

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Investigating the Thermal Properties of Hydrated Salt Phase Change Material Nanocomposites in the Prevention of Heat Stress

Elnaz Rahimi<sup>1</sup>, Saba Kalantary<sup>1</sup>, Aziz Babapoor<sup>2</sup>, Habibollah Dehghan<sup>3</sup>, Anoshirvan Kazemnejad<sup>4</sup>, Mohammadreza Monazzam Esmaeelpour<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, P.O. Box 179, Ardabil, Iran

<sup>3</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

<sup>4</sup>Department of Biostatistics, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 13 - 11 - 2024

Accepted: 19 - 5 - 2025

### ABSTRACT

**Introduction:** Wearable thermal management systems and phase change materials (PCMs) have emerged as effective solutions for regulating body temperature and storing thermal energy. This study focuses on synthesizing and thermal optimizing a sodium sulfate decahydrate-based nanocomposite incorporating various nanoparticles to improve its performance for personal thermal regulation applications.

**Material and Methods:** The composite was prepared using sodium sulfate decahydrate as the base PCM. Potassium chloride (KCl) was added to adjust the melting point, borax (STD) served as a nucleating agent, and sodium polyacrylate (SPA) was included as a thickening agent to suppress phase separation. To evaluate the effect of nanoparticle additives, 0.05 wt.% of aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), iron oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), graphene oxide (GO), and titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) were separately incorporated into the base formulation. A field emission scanning electron microscope (FESEM) was used to analyze the surface morphology of the resulting nanocomposites. Differential scanning calorimetry (DSC) assessed thermal properties, including phase transition temperatures (melting and freezing points) and latent heat.

**Results:** Differential scanning calorimetry (DSC) analysis indicated that sample S-5-5 comprising sodium sulfate decahydrate with 3 wt.% KCl, 5 wt.% STD and SPA exhibited a melting temperature of 29.5 °C and a latent heat of 120 J/g. This composition remained stable without phase separation. The incorporation of nanoparticles raised the melting point of the base PCM by 0.6 to 1.72 °C. Aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and iron oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) reduced the latent heat of fusion, whereas GO and TiO<sub>2</sub> increased it.

**Conclusion:** These findings confirm that the thermal properties of sodium sulfate decahydrate-based PCMs can be tailored by including specific additives and nanoparticles. Hydrated salt nanocomposites demonstrate strong potential as PCMs for wearable body temperature regulation.

**Keywords:** Heat stress, Phase change materials, Nanocomposite, Sodium sulfate decahydrate, Nanoparticles

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Rahimi E, Kalantary S, Babapoor A, Dehghan H, Kazemnejad A, Monazzam Esmaeelpour M. Investigating the Thermal Properties of Hydrated Salt Phase Change Material Nanocomposites in the Prevention of Heat Stress. *J Health Saf Work.* 2025; 15(2): 271-287.

## 1. INTRODUCTION

Prolonged exposure to high temperatures can adversely affect workers' health and reduce productivity. Several strategies have been developed to mitigate heat stress, with wearable technologies representing a recent and promising solution.

Integrating phase change materials (PCMs) into clothing has shown considerable potential for regulating body temperature. PCMs absorb or release latent heat during phase transitions in response to temperature fluctuations, thereby maintaining thermal equilibrium. These materials are widely recognized for their applicability

\* Corresponding Author Email: [smaeel@tums.ac.ir](mailto:smaeel@tums.ac.ir)

Table 1: Thermal-physical properties of nanoparticles

Nanoparticle	Purity	Particle size (nm)	Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	Morphology	color	Thermal conductivity (W/m K)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> gamma	>99%	50-80	138	Hemisphere	White	41.1	3.65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	>99%	50-80	40-80	Oval shape	Dark red	6.4	5.25
GO	>99%	Thickness 3-6	120	Layered	Gray	72	0.43
TiO <sub>2</sub>	>99%	18	60	Spherical	White	8.4	3.9

Table 2: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O-3 wt.% KCl composite with different content of STD and SPA

Samples	STD and SPA content	
	STD (wt.%)	SPA (wt.%)
S-3-3	3	3
S-5-3	5	3
S-5-5	5	5

in thermal energy storage systems. PCMs are generally categorized into three main types: organic, inorganic, and eutectic compounds.

Hydrated inorganic salts have gained considerable attention as phase change materials due to their high latent heat storage capacity, tunable phase transition temperatures, cost-efficiency, and non-flammability, advantages that make them favorable over organic alternatives. However, their practical use remains limited by certain drawbacks, including low thermal conductivity, phase separation, and supercooling. Researchers have investigated the use of various additives to mitigate these limitations. Supercooling can be reduced by incorporating nucleating agents such as eutectic salts or nanoparticles, while phase separation can be minimized by introducing hydrophilic polymers.

This study aimed to synthesize and evaluate the thermal properties of a sodium sulfate decahydrate-based nanocomposite incorporating four types of nanoparticles, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, GO, and TiO<sub>2</sub>, for potential use in body thermal management. KCl was added to adjust the melting point, while borax (STD, Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O) acted as a nucleating agent. SPA was used as a thickening agent to inhibit phase separation. A composite comprising sodium sulfate decahydrate, KCl, STD, and SPA was synthesized to improve structural stability. The influence of nanoparticle addition on melting temperature and latent heat was subsequently investigated.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### A. Materials

Dry sodium sulfate (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 99% purity)

was obtained from Kian Kaveh. KCl (98% purity), SPA, and borax (STD) were also used. The nanoparticles included gamma-phase Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, both supplied by ARMINANO (Iran); GO from United Nanotech (India); and anatase-phase TiO<sub>2</sub> from US-NANO (USA). The physicochemical characteristics of the nanoparticles are summarized in Table 1.

### B. Sample preparation

The sodium sulfate decahydrate composite was prepared using a simple mixing method. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O was initially synthesized by dissolving sodium sulfate in distilled water at a stoichiometric molar ratio of 1:10. Subsequently, 3 wt.% KCl was added to reduce the melting temperature. STD and SPA were then introduced as nucleating and thickening agents, respectively. The mixture was stirred at 40 °C for 20 minutes and then subjected to ultrasonic dispersion for 30 minutes to ensure homogeneity. Table 2 presents the composition of the base PCM samples with varying weight percentages of each component.

Based on the thermal property analysis, Sample S-5-5 was selected as the optimal PCM. In the subsequent stage, 0.05 wt.% of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, GO, and TiO<sub>2</sub> nanoparticles were individually incorporated into the selected PCM to evaluate the effect of minimal nanoparticle addition on latent heat and melting temperature. Each nanoparticle was mixed with the base PCM using mechanical stirring at 40 °C, followed by ultrasonic dispersion for 30 minutes to ensure uniform distribution.

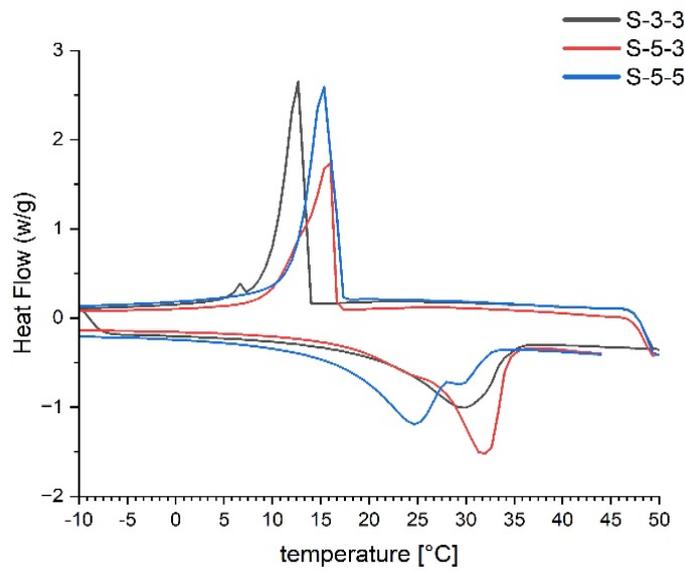


Fig. 1: DSC analysis of base PCM

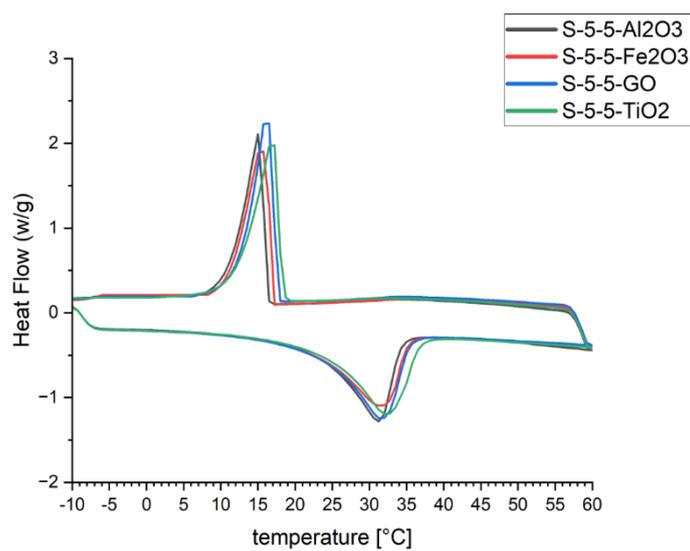


Fig. 2: DSC analysis of

### C. Analysis

The surface morphology of the PCM nanocomposites was examined using a FESEM (TESCAN MIRA II, Czech Republic). Thermal properties, including phase transition temperatures (melting and freezing) and latent heat, were measured using DSC (TA Instruments Q600, USA). The analysis was performed under an argon gas flow rate of 50 mL/min, within a temperature range of -10 to 60 °C, and at a constant heating rate of 5 °C/min.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### A. Morphology

FESEM analysis of the samples containing 0.05 wt.% nanoparticles revealed uniform and homogeneous nanoparticle dispersion without noticeable aggregation. Distinct morphological variations were observed across the different nanoparticle types. The sample containing TiO<sub>2</sub> nanoparticles exhibited a denser and smoother microstructure than the others. The characteristic layered structure of graphene oxide (GO) was

Table 3: Thermal properties of PCM samples

samples	Melting(°C)			Freezing(°C)		
	ONSET temperature	Peak temperature	Latent heat (J/gr)	ONSET temperature	Peak temperature	Latent heat (J/gr)
S-3-3	20.33	28.99	103.89	14.98	14.17	94.84
S-5-3	31.07	36.16	120.054	20.90	16.63	95.89
S-5-5	21.81	29.50	120	21.76	16.34	110.44
S-5-5-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.88	30.11	114.94	16.5	15	100.14
S-5-5-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.59	30.39	111.79	17.25	15.75	106.65
S-5-5-GO	23.13	30.57	120.25	18	16.5	112.73
S-5-5-TiO <sub>2</sub>	23.69	31.22	121.68	18.75	17.25	110.62

visible in its corresponding images. In contrast, the sample with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> showed bulky microstructures with rough surfaces. The formation of larger granules by aggregating smaller particles suggests strong nucleation activity associated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles.

#### B. Thermal analysis

Figure 1 shows the DSC curves for the three base PCM composites, while Figure 2 presents the DSC results for the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, GO, and TiO<sub>2</sub> nanocomposites based on the optimized PCM. In both figures, the lower curves correspond to the melting process, during which the PCM absorbs and stores thermal energy, and the upper curves represent the freezing process, where the material releases this stored energy. The melting and freezing temperatures and the latent heat values for each sample are listed in Table 3. Among the base PCM samples, S-3-3 exhibited a melting temperature of 28.99 °C, which fell within an acceptable range but showed relatively low latent heat. The S-5-3 sample had a higher melting temperature of 36.16 °C, which could be less desirable for body thermal management applications. The S-5-5 sample, with a melting temperature of 29.5 °C and latent heat of 120 J/g, demonstrated the most balanced thermal performance and was selected for further modification using nanoparticles. Following the addition of 0.05 wt.% nanoparticles, the melting temperatures and latent heat values for the nanocomposite samples were as follows: S-5-5-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> exhibited a melting temperature of 30.11 °C with a latent heat of 114.94 J/g; S-5-5-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> showed 30.39 °C and 111.79 J/g; S-5-5-GO recorded 30.57 °C and 120.25 J/g; and S-5-5-TiO<sub>2</sub> reached 31.22 °C with a latent heat of 121.68 J/g. These results indicate that nanoparticle addition slightly increased the melting point and had varying effects on latent heat,

depending on the nanoparticle type.

#### 4. CONCLUSIONS

This study addressed the limitations of hydrated salt-based PCMs, specifically sodium sulfate decahydrate (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O), by incorporating 3 wt.% KCl to adjust the melting point, 3 wt.% sodium polyacrylate (SPA) and 5 wt.% borax (STD) to improve phase stability and prevent separation. The thermal behavior of the optimized PCM was further modified by introducing a low concentration (0.05 wt.%) of four different nanoparticles: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, GO, and TiO<sub>2</sub>. The melting temperatures of the resulting nanocomposites were lower than that of pure Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O (32.4 °C), yet increased by 0.6–1.72 °C compared to the base PCM composite. The type of nanoparticle also affected latent heat values: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> led to a reduction, whereas GO and TiO<sub>2</sub> resulted in a slight increase.

Overall, the findings indicate that incorporating carefully selected additives and nanoparticles can improve the thermal performance of hydrated salt PCMs. However, the effectiveness of these modifications depends on each additive's precise composition and concentration. Future research should focus on exploring a broader range of nanoparticles and optimizing their concentrations to further enhance the stability, efficiency, and applicability of PCMs for thermal energy storage and wearable cooling systems.

#### 5. ETHICAL CODE

IR.TUMS.SPH.REC.1402.192

#### 6. FUNDING

This research has been supported by Tehran University of Medical Sciences and Health Services grant (Grant No. 1402-4-294-68694).

## بررسی خواص حرارتی نانوکامپوزیت تغییر فاز دهنده نمک هیدراته در پیشگیری از استرس گرمایی

الناز رحیمی<sup>۱</sup>، صبا کلانتری<sup>۱</sup>، عزیز باباپور<sup>۲</sup>، حبیب اله دهقان<sup>۳</sup>، انوشیروان کاظم نژاد<sup>۴</sup>، محمدرضا منظم اسمعیل پور<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup>گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

<sup>۳</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران

<sup>۴</sup>گروه آمار زیستی، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۲۹

### چکیده

**مقدمه:** امروزه، استفاده از فناوری های پوشیدنی و مواد تغییر فاز دهنده (PCM) گزینه مناسبی برای کنترل حرارت بدن و ذخیره سازی انرژی حرارتی می باشد. از این رو هدف از این مطالعه، سنتز و بهینه سازی خواص حرارتی نانوکامپوزیت سدیم سولفات دکاهیدرات با استفاده از نانوذرات مختلف به منظور کاربرد مدیریت حرارتی بدن می باشد

**روش کار:** در این مطالعه کامپوزیت سدیم سولفات دکاهیدرات با استفاده از پتاسیم کلرید (KCL) به منظور تنظیم دمای ذوب، بوراکس (STD) به عنوان ماده هسته ساز و سدیم پلی اکریلات (SPA) به عنوان عامل تغلیظ کننده و جلوگیری از جداسازی فاز سنتز شد. سپس تاثیر افزودن ۰/۰۵ wt.% از هر کدام از نانوذرات اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ )، اکسید آهن ( $Fe_2O_3$ )، گرافن اکساید (GO) و تیتانیوم دی اکسید ( $TiO_2$ ) بر خواص حرارتی PCM پایه بررسی شد. از میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی (FESEM) جهت بررسی مورفولوژی سطحی نانوکامپوزیت های PCM و از آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) جهت بررسی خصوصیات حرارتی از جمله دمای تغییر فاز (ذوب و انجماد) و گرمای نهان نمونه ها استفاده گردید.

**یافته ها:** با توجه به نتایج آنالیز DSC، نمونه ۵-۵-S سدیم سولفات دکاهیدرات حاوی ۳ wt.% KCL و ۵ wt.% STD و SPA با دمای ذوب ( $29/5^{\circ}C$ ) و گرمای نهان ( $120 J/gr$ )، به عنوان نمونه مناسب شناخته شد که فاقد جداسازی فاز بود. همچنین، تمام نانوذرات باعث افزایش ۱/۷۲- ۰/۶ درجه ای دمای ذوب PCM پایه شدند. نانوذرات  $Fe_2O_3$  و  $Al_2O_3$  باعث کاهش گرمای نهان ذوب و نانوذرات GO و  $TiO_2$  باعث افزایش گرمای نهان ذوب شدند.

**نتیجه گیری:** نتایج نشان داد با استفاده از مواد افزودنی و نانوذرات می توان خواص حرارتی PCM ها را بهبود بخشید. نانوکامپوزیت های نمک های هیدراته می توانند به عنوان PCM های امیدوار کننده در کاربرد مدیریت حرارتی بدن در نظر گرفته شوند.

**کلمات کلیدی:** استرس گرمایی، مواد تغییر فاز دهنده، نانوکامپوزیت، سدیم سولفات دکاهیدرات، نانوذرات.

## مقدمه

امروزه روند افزایشی دمای جهانی باعث تشدید نگرانی جامعه علمی شده است و به دنبال آن بروز بیماری‌ها و صدمات ناشی از گرما در محیط‌های شغلی، چالشی برای مدیریت بهداشت حرفه‌ای محسوب می‌شود (۱). تنش گرمایی ارتباط بسیار مهمی با کاهش عملکرد کاری دارد، به عبارت دیگر، مواجهه با گرما می‌تواند باعث آسیب بر سلامت کارگران (دهیدراسیون، افزایش دمای داخلی بدن، تعریق بیش از حد، اختلالات روانی، افزایش ضربان قلب و گرمزدگی) و کاهش بهره‌وری آن‌ها شود (۲). بسیاری از کارگران در معادن، شیشه‌سازی، ریخته‌گری، صنعت فولاد و ذوب آهن و همچنین در فضاهای کاری روباز مانند صنعت ساخت و ساز، عملیات چاه‌های نفت و گاز، کشاورزی و باغبانی دچار استرس گرمایی می‌شوند (۳). ۷ درصد از نیروی کار ایالات متحده در صنعت ساختمان مشغول به کار هستند، اما ۳۸ درصد از کل مرگ و میرهای ناشی از مواجهه با گرما در سال ۲۰۲۰ مربوط به این صنعت است (۴). از نقطه نظر فیزیولوژیکی، مواجهه با گرما می‌تواند منجر به نیاز بدن انسان به دفع گرمای ذخیره شده در زمانی که دمای هوا بالاتر از دمای پوست است و همچنین دفع گرمای تولید شده به واسطه فعالیت‌های فیزیکی خود انسان شود. در این شرایط، سیستم تنظیم کننده حرارت انسان، مکانیسم‌های مناسب (اتساع عروق و تعریق) را فعال می‌کند تا سعی کند دمای داخلی بدن (CT) را در محدوده ایمن نگه دارد. هنگامی که این مکانیسم‌ها ناکافی باشند، دمای داخلی بدن شروع به افزایش تدریجی می‌کند، که باعث استرین گرمایی می‌شود و احتمال آسیب‌های شغلی را افزایش می‌دهد. بنابراین، نیاز به پیشنهاد راه‌حل‌های کاهش و سازگاری برای مقابله با استرین گرمایی شغلی وجود دارد (۵).

با توجه به ماهیت آسیب‌های ناشی از مواجهه با گرما راهکارهای مختلفی برای مقابله با آن پیشنهاد شده است که فناوری‌های پوشیدنی راهکارهای جدیدی هستند که برخی از آن‌ها در راستای پایش فیزیولوژیک بدن در

شرایط گرما و برخی دیگر در راستای کنترل حرارت بدن طراحی می‌شوند و انواع مختلفی دارند (۶، ۷). استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCMs<sup>۲</sup>) می‌تواند نقش موثری در کنترل حرارتی بدن داشته باشد. مواد تغییر فاز دهنده با افزایش یا کاهش دما از حالتی به حالت دیگر تغییر فاز داده و با حفظ تعادل دمایی، گرمای نهان را انباشت می‌کنند و انتخاب مناسبی برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی هستند (۸). به طور کلی، PCMها به سه دسته آلی، غیرآلی و یوتکتیک تقسیم می‌شوند (۹). با دسترسی به بسیاری از PCMهای آلی و غیرآلی، نیاز به انتخاب مناسب‌ترین PCM به منظور کنترل حرارتی بدن انسان می‌باشد. این مواد در ظرفیت ذخیره گرما و دمای تغییر فاز با هم متفاوت هستند. انتخاب ماده PCM مناسب جهت کاربردهای مختلف با توجه به معیارهایی انجام می‌شود که از جمله‌ی این معیارها می‌توان به مواردی مانند گرمای نهان بالا، هدایت حرارتی بالا، ظرفیت ذخیره گرمای بالا، فاقد فراسرمایش یا فوق تیرید<sup>۳</sup> کمتر، پایداری مکانیکی و شیمیایی خوب، غیرسمی، اشتعال ناپذیر، غیر قابل انفجار و غیرخورنده اشاره نمود (۱۰). می‌توان دو یا چند ماده را با هم مخلوط کرد تا به دمای تغییر فاز مورد نیاز برای کاربرد خاص رسید. برای سیستم لباس حفاظتی، دمای جذب گرما می‌تواند بین ۴۰-۲۰ °C باشد (۱۱).

نمک‌های هیدراته غیرآلی به دلیل ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای بالا، دمای تغییر فاز مناسب و قابل تنظیم، مقرون به صرفه بودن و عدم اشتعال پذیری نسبت به همتایان آلی خود، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند (۹، ۱۲-۱۴). از این مواد به منظور کنترل دمای ساختمان‌ها در محدوده آسایش و مدیریت انرژی حرارتی تجهیزات الکترونیکی و بدن انسان‌ها استفاده می‌شود (۱۵، ۱۶). PCMهای نمکی علی‌رغم مزایایی که دارند، برخی معایب از جمله جدایی فاز و فوق تیرید دارند که در مطالعات مختلف تلاش می‌شود با استفاده از مواد افزودنی این معایب برطرف شود (۱۷). فوق تیرید به دلیل قدرت هسته‌سازی ضعیف رخ می‌دهد و می‌توان آن را با افزودن

2. Phase Change Materials (PCM)

3. Supercooling

1. Core temperature

عملکرد حرارتی نمک‌های هیدراته نشان داد (۲۴). بنابراین، با توجه به اینکه سدیم سولفات دکاهیدرات معایبی مانند جداسازی و ته نشینی فاز جامد دارد، مطالعه در راستای رفع معایب و ارتقا خواص آن اهمیت دارد. هدف از این مطالعه، سنتز و بررسی خواص حرارتی نانوکامپوزیت سدیم سولفات دکاهیدرات با استفاده از چهار نانوذره  $Al_2O_3$ ،  $Fe_2O_3$ ،  $GO$  و  $TiO_2$  به منظور کاربرد مدیریت حرارتی بدن می باشد. در این راستا، از پتاسیم کلرید ( $KCl$ )<sup>۱۳</sup> به منظور تنظیم دمای ذوب، بوراکس یا سدیم تترابورات دکاهیدرات ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ )<sup>۱۴</sup> به عنوان ماده هسته ساز و سدیم پلی اکریلات ( $SPA$ )<sup>۱۵</sup> به عنوان عامل تغلیظ کننده و جلوگیری از جداسازی فاز استفاده شد. بدین منظور، کامپوزیت سدیم سولفات دکاهیدرات با مواد  $KCl$ ،  $STD$  و  $SPA$  برای بهبود ساختار آن سنتز و سپس تاثیر افزودن نانوذرات بر دمای ذوب و گرمای نهان مورد بررسی قرار گرفت.

### روش کار

#### ۱- مواد

در این مطالعه از سدیم سولفات خشک ( $Na_2SO_4$ ) کیان کاوه با خلوص ۹۹ درصد، پتاسیم کلرید ( $KCl$ ) با خلوص ۹۸ درصد، سدیم پلی اکریلات ( $SPA$ ) و بوراکس ( $STD$ ) استفاده شده است. نانوذرات مورد استفاده شامل، آلومینیوم دی اکسید ( $Al_2O_3$ ) گاما ( $ARMINANO$  شرکت آرمینا، ایران)، اکسید آهن ( $Fe_2O_3$ ) ( $ARMINANO$  شرکت آرمینا، ایران)، گرافن اکساید ( $GO$ ) ( $United Nanotech Innovations$  شرکت،  $US-NANO$  هند)، تیتانیوم دی اکسید ( $TiO_2$ ) آناز ( $US-NANO$  شرکت،  $US-Nano$  آمریکا) هستند که مشخصات این نانوذرات در جدول ۱ ارائه شده است.

10. Iron oxide
11. Graphene oxide
12. Titanium dioxide
13. Potassium chloride
14. Sodium Tetraborate Decahydrate (borax)
15. Sodium polyacrylate

یک ماده هسته ساز مانند یک نمک یوتکتیک یا نانوذرات کنترل نمود (۱۸). جداسازی فاز را نیز می توان با افزودن پلیمرهای آب دوست مانند پلی اکریل امید<sup>۱</sup>، پلی وینیل الکل<sup>۲</sup>، کربوکسی متیل سلولز ( $CMC^3$ ) یا ژلاتین کنترل کرد (۱۹-۲۱). Han و همکارانش (۲۰۲۰) در پژوهش خود، به نمک کلرید ( $MgCl_2:KCl:NaCl$ ) به عنوان PCM پایه، نانوذرات  $Al_2O_3$ <sup>۴</sup>،  $CuO$ <sup>۵</sup> و  $ZnO$ <sup>۶</sup> را به مقدار ۷۰ wt.% اضافه نمودند. نتایج نشان داد دمای ذوب نانوکامپوزیت جدید به PCM پایه بسیار نزدیک است. همچنین، گرمای نهان کمی کمتر شده بود اما هدایت حرارتی افزایش یافته بود که این افزایش در نانوکامپوزیت  $Al_2O_3$  بسیار مشهود (۴۸ درصد) بود. همچنین پایداری حرارتی افزایش یافته بود. لذا، در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که نانوذرات  $Al_2O_3$  می تواند به عنوان یک افزودنی بهینه برای بهبود خواص حرارتی نمک‌های کلرید در نظر گرفته شود (۲۲). در بین تمام انواع نمک های هیدراته، سدیم سولفات دکاهیدرات<sup>۷</sup> ( $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ) یا نمک گلوبر<sup>۸</sup> (دمای ذوب  $32/4^\circ C$ ) به عنوان ماده‌ای که دمای تغییر فاز آن نزدیک دمای بدن انسان است، در مطالعات مختلفی برای کنترل حرارتی بدن انسان مورد بررسی قرار گرفته است (۲۳). Luo و همکارانش (۲۰۲۲) در پژوهشی به منظور مدیریت حرارتی بدن، کامپوزیت آلزینات کلسیم و سدیم پلی اکریلات را با  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  سنتز نمودند. PCM جدید، جداسازی فاز و فوق تبرید نداشت. همچنین، گرمای نهان، هدایت حرارتی و پایداری حرارتی در کامپوزیت بدست آمده افزایش یافت (۲۳). Tao و همکارانش (۲۰۲۰) نیز، نانوکامپوزیت  $GO-SiO_2$ <sup>۹</sup> /  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  را آماده نمودند. نتایج نشان داد که PCM آماده شده، فوق تبرید پایین، گرمای نهان و هدایت حرارتی خوبی دارد و  $GO-SiO_2$  چشم انداز کاربردی مفیدی را برای بهبود

1. Polyacrylamide
2. Polyvinyl alcohol
3. Carboxymethyl cellulose
4. Aluminum oxide
5. Cupric oxide
6. Zinc oxide
7. Sodium sulfate decahydrate
8. Glauber's Salt
9. Silicon dioxide

جدول ۱: خواص حرارتی-فیزیکی نانوذرات

چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	هدایت حرارتی (W/m K)	رنگ	مورفولوژی	مساحت سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	اندازه ذره (nm)	خلوص	نانوذره
۳/۶۵	۴۱/۱	سفید	نیمه کره‌ای	۱۳۸	۵۰-۸۰	>۹۹٪	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> gamma
۵/۲۵	۶/۴	قرمز تیره	بیضی شکل	۴۰-۸۰	۵۰-۸۰	>۹۹٪	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۴۳	۷۲	خاکستری	لایه‌ای	۱۲۰	ضخامت ۳-۶	>۹۹٪	GO
۳/۹	۸/۴	سفید	کره‌ای	۶۰	۱۸	>۹۹٪	TiO <sub>2</sub>

جدول ۲: کامپوزیت Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O-3wt.% KCL با محتوای متفاوت STD و SPA

محتوای STD و SPA		نمونه ها
STD (wt.%)	SPA(wt.%)	
۳	۳	S-3-3
۵	۳	S-5-3
۵	۵	S-5-5*

\*S(sample) سدیم سولفات دکاهیدرات حاوی ۳ درصد وزنی KCL، که دارای ۵ درصد وزنی SPA و ۵ درصد وزنی STD می باشد. نمونه های دیگر نیز به همین ترتیب بوده و اعداد نشانه مقدار درصد وزنی می باشد.

## ۲- آماده‌سازی نمونه

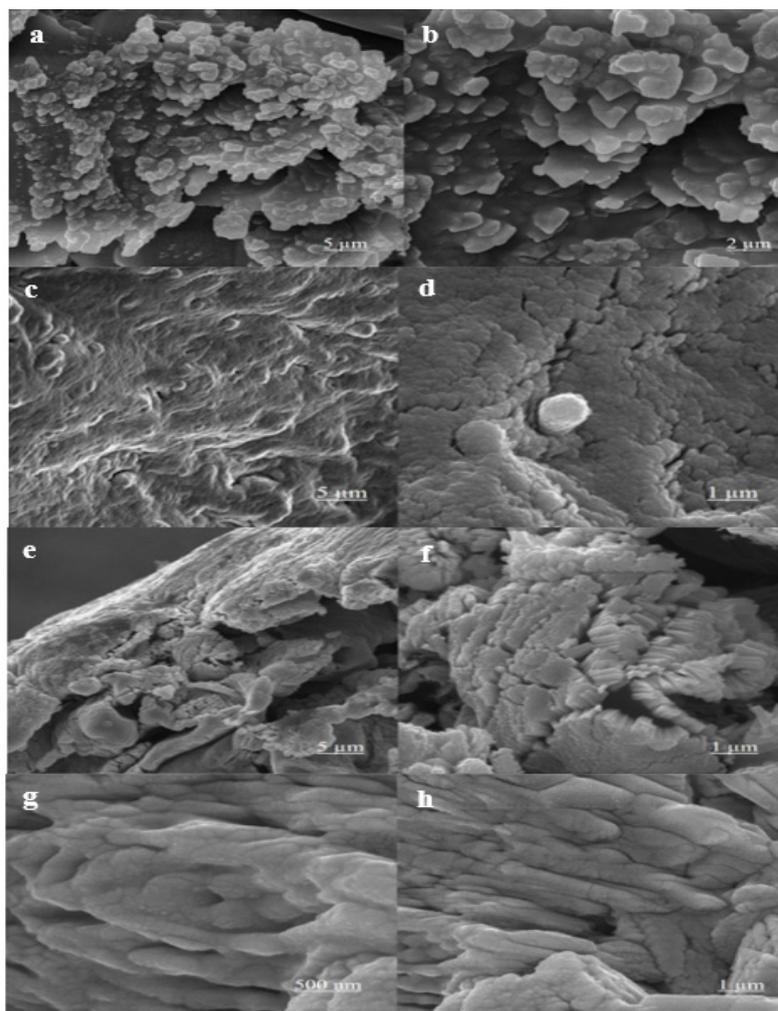
کامپوزیت سدیم سولفات دکاهیدرات به روش مخلوط سازی ساده<sup>۱</sup> با استفاده از استیرر آماده گردید. ابتدا Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O، با استفاده از سدیم سولفات و آب مقطر به نسبت استوکیومتری ۱۰ مول سنتز شد. سپس، KCL به مقدار ۳ درصد وزنی (۳ wt.%) جهت کاهش چند درجه‌ای دمای ذوب اضافه گردید. در مرحله بعد، STD به عنوان عامل هسته‌سازی و SPA به عنوان عامل تغلیظ‌کننده به نمونه اضافه گردید. نمونه‌ها بر روی استیرر ۴۰ °C به مدت ۲۰ دقیقه هم زده شد و به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از دستگاه همزنایزر پروب‌دار به روش اولتراسونیک دیسپرس شدند. جدول ۲، نمونه‌های PCM پایه با درصدهای وزنی مختلف از مواد را نشان می‌دهد (۲۵).

با توجه به ویژگی ظاهری نمونه‌ها از جمله عدم جداسازی فازی و ژلی بودن و همچنین بررسی خواص حرارتی نمونه‌های مورد نظر (دمای ذوب و گرمای نهان مناسب)، نمونه S-5-5 به عنوان PCM بهینه و نهایی انتخاب شد. در مرحله بعد، از هر کدام از نانوذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، GO و TiO<sub>2</sub> به مقدار ۰/۰۵ درصد وزنی (۰/۰۵ wt.%) بر اساس مطالعات پیشین (۲۶)، به نمونه PCM بهینه شده اضافه شد تا تاثیر کمترین مقدار از نانوذرات بر گرمای نهان و دمای ذوب مورد بررسی قرار گیرد. PCM پایه و نانوذرات بر روی استیرر ۴۰ °C مخلوط شده و به مدت ۳۰ دقیقه به روش اولتراسونیک دیسپرس شدند (۲۵).

۳- بررسی ویژگی‌های سطحی (مورفولوژی) و خصوصیات حرارتی نانوکامپوزیت‌های سنتز شده

مورفولوژی سطحی نانوکامپوزیت‌های PCM با

1. Simple Blending



شکل ۱: تصاویر FESEM نمونه های PCM دارای ۰/۰۵ wt.% نانوذرات مختلف.  
a, b) S-5-5+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c, d) S-5-5+ Fe<sub>3</sub>O<sub>3</sub>, e, f) S-5-5+ GO, g, h) S-5-5+ TiO<sub>2</sub>

شده قرار می گیرد که به منظور ایجاد انتقال فاز، یعنی ذوب یا انتقال شیشه‌ای است. ترموگرام حاصل، خواص مواد مانند دمای انتقال فاز، دمای شروع ذوب و انجماد، بیک دمای ذوب و انجماد و آنتالپی را ارائه می دهد (۲۷)

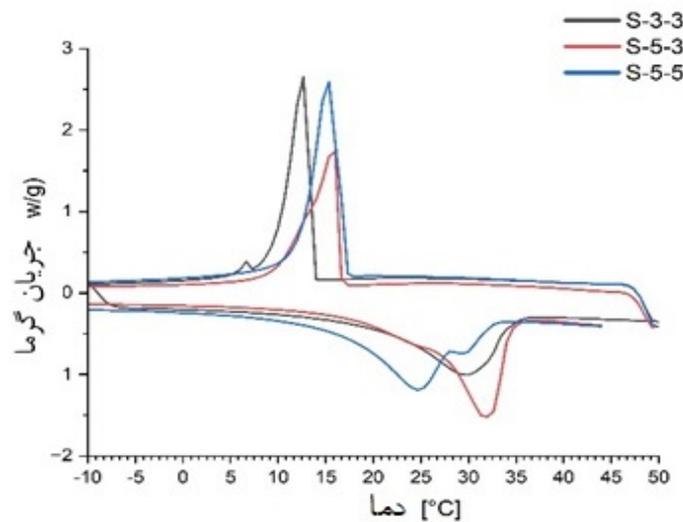
### یافته ها

– مورفولوژی نانوکامپوزیت های سنتز شده

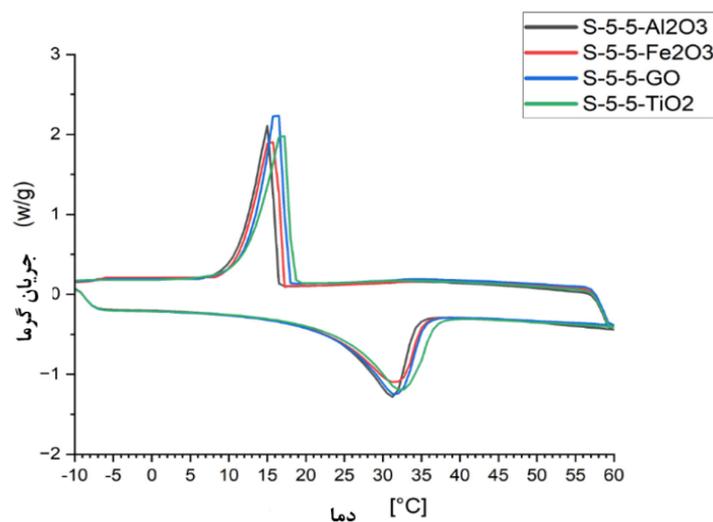
تصاویر FESEM نمونه‌های دارای ۰/۰۵ wt.% نانوذره در شکل ۱ ارائه شده است. تصاویر نشان دهنده تفاوت مورفولوژیک نمونه‌های مختلف با نانوذرات گوناگون است. با توجه به تصاویر، توزیع نانوذرات در نمونه‌ها یکنواخت و همگن

استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی FESEM<sup>۱</sup> (TESCAN, MIRA II, Czech Republic) مورد مشاهده قرار گرفت. خصوصیات حرارتی از جمله دمای تغییر فاز (ذوب و انجماد) و گرمای نهان نمونه‌ها با آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی DSC<sup>۲</sup> (TA Q600, USA) تحت جریان گاز آرگون با دبی ۵۰ ml/min با گستره دمایی ۱۰- تا ۶۰ درجه سانتیگراد و نرخ گرمایش ۵ °C/min مورد بررسی قرار گرفت. DSC یک روش حرارتی تحلیلی است که جریان گرما (تغییر آنتالپی) را اندازه‌گیری می‌کند. در این روش، یک ماده در معرض تغییرات دمایی کاملاً کنترل

1. Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)  
2. Differential Scanning Calorimetry (DSC)



شکل ۲: آنالیز DSC کامپوزیت های PCM



شکل ۳: آنالیز DSC نانوکامپوزیت های

شکل ۲ و نمودار آنالیز DSC مربوط به نانوکامپوزیت های  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ،  $\text{GO}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  با PCM بهینه انتخاب شده، در شکل ۳ ارائه شده است. در این شکل ها، منحنی های پایینی مربوط به فرآیند ذوب است که در آن انرژی حرارتی را جذب و ذخیره می کند و منحنی های بالا مربوط به فرآیند انجماد هستند که PCM انرژی ذخیره شده را آزاد می کند. همچنین، نتایج مربوط به دمای ذوب /انجماد و گرمای نهان نمونه ها در جدول ۳ ارائه شده است. با

می باشد و ساختار کلوخه ای مشاهده نمی شود. نمونه حاوی نانوذره  $\text{TiO}_2$  (تصاویر g و h) دارای ریز ساختار متراکم و صاف تری نسبت به سایر نمونه ها است. نمونه دارای  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (تصاویر a و b) نیز ریزساختارهای حجیم و سطح ناهموار دارند. نمونه دارای  $\text{GO}$  (تصاویر e و f) مورفولوژی لایه ای دارد.

- آنالیز حرارتی نانوکامپوزیت های سنتز شده  
نمودار آنالیز DSC مربوط به ۳ کامپوزیت PCM پایه در

جدول ۳: خصوصیات حرارتی نمونه های PCM

نمونه	ذوب (°C)		انجماد (°C)		گرمای نهان (J/gr)
	دمای ONSET	دمای peak	دمای ONSET	دمای peak	
S-3-3	۲۰/۳۳	۲۸/۹۹	۱۴/۹۸	۱۴/۱۷	۹۴/۸۴
S-5-3	۳۱/۰۷	۳۶/۱۶	۲۰/۹۰	۱۶/۶۳	۹۵/۸۹
S-5-5	۲۱/۸۱	۲۹/۵۰	۲۱/۷۶	۱۶/۳۴	۱۱۰/۴۴
S-5-5-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۲/۸۸	۳۰/۱۱	۱۶/۵	۱۵	۱۰۰/۱۴
S-5-5-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۱/۵۹	۳۰/۳۹	۱۷/۲۵	۱۵/۷۵	۱۰۶/۶۵
S-5-5-GO	۲۳/۱۳	۳۰/۵۷	۱۸	۱۶/۵	۱۱۲/۷۳
S-5-5-TiO <sub>2</sub> *	۲۳/۶۹	۳۱/۲۲	۱۸/۷۵	۱۷/۲۵	۱۱۰/۶۲

\* S-5-5-TiO<sub>2</sub>: سدیم سولفات دکاهیدرات حاوی ۳ درصد وزنی KCL، که دارای ۵ درصد وزنی SPA، ۵ درصد وزنی STD و ۰/۰۵ درصد وزنی نانوذره TiO<sub>2</sub> می باشد. نمونه های دیگر نیز به همین ترتیب بوده و اعداد نشانه مقدار درصد وزنی می باشد.  
دمای ONSET: دمای شروع ذوب و انجماد  
دمای peak: دمای پیک ذوب و انجماد

شده و آب جدا می شود. در این راستا، محققین به دنبال راهکارهایی جهت کاهش تغییرات حجم و دستیابی به شکل پایداری از این PCM ها هستند تا بتوان با افزایش ویسکوزیته از انتشار یون های نمک جلوگیری کرده و یکپارچگی ساختاری PCM را در طول چرخه های مکرر حرارتی حفظ کنند (۲۸). در پژوهش حاضر، تلاش شد تا برخی مشکلات سدیم سولفات دکاهیدرات از جمله جداسازی فاز از طریق سنتز کامپوزیت Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O/ SPA/ STD/ KCL برطرف شود. بدین منظور سه کامپوزیت PCM پایه با درصد های وزنی متفاوت آماده شد. با توجه به نتایج آنالیز DSC، نمونه S-5-5 حاوی ۳ wt.% KCL و ۵ wt.% STD و SPA با دمای ذوب (۲۹/۵ °C) و گرمای نهان (۱۲۰ J/gr)، به عنوان نمونه مناسب شناخته شد که فاقد جداسازی فاز بود. هنگامی که پلیمرهای محلول در آب مثل SPA در محلول سدیم سولفات دکاهیدرات حل می شوند، برهمکنش الکترواستاتیکی را با سدیم سولفات دکاهیدرات آغاز می کنند. پلی الکترولیت ها ذرات سولفات سدیم را محصور می کنند و آنها را در محلول معلق می کنند و در نتیجه جداسازی فاز را کاهش

توجه به جدول ۳، دمای ذوب نمونه، S-3-3 °C ۲۸/۹۹ بوده و مناسب بود اما گرمای نهان پایینی داشت. نمونه S-5-3 نیز دمای ذوب بالا (۳۶/۱۶ °C) داشت. بنابراین نمونه S-5-5 با دمای ذوب (۲۹/۵ °C) و گرمای نهان (۱۲۰ J/gr) به عنوان نمونه نهایی و بهینه انتخاب شد تا اثر افزودن نانوذرات به آن در گام بعدی مورد بررسی قرار گیرد. نمونه های نانوکامپوزیت S-5-5-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، S-5-5-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، S-5-5-GO، S-5-5-TiO<sub>2</sub> به ترتیب دمای ذوب °C ۳۱/۲۲، ۳۰/۵۷، ۳۰/۳۹، ۳۰/۱۱ و گرمای نهان J/gr ۱۲۱/۶۸، ۱۲۰/۲۵، ۱۱۱/۷۹، ۱۱۴/۹۴ داشتند.

### بحث

PCM های مبتنی بر نمک، دارای مشکلات و معایبی همچون جداسازی فازی می باشند که به دلیل ذوب نامتجانس رخ می دهد. به این صورت که پس از ذوب، ساختار بلوری از حالت جامد به مایع تبدیل شده و مولکول های آبی که شکل کریستالی داشتند، آزاد می شوند. از آنجایی که حلالیت سدیم سولفات در آب کم است، پس از ذوب، سدیم سولفات در ظرف ته نشین

می دهند (۲۹).

استفاده از ۱۰ wt.% ترکیب  $KCl:NH_4Cl$  و ۲ wt.% SPA و STD به عنوان عوامل تغلیظ کننده و هسته ساز، به یک کامپوزیت سدیم سولفات دکاهیدرات با دمای ذوب پایین ( $6-13^{\circ}C$ ) و گرمای نهان  $130 J/gr$  دست یافتند (۳۱). در پژوهش حاضر، اثر چهار نوع نانوذره بر خواص حرارتی PCM نمک هیدراته (سدیم سولفات دکاهیدرات) مورد بررسی قرار گرفت که بدین منظور، نمونه S-5-5 به عنوان نمونه نهایی جهت افزودن نانوذرات انتخاب شد. چهار نمونه نانوکامپوزیت S-5-5 با ۰/۰۵ wt.% از نانوذرات  $Al_2O_3$ ،  $Fe_2O_3$ ، GO و  $TiO_2$  سنتز شدند. در بررسی مورفولوژیک نمونه‌ها، ساختار کلوخه ای مشاهده نشد. مورفولوژی لایه ای GO در تصاویر مربوط به این نمونه (تصاویر e و f) مشهود بوده و در مطالعه Tao و همکارانش (۲۰۲۰) نیز این ساختار تایید شده است (۲۴). نمونه دارای  $Al_2O_3$  (تصاویر a و b) با ریزساختارهای بزرگتر که می‌تواند با جمع شدن ذرات کوچکتر تشکیل شده باشد، نشان دهنده قدرت هسته سازی نانوذرات  $Al_2O_3$  می‌باشد که در مطالعه Liu و Yang (۲۰۱۷) نیز تصاویر SEM گویای این موضوع بود (۳۲). همچنین، نتایج آنالیز حرارتی نشان داد که تمام نانوذرات باعث افزایش ۱/۷۲-۰/۶ درجه ای دمای ذوب PCM پایه شدند. نانوذرات  $Al_2O_3$  و  $Fe_2O_3$  باعث کاهش گرمای نهان و نانوذرات GO و  $TiO_2$  باعث افزایش گرمای نهان شدند. در مطالعه Hou و همکارانش (۲۰۱۸) نیز، اثر نانوذره گرافیت منبسط شده (EG)<sup>۸</sup> بر خواص حرارتی سدیم سولفات دکاهیدرات بررسی شد که در این راستا، نمونه S-5-5 با دمای ذوب ( $9/23^{\circ}C$ ) و گرمای نهان  $128 J/gr$ ، به عنوان نمونه مناسب جهت افزودن نانوذره انتخاب شد. نتایج نشان داد با افزایش درصد وزنی نانوذره EG، دمای ذوب و گرمای نهان کاهش یافت (۲۵). Liu و Yang (۲۰۱۷) در مطالعه خود نانوکامپوزیت نمک هیدراته یوتکتیک  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O - Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$  را همراه با STD و  $Al_2O_3$  سنتز کردند و به این نتیجه رسیدند که افزودن ۴/۵ wt.% از نانوذرات  $Al_2O_3$  باعث دستیابی به ترکیبی

8. Expanded graphite

Akamo و همکارانش (۲۰۲۳) در پژوهشی به بررسی افزودنی‌های مختلف جهت کنترل جدایی فاز و ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی در سدیم سولفات دکاهیدرات پرداختند. بدین منظور ۸ پلیمر SPA، CMC<sup>۱</sup>، PSS<sup>۶</sup> و DSS<sup>۵</sup> را به عنوان تغلیظ کننده در نمونه‌های مختلف به کار برده و با هم مقایسه نمودند. نتایج نشان داد SPA، PPA، CNF<sup>۳</sup>، HEC<sup>۴</sup>، DSS، CNF، PPA، SPA، DSS باعث دستیابی به یک مخلوط همگن می‌شوند. تمام نمونه‌ها در مقایسه با  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  خالص، عملکرد حرارتی بسیار خوبی داشتند. همچنین، نمونه‌های دارای PSS و DSS دارای ظرفیت ذخیره سازی انرژی حرارتی بهتری بودند. این مواد باعث افزایش دمای ذوب نمونه‌ها به بالاتر از دمای ذوب  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  خالص ( $32/4^{\circ}C$ ) شد که این افزایش بین  $3/38-0/4^{\circ}C$  با توجه به نوع ماده افزودنی بود. دمای ذوب نمونه دارای SPA به  $34/14^{\circ}C$  افزایش یافت. در واقع، این افزودنی‌ها با یون‌های موجود در سدیم سولفات دکاهیدرات تعامل داشته و مانع جداسازی مولکول‌های آب از ساختار کریستالی می‌شوند. این منجر به افزایش نیاز انرژی برای شکستن پیوندهای بین یون‌های سدیم سولفات دکاهیدرات و مولکول‌های آب می‌شود و در نتیجه نقطه ذوب را افزایش می‌دهد (۳۰). بنابراین، در مطالعات مختلف از افزودنی‌های دیگر مانند KCL جهت کنترل دمای ذوب استفاده می‌شود. در مطالعه Hou و همکارانش (۲۰۱۸)، کامپوزیت‌های  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O / KCL / STD / PAM$ <sup>۷</sup> با درصدی وزنی متفاوت آماده شد. نتایج نشان داد با افزایش درصد وزنی KCL، دمای ذوب کاهش می‌یابد و در نهایت عملکرد حرارتی کامپوزیت با ۵ wt.% از مواد پلی اکریل آمید، STD و KCL مناسب بوده و جدایی فاز نداشت (۲۵). Thakkar و همکارانش (۲۰۲۴) در پژوهش خود، با

1. Carboxymethyl cellulose
2. Potassium polyacrylate
3. Cellulose nanofiber
4. Hydroxyethyl cellulose
5. Dextran sulfate sodium
6. Poly (sodium 4-styrenesulfonate)
7. Polyacrylamide

گرما باشد.

به طور کلی، عملکرد حرارتی نانوکامپوزیت ها بستگی به نوع نانوذرات و میزان برهمکنش بین مولکولی<sup>۱</sup> آن ها دارد. برهمکنش های بین مولکولی به طور قابل توجهی بر پراکندگی، پایداری و عملکرد کلی نانوکامپوزیت ها تأثیر می گذارند. این برهمکنش ها شامل نیروهای بین مولکولی، نیروهای واندروالسی<sup>۲</sup>، پیوند هیدروژنی<sup>۳</sup> و پیوندهای یونی یا کووالانسی<sup>۴</sup> قوی هستند. هر چقدر برهمکنش بین مولکولی قوی تر باشد، گرمای نهان افزایش می یابد. بنابراین، برهمکنش قوی بین نانوذرات و PCM نقش قابل توجهی دارد. اکسیدهای فلزی مانند  $Al_2O_3$  باعث کاهش ظرفیت گرمای نهان PCM می شوند، که ممکن است به دلیل برهمکنش ضعیف بین PCM و سطح این نانوذرات در طی کاهش جزئی در انتقال فاز یوتکتیک باشد (۳۹). کاهش گرمای نهان توسط نانوذرات  $Fe_2O_3$  می تواند به ویژگی های مغناطیسی آن نیز نسبت داده شود (۴۰). از طرف دیگر، گرافن و مشتقات آن سطح وسیعی را برای برهمکنش با مولکول های PCM فراهم می کنند. برهمکنش گسترده این نانوذرات دو بُعدی باعث شکسته شدن ساختار کریستالی PCM شده و منجر به افزایش ظرفیت گرمای نهان می شود (۳۹). برهمکنش های بین مولکولی نانوذرات و PCM باعث تغییر کمی در دمای ذوب (افزایش یا کاهش) نیز می شود. دمای ذوب بستگی به نوع PCM، نوع نانوذرات و درصد وزنی آن ها دارد (۴۱).

### نتیجه گیری

در این مطالعه تلاش شد تا معایب PCM نمک هیدراته ( $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ) با ۳ درصد وزنی KCL و ۵ درصد وزنی SPA و STD برطرف شده و اثر کمترین درصد وزنی (۰/۰۵ wt.%) از نانوذرات  $Al_2O_3$ ،  $Fe_2O_3$ ، GO و  $TiO_2$  بر روی خواص حرارتی نمونه بهینه PCM بررسی شود. نتایج نشان دهنده کاهش دمای ذوب

1. Intermolecular interaction
2. Vander-Waal's forces
3. Hydrogen bonding
4. Ionic or covalent bonds

با خواص حرارتی و مقاومت شیمیایی عالی پس از ۲۰۰ چرخه ذوب و انجماد، کاهش ۸ درصدی در گرمای نهان همراه با دمای ذوب مشابه با PCM خالص شده است. نانوکامپوزیت بدست آمده ترکیبی امیدوارکننده برای ذخیره سازی انرژی حرارتی بود (۳۲). این محققین در پژوهش دیگری (۲۰۱۷)، افزایش گرمای نهان و گرمای ویژه PCM نمک هیدراته یوتکتیک ( $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ ) را با افزودن درصدهای وزنی مختلف از نانوذره  $TiO_2$  (۰/۵، ۰/۳ و ۰/۱) گزارش دادند، به طوری که افزودن نانوذرات  $TiO_2$  ۰/۳ wt.% باعث افزایش ۶/۴ درصدی گرمای نهان شد (۳۳). تأثیر نانوذرات  $TiO_2$  در افزایش گرمای نهان با پژوهش حاضر مطابقت دارد. Oh و همکارانش (۲۰۲۱)، نانوکامپوزیت SSD/NFC/graphite را با ۱ wt.% NFC، ۷ wt.% STD و درصدهای وزنی مختلف از گرافیت سنتز کردند. گرمای نهان (۱۲۱ J/gr) و دمای ذوب ( $31/1^\circ C$ ) کاهش یافت. نتایج نشان داد افزودن ۵ wt.% گرافیت، باعث افزایش هدایت حرارتی و نرخ شارژ حرارتی در حین ذوب می شود (۳۴). در مطالعه Huang و همکارانش (۲۰۲۰) افزودن ۰/۲ wt.% GO به PCM ( $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ ) باعث افزایش گرمای نهان و بهبود خواص حرارتی PCM شد (۳۵). تأثیر نانوذرات گرافن اکساید در افزایش گرمای نهان با پژوهش حاضر مطابقت دارد.

خصوصیات حرارتی کامپوزیت های سدیم سولفات دکاهیدرات در مطالعات مختلف در جدول ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. گرمای نهان در مطالعات مورد بررسی بین ۲۶۲-۹۵ J/gr متغیر می باشد که با افزایش درصد وزنی نانوذره در نانوکامپوزیت های مربوطه، گرمای نهان کاهش نسبی یافته است و دمای ذوب تغییر قابل توجهی نداشته است. کامپوزیت های سنتز شده با ترکیبات مشابه با کامپوزیت سنتز شده در این مطالعه در طی چرخه های مکرر حرارتی بین ۳۰ تا ۲۰۰ چرخه ذوب و انجماد، پایداری حرارتی قابل قبولی داشتند. بنابراین، PCM نمک های هیدراته در چرخه های مکرر حرارتی می تواند انتخاب مناسبی به منظور ذخیره سازی انرژی و کنترل

جدول ۴: مقایسه خصوصیات حرارتی کامپوزیت های سدیم سولفات دکاهیدرات در مطالعات مختلف

نویسندگان (سال چاپ)	پایداری کامپوزیت در چرخه های حرارتی متعدد	گرمای نهان (J/gr)	دمای ذوب پیک (°C)	نانوذرات	کامپوزیت PCM
Hou و همکاران (۲۰۱۸) (۲۵)	افت ۱/۱ درجه ای دمای ذوب و ۷/۲ ژول بر گرم گرمای نهان بعد از ۵۰ چرخه حرارتی	۱۲۷/۸	۲۳/۸	۱ wt.% EG	SSD/KCL/PAM/STD
		۱۱۷/۴	۲۲/۳	۲ wt.% EG	
		۱۱۱/۳	۲۳/۶	۳ wt.% EG	
		۱۰۶/۸	۲۲/۵	۴ wt.% EG	
		۹۵/۲	۲۲/۸	۵ wt.% EG	
Thakkar و همکاران (۲۰۲۴) (۲۸)	پایداری گرمای نهان تا ۳۰ چرخه حرارتی	۱۳۰	۱۴/۱۲	-	SSD/KCL/NH <sub>4</sub> Cl/CMC/STD
Thakkar و همکاران (۲۰۲۴) (۳۱)	پایداری گرمای نهان تا ۳۰ چرخه حرارتی	۱۳۰	۱۳	-	SSD/KCL/NH <sub>4</sub> Cl/ SPA /STD
Li و همکاران (۲۰۲۰) (۳۶)	افت ۱/۵۵ درجه ای دمای ذوب و ۹/۱۶ درصدی گرمای نهان بعد از ۵۰ چرخه حرارتی	۱۲۳/۶	۳۱/۵۲	۵ wt.% EG	SSD/ CMC/STD/OP-10
		۱۱۷/۹	۳۱/۵۰	۶ wt.% EG	
		۱۱۴	۳۱/۰۶	۷ wt.% EG	
Xu و همکاران (۲۰۱۸) (۳۷)	پایداری گرمای نهان تا ۱۰۰ چرخه حرارتی	۱۴۱	۶/۴	-	SSD/KCL/NH <sub>4</sub> Cl/ SPA /STD
Liu و همکاران (۲۰۱۷) (۳۲)	پایداری گرمای نهان تا ۲۰۰ چرخه حرارتی	۲۶۲/۱	۳۱/۴	۳ wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SSD/DHPD/ SA/HEC/STD
		۲۵۶/۹	۳۱/۶	۴/۵ wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Tao و همکاران (۲۰۲۰) (۲۴)	-	۱۸۲/۷	۳۲/۵	۲/۴۵wt.% GO-SiO <sub>2</sub>	SSD/GO-SiO <sub>2</sub>

ادامه جدول ۴: مقایسه خصوصیات حرارتی کامپوزیت های سدیم سولفات دکاهیدرات در مطالعات مختلف

نویسندگان (سال چاپ)	پایداری کامپوزیت در چرخه های حرارتی متعدد	گرمای نهان (J/g)	دمای ذوب پیک (°C)	نانوذرات	کامپوزیت PCM
Luo و همکاران (۲۰۲۲) (۲۳)	پایداری گرمای نهان تا ۵۰ چرخه حرارتی	۹۶/۴۱	۳۵	-	SSD/ CA/ SPA /STD
Oh و همکاران (۲۰۲۱) (۳۴)	-	۱۳۰/۹	۳۳/۲	۱ wt.% graphite	SSD/ NFC/STD
		۱۲۷/۵	۳۳/۱	۳ wt.% graphite	
		۱۲۱/۷	۳۳/۲	۵ wt.% graphite	
Xiao و همکاران (۲۰۲۱) (۳۸)	-	-	۲۴	۰/۱ wt.% GO	SSD/DHPD
		-	۲۶	۰/۳ wt.% GO	
		۱۹۰	۲۲	۰/۵ wt.% GO	
		-	۱۹	۰/۷ wt.% GO	

بررسی قرار گیرد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله منتج از بخشی از پایان نامه با عنوان "امکان سنجی ارتقاء عملکرد جلیقه خنک کننده هیبریدی بر پایه مواد نانوکامپوزیت تغییر فازدهنده" مصوب دانشگاه علوم پزشکی تهران با کد طرح ۶۸۶۹۴-۲۹۴-۴-۱۴۰۲ می باشد که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی تهران انجام شده است.

### تعارض منافع

بین نویسندگان هیچ گونه تعارضی در منافع وجود ندارد.

نانوکامپوزیت ها نسبت به دمای ذوب  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  خالص (  $32/4^\circ\text{C}$  )، با وجود افزایش  $1/72$  -  $0/6$  درجه ای دمای ذوب نانوکامپوزیت ها نسبت به کامپوزیت PCM بود. همچنین نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  باعث کاهش گرمای نهان و نانوذرات GO و  $\text{TiO}_2$  باعث افزایش گرمای نهان شدند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با استفاده از مواد افزودنی و نانوذرات می توان خواص حرارتی PCM ها را بهبود بخشید، اما درصدهای وزنی این افزودنی ها بایستی بهینه سازی شده و به درستی انتخاب شوند. از این رو پیشنهاد می گردد در مطالعات آینده استفاده از نانوذرات مختلف و درصدهای وزنی متفاوت بیشتر مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، عملکرد این نانوکامپوزیت ها در کاهش استرس حرارتی بدن انسان مورد تحقیق و

## REFERENCES

- Cannady R, Warner C, Yoder A, Miller J, Crosby K, Elswick D, et al. The implications of real-time and wearable technology use for occupational heat stress: A scoping review. *Safety Science*. 2024;177:106600.
- Flouris AD, Dinas PC, Ioannou LG, Nybo L, Havenith G, Kenny GP, et al. Workers' health and productivity under occupational heat strain: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Planet Health*. 2018;2(12):e521-e31.
- Mazloumi A, Golbabaee F, Khani SM, Kazemi Z, Hosseini M, Abbasinia M, et al. Evaluating effects of heat stress on cognitive function among workers in a hot industry. *Health promotion perspectives*. 2014;4(2):240.
- Heat-Related Deaths in Construction CPWR- The Center for Construction Research and Training 2022 [Available from: <https://www.cpwr.com/wp-content/uploads/IG-Heat-Related-Deaths.pdf>].
- Del Ferraro S, Falcone T, Morabito M, Messeri A, Bonafede M, Marinaccio A, et al. A potential wearable solution for preventing heat strain in workplaces: The cooling effect and the total evaporative resistance of a ventilation jacket. *Environmental Research*. 2022;212:113475.
- Bustos D, Guedes JC, Baptista JS, Vaz MP, Costa JT, Fernandes RJ. Applicability of physiological monitoring systems within occupational groups: a systematic review. *Sensors*. 2021;21(21):7249.
- Rahimi E, Babapoor A, Moradi G, Kalantary S, Esmaeelpour MM. Personal cooling garments and phase change materials: A review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2024;190:114063.
- Sikiru S, Oladosu TL, Amosa TI, Kolawole SY, Soleimani H. Recent advances and impact of phase change materials on solar energy: A comprehensive review. *J Energy Storage*. 2022;53:105200.
- Kalidasan B, Pandey A, Saidur R, Samykano M, Tyagi V. Nano additive enhanced salt hydrate phase change materials for thermal energy storage. *Int Mater Rev*. 2023;68(2):140-83.
- Zhu S, Nguyen MT, Yonezawa T. Micro-and nano-encapsulated metal and alloy-based phase-change materials for thermal energy storage. *Nanoscale Adv*. 2021;3(16):4626-45.
- Onofrei E, Rocha A, Catarino A. Textiles integrating PCMs—A review. *Bul Inst Politeh Lasi Sect Stiinte Socio Umene*. 2010;60(2):99-107.
- Ali HM, Rehman T-u, Arıcı M, Said Z, Duraković B, Mohammed HI, et al. Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications. *Prog Energy Combust Sci*. 2024;100:101109.
- Junaid MF, ur Rehman Z, Čekon M, Čurpek J, Farooq R, Cui H, et al. Inorganic phase change materials in thermal energy storage: A review on perspectives and technological advances in building applications. *Energy Build*. 2021;252:111443.
- Li Y, Li C, Lin N, Xie B, Zhang D, Chen J. Review on tailored phase change behavior of hydrated salt as phase change materials for energy storage. *Mater Today Energy*. 2021;22:100866.
- Odukamaiya A, Woods J, James N, Kaur S, Gluesenkamp KR, Kumar N, et al. Addressing energy storage needs at lower cost via on-site thermal energy storage in buildings. *Energy Environ Sci*. 2021;14(10): 5315-29.
- Shi J, Qin M, Aftab W, Zou R. Flexible phase change materials for thermal energy storage. *Energy Storage Mater*. 2021;41:321-42.
- Zbair M, Bennici S. Survey summary on salts hydrates and composites used in thermochemical sorption heat storage: a review. *Energies*. 2021;14(11):3105.
- Liu Y, Yang Y. Form-stable phase change material based on Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·10H<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O eutectic hydrated salt/expanded graphite oxide composite: the influence of chemical structures of expanded graphite oxide. *Renewable energy*. 2018;115:734-40.
- Wang Y, Yu K, Peng H, Ling X. Preparation and thermal properties of sodium acetate trihydrate as a novel phase change material for energy storage. *Energy*. 2019;167:269-74.
- Mao J, Dong X, Hou P, Lian H. Preparation research of novel composite phase change materials based on sodium acetate trihydrate. *Appl Therm Eng*. 2017;118:817-25.
- Karimineghlani P, Emmons E, Green MJ, Shamberger P, Sukhishvili SA. A temperature-responsive poly (vinyl alcohol) gel for controlling fluidity of an inorganic phase change material. *J Mater Chem A Mater*. 2017;5(24):12474-82.
- Han D, Lougou BG, Xu Y, Shuai Y, Huang X. Thermal properties characterization of chloride salts/nanoparticles composite phase change material for high-temperature thermal energy storage. *Applied Energy*.

- 2020;264:114674.
23. Luo Y, Yu W, Qiao J, Zhao X, Wu H, Sheng X, et al. Self-Healing Inorganic Hydrated Salt Gels for Cost-Effective and Wearable Personal Thermal Management in the Static and Dynamic Modes. Available at SSRN 3999301. 2022.
24. Tao W, Kong X, Bao A, Fan C, Zhang Y. Preparation and phase change performance of graphene oxide and silica composite Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O phase change materials (PCMs) as thermal energy storage materials. *Materials*. 2020;13(22):5186.
25. Hou B, Mao J, Chen F, Li Y, Dong X. Preparation and thermal performance enhancement of low temperature eutectic composite phase change materials based on Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O. *Materials*. 2018;11(11):2230.
26. Zhang Y, Tie S. Preparation and Rheological Properties of Amide-based Multiwalled Carbon Nanotube Mirabilite Phase Change Materials. *Scientific and Social Research*. 2021;3(2):86-91.
27. Lynch JM, Corniuk RN, Brignac KC, Jung MR, Sellona K, Marchiani J, et al. Differential scanning calorimetry (DSC): An important tool for polymer identification and characterization of plastic marine debris. *Environmental Pollution*. 2024;346:123607.
28. Thakkar J, Annavajjala SB, Sobkowicz MJ, Kosny J. Influence of Carboxymethyl Cellulose as a Thickening Agent for Glauber's Salt-Based Low Temperature PCM. *Materials*. 2024;17(10):2442.
29. Li Y, Kumar N, Hirsche J, Akamo DO, Li K, Tugba T, et al. Stable salt hydrate-based thermal energy storage materials. *Compos B Eng*. 2022;233:109621.
30. Akamo DO, Kumar N, Li Y, Pekol C, Li K, Goswami M, et al. Stabilization of low-cost phase change materials for thermal energy storage applications. *IScience*. 2023;26(7).
31. Thakkar J, Annavajjala SB, Kosny J, Sobkowicz MJ. Stabilizing a low temperature phase change material based on Glaubers salt. *J Energy Storage*. 2024;91:111936.
32. Liu Y, Yang Y. Use of nano- $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to improve binary eutectic hydrated salt as phase change material. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2017;160:18-25.
33. Liu Y, Yang Y. Investigation of specific heat and latent heat enhancement in hydrate salt based TiO<sub>2</sub> nanofluid phase change material. *Appl Therm Eng*. 2017;124:533-8.
34. Oh K, Shen Z, Kwon S, Toivakka M. Thermal properties of graphite/salt hydrate phase change material stabilized by nanofibrillated cellulose. *Cellulose*. 2021;28(11):6845-56.
35. Huang K, Li J, Luan X, Liu L, Yang Z, Wang C. Effect of graphene oxide on phase change materials based on disodium hydrogen phosphate dodecahydrate for thermal storage. *ACS omega*. 2020;5(25):15210-7.
36. Li C, Zhang B, Xie B, Zhao X, Chen J. Tailored phase change behavior of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O/expanded graphite composite for thermal energy storage. *Energy Convers Manag*. 2020;208: 112586.
37. Xu X, Zhang X, Zhou S, Wang Y, Lu L. Experimental and application study of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O with additives for cold storage. *J Therm Anal Calorim*. 2019;136:505-12.
38. Xiao L, Zhao M, Hu H. Study on graphene oxide modified inorganic phase change materials and their packaging behavior. *J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed*. 2018;33:788-92.
39. Said Z, Pandey A, Tiwari AK, Kalidasan B, Jamil F, Thakur AK, et al. Nano-enhanced phase change materials: Fundamentals and applications. *Prog Energy Combust Sci*. 2024;104:101162.
40. Babapoor A, Karimi G. Thermal properties measurement and heat storage analysis of paraffin nanoparticles composites phase change material: Comparison and optimization. *Appl Therm Eng*. 2015;90:945-51.
41. Zhang Q, Ma F, Liu L, Tan W, Jing M, Wang L, et al. Recent advances in nano-enhanced phase change materials. *Journal of Materials Science*. 2024;59(12):5247-67.