanoparticles combined with paraffin in order to increase the thermal conductivity of the material [4]. A review of the above shows that the use of hybrid systems can be successful in the thermal management of lithium-ion batteries. However, the addition of nanoparticles to phase change agents and its effect on reducing battery temperature in these hybrid systems has not been investigated. Therefore, in this research, a combined thermal management system including nanoparticles added to paraffin (nano-paraffin) for cooling lithium-ion battery, which has been introduced by references [2-3] has been developed.

2. EXPERIMENTAL SETUP

The heat management system with plate heaters is installed inside a box to increase the contact level between the components is shown in Fig. 1. Copper foam with dimensions of 130 × 80 × 32 mm is used and heaters are installed next to them. The heaters are placed next to this copper foam as a battery replacement. The general form of the system is given in [2-3], which will not be retold here.

The nanoparticles distributed in paraffin are titanium oxide (TiO2) with an average size of 20 nm. The fabricated nanoparticles were added to the paraffin and the mixture

*Corresponding author's email: spooshan@kashanu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

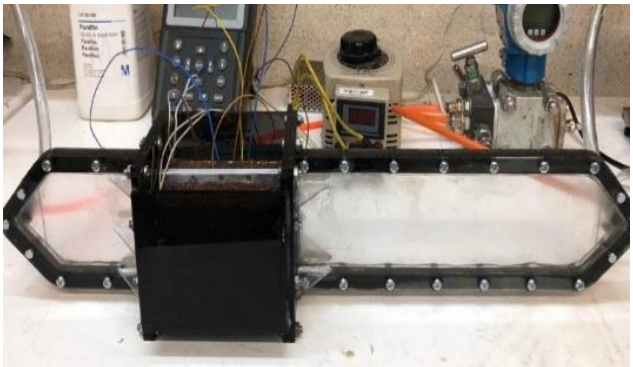


Fig. 1. Set up of thermal management system with plate heater

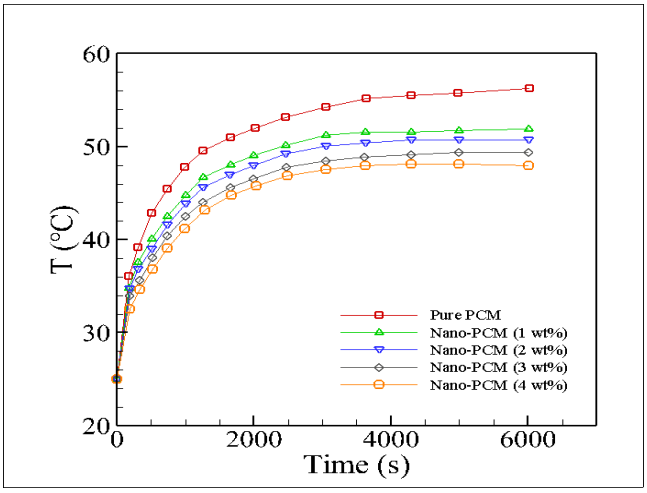
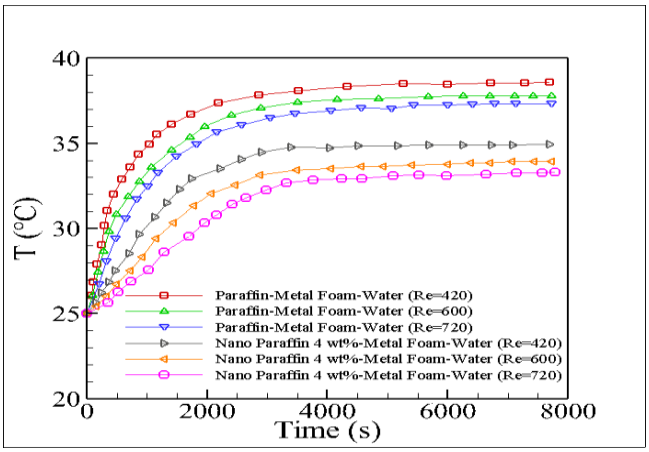
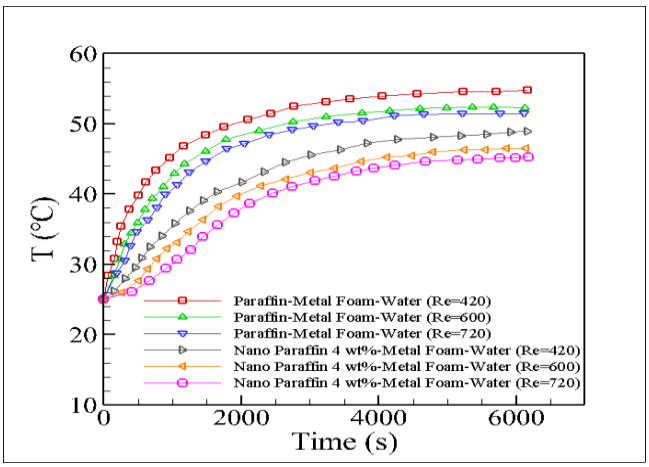


Fig. 2. Comparison temperature variations of plates batteries between nano-PCM and pure PCM with air as working fluid



(a)



(b)

Fig. 3. The effect of Reynolds number of pure water flow in a combined system the pure water as working fluid and two cases in the passive part, including paraffin-metal foam and 4% nano-paraffin-metal foam in the cooling system at (a) 4.5 Watts and (b) 14 Watts

was stirred thoroughly for 30 minutes at 65°C and gradually cooled to achieve a uniform distribution of the nanoparticles in the paraffin.

3. RESULTS AND DISCUSSION

During the experiments, changes in the temperature of the surface of the battery (heater) have been recorded until the operating conditions are stable or the maximum allowable temperature of 60°C is reached. The results are presented in two sections, including air-cooled cooling system and water-cooled cooling system.

3.1. Cooling system with air operating fluid

In order to investigate the effect of adding titanium nanoparticles to the PCM, the results of nanoparaffin prepared in different volume percentages of nanoparticles are compared. In Fig. 2, the experimental results for the maximum temperature changes of the heater over time in five different states of pure paraffin and nanoparaffin in four different volume percentages are given. It can be seen that in all cases of the combined system, pure paraffin and nano-paraffin behave similarly. Also the cooling performance of the system for nanoparaffin has increased significantly compared to pure paraffin. The melting temperature of paraffin is 42 to 44°C. According to these results, the addition of nanoparticles by 4% of volume delayed the melting time of paraffin by 1291 seconds, which increased the cooling performance of the PCM. One hour and 40 minutes after the start of the experiment, battery temperature in pure paraffin, and nanoparaffins with 1, 2, 3 and 4% by volumes is 56.2°C, 51.8, 50.7°C, 49.3°C and 48°C respectively. By comparing the two modes of pure paraffin and nanoparaffin 4% by volume, an approximate amount of 17% reduction in temperature is obtained by adding nanoparticles to paraffin, which indicates the important effect of using nanoparticles in the proposed composite system.

3.2. Combined cooling system with pure water operating fluid

For cooling with pure water-working fluid, the inlet flow temperature is assumed to be constant at 24°C. The test was performed at two different thermal powers of 4.5 and 14 Watts and at three Reynolds numbers 420, 600 and 720 to investigate the effect of water cooling on battery temperature control. With increasing Reynolds number, it is observed that the battery temperature changes become closer to each other, which indicates that the effect of increasing Reynolds number at low capacities in decreasing battery temperature has a high limit and more than that, increasing flow rate does not effect. Therefore, at 4.5 Watts of power and despite the copper foam, in no Reynolds number, the battery surface temperature does not reach to a maximum of 60° C, and therefore the water cooling system with paraffin and copper foam can be used well at low thermal capacities and no need for using of nanoparaffin. Compared to cooling the battery with paraffin without copper foam, it is observed that the addition of copper foam has a significant role in controlling the temperature of the battery and not only prevents the paraffin from melting but also keeps the battery temperature stable. According to Fig. 3(a), the addition of nanoparticles to pure paraffin with a combination of copper foam and water flow has significantly reduced the heating temperature. The results show that in the flow of water working fluid with Reynolds number 420, the amount of heating temperature after 2563 seconds has reached a stable temperature of 34°C, which compared to pure paraffin, at the same time about 3°C temperature decreased. Also in Reynolds number equal to 600, the value of heater temperature after 2875 seconds reached a stable temperature of 33°C and in Reynolds number 720, the value of heater temperature after 4244 seconds reached a stable temperature of 32.5°C which comparisons with pure paraffin show 4° C and 4.6° C, respectively.

4. CONCLUSION

In this study, the effect of adding nanoparticles to paraffin in a hybrid system has been investigated experimentally. The results in the case of using air-working fluid for the active part of the cooling system showed that firstly, the passive part with paraffin, paraffin-copper foam and nano-paraffin-copper foam to keep the battery temperature in the safe range of 60° C and especially in operating mode with high thermal power (14 Watts in this study) is essential. This showed that if the operating fluid of the air is used in the active part of the system, the passive part of the system must be designed as a combination of nanoparaffin-copper foam so that the battery temperature does not exceed the safe temperature. The results showed that with increasing the volume percentage of titanium oxide nanoparticles to paraffin in the passive part of the hybrid system, the maximum value of the battery temperature has decreased well. The effect of nanoparaffin in the combined system with water-working fluid has also been investigated and the results show the similarity of the general trend of the effect of adding nanoparticles to paraffin in the system with air-flowing fluid. Finally, the present results showed that if the thermal power of the battery is high and the Reynolds number of the working fluid flow is low, the use of nanoparaffin in the hybrid system can easily control the temperature of the battery and keep it within the designed safe range.

REFERENCES

[1] X.T. Liu, Z.H. Chen, C.B. Zhang, J. Wu, A novel temperature-compensated model for power Li-ion batteries with dual-particle-filter state of charge estimation, Appl. Energy 123 (2014) 263–272.

[2] M. Kiani, M. Ansari, A.A. Arshadi, E. Houshfar, 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, (2020) 1-13.

[3] M. Mashayekhi, E. Houshfar, M. Ashjaee, Development of hybrid cooling method with PCM and Al2O3 nanofluid in aluminium minichannels using heat source model of Li-ion batteries, Applied thermal engineering, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115543

[4] A. Hussain, I.H. Abidi, C.Y. Tso, K.C. Chan, Z. Luo, C.Y. Chao, Thermal management of lithium ion batteries using graphene coated nickel foam saturated with phase change materials, International journal of thermal sciences, 124 (2018) 23-35.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Malekipour, M. Sabzpooshani, E. Houshfar, Investigation on the effect of addition of nano-titanium oxide particles to phase change material in a hybrid system for battery cooling under constant heat flux, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 1037-1040.

DOI: 10.22060/mej.2021.18825.6897

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۷، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۳۷۹ تا ۴۳۹۶
DOI: 10.22060/mej.2021.18825.6897

بررسی تاثیر اضافه‌نمودن نانوذرات تیتانیا به ماده تغییرفازدهنده سیستم ترکیبی خنک‌کاری باتری با شار حرارتی ثابت

محسن ملکی‌پور[۱]، مجید سبزپوشانی*[۱]، احسان هوشفر[۲]

[۱] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
[۲] دانشکدهمهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

خلاصه: افزایش دمای باتری‌های لیتیوم-یون به عنوان یک چالش شناخته‌شده‌است. در این تحقیق، با تکمیل سیستم مدیریت حرارتی ترکیبی، تاثیر اضافه‌نمودن ذرات نانوتیتانیا به ماده تغییرفازدهنده پارافین روی عملکرد خنک‌کاری باتری در دو حالت توان حرارتی ثابت ۴/۵ و ۱۴ وات بررسی شده‌است. سیستم ترکیبی شامل نانوپارافین و فوم فلزی به همراه دو نوع سیال عامل آب و هوا است. برای سیال عامل هوا، در حالتهای پارافین خالص و نانوپارافین با چهار درصدحجمی نانوذرات ۱، ۲، ۳ و ۴، دمای باتری به ترتیب برابر ۵۶/۲°C ، ۵۱/۸°C ، ۵۰/۷°C، ۴۹/۳°C و ۴۸°C بدست‌آمده‌است. از بین موارد بررسی‌شده، حالت نانوپارافین ۴ درصد حجمی بیشترین کاهش دمای باتری داشته که نسبت به حالت پارافین خالص، حدودا ۱۷٪ است. در سیستم با سیال عامل آب و در عدد رینولدزهای ۴۲۰، ۶۰۰ و ۷۲۰، با استفاده از فوم مسی و نانوپارافین، باتری به دمای پایدار به ترتیب ۴۸ °C؛ ۴۶ °C و ۴۴ °C رسیده که در مقایسه با حالت پارافین خالص، باعث کاهش دما به مقدار ۱۱٪، ۱۲٪ و ۱۲/۵٪ شده‌است. لذا با توجه به کم‌بودن ضریب هدایت حرارتی پارافین، افزودن نانوذرات باعث افزایش نرخ انتقال حرارت شده و گزینه مناسبی برای سیستم ترکیبی می‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۵
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱

کلمات کلیدی:
انتقال حرارت
نانوپارافین
باتری‌های لیتیوم-یونی
روش تجربی

۱- مقدمه

باتری‌های لیتیوم-یونی، به خاطر بالابودن ظرفیت حرارتی، چرخه عمر طولانی و نرخ تخلیه خودبه‌خودی پایین، به‌طور گسترده‌ای در صنایع و بخصوص در خودروهای الکتریکی به کار گرفته‌شده‌اند. اما موضوع پایداری حرارتی شامل چالش‌هایی نظیر ظرفیت تخریب، فرار حرارتی و حتی انفجار بر اثر گرمای بیش از حد و توزیع حرارتی غیریکنواخت باعث بروز مشکلات متعددی در استفاده از آنها شده‌است. لذا استفاده از سیستم مدیریت حرارتی باتری مناسب که قادر به برآورده کردن شرایط لازم باشد از نکات ضروری در طراحی این نوع باتری می‌باشد [۱]. با توجه به موارد ذکرشده، سیستم انتقال حرارت و خنک‌کاری باتری نه تنها باید توانایی نگهداری دمای مجموعه باتری‌ها را در محدوده مناسب داشته باشد، بلکه باید بتواند بیشینه اختلاف دما درون هر سلول باتری را در حداقل مقدار خود نگه دارد تا از تخریب سلول جلوگیری کند[۲].

عملکرد مطلوب باتری‌های لیتیوم-یون، محدود به شرایط دمایی باتری می‌باشد. با توجه به توصیه‌های تولیدکنندگان این نوع از باتری‌ها، دمای مطلوب محیط کارکرد باتری در حین تولید انرژی بین ۰ تا ۴۵ درجه سلسیوس است و در هر صورت نباید از محدوده ایمن ۶۰ درجه سلسیوس فراتر رود. بر این اساس محققان تلاش کرده‌اند تا با ارائه سیستمهای متنوع برای خنک‌کاری این نوع باتریها به این مشکل مهم غلبه کنند. به منظور برآورده‌کردن این شرایط مدیریت حرارتی و قراردادن باتری در شرایط ایمن، از استراتژی‌های گوناگونی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: spooshan@kashanu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

از قبیل خنک‌کاری با هوا [۳]، خنک‌کاری با مایع [۴]، لوله حرارتی[1] [۵] و استفاده از مواد تغییرفازدهنده[2] [۶] استفاده شده‌است.

سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری به دو نوع فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شوند. در سیستم فعال، از جریان اجباری سیال خنک‌کننده مانند هوا، آب و یا نانو سیال و در سیستم غیرفعال از محیط پیرامون برای خنک‌کاری استفاده می‌شود. هوا، مایعات، مواد تغییرفازدهنده و یا ترکیبی از آن‌ها می‌توانند به عنوان واسط انتقال حرارت در سیستم غیرفعال استفاده شوند. هر کدام از این موارد نقاط قوت و ضعف خود را داشته و از آنجایی که بر روی وزن، اندازه و هزینه تمام شده سیستم تأثیر می‌گذارند، باید مطابق با نیازهای وسیله الکتریکی مورد استفاده قرارگیرند. سیستم خنک‌کاری بر پایه هوا معمولا ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر از سیستم بر پایه مایعات بوده ولی اثربخشی آن نیز کم‌تر است.

برای بهبود انتقال حرارت و خنک‌کاری باتریهای لیتیوم-یون در سیستم غیرفعال باتری، استفاده از مواد تغییرفازدهنده و نیز فومهای فلزی[3] و ترکیب آنها توسط برخی از محققان پیشنهاد شده‌است [۷-۸]. مواد تغییرفازدهنده با دارابودن گرمای نهان بالا می‌توانند گرما را در حین تغییر فاز جذب کرده و افزایش دما را به تأخیر انداخته و یا شیب آن را کاهش دهند. از این رو این مواد برای استفاده در سیستم‌های مدیریت حرارتی توجه زیادی را به سمت خود جلب کرده‌اند. پارافین یکی از متداول‌ترین موادتغییرفازدهنده می‌باشد که از جمله ویژگی‌های آن عملکرد حرارتی پایدار، گرمای نهان بالا، بازه دمای ذوب گسترده و غیرسمی‌بودن است که این ماده را تبدیل به گزینه مناسب برای سیستم مدیریت گرمایی غیرفعال باتری‌های لیتیوم-یون کرده‌است [۹]. با این حال، ضریب هدایت حرارتی کم یک اشکال عمده است که باعث کاهش سرعت ذخیره‌سازی گرما و بازیابی در طی فرآیند ذوب و تبلور می‌شود. با توجه به پایین‌بودن ضریب هدایت حرارتی مواد تغییرفازدهنده، مواد خالص تغییرفازدهنده به تنهایی توانایی کنترل دما در سیستم مدیریت حرارتی را دارا نمی‌باشند. محققان نشان دادند که کاهش مقاومت حرارتی جابجایی و افزایش ضریب هدایت حرارتی مواد تغییرفازدهنده باعث کاهش دمای باتری می‌شود [۱۰]. یکی از روشهای جدید برای افزایش هدایت حرارتی مواد تغییرفازدهنده، افزودن نانوذرات به این مواد می‌باشد. به عنوان نمونه، الجافی و لفدی [۱۱] در مطالعه‌ای به بررسی افزودن ذرات نانو فیبرکربنی به مواد تغییرفازدهنده پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش درصد حجمی نانوذرات، ظرفیت گرمایی کاهش و نرخ خنک‌کاری افزایش می‌یابد. در تحقیقی دیگر، بحیرایی و همکاران [۱۲] به افزایش هدایت حرارتی مواد تغییرفازدهنده خالص با استفاده از افزودن نانوذرات به این مواد پرداختند. روفوس و همکاران [۱۳] نیز در مطالعه‌ای تجربی به بررسی تاثیر افزودن نانوذرات به مواد تغییرفازدهنده با استفاده از سه نوع نانو ذره شامل TiO_2, CuO, GO در سیستم تقطیر خورشیدی پرداخته و عملکرد مثبت استفاده از این نوع مواد را گزارش کردند. ونگ و همکاران [۱۴] عملکرد مواد تغییرفازدهنده را برای باتری لیتیوم-یون بررسی کردند و کاهش ۲۰ درصدی در بیشینه دمای باتری را در شرایط تخلیه شارژ مشاهده نمودند. محمود و پارک [۱۵] سیستم خنک‌کاری باتری لیتیوم-یون با جریان هوای رفت و برگشتی را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که سیستم رفت و برگشتی، توزیع دمای یکنواخت‌تری را در مقایسه با سیستم یک‌طرفه فراهم‌می‌آورد. پارک [۱۶] سیستم خنک‌کاری مجموعه‌ای از باتری‌ها شامل ۳۶ باتری مستطیلی و ۳۷ مسیر خنک‌کاری با جریان اجباری هوا را به‌صورت عددی مطالعه کرد و به این نتیجه رسید که استفاده از سیستم تهویه مطبوع می‌تواند توان مورد نیاز فن‌ها را کاهش دهد، هرچند به دبی جریان زیادی از هوا برای خنک‌کاری باتری‌ها نیاز می‌باشد.

سیستم‌های خنک‌کاری باتری بر پایه هوا به شدت به دمای هوای پیرامون وابسته بوده و در شرایط کاری شدید با دمای بالا و نرخ تخلیه شارژ بالا این سیستم‌ها قادر به کنترل مناسب دمای باتری نمی‌باشند [۱۷]. همچنین باتوجه به پایین‌بودن ظرفیت حرارتی سیستم‌های بر پایه هوا، از نظر ایجاد توزیع دمای یکنواخت روی سطح باتری و یا میان سلول‌های باتری نیز عملکرد مناسبی ندارند [۱۸]. لذا برخی از محققان به استفاده از سیستمهای بر پایه مایعات پرداخته‌اند.

مطالعات زیادی بر روی سیستم‌های خنک‌کاری باتری بر پایه مایعات انجام شده‌است. فنگ و همکاران [۱۸] با ترکیب‌کردن سیستم خنک‌کاری با جریان اجباری هوا و سیستم تبخیر آب، روند خنک‌کاری باتری‌های استوانه‌ای را به صورت تجربی بررسی کردند و موفق شدند دمای باتری را در دمای کم‌تر از ۶۰ درجه سلسیوس نگه‌دارند. لیان

1 Heat pipe
2 Phase change materials
3 Metal foam

و همکاران [۱۹] با انجام تحقیقات عددی و تجربی، عملکرد سیستم خنک‌کاری باتری‌های لیتیوم-یون منشوری را با استفاده از آب و کانال‌های کوچک خنک‌کننده مطالعه کردند. نتایج این کار تحقیقاتی در دماهای مختلف و نرخ‌های تخلیه شارژ متفاوت نشان داد که نواحی اطراف الکترودها، دمای بیشتری نسبت به نواحی مرکزی باتری دارند. تأثیر استفاده از سیستم‌های مختلف در خنک‌کاری باتری لیتیوم-یون توسط لیانگ و همکاران [۲۰] مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها اثر دما و دبی سیال خنک‌کننده، دمای محیط پیرامون و عملکرد گذرای سیستم خنک‌کاری لوله گرمایی را بررسی کردند و نشان دادند که روش خنک‌کاری متناوب می‌تواند با مصرف انرژی کم‌تر، عملکرد حرارتی مشابه با حالت خنک‌کاری به‌صورت پیوسته را ایجاد نماید و از این‌رو جایگزین مناسبی برای روش‌های خنک‌کاری پیوسته می‌باشد. همچنین آن‌ها دریافتند که دبی سیال خنک‌کننده دارای حد بیشینه در خنک‌کاری باتری می‌باشد [۲۰]. برخی از محققان برای افزایش نرخ انتقال حرارت در بخش فعال سیستم مدیریت حرارتی به جای سیال آب، از نانوسیال بر پایه آب استفاده کردند و نشان دادند که در حالت کلی استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل، می‌تواند باتری را در مقایسه با سیال پایه آب خنک‌تر نماید، هرچند که افزایش توان پمپ به عنوان نقطه ضعف این روش شناخته‌می‌شود [۲۱-۲۲]. کیانی و همکاران [۲۱] در مطالعه‌ای تجربی و عددی به طراحی سیستم ترکیبی مدیریت حرارتی پرداختند. سیستم طراحی‌شده شامل ترکیب پارافین به عنوان ماده تغییرفازدهنده، فوم مسی به عنوان سیستم غیرفعال و استفاده از نانوسیال آلومینا به عنوان سیال عامل در بخش سیستم فعال می‌باشد. نتایج آنها در عددهای رینولدز و توان‌های حرارتی مختلف نشان داد که استفاده از نانوسیال آلومینا در مقایسه با آب، باعث کاهش دمای باتری و نیز به تاخیر افتادن محدوده زمانی ذوب پارافین شده‌است. همچنین مشایخی و همکاران [۲۲] برای بخش فعال سیستم ترکیبی، نانوسیال و برای بخش غیرفعال آن، پارافین و فوم مسی را در میکروکانالهای تعبیه‌شده بکاربردند و تاثیر مثبت این سیستم ترکیبی در مدیریت حرارتی باتری را گزارش کردند. بهرحال علی‌رغم این که سیستم‌های خنک‌کاری با مایع از سیستم‌های بر پایه هوا کارآمدتر می‌باشند، این سیستم‌ها عموماً سنگین‌تر و پرهزینه‌تر نیز می‌باشند و همچنین هزینه‌های نگهداری بیش‌تری نیز به مصرف‌کننده تحمیل می‌کنند.

یکی از ویژگی‌های منفی پارافین، ضریب هدایت حرارتی پایین آن است که محققان را به سمت استفاده از موادی با هدایت حرارتی بالا همچون فوم‌های فلزی و نانوذرات به همراه پارافین ترغیب کرده‌است تا بتوانند هدایت حراتی کل ماده را بالا ببرند [۲۳]. با توجه به تکنولوژیهای در دسترس برای خنک‌کاری باتریهای لیتیوم-یون، استفاده از سیستمهای ترکیبی به عنوان یک گزینه جدید مورد توجه قرارگرفته‌است. محرابی و همکاران [۲۴] سیستم ترکیبی فوم فلزی مسی با ماده تغییرفازدهنده را برای بخش غیرفعال و جریان جابجایی اجباری با سیال عامل هوا برای بخش فعال سیستم بکار بردند و نشان دادند که استفاده از سیستم فوم مسی با ماده تغییرفازدهنده می‌تواند دمای سطح باتری را نسبت به حالت عدم استفاده از آن، بیشتر کاهش دهد. رنجبران و همکاران [۲۵] تأثیر استفاده از فوم‌های مسی با درصدهای مختلف بر روی خنک‌کاری باتری را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که استفاده از فوم مسی هدایت حرارتی ترکیب متشکل از ماده تغییرفازدهنده و فوم فلزی را افزایش داده‌است، اما استفاده از فوم فلزی با درصد بالا تأثیر منفی بر روی روند خنک‌کاری می‌گذارد. در مطالعه‌ای تجربی توسط ژانگ و همکاران [۲۶] سیستم خنک‌کاری باتری با استفاده از ترکیب گرافیت گسترده و پارافین بدون سیستم خنک‌کاری فعال مورد مطالعه قرارگرفت. نتایج کار آن‌ها برای شرایط عملکردی متفاوت نشان داد که این سیستم می‌تواند افزایش دمای باتری در حین تخلیه شارژ را در محدوده ایمن نگه‌دارد ولی موجب بیشینه اختلاف دمای ۵ درجه سلسیوسی میان سلول‌های باتری می‌شود. اگرچه گرمای نهان ذوب بالای پارافین ویژگی مهمی برای سیستم خنک‌کاری غیرفعال است ولی فاز مایع پارافین، اثر خنک‌کاری کارآمدی نداشته و قابلیت کنترل دمای باتری به‌خصوص در نرخ‌های تخلیه زیاد را ندارد. بنابراین برای کارکرد با نرخ تخلیه بالا و برای طولانی مدت، باید از ترکیب سیستم‌های فعال و غیرفعال برای کنترل افزایش دمای باتری استفاده‌کرد. لینگ و همکاران [۲۷] سیستم خنک‌کاری با جابجایی اجباری هوا را با سیستم غیرفعال شامل مواد تغییرفازدهنده ترکیب کردند تا بتوانند مشکل گرم‌شدن بیش از حد ایمن در باتری‌های استوانه‌ای لیتیوم-یون را حل کنند. نتایج عددی و تجربی آن‌ها نشان داد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده، به تنهایی پاسخگوی کنترل دمای باتری در

محدوده ایمن نمی‌باشد ولی با استفاده از سیستم ترکیبی، خنک‌کاری باتری بهبود یافته و باتری قادر است در محدوده دمایی مجاز عمل کند. ژائو و همکاران [۲۸] خنک‌کاری باتری استوانه‌ای لیتیوم-یون را با استفاده از مواد تغییرفازدهنده و فوم مسی به همراه سیستم خنک‌کاری فعال به‌صورت عددی مورد مطالعه قراردادند و کاهش ۱۴ درجه سلسیوسی در کاهش دمای بیشینه باتری را با استفاده از سیستم ترکیبی مشاهده کردند.

مرور مطالب بالا نشان می‌دهد که استفاده از سیستمهای ترکیبی فعال و غیرفعال می‌تواند در مدیریت حرارتی باتریهای لیتیوم-یون موفق عمل کند. با این وجود، اضافه‌نمودن نانوذرات به مواد تغییرفازدهنده و تاثیر آن روی کاهش دمای باتری در این سیستمهای ترکیبی تحقیقی انجام نشده‌است. لذا در این پژوهش یک سیستم ترکیبی مدیریت حرارتی شامل نانوذرات اضافه‌شده به پارافین (نانوپارافین) برای خنک‌کاری باتری لیتیوم-یون که توسط مراجع [۲۱-۲۲ و ۲۴] معرفی شده، توسعه داده‌شده‌است. در مطالعه حاضر، سیستم خنک‌کاری ترکیبی با استفاده از تلفیق سیستم خنک‌کاری فعال (با دو نوع سیال عامل هوا و آب) و سیستم غیرفعال (شامل نانو-پارافین و فوم مسی) به‌صورت تجربی بررسی شده‌است تا اثر نانوپارافین روی عملکرد سیستم ترکیبی مشخص شود. برای تهیه نانوپارافین، نانو ذرات تیتانیا در درصدهای حجمی مختلف در پارافین بطور کاملاً یکنواخت توزیع شده‌است. به منظور مشخص‌نمودن تاثیر نانوپارافین تهیه‌شده، سیستم ترکیبی در شرایط مختلف عملکردی شامل چندین عدد مختلف رینولدز جریان سیال عامل در کانال، دو توان حرارتی مختلف و ثابت و نیز درصدهای مختلف حجمی نانوذرات توزیعی در پارافین بررسی می‌شود.

۲- مجموعه آزمایشگاهی

سیستم ترکیبی مورد استفاده در این تحقیق توسعه یافته سیستم ترکیبی معرفی‌شده توسط مراجع [۲۱-۲۲]می‌باشد. این تحقیق در آزمایشگاه نانوسیالات دانشگاه تهران انجام شده‌است. نحوه ترکیب فوم مسی با پارافین خالص مشابه مراجع [۲۱-۲۲] می‌باشد که از این روش برای توزیع نانوپارافین در فوم مسی نیز استفاده شده‌است. چگونگی توزیع ناذرات آلومینا در پارافین نیز در ادامه توضیح داده‌شده‌است.

۲-۱- آماده‌سازی کامپوزیت ماده تغییرفازدهنده با فوم مسی

پارافین به‌کاررفته در این آزمایش از نوع بلوکی با دمای ذوب ۴۲ تا ۴۴ درجه سلسیوس با چگالی ۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، گرمای نهان ذوب ۲۴۹ کیلوژول برکیلوگرم، با ترکیب شیمیایی مخلوط نمک و هیدروکربن اشباع‌شده، رنگ سفید مات، بدون بو، با اسیدیته خنثی، غیرقابل‌حل در آب و غیرسمی می‌باشد که از شرکت مرک[1] آلمان خریداری شده‌است.

برای تهیه ناذرات تیتانیا و با روش واکنش هیدرولیز، ۱ میلی‌لیتر $TiCl_4$ به ۲۰ میلی لیتر محلول هیدروژن کلراید چکیده می‌شود و در یک حمام آب یخ، بهم زده‌می‌شود. سپس ۲ میلی‌لیتر محلول آمونیاک برای مصرف بیشتر هیدروژن کلراید به مخلوط اضافه می‌شود و مخلوط به مدت سی دقیقه در دمای اتاق هم‌زده می‌شود. پس از آن، درجه حرارت مخلوط به ۹۰ درجه سلسیوس افزایش یافته و به مدت ۶۰ دقیقه هم‌زده می‌شود. محلول آمونیاک به داخل مخلوط چکیده می‌شود تا مقدار پی‌اچ آن به ۶ برسد. بدون هم‌زدن و گرم‌کردن، این مخلوط به طور طبیعی در حدود ۸ ساعت در دمای اتاق خنک می‌شود. مخلوط پس از واکنش توسط آب مقطر رقیق شده، فیلتر شده و به طور مکرر شسته می‌شود تا زمانی که شستشوها حضور Cl^- را نشان ندهد. جامد تمیزشده جمع‌آوری و در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت خشک می‌شود که پودر خشک شده، شامل نانوذرات TiO_2 می‌باشد. واکنش‌های شیمیایی آن به صورت زیر می‌باشند:

$$TiCl_4 + H_2O \longrightarrow TiOH^{3+} + H^+ + 4Cl \quad (۱)$$

$$TiOH^{3+} \longrightarrow TiO^{2+} + H^+ \quad (۲)$$

$$TiO^{2+} + H_2O \longrightarrow TiO_2 + 2H^+ \quad (۳)$$

نانوذرات توزیع‌شده در پارافین، نانوذرات اکسید تیتانیوم با میانگین اندازه ۲۰nm می‌باشد. نانوذرات ساخته‌شده به پارافین اضافه شده و این مخلوط به مدت سی دقیقه در دمای ۶۵ درجه سلسیوس بطور کامل هم زده شده و به تدریج خنک می‌شود تا توزیع یکنواخت نانوذرات در پارافین حاصل شود.

از دستگاه KD2 با دقت اندازه‌گیری W/(mK) ۰/۰۱± برای

1 MERCK

شکل ۱. حمام حرارتی

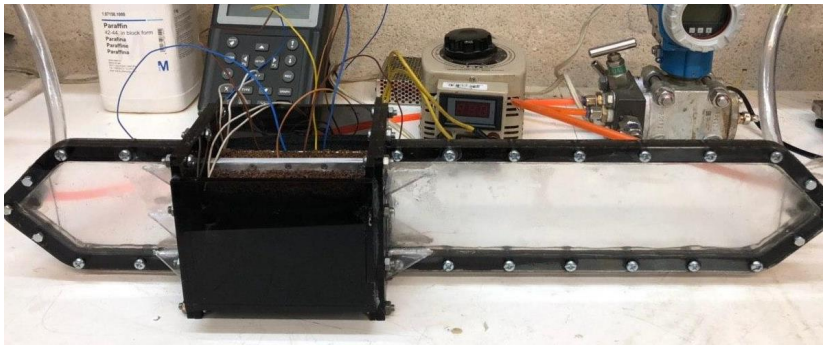
Fig. 1. Thermal Bath

شکل ۲. نمایی از گرمکن کتابی مورد استفاده در آزمایش

Fig. 2. Schematic of plate heater using in the experiment

اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی استفاده شده‌است. روش کار این دستگاه به این صورت می‌باشد که با عبور جریان الکتریکی از یک سیم نازک و ایجاد حرارت و آنالیز دمایی نمونه، ضریب هدایت حرارتی نمونه بدست می‌آید. ضریب هدایت حرارتی پارافین در فاز جامد و مایع به‌ترتیب برابر ۰/۲ و ۰/۳۱۷ وات بر متر بر کلوین بدست آمده‌است که مطابق نتایج مراجع قبلی از جمله نتایج مشایخی و همکاران [۲۲] می‌باشد. طبق دستورالعمل گفته‌شده برای این محصول، در هنگام ذوب‌کردن و تزریق آن درون مجموعه، نباید دمای آن از ۸۰ درجه سلسیوس تجاوز کند. برای این منظور از حمام آب گرم مطابق شکل ۱ در دمای ۷۰ درجه سلسیوس استفاده شده‌است. از حمام دما ثابت برای ثابت‌نگه‌داشتن دمای سیال ورودی، دست‌یابی به دمای مختلف از ۲۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس برای کالیبره‌کردن ترموکوپل‌ها و همچنین ذوب‌کردن پارافین در دمای ۷۰ درجه سلسیوس استفاده شده‌است. دقت این دستگاه در کاتالوگ شرکت سازنده مقدار ۰/۰۵± درجه سلسیوس ذکر شده‌است.

مس و آلومینیوم از جمله مواد رایج برای ساخت فوم‌های فلزی



شکل ۳. مجموعه سیستم مدیریت حرارتی به همراه گرمکن

Fig. 3. Set up of thermal management system with plate heater

جدول ۱. مقادیر عدم قطعیت برای پارامترهای مورد نظر در آزمایش

Table 1. Uncertainty values for the desired parameters in the experiment

پارامتر	میزان عدم قطعیت
دمای هیتر (دمای مجاز)	٪۱/۲
دبی سیال (۷۰۰ ml/min)	٪۱/۴
مقاومت هیتر	٪۰/۹
اختلاف فشار	٪۰/۷۵
توان مصرفی پمپ	٪۱/۵

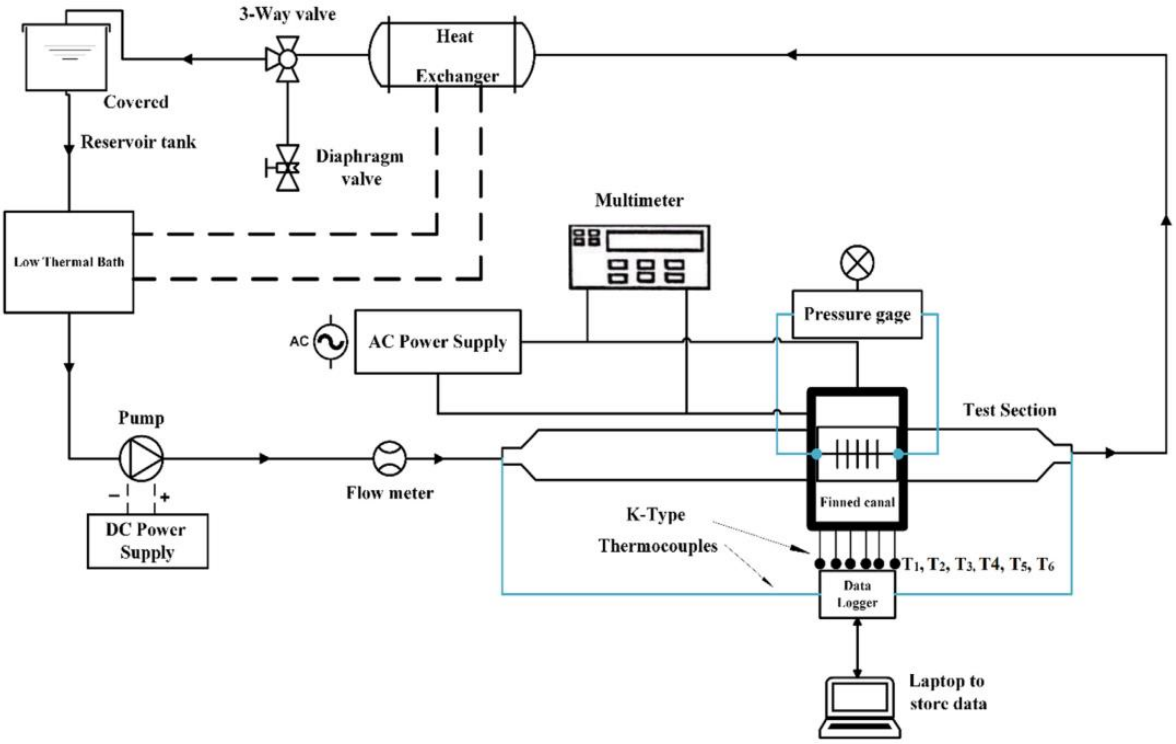
می‌باشند ولی مس خواص حرارتی بهتری نسبت به سایر مواد دارد [۲۲-۲۱ و ۲۴] که به همین علت در این مطالعه از فوم مسی استفاده شده‌است. در مطالعه حاضر از فوم مسی با تخلخل ۹۰٪ و با تعداد حفره در اینچ برابر با ۲۰، ارتفاع ۸۰ میلی‌متر، عرض ۳۲ میلی‌متر و طول ۱۳۰ میلی‌متر استفاده شده‌است. این فوم فلزی از شرکت تحقیقاتی و صنعتی نانوپوشش فلز که یکی از شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در زمینه تولید محصولات با تکنولوژی بالا در حوزه نانوتکنولوژی است و در پارک علم و فناوری دانشگاه تهران مستقر می‌باشد، تهیه شده‌است که توسط مراجع قبلی نیز [۲۱] مورد استفاده قرار گرفته‌است. از مزایای این فوم فلزی می‌توان به سبک‌بودن و بالابودن ضریب رسانش آن اشاره کرد.

۲-۲- باتری لیتیوم-یون کتابی

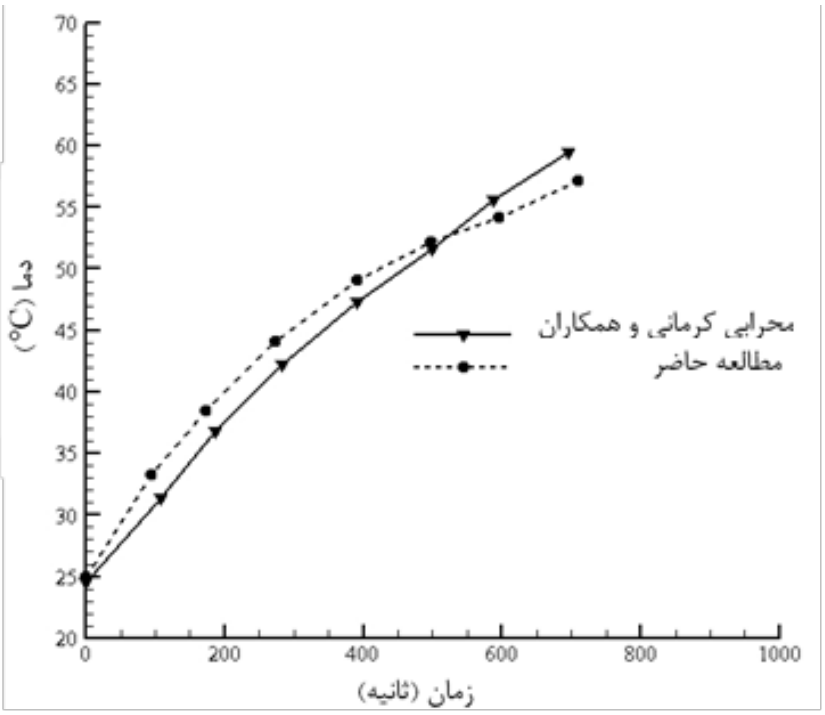
تولید حرارت در حین عملیات شارژ و تخلیه حراراتی به دو عامل اصلی بازگشت‌پذیری و غیرقابل‌بازگشت‌پذیری آن بستگی دارد. علی‌رغم فواید زیاد باتری‌های لیتیوم-یونی، دغدغه ایمن‌سازی این دسته از باتری‌ها نگرانی زیادی را به‌وجود می‌آورد. این موضوعات ایمن‌سازی را عمدتاً فرار حرارتی می‌نامند. این پدیده باعث یک افزایش ناگهانی در دما تحت شرایط کاری می‌باشد. فرار حرارتی یک واکنش حرارتی غیرقابل کنترل می‌باشد که ممکن است باعث انفجار یا آتش‌سوزی در باتری شود. بنابراین، تست باتری اصلی تحت این شرایط کاری، نسبتا خطرناک و پرهزینه می‌باشد. لذا بجای استفاده از باتری اصلی، از گرمکن حرارتی کتابی در آزمایشات استفاده شده‌است برای ساخت گرمکن حرارتی، از صفحات میکا و صفحه آلومینیومی با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر استفاده شده‌اند. ماده میکا از تماس الکتریکی جلوگیری می‌کند. در شکل ۲ نمایی از گرمکن کتابی نشان داده‌شده‌است.

۲-۳- مجموعه دستگاه آزمایش

سیستم مدیریت حرارتی به همراه گرم‌کن‌های کتابی داخل جعبه‌ای تحت فشار نصب شده‌است تا سطح تماس میان اجزا افزایش یابد و در شکل ۳ نشان داده‌شده‌است. فوم مسی با ابعاد ۱۳۰*۸۰*۳۲



(الف)



(ب)

شکل ۴. الف) طرحواره مجموعه آزمایش ب)اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی حاضر با نتایج تجربی محرابی و همکاران [۲۲]

Fig. 4. a) Schematic of experimental set up b) Validation of the present experimentally results with the experimental results of Mehrabi et. al. [22]

میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته و گرم‌کن‌ها در کنار آنها تعبیه شده‌است. گرم‌کن‌ها به عنوان جایگزین باتری کنار این فوم مسی قرار می‌گیرند. شکل کلی سیستم در مرجع]۲۱ و ۲۲[داده شده‌است که از بیان مجدد آن در اینجا خودداری می‌شود.

برای سنجش تأثیر تفاوت بین دبی‌های ورودی مختلف، از عدد بدون بعد رینولدز در بخش سیال عامل آب خالص استفاده شده‌است که برای محاسبه آن از معادلات (۴) تا (۶) استفاده می‌شود.

$$\mathrm{Re} = \frac{UD_h}{\upsilon} \tag{۴}$$

$$U = \frac{Q}{A} \tag{۵}$$

$$D_h = \frac{4A}{p} \tag{۶}$$

که در آن Re عدد بدون بعد رینولدز، U سرعت متوسط سیال ورودی به کانال (m/s)، D_h قطر هیدرولیکی معادل (m)، v ویسکوزیته سینماتیکی سیال در دمای ورودی به کانال (s/m^2)، Q دبی حجمی سیال ورودی به کانال (s/m^3)، A سطح مقطع کانال (m^2) و p محیط تر شده کانال (m) می‌باشند.

برای اندازه‌گیری دما در طول آزمایش از ترموکوپل نوع K استفاده شده‌است. جهت اتصال ترموکوپل‌ها به بدنه گرمکن‌ها یک شیار به عمق ۱/۵میلی‌متر روی سطح هر گرمکن تعبیه شده و ترموکوپل‌ها با فشار درون آن قرار داده شده‌اند. جهت چسباندن ترموکوپل درون سوراخ ایجادشده در سطح گرمکن، از چسب سیلیکون حرارتی استفاده شده‌است. هفت ترموکوپل نوع K برای اندازه‌گیری دما مورد استفاده قرارگرفته‌است. دو ترموکوپل به‌صورت موازی با گرمکن‌های کتابی در فصل مشترک فوم فلزی و یا ماده تغییرفازدهنده و کانال آلومینیومی قرارداده‌می‌شوند. یک ترموکوپل نیز در مسیر جریان ورودی به کانال آلومینیومی و یک ترموکوپل دیگر در مسیر خروج جریان از کانال آلومینیومی قرار می‌گیرد.

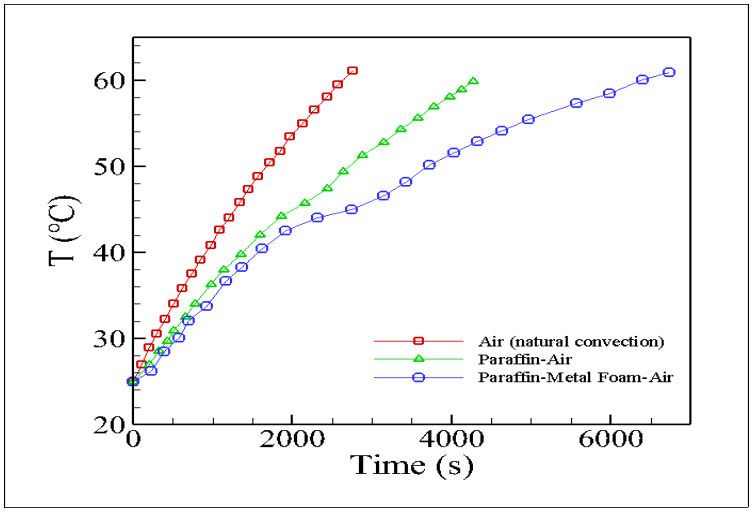
۲-۴- تحلیل عدم قطعیت نتایج

عدم قطعیت اندازه‌گیری، اطلاعاتی راجع به کیفیت نتایج حاصل از اندازه‌گیری را بیان می‌کند. در حقیقت عدم قطعیت شک و گمانی است که درباره نتیجه هر اندازه‌گیری پدید می‌آید. ممکن است تصور شود که یک وسیله اندازه‌گیری کاملا قابل اعتماد است و نتیجه درستی از اندازه‌گیری ارائه می‌دهد، ولی همیشه در تجهیزات اندازه‌گیری حتی دقیق‌ترین آن‌ها شک وجود دارد. معمولا آنالیز عدم قطعیت با دو نوع خطا مواجه می‌شود. یک خطای سیستماتیک دستگاه اندازه‌گیری که با هر بار تکرار از بین نمی‌رود که به آن خطای بایس[1] گفته می‌شود. در این روند، اندازه‌گیری خطای سیستماتیک همان دقت اندازه‌گیری دستگاه‌ها می‌باشد که در نحوه ساخت دستگاه وجود دارد و جزء محدودیت‌های دستگاه بوده و در واقع اجتناب‌ناپذیر است. خطایی دیگر، خطایی است که در تکرارپذیری اندازه‌گیری رخ می‌دهد و برای حالتی پیش می‌آید که مقادیر اندازه‌گیری شده، مقادیر یکسانی را نشان ندهند. این خطا، خطای رندوم[2] نامیده می‌شود که بیشتر به شرایط محیطی و آزمایشگاهی مربوط بوده و به محدودیت‌های دستگاه ارتباطی پیدا نمی‌کند. در پژوهش حاضر و انجام آزمایش، مقادیر اندازه‌گیری‌شده را در حالتی که نسبت به تغییرات خود به حالت پایدار رسیده بودند، اندازه گرفته شده‌است. در جدول ۱ مقادیر عدم قطعیت برای پارامترهای مورد نظر در آزمایش نشان داده‌شده‌است.

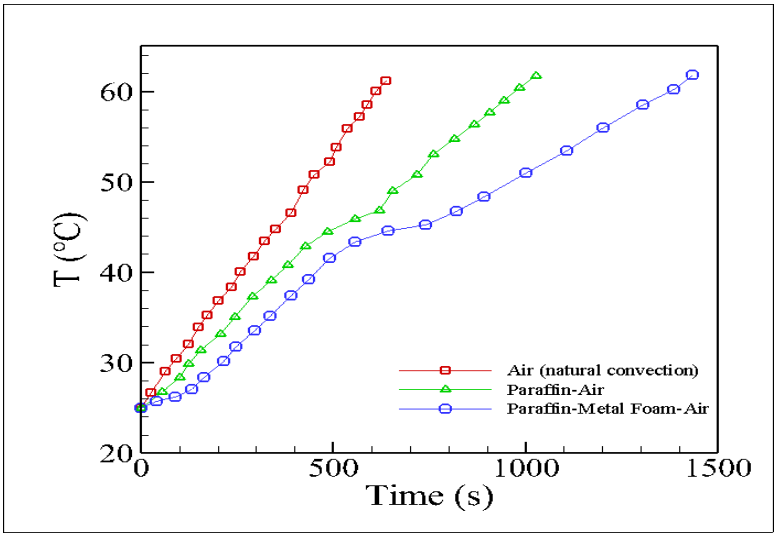
۳- اعتبارسنجی نتایج تجربی

اکثر بخشهای سیستم ترکیبی حاضر منطبق بر سیستم ترکیبی معرفی شده توسط مراجع [۲۱-۲۲] است که طرحواره کل سیستم در شکل ۴-الف نشان داده‌شده‌است. با توجه به تغییرات انجام‌شده در سیستم حاضر و برای اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی این پژوهش، از کار تحقیقاتی انجام‌شده توسط محرابی و همکاران [۲۴] استفاده شده‌است. آن‌ها از گرم‌کن‌های کتابی با چاه حرارتی پین‌دار به همراه پارافین برای خنک‌کاری باتری استفاده کردند درحالیکه در سیستم حاضر چاه حرارتی پین دار حذف شده‌است. در شکل ۴-ب تغییرات دمایی به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر با پارافین خالص با نتایج مرجع [۲۴] مقایسه شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روند تغییرات دمایی هر دو کار مشابه می‌باشد. البته اختلافاتی که وجود دارد به دلیل تفاوت در اعمال شار حرارتی، تفاوت در نوع و مشخصات پارافین‌های استفاده‌شده و همچنین تفاوت در ابعاد گرم‌کن‌ها می‌باشد.

1 Bias
2 Random



(الف)



(ب)

شکل ۵. تغییرات دمای سطح باتری در توان های حرارتی ۴/۵ وات (الف) و ۱۴ وات (ب) با استفاده از سیال عامل هوا در بخش فعال سیستم ترکیبی و سه حالت برای بخش غیرفعال شامل جریان طبیعی هوا؛ هوا - پارافین و هوا-پارافین-فوم فلزی

Fig. 5. Variations of temperature battery surface at heating powers (a) 4.5 Watts and (b) 14. Watts using of air as working fluid in the active section of system

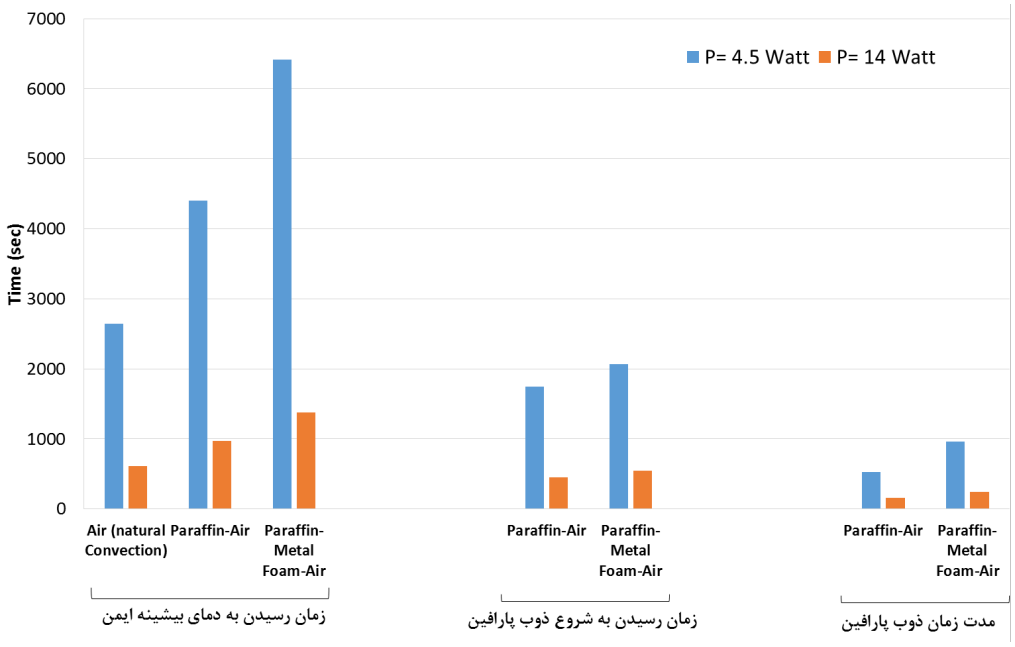
۴- نتایج

در حین انجام آزمایش‌ها، دمای محیط اطراف ثابت و دمای سیال ورودی به کانال برابر با ۲۵ درجه سلسیوس بوده‌است. تغییرات دمای سطح جایگزین باتری (گرمکن) تا رسیدن به شرایط کارکرد پایا یا رسیدن به بیشینه دمای مجاز C° ۶۰ ثبت شده‌است. آزمایش‌ها چندین مرتبه تکرار شده تا از صحت نتایج اطمینان حاصل گردد. در این فرایند زمان رسیدن به بیشینه دمای مجاز C° ۶۰ یا دمای پایا اندازه‌گیری شده‌است. نتایج در دو بخش شامل سیستم خنک‌کاری با سیال عامل هوا و سیستم خنک‌کاری با سیال عامل آب ارائه شده‌است و در هر بخش تاثیر اضافه‌نمودن نانوپارافین روی عمکلرد سیستم ارائه شده‌است.

۴-۱- سیستم خنک کاری با سیال عامل هوا

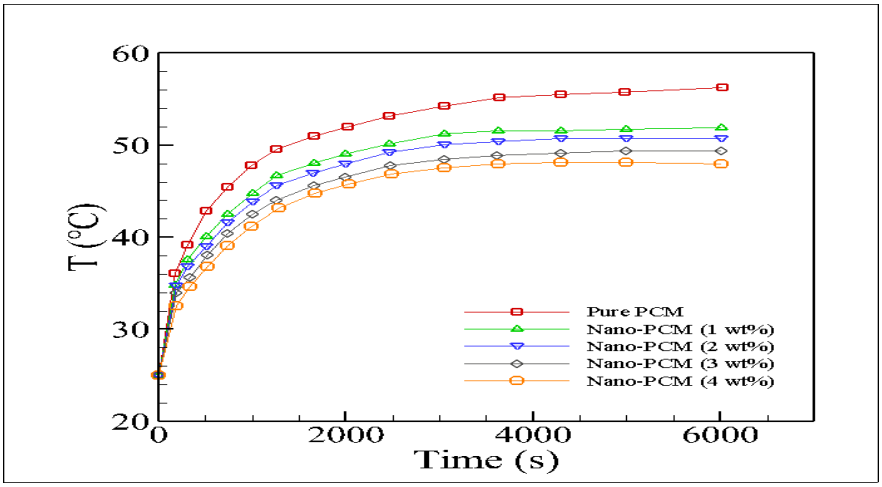
با توجه به اینکه استفاده از سیال هوا در بخش فعال سیستم ترکیبی خنک‌کاری به خاطر هزینه‌های کمتر پیشنهاد داده‌شده‌است، در این بخش عملکرد این سیستم بررسی می‌شود. با توجه به بیشینه دمای ایمن ۶۰ درجه سلسیوس، آزمایش‌ها تا جایی که دمای سطح باتری‌ها (که در این پژوهش به شکل گرمکن‌های کتابی است) به ۶۰ درجه سلسیوس برسد ادامه یافته‌است. در ابتدا برای نشان‌دادن تاثیر بخش غیرفعال سیستم ترکیبی خنک‌کاری برای سه حالت جریان هوای جابجایی آزاد (در بخش غیرفعال)، وجود پارافین و ترکیب پارافین و فوم مسی در دو توان حرارتی ثابت ۴/۵ و ۱۴ وات انجام شده و در شکل ۵ داده‌شده‌است.

با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل ۵- الف، در حالت خنک‌کاری بدون پارافین (جابجایی آزاد هوا) در توان حرارتی ۴/۵ وات دمای سطح گرمکن در مدت زمان ۴۴ دقیقه و ۵ ثانیه (۲۶۴۵ ثانیه) از دمای بیشینه ۶۰ درجه سلسیوس عبور می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که درحالت از استفاده از پارافین و بدون فوم مسی به همراه جابجایی آزاد هوا، بیشینه دمای سطح گرمکن (جایگزین باتری در آزمایش) در مدت زمان ۴۳۹۸ ثانیه به دمای ۶۰ درجه سلسیوس رسیده‌است. در نتیجه فقط با اضافه‌کردن پارافین، حدود ۶۶٪ مدت زمان رسیدن به دمای بیشنیه ایمن نسبت به حالت خنک‌کاری با جابجایی آزاد هوا افزایش یافته‌است. همچنین زمانی که دمای سطح باتری در خنک‌کاری با جابجایی آزاد هوا به ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد (حدود ۲۶۴۵ ثانیه)، دمای سطح باتری در همین زمان با خنک‌کاری با استفاده از پارافین به ۴۸/۹ درجه سلسیوس می‌رسد که کاهش حدود ۱۹٪ در دمای سطح باتری نسبت به حالت بدون پارافین را نشان می‌دهد. در نمودار شکل ۵-الف تغییرات دمای سطح باتری با پارافین، ناحیه‌ای با شیب کم وجود دارد که در زمان ۱۷۵۰ تا ۲۲۸۰ ثانیه، رشد اندک دما نسبت به زمان را نشان می‌دهد. این ناحیه نقطه شروع ذوب شدن پارافین را تا زمانی که کل آن تبدیل به مایع می‌گردد نمایان می‌سازد. پس از گذشت تقریبا ۱۸۸۰ ثانیه پارافین جامد که در تماس با گرمکن‌های کتابی قرار دارد به دمای نقطه ذوب خود (۴۴-۴۲ درجه سلسیوس) می‌رسد و در مدت زمان ۵۳۰ ثانیه به‌طور کامل ذوب می‌شود. در طول این مدت پارافین گرما را به‌صورت گرمای نهان در خود ذخیره کرده و نرخ افزایش دمای سطح باتری را کاهش می‌دهد. پس از ذوب کامل، پارافین دیگر قادر به ذخیره‌ی گرما به‌صورت گرمای نهان نبوده و نرخ افزایش دمای سطح باتری افزایش



شکل ۶. خلاصه نتایج در سیستم خنک‌کاری غیرفعال جابجایی آزاد هوا؛ هوا-پارافین و نیز هوا-پارافین-فوم مسی با بخش فعال شامل جریان سیال عامل هوا

Fig. 6. Summary of results in passive cooling system with free convection air; air-paraffin as well as air-paraffin-copper foam with active part including air flow fluid



شکل ۷. مقایسه تغییرات دمایی باتری‌های کتابی با نانوذره و بدون نانوذره با جریان سیال عامل هوا

Fig. 7. Comparison temperature variations of plates batteries between nano-PCM and pure PCM with air as working fluid

یافته و باتری به بیشینه دمای ایمن می‌رسد. همچنین شیب تغییرات دما بعد از ذوب کامل پارافین تقریبا ۴۰٪ نسبت به قبل از شروع ذوب شدن پارافین کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در هنگام ذوب پارافین، حرارت باید از پارافین جامد که ضریب انتقال حرارت کمتری نسبت به پارافین مایع دارد عبور کند و یا به عبارتی، مقاومت حرارتی پارافین جامد از پارافین مایع بیشتر است و لذا این پدیده قابل توجیه می‌باشد. در مجموع استفاده از پارافین حتی بدون فوم مسی خنک‌کاری باتری را بهبود می‌بخشد در حالی که خنک‌کاری تنها با جریان جابجایی آزاد هوا کارکرد مطلوبی نداشته و در مدت نسبتا کوتاهی باتری از بیشینه دمای ۶۰ درجه تجاوز کرده و عمر و ایمنی آن به خطر می‌افتد.

مشابه با آزمایشی که برای گرمکن‌های کتابی ۴/۵ وات انجام شد، آزمایش برای توان ۱۴ وات نیز انجام شده‌است و نتایج آن در شکل (۵- ب) نشان داده‌شده‌است. در حالت خنک‌کاری با جریان جابجایی آزاد هوا، دمای سطح باتری در مدت زمان ۶۱۵ ثانیه به بیشینه دمای ایمن ۶۰ درجه سلسیوس رسیده‌است. در حالت خنک‌کاری با پارافین خالص، ۹۷۵ ثانیه طول کشیده تا دمای سطح باتری به ۶۰ درجه سلسیوس برسد. همچنین زمانی که دمای باتری خنک‌شده با جریان آزاد هوا به ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد دمای سطح باتری خنک‌شده با پارافین خالص به ۴۶/۸ درجه سلسیوس رسیده که کاهش حدود ۲۲٪ را نشان می‌دهد. در توان ۱۴ وات، نمودار تغییرات دما برای خنک‌کاری با جریان هوا حالت خطی‌تری نسبت به توان ۴/۵ وات دارد. پس از تقریبا ۴۵۰ ثانیه پارافین شروع به ذوب‌شدن می‌کند و پس از ۱۶۰ ثانیه کاملا ذوب شده و نرخ افزایش دما مجددا افزایش می‌یابد.

ایراد انتقال حرارت با پارافین تنها، پایین بودن ضریب هدایت حرارتی آن است. با توجه به پایین‌بودن ضریب هدایت حرارتی پارافین، گرمای منتقل‌شده در آن جمع شده و موجب ذوب کامل آن می‌گردد و در نتیجه پارافین مزیت اصلی خود که گرمای نهان بالا است را از دست می‌دهد و ازطرفی قادر به انتقال مناسب گرما از دیواره باتری به سمت کانال سیال خنک‌کننده نمی‌باشد. از این‌رو با توجه پیشنهاد مراجعی نظیر [۲۱-۲۲ و ۲۴] فوم مسی را داخل پارافین قرار داده و آزمایش‌های با پارافین-فوم مسی انجام شده‌است. لازم بذکر است که در شکل (۵- الف و ب)، نتایج برای توان‌های ۴/۵ و ۱۴ وات و با اضافه‌نمودن فوم مسی نیز داده‌شده‌اند. با اضافه‌کردن فوم مسی، مشاهده شده که مدت زمان ۶۷۳۱ ثانیه طول می‌کشد تا دمای سطح باتری از ۲۵ درجه سلسیوس محیط پیرامون به ۶۰ درجه سلسیوس برسد که در مقایسه با پارافین خالص (۴۲۷۴ ثانیه) افزایش ۵۷٪ را نشان می‌دهد. زمانی که دمای باتری در حالت خنک‌کاری با هوای

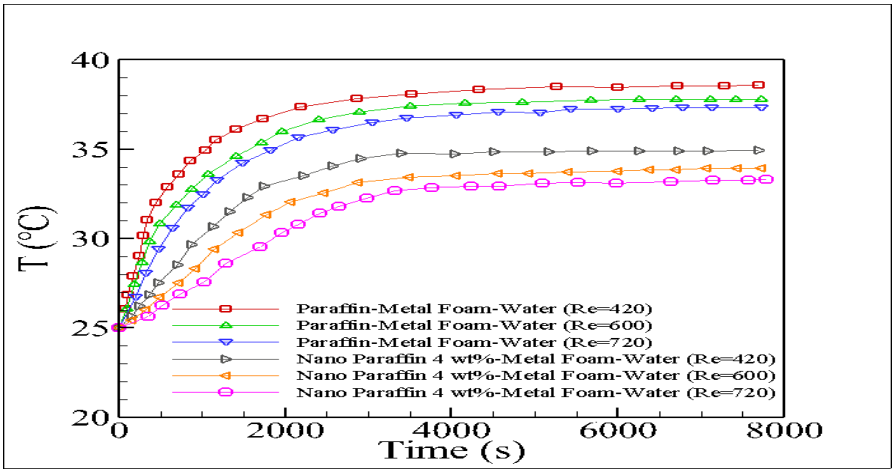
آزاد به ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد، دمای باتری خنک‌کاری‌شده با پارافین خالص ۴۸/۹ درجه سلسیوس شده‌است (۱۹٪ کاهش). همچنین زمانی که دمای کارکرد باتری با پارافین خالص به ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد، دمای باتری خنک‌کاری‌شده با پارافین و فوم مسی به ۵۲/۸ درجه سلسیوس رسیده که کاهش حدود ۱۳ درصدی در کاهش دما را نسبت به پارافین خالص فراهم می‌آورد. این کاهش مشخصا به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی مجموعه پارافین و فوم مسی نسبت به پارافین تنها می‌باشد. با اضافه‌کردن فوم مسی، انتقال گرما از دیواره‌ی باتری به محیط پیرامون بهتر انجام شده و تجمع گرمای کم‌تری در باتری صورت گرفته و در نتیجه سیستم مدیریت گرمایی عملکرد بهتری خواهدداشت. با توجه به شکل (۵- الف) مشاهده می‌شود که با اضافه‌شدن فوم مسی، نه تنها نقطه شروع‌شدن فرآیند ذوب‌شدن پارافین به تاخیر افتاده‌است، بلکه مدت زمان ذوب‌شدن پارافین نیز از ۵۳۰ ثانیه در حالت پارافین خالص به ۹۶۶ ثانیه در حالت اضافه‌شدن فوم مسی افزایش یافته‌است. با وجود اینکه اضافه‌کردن فوم مسی انتقال حرارت در داخل باتری را سرعت می‌بخشد، به دلیل پایین‌بودن ضریب جابجایی هوا در اطراف جعبه باتری، خروج گرما از باتری به درستی صورت نمی‌گیرد. با توجه به نتایج برای شار حرارتی ۱۴ وات در شکل ۵-ب مشاهده می‌شود که باتری خنک‌کاری‌شده با پارافین و فوم مسی تقریبا ۱۳۷۷ ثانیه طول می‌کشد که به بیشینه دمای کارکرد ایمن برسد. این مدت ۴۰۲ ثانیه کمتر از مدت زمان مربوط به باتری با پارافین خالص می‌باشد. در نتیجه ۴۱٪ بهبود در زمان رسیدن باتری به مرز ۶۰ درجه سلسیوس با استفاده از فوم مسی حاصل شده‌است. زمانی که دمای کارکرد باتری با پارافین خالص به ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد، دمای باتری خنک‌کاری‌شده با پارافین و فوم مسی به ۵۰/۹ درجه سلسیوس رسیده که کاهش ۱۵/۲ درصدی در کاهش دما را نسبت به پارافین خالص فراهم می‌آورد. در نتیجه مشاهده می‌شود که در توان حرارتی بالاتر، فوم مسی تاثیر بیشتری در مقایسه با توان حرارتی پایین‌تر در کاهش دمای باتری داشته‌است. لازم بذکر است که در حالت کلی، رفتار حرارتی سیستم بررسی‌شده در این بخش در توافق با نتایج گزارش‌شده توسط مراجع [۲۱--۲۴] نیز می‌باشد. اگرچه با توجه به تفاوت در نوع پارافین و یا سیال عامل و نیز شرایط مختلف توان حرارتی، از لحاظ کمی نتایج متفاوت می باشند.

برای درک بهتر اثر سیستم‌های مختلف حرارتی در خنک‌کاری باتری خلاصه‌ای از نتایج در شکل ۶ نشان داده‌شده‌است.

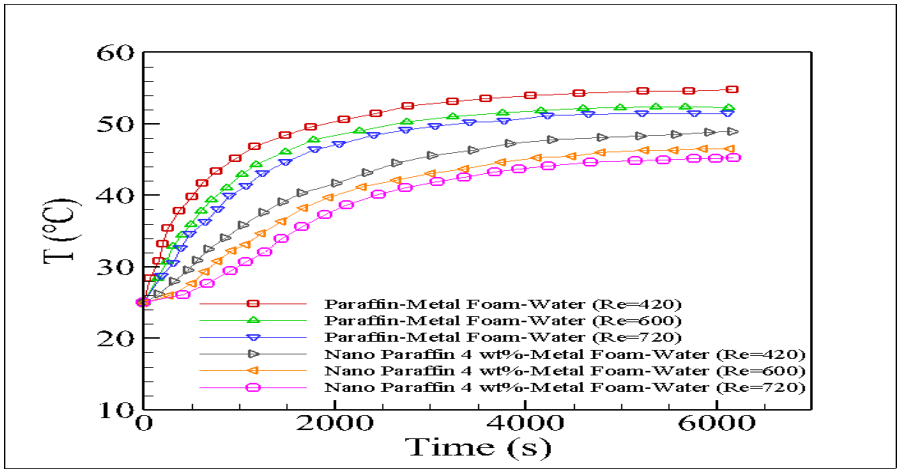
به منظور بررسی اثر اضافه‌کردن نانو ذرات تیتانیوم به ماده تغییرفازدهنده، به مقایسه‌ی نتایج حاصل از نانو پارافین آماده‌شده در درصدهای حجمی مختلف با حالت پارافین بدون نانو ذرات پرداخته‌شده‌است. در شکل ۷، نتایج تجربی حاصل برای تغییرات دمای بیشینه گرمکن برحسب زمان در پنج حالت مختلف پارافین خالص و نانوپارافین در چهار درصد حجمی مختلف داده‌شده‌است. با توجه به این شکل می‌توان مشاهده نمود که در همه حالتهای سیستم ترکیبی با پارافین خالص و نانو پارافین رفتاری مشابه دارند. با توجه به شکل ۷، میزان عملکرد خنک‌کاری سیستم به ازای اضافه‌کردن نانوذرات به پارافین، افزایش چشمگیری در مقایسه با حالت پارافین خالص داشته‌است. دمای ذوب پارافین ۴۲ تا ۴۴ درجه سلسیوس می‌باشد. با توجه به نتایج، اضافه‌کردن نانو ذرات به میزان ۴ درصد حجمی باعث به تاخیرانداختن زمان ذوب‌شدن پارافین به میزان ۱۲۹۱ ثانیه شده که باعث افزایش عملکرد خنک‌کاری ماده تغییرفازدهنده شده‌است. پس از گذشت یک ساعت و ۴۰ دقیقه از زمان شروع آزمایش، دمای باتری (گرمکن کتابی) در حالت‌های پارافین خالص، و نانوپارافین ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد حجمی به ترتیب برابر C^o ۵۶/۲ ، C^o ۵۱/۸ ، C^o ۵۰/۷ ، C^o ۴۹/۳ و C^o ۴۸ می‌باشد. با مقایسه دو حالت پارافین خالص و نانوپارافین ۴ درصد حجمی، مقدار تقریبی ۱۷٪ کاهش دما در اثر اضافه‌نمودن نانوذرات به پارافین بدست‌آمده‌است که بیانگر تاثیر مهم استفاده از نانوذرات در سیستم ترکیبی پیشنهادی می‌باشد..

۴-۲- سیستم ترکیبی خنک کاری با سیال عامل آب خالص

برای خنک‌کاری با سیال عامل آب خالص، دمای جریان ورودی ثابت و برابر ۲۴ درجه سلسیوس درنظر گرفته‌شده‌است. آزمایش در دو توان حرارتی مختلف ۴/۵ و ۱۴ وات و در سه عدد رینولدز جریان برابر ۴۲۰ و ۶۰۰ و ۷۲۰ انجام شده تا اثر خنک‌کاری با آب در کنترل دمای باتری بررسی شود. با توجه به نتایج بدست‌آمده از بخش قبل، سیستم خنک‌کاری با وجود فوم مسی و پارافین در بخش غیرفعال سیستم ترکیبی درنظر گرفته‌شده و نانوذرات در کسرحجمی ۴ درصد به پارافین اضافه‌شده‌است. در شکل ۸ نتایج تجربی بدست‌آمده برای تغییرات دمای بیشینه باتری (گرمکن کتابی) برحسب زمان و در



(الف)



(ب)

شکل ۸. تاثیر عدد رینولدز جریان آب خالص در سیستم ترکیبی با بخش فعال سیال عامل آب خالص و دو حالت بخش غیرفعال شامل پارافین-فوم فلزی و نانوپارافین ۴درصد– فوم فلزی در خنک‌کاری سیستم در توان‌های(الف) ۴/۵ وات و (ب) ۱۴ وات

Fig. 8. The effect of Reynolds number of pure water flow in a combined system with the active part of the pure water as working fluid and two cases in the passive part, including paraffin-metal foam and 4% nano-paraffin-metal foam in the cooling system at (a) 4.5 Watts and (b) 14 Watts

حالتهای مختلف ارائه شده‌است. باتوجه به شکل ۸-الف و برای توان حرارتی ۴/۵، مشاهده می‌شود که در عدد رینولدز ۴۲۰، دمای گرمکن کتابی در حالت استفاده از سیستم ترکیبی پارافین خالص- فوم مسی- جریان سیال عامل آب، پس از تقریبا ۳۵۱۶ ثانیه به مقدار پایدار ۳۸/۱ درجه سلسیوس رسیده و از بیشینه دما ۶۰ درجه سلسیوس تجاوز نکرده‌است. همچنین در عدد رینولدز ۶۰۰، دمای گرمکن در حالت استفاده از سیستم ترکیبی پارافین خالص-فوم مسی-جریان سیال عامل آب، پس از ۲۸۹۲ ثانیه به مقدار پایدار ۳۷ درجه سلسیوس رسیده‌است که همانند حالت قبل از دمای ۶۰ درجه سلسیوس تجاوز نکرده‌است. با مقایسه این دو مقدار عدد رینولدز نتیجه می‌شود که

استفاده از فوم مسی و جریان سیال عامل آب خالص، موجب کاهش به ترتیب ۴۰ ٪ و ۴۱/۵٪ در دمای باتری شده‌است. در عدد رینولدز ۷۲۰ دمای باتری به دمای پایدار ۳۷/۱ درجه سلسیوس رسیده که نسبت به حالت بدون فوم مسی، موجب کاهش ۴۱/۲٪ در بیشینه دمای باتری شده‌است. البته باید به این نکته توجه کرد که در حالت بدون فوم مسی، دمای باتری اصلا به میزان پایدار نرسیده‌است. همچنین در عددهای رینولدز ۶۰۰ و ۷۶۰، زمان رسیدن دمای باتری به حالت پایدار به ترتیب ۲۸۹۲ و ۴۵۶۴ ثانیه می‌باشد. با افزایش عدد رینولدز مشاهده می‌شود که نمودار تغییرات دمای باتری به هم نزدیک‌تر می‌شوند که گویای این مطلب می‌باشد که تاثیر افزایش عدد رینولدز در توان‌های پایین در کاهش دمای باتری، دارای حد بالایی بوده و بیشتر از آن مقدار، افزایش دبی جریان تاثیری بر خنک‌کاری باتری ندارد. بنابراین در توان ۴/۵ وات و با وجود فوم مسی، در هیچ عدد رینولدزی دمای سطح باتری به بیشینه ۶۰ درجه سلسیوس نرسیده و لذا می‌توان از سیستم خنک‌کاری آب به همراه پارافین و فوم مسی، به خوبی در توان‌های حرارتی پایین استفاده کرد و نیازی به استفاده از نانوپارافین وجود ندارد. در مقایسه با خنک‌کاری باتری با پارافین بدون فوم مسی مشاهده می‌شودکه اضافه‌کردن فوم مسی نقش قابل توجهی در کنترل دمای باتری داشته و نه تنها از ذوب‌شدن پارافین جلوگیری کرده بلکه دمای باتری را نیز پایدار نگه‌داشته‌است. با توجه به شکل ۸-الف، افزودن نانو ذرات به پارافین خالص با ترکیب فوم مسی و جریان آب، باعث کاهش چشمگیر دمای گرمکن شده‌است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که در جریان سیال عامل آب با عدد رینولدز ۴۲۰، مقدار دمای گرمکن پس از ۲۵۶۳ ثانیه به دمای پایدار ۳۴ درجه سلسیوس رسیده که در مقایسه با حالت پارافین خالص، در همین زمان حدودا ۳ درجه سلسیوس کاهش دما داشته‌است. همچنین در عدد رینولدز جریان برابر با ۶۰۰، مقدار دمای گرمکن بعد از ۲۸۷۵ ثانیه به دمای پایدار ۳۳ و در عدد رینولدز برابر با ۷۲۰، مقدار دمای گرمکن بعد از ۴۲۴۴ ثانیه به دمای پایدار ۳۲/۵ درجه سلسیوس رسیده که در مقایسه با حالت پارافین خالص به ترتیب مقدار ۴ و ۴/۶ درجه سلسیوس کاهش دما را نشان می‌دهند.

با افزایش توان گرمکن کتابی به ۱۴ وات، مطابق شکل (۸- ب) مشاهده می‌شود که در هر سه عدد رینولدز جریان سیال آب در بخش فعال سیستم ترکیبی، سیستم مدیریت گرمایی قادر است تا دمای پایدار باتری را در کمتر از ۶۰ درجه سلسیوس نگه دارد. در عدد رینولدز ۴۲۰ و در حالت استفاده از فوم مسی و پارافین خالص، پس

جدول ۲. نتایج بدست‌آمده در سیستم ترکیبی خنک‌کاری با نانو پارافین-فوم مسی و جریان سیال عامل آب در سه عدد رینولدز و دو توان حرارتی متفاوت

Table 2. Results obtained in a combined cooling system with nano-paraffin-copper foam and water as working fluid flow in three Reynolds numbers and two different thermal powers

	Re=720		Re=600		Re=420	
	P=14 (W)	P=4.5 (W)	P=14 (W)	P=4.5 (W)	P=14 (W)	P=4.5 (W)
رسیدن به دمای پایدار	✓	✓	✓	✓	✓	✓
دمای نهایی سطح باتری	۴۴	۳۲/۵	۴۶/۵	۳۳/۹	۴۸/۹	۳۴/۹
زمان رسیدن به دمای نهایی	۶۲۳۴	۷۸۲۳	۶۱۳۹	۷۷۲۳	۶۱۶۷	۷۶۹۲
زمان شروع ذوب شدن پارافین	۱۸۲۶	-	۱۹۲۷	-	۱۶۷۴	-
مدت زمان ذوب شدن پارافین	۱۲۱۵	-	۱۲۹۳	-	۱۱۵۸	-

از ۱۶۷۴ ثانیه پارافین شروع به ذوب‌شدن می‌کند و پس از مدت زمان ۱۱۵۸ ثانیه دیگر، کاملا ذوب می‌شود. در طی مدت ذوب‌شدن، پارافین که ضریب هدایت حرارتی آن با اضافه‌شدن فوم مسی افزایش یافته‌است، حرارت را در خود جذب کرده و شیب افزایش دما در گرمکن کتابی را کاهش می‌دهد. در نهایت پس از ۳۲۲۹ ثانیه دیگر (حدود ۶۱۰۰ ثانیه از شروع ذوب‌شدن)، باتری به دمای پایدار ۵۳ درجه سلسیوس می‌رسد. در عددهای رینولدز ۶۰۰ و ۷۶۰، دمای پایدار گرمکن به ترتیب بعد از ۳۲۴۵ و ۴۲۲۲ ثانیه، به دمای ۵۱ و ۵۰/۶ درجه سلسیوس رسیده‌است. لذا مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز از ۴۲۰ به ۶۰۰ و ۷۲۰، به ترتیب کاهش ۴٪ و ۴/۶٪ در دمای نهایی باتری اتفاق افتاده‌است. همچنین با افزایش عدد رینولدز، شروع ذوب‌شدن پارافین به تاخیر افتاده و از ۱۶۷۴ ثانیه در عدد رینولدز ۴۲۰، به ۱۸۲۶ ثانیه در عدد رینولدز ۶۰۰ و ۱۹۲۷ ثانیه در عدد رینولدز ۷۲۰ افزایش یافته‌است. نتایج حاصل مشخص نمودند که در توان حرارتی ۱۴ وات برای سیستم حاضر، اگرچه افزایش عدد رینولدز موجب کاهش دمای باتری شده ولی این بهبود چندان قابل توجه نمی‌باشد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که اضافه‌شدن نانو ذرات به پارافین خالص و فوم مسی نقش بیشتری در کنترل دمای باتری داشته‌باشند.

باتوجه به شکل ۸-ب و برای توان حرارتی ۱۴ وات، افزودن نانوذرات به پارافین خالص باعث کاهش قابل توجهی در دمای گرم‌کن شده‌است. در عدد رینولدز ۴۲۰ و با استفاده از فوم مسی و نانو پارافین، پس از ۴۸۰۰ ثانیه به دمای پایدار ۴۸ درجه سلسیوس رسیده‌است و همچنین در عددهای رینولدز ۶۰۰ و ۷۲۰ پس از همین مدت زمان، به دمای پایدار ۴۶ و ۴۴ درجه سلسیوس رسیده‌است که تاثیر افزایش عدد رینولدز مشخص است. با توجه به نتایج این حالت در مقایسه با حالت پارافین خالص، افزودن نانوذرات به پارافین باعث کاهش دما به میزان ۱۱٪، ۱۲٪ و ۱۲/۵٪ در گرم‌کن شده‌است که تاثیر مثبت نانوپارافین بر سیستم ترکیبی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جهت درک بهتر اثر سیستم‌های مختلف حرارتی در خنک‌کاری باتری، خلاصه نتایج برای سیستم خنک‌کاری با نانوپارافین در جدول ۲ داده‌شده‌است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بر اساس یک سیستم ترکیبی معرفی‌شده توسط محققین قبلی، تاثیر افزودن نانوذرات به پارافین در سیستم ترکیبی شامل فوم مسی بطور تجربی مورد بررسی قرارگرفته‌است. سیستم خنک‌کاری ترکیبی شامل دو بخش فعال و غیرفعال می‌باشد. تاثیر افزودن نانوذرات برای دو نوع سیال عامل هوا و آب خالص در بخش فعال مورد توجه قرارگرفته‌است. همچنین عملکرد سیستم حرارتی ترکیبی با دو توان حرارتی ۴/۵ و ۱۴ وات درنظر گرفته‌شده‌است.

نتایج حاصل در حالت استفاده از سیال عامل هوا برای بخش فعال سیستم خنک‌کاری نشان داد که اولا وجود بخش غیرفعال با پارافین، پارافین-فوم مسی و نانو پارافین-فوم مسی برای نگه‌داشتن دمای باتری در محدوده ایمن ۶۰ درجه سلسیوس و مخصوصا در حالت کارکرد با توانهای حرارتی بالا (در این تحقیق ۱۴ وات) ضروری می‌باشد. این مطلب نشان داد که درصورت استفاده از سیال عامل هوا در بخش فعال سیستم، لزوما باید بخش غیرفعال سیستم بصورت ترکیب نانوپارافین-فوم مسی طراحی شود تا دمای باتری از دمای ایمن فراتر نرود. نتایج بدست‌آمده مشخص نمودند که با افزایش درصد حجمی نانوذرات اکسید تیتانیوم به پارافین در بخش غیرفعال سیستم ترکیبی، مقدار بیشینه دمای باتری به خوبی کاهش یافته‌است. به عنوان نمونه با استفاده از سیال عامل هوا در بخش فعال و در توان حرارتی ۴/۵ وات، میزان عملکرد خنک‌کاری سیستم به ازای اضافه‌کردن نانوذرات به پارافین، افزایش چشمگیری در مقایسه با حالت پارافین خالص داشته‌است بطوریکه اضافه‌کردن نانو ذرات در مقدار ۴ درصد حجمی، باعث به‌تاخیرانداختن زمان ذوب‌شدن پارافین به میزان ۱۲۹۱ ثانیه شده و لذا باعث افزایش عملکرد خنک‌کاری ماده تغییرفازدهنده شده‌است. در حالت استفاده از سیال عامل هوا در بخش فعال و پس از گذشت یک ساعت و ۴۰ دقیقه از زمان شروع آزمایش، دمای باتری (گرمکن کتابی) در حالت‌های استفاده از پارافین خالص، نانوپارافین ۱ تا ۴ درصد حجمی به ترتیب برابر $56/2\ C^{o}$ ، $51/8\ C^{o}$ ، $50/7\ C^{o}$ ، $49/3\ C^{o}$ و $48\ C^{o}$ بوده‌است. با مقایسه دو حالت پارافین خالص و نانوپارافین ۴ درصد حجمی، مقدار تقریبی ۱۷٪ کاهش دما مشاهده شده‌است. بنابراین افزودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی، افزایش زمان ذوب شدن پارافین و نیز باعث کاهش دمای باتری و پخش گرمای یکنواخت باتری شده‌است.

بررسی تاثیر نانوپارافین در سیستم ترکیبی با سیال عامل آب

نیز انجام شده و نتایج حاصل نشان‌دهنده تشابه روند کلی تاثیر اضافه‌نمودن نانو ذره به پارافین در سیستم با سیال عامل هوا است. تاثیر افزایش عدد رینولدز جریان سیال عامل آب خالص در محدوده مورد بررسی حاضر از ۴۲۰ تا ۷۲۰ و در توانهای حرارتی ۴/۵ و ۱۴ وات است. نتایج نشان دادند که در هر دو حالت استفاده از نانوپارافین و پارافین خالص، با افزایش عدد رینولدز اولا دمای پایدار باتری کاهش می‌یابد و ثانیا اختلاف دمای بیشینه باتری بین دو عدد رینولدز ۴۲۰ و ۶۰۰ در مقایسه با دو عدد رینولدز ۶۰۰ و ۷۲۰ و در یک زمان مشخص؛ کمتر می‌شود. هرچند که در حالت کلی دمای باتری در حالت استفاده از نانوپارافین حدودا ۴ درجه سلسیوس کمتر از حالت پارافین خالص است. لذا مقایسه نتایج بدست‌آمده در توان حرارتی ۴/۵ و ۱۴ وات بیانگر تاثیر زیاد افزایش رینولدز در توان‌های حرارتی کم بوده‌است. درنهایت نتایج حاضر مشخص نمودند که اگر توان حرارتی باتری زیاد و عدد رینولدز جریان سیال عامل کم باشد، استفاده از نانوپارافین در سیستم ترکیبی براحتی می‌تواند دمای باتری را کنترل نموده و در محدوده ایمن طراحی‌شده نگه دارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از مسئولین محترم آزمایشگاه نانوسیالات دانشگاه تهران و نیز مهندس مهرداد کیانی که در انجام این تحقیق کمک شایانی نمودند تشکر و قدردانی می‌کنند. همچنین از پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان برای حمایت از این تحقیق تشکر می‌شود.

مراجع

[1] X.T. Liu, Z.H. Chen, C.B. Zhang, J. Wu, A novel temperature-compensated model for power Li-ion batteries with dual-particle-filter state of charge estimation, Appl. Energy 123 (2014) 272–263.

[2] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, M. Ouyang, A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles, Journal of power sources, 288-272 (2013) 226.

[3] T. Wang, K. Tseng, J. Zhao, Development of efficient air-cooling strategies for lithium-ion battery module based on empirical heat source model, Applied Thermal Engineering, 529-521 (2015) 90.

[4] T. Zhang, Q. Gao, G. Wang, Y. Gu, Y. Wang, W. Bao, D. Zhang, Investigation on the promotion of temperature uniformity for the designed battery pack with liquid flow in cooling process, Applied Thermal Engineering, 116 662-655 (2017).

[5] R. Zhao, J. Gu, J. Liu, An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries, Journal of power sources, (2015) 273 1097-1089.

[6] B. Coleman, J. Ostanek, J. Heinzel, Reducing cell-to-cell spacing for large-format lithium ion battery modules with aluminum or PCM heat sinks under failure conditions, Applied energy, 26-14 (2016) 180.

[7] D.-w. Yoo, Y.K. Joshi, Energy efficient thermal management of electronic components using solid-liquid phase change materials, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 649-641 (2004) (4)4.

[8] B. Zalba, J.M. Marın, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Applied thermal engineering, 283-251 (2003) (3)23.

[9] P. Arndt, J. Dunn, R. Willix, Organic compounds as candidate phase change materials in thermal energy storage, Thermochimica acta, 68-55 (1984) 79.

[10] S. Shi, Y. Xie, M. Li, Y. Yuan, J. Yu, H. Wu, B. Liu, N. Liu, Non-steady experimental investigation on an integrated thermal management system for power battery with phase change materials, Energy Conversion and Management, 96-84 (2017) 138.

[11] A. Elgafy, K. Lafdi, Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials, Carbon, 3074-3067 (2005) (15)43.

[12] F. Bahiraei, A. Fartaj, G.-A. Nazri, Experimental and numerical investigation on the performance of carbon-based nanoenhanced phase change materials for thermal management applications, Energy Conversion and Management, 128-115 (2017) 153.

[13] D.D.W. Rufuss, L. Suganthi, S. Iniyan, P. Davies, Effects of nanoparticle-enhanced phase change material (NPCM) on solar still productivity, Journal of Cleaner Production, 29-9 (2018) 192.

[14] Z. Wang, X. Li, G. Zhang, Y. Lv, C. Wang, F. He, C. Yang, C. Yang, Thermal management investigation for lithium-ion battery module with different phase change materials, RSC advances, 42918-42909 (2017) (68)7.

[15] R. Mahamud, C. Park, Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity, Journal of Power Sources, (2011) (13)196 5696-5685.

[16] H. Park, A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles, Journal of power sources, 36-30 (2013) 239.

[17] T.-H. Tran, S. Harmand, B. Sahut, Experimental investigation on heat pipe cooling for Hybrid Electric Vehicle and Electric Vehicle lithium-ion battery, Journal of power sources, 272-262 (2014) 265.

[18] G. Fang, Y. Huang, W. Yuan, Y. Yang, Y. Tang, W. Ju, F. Chu, Z. Zhao, Thermal management for a tube–shell Li-ion battery pack using water evaporation coupled with forced air cooling, RSC advances, 9961-9951 (2019) (18)9.

[19] C. Lian, Y. Wang, Q. Li, H. Li, X. He, Numerical investigation on the performance of microencapsulated phase change material suspension applied to liquid cold plates, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 358-342 (2019) (5)75.

[20] J. Liang, Y. Gan, Y. Li, Investigation on the thermal performance of a battery thermal management system using heat pipe under different ambient temperatures, Energy Conversion and Management, 9-1 (2018) 155.

[21] M. Kiani, M. Ansari, A.A. Arshadi, E. Houshfar, 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, (13-1 (2020.

[22] M. Mashayekhi, E. Houshfar, M. Ashjaee, Development of hybrid cooling method with PCM and Al2O3 nanofluid in aluminium minichannels using heat source model of Li-ion batteries, Applied thermal engineering, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115543

[23] A. Hussain, I.H. Abidi, C.Y. Tso, K.C. Chan, Z. Luo, C.Y. Chao, Thermal management of lithium ion batteries using graphene coated nickel foam saturated with phase change materials, International journal of thermal sciences, 124 35-23 (2018).

[24] M. Mehrabi-Kermani, E. Houshfar, M. Ashjaee, A novel hybrid thermal management for Li-ion batteries using phase change materials embedded in copper foams combined with forced-air convection, International Journal of Thermal Sciences, 61-47 (2019) 141.

[25] Y.S. Ranjbaran, S.J. Haghparast, M. Shojaeefard, G. Molaeimanesh, Numerical evaluation of a thermal management system consisting PCM and porous metal foam for Li-ion batteries, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (23-1 (2019.

[26] J. Zhang, X. Li, F. He, J. He, Z. Zhong, G. Zhang, Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery module with paraffin/expanded graphite composite phase change material, International Journal of Photoenergy, 2017) 2017).

[27] Z. Ling, F. Wang, X. Fang, X. Gao, Z. Zhang, A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling, Applied energy, 409-403 (2015) 148.

[28] Y. Zhao, B. Zou, C. Li, Y. Ding, Active cooling based battery thermal management using composite phase change materials, Energy Procedia, 4940-4933 (2019) 158.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Malekipour, M. Sabzpooshani, E. Houshfar, Investigation on the effect of addition of nano-titanium oxide particles to phase change material in a hybrid system for battery cooling under constant heat flux, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 4379-4396.

DOI: 10.22060/mej.2021.18825.6897

این صفحه عمداً خالی است