Iranian Food Science and Technology Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Review Article
Vol. 22, No. 4, Sep.-Oct. 2026, p. 431-448

A Comprehensive Review of the Application of Phase Change Materials in Food Packaging: Their Impact on Cold Chain Performance and Product Quality Preservation

H. Yazdanbakhsh[1], S. Alahmoradi[1], M.H. Moradiyan[2], M. Azizi-Lalabadi[3*]

1- Student Research Committee, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran
2- Department of Food Science and Technology, Faculty of Nutrition Science and Food Technology, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
3- Research Center of Oils and Fats, Health Technology Institute, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding Author Email: maryamazizi766@gmail.com)

Received: 09.06.2026
Revised: 06.08.2026
Accepted: 19.08.2026
Available Online: 24.08.2026

How to cite this article:
Yazdanbakhsh, H., Alahmoradi, S., Moradiyan, M.H., & Azizi-Lalabadi, M. (2026). A comprehensive review of the application of phase change materials in food packaging: Their impact on cold chain performance and product quality preservation. *Iranian Food Science and Technology Research Journal, 22*(4), 431-448. (In Persian). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.99112.1586

Introduction

Temperature control throughout the food supply chain plays a pivotal role in preserving product quality and safety as well as extending shelf life. In recent years, phase change materials (PCMs) have emerged as a promising component of intelligent packaging systems due to their ability to regulate temperature through the absorption and release of latent heat. This passive thermal management mechanism effectively minimizes temperature fluctuations, reduces reliance on active refrigeration systems, and enhances the overall thermal stability of food products during storage and transportation. In particular, temperature fluctuations during transportation, retail display, and temporary interruptions in refrigeration can accelerate undesirable physicochemical, microbiological, and sensory changes in perishable foods. Therefore, maintaining a stable thermal environment is essential for products such as dairy products, meat, seafood, fresh produce, and other temperature-sensitive foods. Unlike conventional cooling systems that continuously consume energy, PCM-based approaches can store excess thermal energy when the surrounding temperature increases and release the stored latent heat when the temperature decreases. This characteristic makes PCMs particularly attractive for passive thermal buffering and for mitigating short-term temperature deviations within the cold chain.

Materials and methods

This review was conducted through a comprehensive search of the scientific literature available in major databases, including Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar. Relevant studies investigating the application of phase change materials (PCMs) in food packaging and cold chain systems were identified using carefully selected keywords. The retrieved publications were screened and selected based on their relevance to PCM properties, incorporation strategies, thermal performance, and their role in preserving food quality during storage and transportation. The selected studies were then critically evaluated and synthesized to provide a comprehensive overview of the current state of knowledge, recent technological advances, existing challenges, and future research directions in this field. Particular attention was given to studies addressing the physicochemical characteristics of PCMs, including phase transition temperature, latent heat capacity, thermal stability, and compatibility with packaging matrices. In addition, reported effects on temperature regulation, product quality, storage stability, and cold-chain performance were considered in order to identify the practical

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).
https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.99112.1586

potential of these technologies. The available evidence was compared across different PCM types and packaging configurations to highlight the factors that determine their effectiveness under realistic food storage and transportation conditions.

Results and Discussion

The findings of recent studies indicate that current attention has primarily focused on the development of biocompatible and biodegradable PCMs, the enhancement of thermal conductivity through the incorporation of nanomaterials, and the improvement of physical stability using encapsulation and shape-stabilization technologies. Significant advances in microencapsulation and nanoencapsulation techniques, the use of polymeric and biopolymeric shell materials, and the development of stable composite structures have contributed to reducing PCM leakage, enhancing thermal and mechanical stability, improving heat storage efficiency, and maintaining long-term performance over repeated melting and freezing cycles.

Despite these considerable advancements, several challenges continue to hinder the large-scale industrial application of PCM-based technologies. High production costs, the risk of material leakage during phase transitions, the inherently low thermal conductivity of some PCMs, and the difficulty of selecting an appropriate operating temperature range remain among the major limitations that must be addressed for broader commercial implementation.Recent research also suggests that the selection of an appropriate PCM should be closely related to the temperature requirements of the target food product and the conditions encountered throughout the cold chain. Organic PCMs, including fatty acids and paraffin-based materials, have received considerable attention because of their relatively suitable phase transition characteristics and chemical stability. At the same time, bio-based and biodegradable materials are increasingly being investigated to reduce environmental concerns associated with conventional packaging systems. The use of encapsulated PCMs can further improve their compatibility with packaging matrices and reduce direct contact between the PCM and food, which is particularly important when considering food safety and regulatory requirements. Moreover, combining PCMs with polymers, biopolymers, nanomaterials, or other functional components may provide multifunctional packaging systems capable of simultaneously improving thermal regulation and mechanical or barrier properties.

Conclusion

Overall, this review provides a comprehensive overview of the current state of research and demonstrates that the development of sustainable, biocompatible, and cost-effective phase change materials (PCMs) can play a significant role in improving the performance of intelligent packaging systems, enhancing food safety, increasing the efficiency of the cold chain, and reducing the environmental impact of the packaging industry. The evidence reviewed in this study further indicates that the future development of PCM-based food packaging should move beyond simple thermal regulation toward integrated systems that combine effective heat management with sustainability, food safety, and improved packaging functionality. Greater emphasis on scalable encapsulation methods, biodegradable carrier materials, standardized performance evaluation, and validation under real cold-chain conditions will be essential for successful commercialization. Overall, continued interdisciplinary research involving food science, materials engineering, nanotechnology, and packaging technology can contribute to the development of reliable PCM-based solutions capable of reducing temperature-related quality losses and supporting a more sustainable and efficient food supply chain.

Keywords: Cold chain, Food quality, Phase change materials, Temperature control, Temperature fluctuation

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله مروری
جلد ۲۲، شماره ٤، مهر- آبان ١٤٠٥، ص. ٤٤٨-٤٣١

مروری جامع بر کاربرد مواد تغییر فاز در بسته‌بندی مواد غذایی: تأثیر آن‌ها بر کارایی زنجیره سرد، و حفظ کیفیت محصول

حنانه یزدان‌بخش[۱]- سودابه اله مرادی[۱]- محمد هادی مرادیان[۲]- مریم عزیزی لعل آبادی[۳*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

چکیده

کنترل دما در طول زنجیره تأمین مواد غذایی نقش کلیدی در حفظ کیفیت، ایمنی و افزایش ماندگاری محصولات دارد. استفاده از مواد تغییر فاز (PCMs) به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین در بسته‌بندی هوشمند، امکان تنظیم خودکار دما از طریق جذب و رهایش گرمای نهان را فراهم کرده و موجب کاهش نوسانات حرارتی، کاهش وابستگی به سیستم‌های سرمایشی فعال و بهبود پایداری حرارتی محصولات می‌شود. این بررسی از طریق جستجوی گسترده در متون علمی موجود در پایگاه‌های داده اصلی، از جمله Scopus، Web of Science، PubMed، ScienceDirect و Google Scholar انجام شد. مطالعات مربوط به استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در بسته‌بندی مواد غذایی و کاربردهای زنجیره سرد با استفاده از کلمات کلیدی مرتبط شناسایی شدند. انتشارات بازیابی شده بر اساس ارتباط آنها با ویژگی‌های PCM، روش‌های ترکیب، عملکرد حرارتی و نقش آنها در حفظ کیفیت مواد غذایی در طول نگهداری و حمل و نقل، بررسی و انتخاب شدند. سپس مطالعات انتخاب شده به‌صورت انتقادی ارزیابی و ترکیب شدند تا مروری جامع بر دانش فعلی، پیشرفت‌های اخیر و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده در این زمینه ارائه دهند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌های اخیر عمدتاً بر توسعه PCMsهای زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر، افزایش هدایت حرارتی از طریق افزودن نانومواد، و بهبود پایداری فیزیکی با استفاده از فناوری‌های کپسوله‌سازی و تثبیت شکل متمرکز بوده‌اند. در این میان، پیشرفت در روش‌های ریزکپسوله‌سازی و نانوکپسوله‌سازی، استفاده از پوسته‌های پلیمری و زیست‌پلیمری، و توسعه کامپوزیت‌های پایدار، موجب کاهش نشت PCM، افزایش پایداری حرارتی و مکانیکی، بهبود راندمان ذخیره‌سازی گرما و افزایش دوام عملکرد در چرخه‌های مکرر ذوب و انجماد شده است. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، چالش‌هایی نظیر هزینه بالای تولید، احتمال نشت ماده در هنگام ذوب، محدودیت هدایت حرارتی برخی PCMs و انتخاب محدوده دمایی مناسب، همچنان از مهم‌ترین موانع کاربرد صنعتی این فناوری به شمار می‌روند. در مجموع، این مطالعه ضمن ارائه تصویری جامع از وضعیت کنونی پژوهش‌ها، نشان می‌دهد که توسعه مواد تغییر فاز پایدار، زیست‌سازگار و مقرون‌به‌صرفه می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای عملکرد بسته‌بندی‌های هوشمند، افزایش ایمنی مواد غذایی، بهبود کارایی زنجیره سرد و کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت بسته‌بندی ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: زنجیره سرد، کنترل دما، کیفیت غذا، مواد تغییر فاز، نوسانات حرارتی

۱- کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
۲- کمیته تحقیقات دانشجویی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، مؤسسه تحقیقات تغذیه و صنایع غذایی کشور، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
۳- مرکز تحقیقات روغن‌ها و چربی‌ها، پژوهشکده فناوری سلامت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: maryamazizi766@gmail.com)

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.99112.1586

مقدمه

کنترل دما یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده در حفظ کیفیت، ایمنی و ماندگاری محصولات غذایی حساس به فساد، به‌ویژه گوشت، قارچ و فرآورده‌های لبنی، در طول مراحل نگهداری، حمل‌ونقل و توزیع است. این دسته از محصولات به‌دلیل فعالیت بالای میکروبی، واکنش‌های آنزیمی و حساسیت شدید به شرایط محیطی، به سرعت تحت تأثیر تغییرات دمایی قرار گرفته و دچار افت کیفیت می‌شوند (Abedi-Firoozjah *et al*., 2024; Azizi-Lalabadi, Rafiei, Divband, & Ehsani, 2020). در این راستا، حتی نوسانات دمایی کوتاه‌مدت در زنجیره سرد می‌تواند منجر به افزایش رشد میکروارگانیسم‌ها، تسریع فرآیندهای اکسیداسیون لیپیدی، تغییرات بافتی و در نهایت کاهش ارزش تغذیه‌ای و حسی محصولات غذایی گردد. از این‌رو، مدیریت دقیق و پایدار دما در زنجیره سرد به‌عنوان یک چالش اساسی در صنایع غذایی مطرح شده است (Bahrami & Sablani, 2025). در سال‌های اخیر، با توجه به افزایش تقاضا برای مواد غذایی تازه و با کیفیت بالا، توسعه سیستم‌های بسته‌بندی پیشرفته با قابلیت کنترل فعال شرایط محیطی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. در این میان، بسته‌بندی فعال و هوشمند به‌عنوان رویکردی نوین، فراتر از نقش سنتی بسته‌بندی (یعنی صرفاً ایجاد یک مانع فیزیکی)، عمل کرده و امکان تعامل با محیط و بهبود شرایط نگهداری محصول را فراهم می‌سازد. یکی از مهم‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در این حوزه، بهره‌گیری از مواد تغییر فاز[1] به‌منظور مدیریت حرارتی و کاهش نوسانات دمایی در سیستم‌های بسته‌بندی است (Al-Gunaid *et al*., 2023).

مواد تغییر فاز موادی هستند که قادرند در دمای مشخصی با جذب یا آزادسازی گرمای نهان، بدون تغییر محسوس در دمای خود، انرژی حرارتی را ذخیره یا آزاد کنند. این ویژگی منحصربه‌فرد باعث شده است که PCMs به‌عنوان یکی از مؤثرترین گزینه‌ها برای تثبیت دما در سیستم‌های حساس به تغییرات حرارتی شناخته شوند. در کاربردهای بسته‌بندی غذایی، این مواد با جذب گرمای اضافی در زمان افزایش دما و آزادسازی آن در شرایط افت دما، نقش یک بافر حرارتی را ایفا کرده و از بروز شوک‌های دمایی جلوگیری می‌کنند. در نتیجه، استفاده از PCMs می‌تواند به‌طور مستقیم در افزایش پایداری کیفیت محصولات غذایی در طول زنجیره سرد مؤثر باشد (Bhatlawande, Ghatge, Shinde, Anushree, & Patil, 2024; Tas & Unal, 2021). از منظر طبقه‌بندی، PCMs مورد استفاده در صنایع غذایی عمدتاً شامل پارافین‌ها، اسیدهای چرب، مواد یوتکتیک، هیدرات‌های نمکی، اتیلن گلیکول و آب هستند. هر یک از این گروه‌ها دارای ویژگی‌های ترمودینامیکی خاصی از جمله دمای ذوب، ظرفیت گرمای نهان، پایداری حرارتی و سازگاری شیمیایی متفاوت هستند که انتخاب آن‌ها را برای کاربردهای مختلف بسته‌بندی تعیین می‌کند. برای مثال، اسیدهای چرب به‌دلیل زیست‌سازگاری بالا و سمیت پایین، گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای مرتبط با مواد غذایی محسوب می‌شوند، در حالی که پارافین‌ها به‌دلیل پایداری حرارتی مناسب و قیمت پایین، کاربرد گسترده‌تری در سیستم‌های ذخیره انرژی دارند (Thanakkasaranee & Seo, 2021). با وجود مزایای قابل توجه، استفاده مستقیم از PCMs در سیستم‌های بسته‌بندی با چالش‌های متعددی همراه است. مهم‌ترین محدودیت‌ها شامل نشت مواد در حالت مایع، کاهش پایداری مکانیکی، افت راندمان انتقال حرارت و ناسازگاری با برخی ماتریس‌های بسته‌بندی می‌باشد. این چالش‌ها موجب شده‌اند که استفاده از PCMs به شکل خالص در کاربردهای عملی محدود گردد و نیاز به راهکارهای بهبود عملکرد آن‌ها احساس شود. در پاسخ به این محدودیت‌ها، رویکرد کپسوله‌سازی به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها برای افزایش پایداری و کارایی PCMs معرفی شده است. در این روش، مواد تغییر فاز درون یک پوشش محافظ قرار گرفته و از تماس مستقیم با محیط اطراف جلوگیری می‌شود. این ساختار نه تنها از نشتی فاز مایع جلوگیری می‌کند (Bayram, Ozkan, Kostka, Capanoglu, & Esatbeyoglu, 2021; Jafarpour, Fathi, & Soltanizadeh, 2023). بلکه موجب بهبود پایداری حرارتی، افزایش سطح تماس برای انتقال حرارت و کنترل بهتر رفتار حرارتی سیستم می‌گردد. در میان روش‌های مختلف کپسوله‌سازی، تکنیک الکتروریسی به‌دلیل توانایی تولید نانوالیاف با سطح ویژه بالا، تخلخل مناسب و قابلیت بارگذاری مؤثر مواد فعال، توجه ویژه‌ای در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است (Azizi-Lalabadi, Rahimzadeh-Sani, Feng, Hosseini, & Jafari, 2023; Swetha *et al*., 2023; Zhao *et al*., 2022). الکتروریسی امکان طراحی ساختارهای نانوالیافی پیوسته و یکنواخت را فراهم می‌سازد که می‌توانند به‌عنوان ماتریس‌های مناسب برای بارگذاری PCMs عمل کنند. این ساختارها علاوه بر بهبود انتقال حرارت، امکان تنظیم خواص مکانیکی، افزایش انعطاف‌پذیری و طراحی بسته‌بندی‌های سبک و قابل حمل را فراهم می‌کنند. همچنین، استفاده از نانوالیاف موجب افزایش نسبت سطح به حجم شده و در نتیجه راندمان تبادل حرارتی در سیستم‌های بسته‌بندی بهبود می‌یابد (Hu *et al*., 2025; Mehling, Brütting, & Haussmann, 2022).

1- Phase change materials (PCMs)

در کنار روش‌های ساخت، انتخاب ماتریس پلیمری مناسب نقش کلیدی در عملکرد نهایی سیستم‌های حاوی PCMs دارد.

پلیمرهای زیستی نظیر کیتوزان، پلی‌وینیل الکل[1]، پلی‌لاکتیک اسید[2]، آلژینات و نشاسته به‌دلیل ویژگی‌هایی همچون زیست‌تخریب‌پذیری، زیست‌سازگاری، در دسترس بودن و قابلیت پردازش مناسب، به‌طور گسترده در طراحی این سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پلیمرها علاوه بر ایفای نقش به‌عنوان پوشش محافظ، می‌توانند با PCMs برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی ایجاد کرده و موجب بهبود پایداری ساختاری و عملکرد حرارتی سیستم شوند (Zhao *et al.*, 2025). ترکیب PCMs با پلیمرهای زیستی نه تنها به بهبود خواص حرارتی و مکانیکی منجر می‌شود، بلکه زمینه را برای توسعه بسته‌بندی‌های پایدار و دوستدار محیط‌زیست فراهم می‌سازد. این رویکرد با اهداف توسعه پایدار و کاهش وابستگی به پلیمرهای نفتی نیز همسو بوده و از منظر زیست‌محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد. علاوه بر این، امکان طراحی سیستم‌های چندمنظوره که همزمان دارای ویژگی‌های محافظتی، حرارتی و حتی ضدمیکروبی باشند، از دیگر مزایای این ترکیب به شمار می‌رود (Al-Gunaid *et al.*, 2023; Png *et al.*, 2022). به‌طور کلی، PCMs کپسوله‌شده به‌عنوان یک فناوری نوظهور، رویکردی مؤثر برای مدیریت حرارتی در بسته‌بندی مواد غذایی و بهبود عملکرد زنجیره سرد ارائه می‌دهند. این سیستم‌ها با کاهش نوسانات دمایی، نقش مهمی در حفظ کیفیت، ایمنی و ماندگاری محصولات غذایی حساس ایفا می‌کنند. با این حال، همچنان چالش‌هایی از جمله بهینه‌سازی عملکرد حرارتی، افزایش مقیاس‌پذیری صنعتی، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود یکپارچگی با ساختارهای بسته‌بندی وجود دارد که نیازمند تحقیقات بیشتر است. بر این اساس، هدف این مطالعه ارائه یک مرور جامع بر نقش مواد تغییر فاز کپسوله‌شده در بسته‌بندی مواد غذایی، با تمرکز بر مکانیزم‌های عملکرد، انواع مواد، روش‌های کپسوله‌سازی و ادغام آن‌ها با پلیمرهای زیستی است. همچنین، این مطالعه تأثیر این سیستم‌ها را بر بهبود کنترل دما، کاهش نوسانات حرارتی و ارتقای کیفیت، ایمنی و ماندگاری محصولات غذایی در طول زنجیره سرد مورد بررسی قرار می‌دهد.

انواع PCMs

PCMs انواع متفاوتی دارند نظیر PCMs آلی، PCMs غیر آلی و اسیدهای چرب که در ادامه هر کدام از آن‌ها به‌طور مجزا بررسی خواهند شد همچنین در جدول ۱ به بررسی چند نمونه از PCMs و ویژگی‌هایشان می‌پردازیم.

PCMs آلی

PCMs آلی مانند پارافین‌ها، اسیدهای چرب و پلی‌اتیلن گلیکول به‌دلیل پایداری شیمیایی، غیرخورنده بودن و عدم جدایش فازی، کاربرد گسترده‌ای در مدیریت حرارتی دارند. اگرچه رسانایی حرارتی آن‌ها پایین است، اما ادغام آن‌ها با سایر PCMs یا استفاده هم‌زمان از چند نوع PCMs مختلف می‌تواند این ویژگی را بهبود بخشد. به‌دلیل هزینه نسبتاً پایین و گستره وسیع دمای تغییر فاز، PCMs آلی گزینه مناسبی برای کاربرد در شرایط نزدیک به دمای محیط به شمار می‌روند (Png *et al.*, 2022). یکی از چالش‌های مهم PCMs آلی، نشتی و هدایت حرارتی پایین است که معمولاً با افزودن موادی مانند گرافن یا سیلیکا پیش از فرآیند کپسوله‌سازی برطرف می‌شود (Al-Gunaid *et al.*, 2023). مثال‌های متعددی از کاربرد این دسته گزارش شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارافین به‌دلیل پایداری شیمیایی، خاصیت غیرخورندگی و ویژگی‌های مناسب در تغییر فاز، یکی از رایج‌ترین PCMs محسوب می‌شود. به‌عنوان مثال، پاهاملی و همکاران (Pahamli & Valipour, 2021) از پارافین در زنجیره سرد استفاده کردند. برای رفع مشکل نشتی و هدایت حرارتی پایین، ۱ درصد وزنی گرافن به پارافین افزوده شد. نتایج نشان داد که این ترکیب توانست دمای محصولات فسادپذیر را در حین حمل‌ونقل تثبیت کرده و علاوه بر افزایش ماندگاری، کیفیت محصول را نیز حفظ کند. با وجود مزایای متعدد، پارافین به‌دلیل ماهیت هیدروکربنی خود از هدایت حرارتی نسبتاً پایینی برخوردار است و در صورت عدم تثبیت ساختاری، هنگام ذوب ممکن است دچار نشت شود. ازاین‌رو، در سال‌های اخیر استفاده از مواد کربنی، نانوذرات معدنی و پلیمرهای متخلخل برای افزایش هدایت حرارتی و تثبیت شکل پارافین به یکی از مهم‌ترین محورهای پژوهشی در توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند تبدیل شده است (Hassoun, Dankar, Bhat, & Bouzembrak, 2024). توانایی پارافین در تنظیم دما ناشی از آن است که با افزایش دما و عبور از نقطه ذوب، ذوب شده و گرمای اضافی را جذب می‌کند و همچنین در هنگام کاهش دما با انجماد انرژی را آزاد می‌سازد (Duquesne *et al.*, 2021). اتیلن گلیکول نیز به‌دلیل پایداری شیمیایی، غیرخورنده بودن، غیرسمی بودن و قابلیت تنظیم نقطه ذوب از طریق تغییر وزن مولکولی، کاربرد گسترده‌ای در ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی دارد (Zhao *et al.*, 2022). در مطالعه‌ای توسط دارادری و همکاران (Dardari *et al.*, 2025)، پلی‌اتیلن گلیکول به‌عنوان PCM به ترکیب PVA/کاراژینان در بسته‌بندی بستنی اضافه شد. نتایج نشان داد که الیاف حاوی PCM عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های بدون آن داشتند، زیرا ظرفیت بافری حرارتی آن‌ها نوسانات دمایی را کاهش داده و کیفیت محصولاتی مانند

1- Polyvinyl alcohol (PVA)

2- Polylactic acid (PLA)

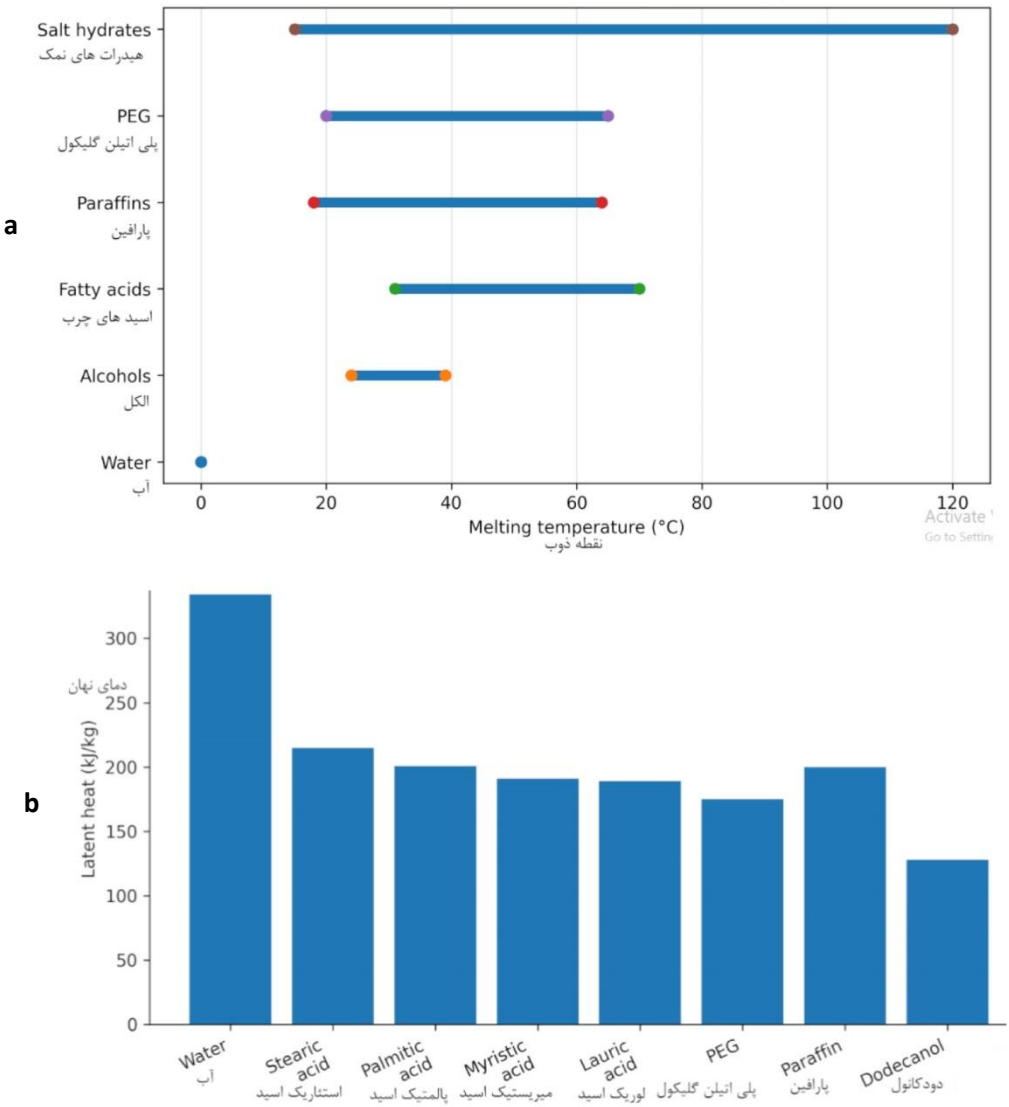
بستنی را حفظ می‌کند (Dardari *et al.*, 2025; Zhang, Dai, & Yang, 2025). تترادکانول یکی دیگر از PCMs آلی است که در طیف FTIR پیوندهای هیدروژنی درون‌مولکولی و بین‌مولکولی از خود نشان می‌دهد. کپسوله‌سازی پلیمری تأثیر اندکی بر این پیوندها دارد اما پایداری حرارتی و توانایی ذخیره و آزادسازی حرارت آن حفظ می‌شود و همین امر استفاده از آن در بسته‌بندی را امکان‌پذیر می‌سازد (Pielichowska & Pielichowski, 2023).

نبی و نورانی (Nabi & Nourani, 2023) تترادکان را در پوشش آلژینات کلسیم کپسوله کرده و آن را برای بسته‌بندی گوشت به کار گرفتند. این بسته‌بندی موجب شد که افزایش دمای گوشت طی نگهداری به تأخیر افتاده و در نتیجه، کاهش وزن و افت کیفیت بافت به میزان قابل‌توجهی پس از ۵–۷ ساعت ذخیره‌سازی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا کرد. این خاصیت ناشی از توانایی تترادکان در جذب حرارت اضافی در زمان افزایش دما و آزادسازی آن در زمان افت دما است که نوسانات حرارتی را کنترل کرده و کیفیت محصول را حفظ می‌کند (Zhang *et al.*, 2024). دودکانول، یک الکل چرب است که به‌عنوان PCM برای تنظیم دما مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده هنگام افزایش دما گرمای اضافی را جذب کرده و در زمان سرد شدن آن را آزاد می‌کند. دودکانول از نظر شیمیایی پایدار، غیرخورنده بوده و با کپسوله‌سازی می‌توان هدایت حرارتی آن را ارتقا داده و مشکل نشتی را برطرف کرد (Jain, Paliwal, & Jain, 2024). برای نمونه، بهاتلوانده و همکاران (Bhatlawande *et al.*, 2024) دودکان را از طریق الکتروریسی در نانوالیاف زئین ادغام کردند تا یک پوشش هوشمند برای بسته‌بندی شیر ایجاد شود. میزان دودکان در الیاف تا ۵۵٪ افزایش یافته و توانست ظرفیتی معادل ۲۵ J/g انرژی ذخیره کند. این پوشش‌ها با تنظیم دمای بسته‌بندی، کیفیت شیر را در طول زنجیره سرد حفظ کردند و فساد شیر را به‌مدت ۲۴–۷۲ ساعت به تعویق انداختند. به‌طور کلی، استفاده از PCMs آلی با امکان ذخیره و آزادسازی گرمای نهان، موجب تنظیم دما و کاهش نوسانات حرارتی می‌شود. این ویژگی‌ها به حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری محصولات کمک می‌کنند. همچنین، کپسوله‌سازی به همراه افزودنی‌هایی مانند گرافن یا سیلیکا، مشکلاتی نظیر نشتی و هدایت حرارتی پایین را برطرف کرده و عملکرد این مواد را به‌طور چشمگیری ارتقا می‌دهد (Chalivendula & Tarigonda, 2025; Zare & Mikkonen, 2023). بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که روند تحقیقات از استفاده از PCMs آلی خالص به سمت توسعه سامانه‌های کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی حرکت کرده است. این سامانه‌ها علاوه بر افزایش ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی، موجب بهبود هدایت حرارتی، افزایش استحکام مکانیکی و کاهش احتمال نشت می‌شوند. در نتیجه، عملکرد بسته‌بندی در برابر نوسانات دمایی بهبود یافته و قابلیت استفاده از این مواد در مقیاس صنعتی افزایش می‌یابد.

PCMs غیرآلی

PCMs غیر آلی شامل نمک های هیدراته و فلزات ذوب‌شونده هستند. نمک‌های هیدراته می‌توانند در اثر واکنش شیمیایی بین کریستال خشک و محلول آبی، حرارت تولید یا جذب کنند و همچنین کاربرد گسترده‌ای در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در دماهای پایین دارند. این PCMs دارای ویژگی‌هایی مانند محدوده دمایی وسیع، تغییر فاز سریع، پایداری و رسانایی حرارتی بالا می‌باشند. فلزات با دمای ذوب پایین مانند بیسموت، ایندیوم، قلع، کادمیوم و سرب نیز به‌عنوان PCMs غیرآلی هستند که در بسته‌بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند اما چون معمولا این فلزات کمی سمی هستند، استفاده از آن‌ها محدود است. ضعف دیگر آن‌ها اثرات نا متقارن و سوپرکولینگ است که نیاز به افزودنی‌های هسته زا و مواد غلیظ کننده دارند تا عملکرد چرخه‌ای حرارت حفظ شده و از از دست رفتن آب جلوگیری شود (Sarkar, Mestry, & Mhaske, 2022).

استات سدیم تری هیدرات نوعی PCMs است که می‌تواند انرژی حرارتی را ذخیره کند، در مطالعه‌ای که از لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2022) آمده است، نقل می‌کند که افزودن استات سدیم تری هیدرات به بسته‌بندی گوشت و همچنین اضافه کردن آکریل آمید و نشاسته آبی به آن جهت بهبود انعطاف‌پذیری و افزودن گرافیت به فیلم تهیه شده برای جلوگیری از سرمایش بیش از حد، توانستند حرارت نهان داخل بسته‌بندی را به ۱۳۴ ژول بر گرم برسانند. کلسیم هیدراته ماده‌ای است که می‌تواند به‌عنوان PCM در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده شود، نبی و نورانی (Nabi & Nourani, 2023) این ماده را به ماتریس ژل آلژینات کپسوله کردند و نتایج به‌دست آمده گویای این بود که کلسیم هیدراته سبب می‌شود که ۵–۷ ساعت بافت گوشت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد حفظ شود. آب، به‌عنوان یک ماده تغییر فاز غیرآلی، در بسته‌بندی مواد غذایی به‌کار می‌رود و توانایی ذخیره و آزادسازی گرمای نهان در طی فرآیندهای ذوب و انجماد را دارد. این ویژگی به کاهش نوسانات دمایی کمک کرده و دمای محصول را در محدوده‌ای پایدار نگه می‌دارد، که در نتیجه کیفیت و ماندگاری محصولات در طول زنجیره سرد بهبود می‌یابد. برای افزایش کارایی و جلوگیری از نشت، آب معمولاً در قالب سیستم‌های کپسوله‌شده یا در ماتریس‌های پلیمری ادغام می‌شود.



شکل ۱- a. مقایسه محدوده دمای ذوب گروه‌های مختلف PCM/ b. مقایسه گرمای نهان مواد تغییر فاز

Fig. 1. a. Comparison of melting temperature ranges of different PCM groups/ b. Comparison of latent heat of phase change materials

این رویکرد به‌عنوان یک راهکار پایدار و مؤثر برای مدیریت حرارتی فعال در بسته‌بندی مواد غذایی شناخته می‌شود (Liu *et al.*, 2023). وانگ و همکاران (Wang, Xu, & Wang, 2024) از آب به‌عنوان PCM در بسته‌بندی میوه‌جات که از ترکیب PVA و پلی آکریلیک اسید [1] ساخته شده بود استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که این سامانه موجب افزایش ظرفیت گرمای نهان تا حدود ۱۸۰–۲۲۰ J/g، کاهش نشتی بیش از ۹۵٪ و افزایش ماندگاری میوه از ۶ به ۱۰ روز شد که ناشی از کنترل تبادل حرارتی و حفظ رطوبت در ساختار نانوالیافی بود. سولفید کادمیوم (CdS) به‌عنوان یک ماده غیرآلی در ساخت میکروکپسول‌های دوتایی PCMs به‌کار رفته است تا ویژگی‌های حرارتی و پایداری شکل آن‌ها را بهبود دهد. ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2022) با افزودن CdS به ماتریس پلیمری ملامین–فرمالدهید باعث افزایش پایداری حرارتی شدند. به‌طوری‌که این میکروکپسول‌ها حتی پس از ۱۰۰ چرخه حرارتی هم پایداری حرارتی را حفظ کردند. همچنین پس از حرارت‌دهی به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد هیچ نشتی مشاهده نشد. به‌طور کلی، PCMs غیرآلی با قابلیت ذخیره و آزادسازی گرمای نهان، نقش مؤثری در کنترل دما و کاهش نوسانات حرارتی در بسته‌بندی مواد غذایی دارند (Bahrami

1- Polyacrilyc acid (PAA)

& Sablani, 2025). به‌منظور مقایسه ویژگی‌های حرارتی مواد تغییر فاز، شکل ۱ محدوده دمای ذوب و ظرفیت گرمای نهان PCM های پرکاربرد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تفاوت در این ویژگی‌ها، انتخاب PCM مناسب را بر اساس دمای نگهداری و نوع محصول غذایی ضروری می‌سازد.

اسیدهای چرب

اسیدهای چرب یک دسته از PCMs است که می‌توانند انرژی حرارتی را ذخیره کنند. یکی از مزایای اصلی آن‌ها دسترسی به منابع زیستی و مصنوعی است. اکثر این ترکیبات حاصل از هیدروژناسیون اسیدهای چرب غیراشباع هستند که این فرآیند می‌تواند پایداری این مواد را در طول چرخه‌های مکرر تغییر فاز با جلوگیری از اکسیداسیون حفظ کند. اسیدهای چرب با وجود هزینه پایین و تغییرات اندک در برابر تغییر فاز دارای یکسری چالش‌ها هستند، مثلا در صورتی‌که کپسوله‌سازی به خوبی انجام نشود ممکن است سبب نشتی شود که در این صورت با افزودن مواد کربنی مثل گرافن می‌توان از این اتفاق جلوگیری کرد (Al-Ahmed *et al.*, 2021).

اسید لوریک نوعی PCM است که به واسطه دمای ذوب پایین و گرمای نهان بالای آن در بسته‌بندی مواد غذایی از جمله در زنجیره سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. وناپوسا و همکاران (Vennapusa, Singh, & Chattopadhyay, 2022) اسید لوریک را با دمای ذوب ۴۵/۲ درجه سانتی‌گراد و گرمای نهان ۱۸۹/۴۳ کیلوژول بر کیلوگرم به‌عنوان PCM در قالب ۶ پاکت پلی‌اتیلنی ۴۰ گرمی به دیواره‌های داخلی یک جعبه کارتنی متصل کردند. این بسته‌بندی توانست دمای ۱۵۰ گرم شیر را به‌مدت ۱۶۰ دقیقه در بازه دمایی مطلوب نگه دارد. این روش نشان‌دهنده پتانسیل بالای PCMs در بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی برای حفظ دما و کیفیت محصول است. کاپریک اسید به‌دلیل داشتن خواص ضد باکتریایی و ضد قارچی، در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود تا از رشد میکروارگانیسم‌ها در محصولات جلوگیری کرده و ماندگاری محصول را افزایش دهد (Zahid, Farooq, & Farhan, 2023). وناپوسا و همکاران (Vennapusa, Singh, & Chattopadhyay, 2022) از کاپریک اسید با پرلیت منبسط شده به‌عنوان PCM استفاده کردند. این ماده می‌تواند گرما را تا ۸۱ کیلوژول بر کیلوگرم ذخیره کند. ۵۸/۶ گرم از وزن این ماده را کاپریک اسید تشکیل داده است. وقتی ۲۰۰ گرم از این ماده را داخل بسته‌بندی گذاشتند توانست دمای ۳۶۰ گرم شکلات را به‌مدت ۳۴۹ دقیقه زیر ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهدارد. این یعنی بسته‌بندی توانست از گرم شدن شکلات جلوگیری کند. علاوه بر این توانست کیفیت شکلات را در طول حمل و نقل حفظ کند (Vennapusa, Konala, Dixit,

& Chattopadhyay, 2020). پالمتیک اسید یکی دیگر از PCMs محسوب می‌شود که به‌دلیل گرمای نهان بالا و دمای ذوب در محدوده مناسب برای حفظ دمای محصولات غذایی استفاده می‌شود. طبق مطالعات زارع و همکاران (Zare & Mikkonen, 2023) افزودن پالمتیک اسید به ماتریس پلیمری PVA و پلی آکریلیک اسید در بسته‌بندی میوه‌جات سبب پایدار نگه داشتن دمای داخل بسته‌بندی شده و از نوسانات حرارتی جلوگیری می‌کند که منجر به حفظ تازگی و کیفیت میوه در طول نگهداری می‌شود. به‌طور کلی، ادغام PCMs آلی مانند لوریک، کاپریک و پالمتیک اسید در بسته‌بندی با ماتریس‌های پلیمری زیستی، نوسانات حرارتی را کاهش داده، دمای محصول را پایدار نگه می‌دارد و کیفیت و ماندگاری مواد غذایی فسادپذیر را افزایش می‌دهد (Deka *et al.*, 2026).

خواص فیزیکی PCMs

خواص فیزیکی PCMs شامل گرمای نهان، دمای ذوب و انجماد و پایداری حرارتی می‌باشد که در شکل ۲ نمایش داده شده است و در ادامه هر یک از آن‌ها به‌طور مجزا توضیح داده می‌شود و در جدول ۲ خلاصه‌ای از خواص فیزیکی این مواد آورده شده است.

گرمای نهان PCMs

گرمای نهان میزان انرژی حرارتی گفته می‌شود که یک ماده در طول تغییر فاز مانند ذوب، انجماد و تبخیر، بدون اینکه دمای آن تغییر کند، دریافت یا آزاد می‌کند. PCMs می‌توانند گرمای اضافی محیط را در هنگام افزایش دما جذب کرده و هنگام کاهش دما مجدد آن را آزاد کنند که این فرآیند موجب کاهش نوسانات دمایی و حفظ دمای مطلوب به‌مدت قابل قبولی می‌شود. به همین دلیل گرمای نهان یکی از مهم‌ترین پارامترهای انتخاب PCM محسوب می‌شود و در رابطه با بسته‌بندی مواد غذایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (شکل ۲)(Rahimi-Khoigani & Hamdami, 2025). گرمای نهان PCMs نقش کلیدی در تثبیت دمای محصولات غذایی دارد. مطالعه‌ای که از رحیمی و همکاران (Rahimi-Khoigani & Hamdami, 2023) آمده است، عنوان می‌کند که وقتی تترادکان با گرمای نهان ۲۰۶/۳ کیلوژول بر کیلوگرم به بسته‌بندی قارچ اضافه شد توانست دمای این ماده غذایی را ۲-۳ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از بسته‌بندی بدون PCMs حفظ کند. استفاده از این PCMs همراه با طراحی بهینه بسته‌بندی توانست نواسانات حرارتی را کاهش داده و همچنین روی کیفیت و ماندگاری قارچ اثر مثبت بگذارد.

جدول ۱- انواع مواد تغییر فاز (PCMs) و کاربردهایشان در صنایع غذایی، پلی‌وینیل الکل (PVA)، پلی‌اکریل آمید (PAA)، پلی‌پروپیلن (PP)

Table 1- Types of phase change materials (PCMs) and their applications in the food industry, polyvinyl alcohol (PVA), polyacrylamide (PAA), polypropylene (PP)

Food product محصول غذایی	PCM مواد تغییر فاز	Encapsulation method روش کپسوله‌سازی	Matrix ماتریس	Results نتایج	Source منبع
فیله سالمون تازه Fresh Salmon Fillets	ان–اکتادکان n-Octadecane	پلیمریزاسیون امولسیونی Emulsion Polymerization	ملامین–فرمالدهید Melamine–Formaldehyde	افزایش زمان نگهداری حدود ۱۱ ساعت؛ کاهش ۳۱٪ TVB-N / Extended cold storage by ~11 h; 31% lower TVB-N	(Jafarpour *et al.*, 2023)
توت‌فرنگی تازه Fresh Strawberries	ان–هگزادکان n-Hexadecane	پلیمریزاسیون بین‌سطحی Interfacial Polymerization	پلی‌یوریا Polyurea	کاهش ۲۲٪ افت وزن؛ افزایش ماندگاری ۴ روز ۲۲% lower weight loss; Shelf life +4 days	(Rivera & Moraga, 2024a, 2024b)
شیر تازه Fresh milk	موم پارافین Paraffin wax	خشک‌کردن پاششی Spray drying	مالتودکسترین–صمغ عربی Maltodextrin–gum Arabic	حفظ دما کمتر از ۶ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹ ساعت Temperature below 6°C for 9 h	(Wang *et al.*, 2023)
بستنی Ice cream	یوتکتیک اسید کاپریک–لوریک Capric–lauric acid Eutectic	کمپلکس کواسرواسیون Complex Coacervation	ژلاتین–صمغ عربی Gelatin–gum Arabic	کاهش ۳۸٪ نوسانات دمایی 38% Lower Temperature fluctuation	(Chen *et al.*, 2022)
گوشت گاو تازه Fresh beef	ان–ایکوزان n-Eicosane	پلیمریزاسیون درجا In-situ Polymerization	پلی‌متیل متاکریلات PMMA	افزایش ۱۵ ساعت حفظ سرما؛ کاهش ۲۸٪ اکسیداسیون چربی 15h longer cooling; 28% lower lipid oxidation	(Jafarpour *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024)
ماست Yogurt	RT5 پارافین RT5 Paraffin	الکتروریسی Electrospinning	نانوالیاف PLA PLA Nanofibers	کاهش ۴۱٪ نوسان دمایی 41 % lower thermal fluctuation	(Pasha, 2026)
شکلات Chocolate	اسید استئاریک Stearic acid	اسپری چیلینگ Spray Chilling	چربی گیاهی هیدروژنه Hydrogenated vegetable fat	پایداری حرارتی تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد Thermal stability up to 32°C	(Yenare *et al.*, 2026)
ماهی تازه Fresh fish	ان–هگزادکان n-Hexadecane	امولسیون پیکرینگ Pickering emulsion	نانوبلورهای سلولز Cellulose nanocrystals	کاهش ۳۵٪TVB-N؛ افزایش ماندگاری ۳ روز 35% lower TVB-N; Shelf life +3 days	(Harini, Sunil, & Natarajan, 2026)
میگوی منجمد Frozen shrimp	اسید کاپریک Capric acid	خشک‌کردن پاششی Spray drying	ایزوله پروتئین آب‌پنیر Whey Protein isolate	بهبود ۲۶٪ حفظ بافت؛ کاهش آسیب چرخه انجماد–ذوب 26% better texture retention; Reduced freeze–thaw damage	(Harini *et al.*, 2026)

پالمتیک اسید یکی دیگر از PCMs مورد استفاده در صنعت بسته‌بندی است که به واسطه دمای ذوب حدود ۶۳ C° و گرمای نهان ۲۰۰ kJ/kg می‌تواند به مطلوب بودن بسته‌بندی کمک کند. PCMپالمتیک با ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان بالا، در بسته‌بندی فعال می‌تواند به‌عنوان یک دمابافر حرارتی عمل کند و عمر مفید و کیفیت محصولات غذایی حساس به دما را بهبود دهد. همچنین بهرامی و سبلانی (Bahrami, & Sablani *et al.*, 2025) اسید پالمتیک را به‌عنوان PCMs به PVA داخل بسته‌بندی میوه‌جات استفاده کردند و نتایج به این صورت بود که این بسته‌بندی به کار رفته برای میوه‌ها توانست نوسانات دمایی را کاهش دهد و دمای داخل بسته‌بندی را در محدوده مطلوب نگه دارد. استفاده از PCM باعث شد که تازگی و کیفیت میوه‌ها در طول زنجیره سرد افزایش یابد و از فساد ناشی از تغییرات دمای محیط جلوگیری شود (Bahrami & Sablani, 2025). در نتیجه گرمای نهان بالای PCMs با جذب و آزادسازی کنترل‌شده انرژی حرارتی، نوسانات دمایی را کاهش داده و به حفظ کیفیت و ماندگاری محصولات غذایی حساس به دما کمک می‌کند (Zare & Mikkonen, 2023).

دمای ذوب و انجماد

دمای ذوب و انجماد یک PCM دمایی است که در آن ماده از حالت جامد به مایع یا بالعکس تغییر فاز می‌دهد. این دما باید در محدوده‌ای انتخاب شود که با کاربرد موردنظر مطابقت داشته باشد (Nabi & Nourani, 2023). دمای ذوب بالاتر از این محدوده ممکن است باعث ذوب سریع و کاهش کیفیت محصول شود و دمای ذوب پایین‌تر ممکن است PCM در شرایط محیطی فعال نشود (Dardari *et al.*, 2025). در این راستا مطالعاتی صورت گرفته است که در غالب مثال ارائه می‌شود. گلیسیرین یک PCM غیرسمی و پایدار است که با ذخیره و آزادسازی گرمای نهان می‌تواند دمای داخلی بسته‌بندی مواد غذایی حساس به دما را تثبیت کرده و تازگی و کیفیت محصول را حفظ کند. نقطه ذوب گلیسیرین ۱۷–۱۸ درجه سلسیوس می‌باشد این دمای نسبتاً پایین باعث می‌شود گلیسیرین بتواند در کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی یا محصولات سرد، به‌عنوان ذخیره‌کننده و آزادکننده گرمای نهان عمل کند. طبق مطالعات پریرا و همکاران (Pereira *et al.*, 2024) با اضافه کردن گلیسیرین به‌عنوان PCM به سلولز استات در بسته‌بندی روغن جامد استفاده شد و نتایج نشان داد که نوسانات دمایی داخل بسته‌بندی کاهش یافته و دمای محصول در محدوده مطلوب حفظ شد. این امر منجر به افزایش کیفیت و تازگی روغن در طول ذخیره‌سازی شد و نشان داد که استفاده از گلیسیرین به‌عنوان PCM می‌تواند پایداری حرارتی بسته‌بندی را بهبود بخشیده و عمر مفید محصول را طولانی‌تر کند. پس استفاده از PCMs با دمای ذوب مناسب می‌تواند دمای داخلی بسته‌بندی مواد غذایی حساس به دما را پایدار نگه داشته و کیفیت و عمر مفید محصول را افزایش دهد (Bahrami & Sablani, 2025).

هدایت حرارتی و پایداری چرخه ای

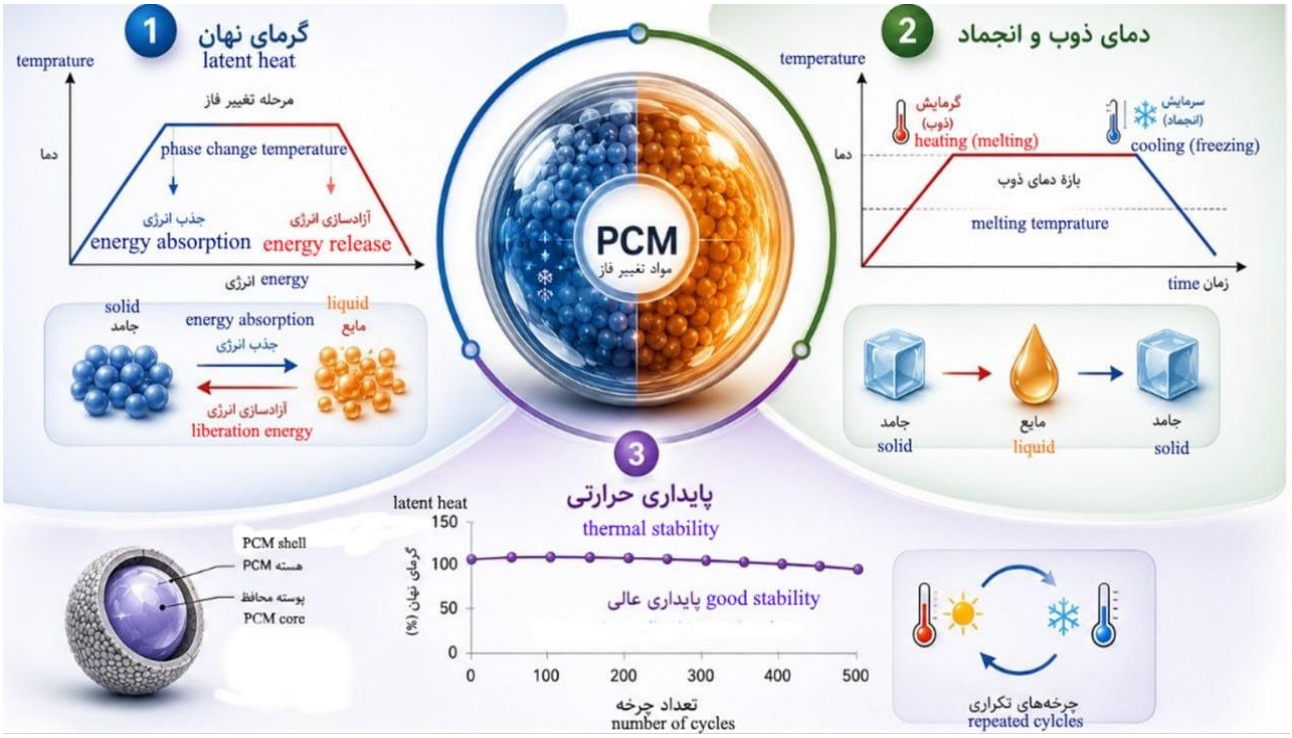
هدایت حرارتی و پایداری چرخه‌ای از پارامترهای حیاتی تعیین‌کننده عملکرد PCM در کاربردهای بسته‌بندی هوشمند هستند. هدایت حرارتی بیانگر توانایی ماده در انتقال گرما است و به‌طور مستقیم بر نرخ ذوب و انجماد و کارایی جذب و رهایش حرارت تأثیر می‌گذارد. پایداری چرخه‌ای نشان‌دهنده ظرفیت PCM برای تحمل تکرار چرخه‌های حرارتی بدون کاهش قابل توجه در گرمای نهان، دمای تغییر فاز یا یکپارچگی ماده است. هر دو ویژگی برای تضمین کنترل حرارتی پایدار و عملکرد طولانی‌مدت PCM ضروری‌اند. استفاده از روش‌هایی نظیر کپسوله‌سازی و تثبیت شکل موجب ارتقای این ویژگی‌ها و بهبود دوام و قابلیت اطمینان سیستم‌های بسته‌بندی مبتنی بر PCM در شرایط چرخه‌ای می‌شود (Bahrami & Sablani, 2025). در یک مطالعه اخیر، PCM های پارافینی کپسوله‌شده به ماتریس پلی‌اتیلن ترفتالات[1] افزوده شدند تا فیلم‌های بسته‌بندی هوشمند با قابلیت کنترل حرارتی تولید گردد. نتایج ارتوگرال و همکاران (Güngör Ertuğral & Alkan, 2021) نشان داد که این ترکیب نه‌تنها توانست دمای داخلی بسته‌بندی را در محدوده مطلوب پایدار نگه دارد، بلکه فرآیندهای ذوب و انجماد را با کارایی بالایی انجام داد. علاوه بر این، پایداری چرخه‌ای بالا تضمین کرد که پس از بیش از ۵۰۰ چرخه حرارتی، ظرفیت گرمای نهان و عملکرد حرارتی PCM ها به‌طور قابل توجهی کاهش نیابد. این یافته‌ها اهمیت بالای استفاده از PCM های کپسوله‌شده در طراحی بسته‌بندی‌های هوشمند را برجسته می‌کنند و نشان می‌دهند که چنین سیستم‌هایی می‌توانند ماندگاری محصولات غذایی را افزایش داده و قابلیت اطمینان بسته‌بندی را در طول زنجیره سرد بهبود بخشند. لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2023)، اسید لوریک به‌عنوان PCM انتخاب کردند و در ترکیب با ماتریس پشتیبان خاکستر پروازی اصلاح‌شده و گرافن به‌صورت کامپوزیت شکل‌پایدار تولید کردند. نتایج نشان داد که این PCM ترکیبی دارای نقطه ذوب حدود ۴۵/۳۸ درجه سلسیوس و گرمای نهان ذوب تقریباً ۱۸۵–۱۹۰ ژول بر گرم بود. علاوه بر این، افزودن گرافن موجب شد زمان ذوب و انجماد به‌ترتیب تا حدود ۶۱٪ و ۸۰٪ کاهش یابد، که نشان‌دهنده بهبود چشمگیر هدایت حرارتی و سرعت انتقال حرارت است. این مطالعه تأکید می‌کند که انتخاب دقیق PCMو ادغام آن با ماتریس‌های پشتیبان و نانومواد رسانا می‌تواند نه تنها کنترل حرارتی مؤثر را برای کاربردهایی مانند بسته‌بندی فراهم کند، بلکه دوام حرارتی و پایداری چرخه‌ای ماده را نیز افزایش دهد (Liu *et al.*, 2023). در نتیجه هدایت حرارتی و پایداری چرخه تأثیر به خصوصی در کنترل نوسانات دمایی دارد.

1- Poly ethylene terephthalate (PET)

جدول ۲- ویژگی‌های حرارتی و کاربردهای بسته‌بندی برخی از مواد تغییر فاز

Table 2- Thermal properties and packaging applications of some phase change materials

نوع PCM PCM Type	دمای ذوب Melting temperature (°C)	گرمای نهان Latent Heat (kJ/kg)	دمای انتقال شیشه ای Glass transition temperature (Tg)	کاربرد Application	محدودیت اصلی Main limitation	منبع Source
Lauric acid لوریک اسید	45.2	189.43	68	Maintaining milk temperature within the cold chain at 3–4°C حفظ دمای شیر در زنجیره سرد در بازه ۳–۴ درجه سانتی گراد	leakage, low thermal conductivity نشت در حالت ذوب، هدایت حرارتی پایین	Vennapusa, Singh, & Chattopadhyay, 2022)
Capric acid کاپریک اسید	33-31	81	72	Preventing chocolate overheating and controlling thermal fluctuations جلوگیری از گرم شدن شکلات و کنترل گرما	Leakage after melting نشت در حالت ذوب	Qazanfarzadeh, Kadivar, Shekarchizadeh, & Porta, 2021)
Palmitic acid پالمتیک اسید	64-62	201-200	64	Preserving fruit temperature and reducing temperature fluctuations حفظ کردن دمای میوه و جلوگیری از نوسانات دما	High melting temperature; unsuitable for refrigerated foods دمای ذوب بالا؛ نامناسب برای زنجیره سرد	Carvalho, de Carvalho, & Conte-Junior, 2025)
Myristic acid میریستیک اسید	54	191	66	Utilized in eutectic mixtures with lauric acid for cold-chain preservation ترکیب با لوریک اسید در یوتکتیک‌ها و حفظ زنجیره سرد	limited operating temperature range محدوده دمای کاری محدود	Chen, Chang, & Zhang, 2021)
Stearic acid استئاریک اسید	70	215	60	Eutectic formulations for temperature regulation in meat packaging یوتکتیک‌ها برای تنظیم دما، بسته‌بندی گوشت	Very high melting temperature دمای ذوب بسیار بالا	(Song *et al.*, 2021)
Tetradecanol تترادکانول	39-38	160	78	Encapsulation within alginate coatings for meat packaging applications کپسوله سازی در پوشش آلژینات برای بسته بندی گوشت	Leakage during repeated cycles نشت در چرخه‌های مکرر	(Al-Gunaid *et al.*, 2023)
Dodecanol دودکانول	25-24	130-125	83	Electrospun zein nanofibers for milk packaging systems الکتروریسی در نانوالیاف زئین برای بسته‌بندی شیر	Low thermal conductivity, leakage هدایت حرارتی پایین، نشت	Singh, Parvate, Dixit, & Chattopadhyay, 2020)
Water آب	0	334	137	Fruit packaging; high latent heat storage capacity and leakage prevention بسته‌بندی میوه جات، ظرفیت گرمای نهان بالا، جلوگیری از نشت	Volume expansion during freezing انبساط حجمی هنگام انجماد	Antunes, Silva, & Gaspar, 2025)



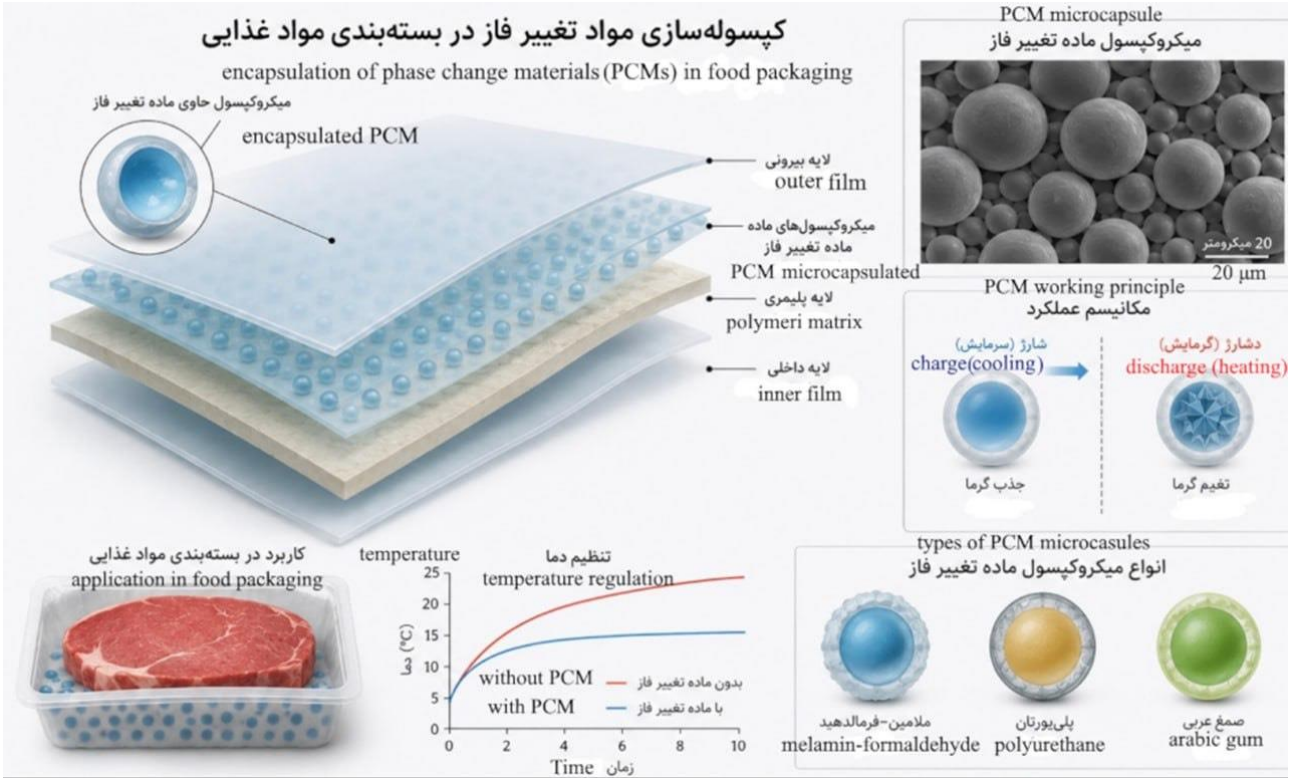
شکل ۲- خواص فیزیکی مواد تغییر فاز

Fig. 2. Physical properties of phase change material

کپسوله سازی

PCMs به‌دلیل قابلیت ذخیره و رهایش گرما، گزینه‌ای ایده‌آل برای بسته‌بندی هوشمند محسوب می‌شوند، اما محدودیت‌هایی مانند هدایت حرارتی پایین، نشت ماده در حالت ذوب و کاهش پایداری چرخه‌ای نیازمند راهکارهای بهبود عملکرد هستند. برای بهبود عملکرد مواد تغییر فازPCM در بسته‌بندی هوشمند، راهکارهای متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. کپسوله‌سازی PCM ها درون پوسته‌های پلیمری یا معدنی موجب جلوگیری از نشت و افزایش پایداری چرخه‌ای می‌شود، در حالی‌که تثبیت شکل با ادغام PCMs در ماتریس‌های پلیمری یا کامپوزیتی امکان حفظ ساختار ماده حتی در حالت ذوب را فراهم می‌کند. علاوه بر این، افزودن نانوذرات رسانا نظیر گرافن یا اکسید فلزات موجب افزایش هدایت حرارتی و تسریع فرآیندهای ذوب و انجماد می‌شود. ترکیب PCM با پلیمرهای زیست‌پایه و استفاده از اصلاح سطح یا افزودنی‌های عملکردی نیز می‌تواند کنترل حرارت، دوام چرخه‌ای و سازگاری با بسته‌بندی پایدار را ارتقا دهد (Jafarpour *et al.*, 2023). به‌طور کلی، بهره‌گیری همزمان از این روش‌ها، عملکرد حرارتی و قابلیت اطمینان PCM ها در کاربردهای بسته‌بندی هوشمند را به شکل قابل توجهی بهبود می‌بخشد، یکی از روش‌های کاربردی و مؤثر که استفاده می‌شود کپسوله‌سازی است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. کپسوله‌سازی به‌عنوان یکی از روش‌های کلیدی و متداول برای ارتقای عملکرد PCM در بسته‌بندی هوشمند شناخته می‌شود، که طی آن PCM درون پوسته‌ای از جنس پلیمر یا مواد معدنی محصور می‌گردد. این تکنیک علاوه بر جلوگیری از نشت ماده در حالت ذوب، موجب افزایش پایداری چرخه‌ای PCM و حفظ یکپارچگی فیزیکی آن طی چرخه‌های متعدد حرارتی می‌شود. همچنین، کپسوله‌سازی امکان ادغام PCM با ماتریس‌های بسته‌بندی مختلف را فراهم می‌آورد و به بهبود قابلیت کنترل دما، افزایش دوام حرارتی و ارتقای کارایی کلی سیستم بسته‌بندی کمک می‌کند. کپسوله‌سازی مواد تغییر فاز به دو روش اصلی ریزکپسوله‌سازی و نانوکپسوله‌سازی انجام می‌شود که هر دو با هدف جلوگیری از نشت، افزایش پایداری چرخه‌ای و بهبود عملکرد حرارتی به کار می‌روند. در این روش‌ها، ماده تغییر فاز درون پوسته‌هایی از پلیمرهای طبیعی، پلیمرهای سنتزی یا مواد معدنی محصور می‌شود که علاوه بر جلوگیری از نشت، موجب افزایش استحکام و دوام حرارتی سامانه می‌شوند. مواد مورد استفاده برای تشکیل پوسته کپسول نقش مهمی در جلوگیری از نشت و افزایش پایداری ماده تغییر فاز دارند. از رایج‌ترین مواد پوششی می‌توان به پلیمرهای طبیعی مانند آلژینات، کیتوسان، ژلاتین و مشتقات سلولز، پلیمرهای سنتزی مانند پلی‌وینیل الکل، پلی‌یورتان و پلی‌یوریا و همچنین مواد معدنی نظیر سیلیکا و رس‌های لایه‌ای اشاره کرد. انتخاب جنس پوسته بر اساس نوع ماده تغییر فاز، دمای کاری و شرایط نگهداری محصول غذایی انجام

می‌شود (Jafarpour *et al.*, 2023). به‌طور کلی، استفاده از کپسوله‌سازی یکی از مؤثرترین راهکارها برای بهینه‌سازی عملکرد حرارتی PCM در کاربردهای صنعتی و بسته‌بندی مواد حساس به دما محسوب می‌شود و همچنین نشتی را به حداقل می‌رساند. در سال‌های اخیر، الکتروریسی به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های کپسوله‌سازی مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، ماده تغییر فاز درون نانوالیاف پلیمری یا در هسته الیاف هم‌محور قرار می‌گیرد و به‌وسیله یک لایه پلیمری احاطه می‌شود. این ساختار علاوه بر جلوگیری از نشت ماده در هنگام ذوب، موجب افزایش سطح تماس، بهبود انتقال حرارت، تسریع جذب و آزادسازی گرمای نهان و افزایش پایداری چرخه‌ای می‌شود. ازاین‌رو، الکتروریسی یکی از روش‌های امیدبخش برای توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند با قابلیت کنترل مؤثر نوسانات دمایی محسوب می‌شود (شکل ۳) (Aguiar, Gaspar, & da Silva, 2023; Jafarpour *et al.*, 2023)، بدین‌وسیله مطالعاتی در این باره مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۳- کپسوله‌سازی مواد تغییر فاز در ماتریس پلیمری

Fig. 3. Encapsulation of phase change materials in a polymer matrix

لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2022) با استفاده از استات سدیم تری‌هیدرات کپسوله‌شده در بسته‌بندی گوشت در ماتریس PAA و نشاسته گزارش کردند که سامانه طراحی‌شده دارای گرمای نهان ۱۳۴ ژول بر گرم بود و توانست دمای گوشت را در محدوده مناسب نگه دارد. در نتیجه، نمونه‌های گوشت تا ۲ روز بیشتر نسبت به شاهد کیفیت قابل قبول خود را حفظ کردند. دلیل این موضوع، کاهش شوک دمایی و جلوگیری از رشد سریع میکروبی بود و همچنین کپسوله‌سازی استات سدیم تری هیدرات در ماتریس PAA باعث جلوگیری از نشت فاز مایع هنگام ذوب و افزایش پایداری حرارتی ماده شد (Liu *et al.*, 2022).

در مطالعه‌ای دیگر زو و همکاران (Xu, Zhou, Zhang, Zhai, & Zhang, 2023) گزارش کردند که استفاده از پلیمر HDPE[1] حاوی RT8HC[2] توانست دمای میوه را تا ۸ ساعت زیر ۱۰ درجه سلسیوس حفظ کند، در حالی‌که این زمان در نمونه کنترل تنها ۲/۵ ساعت بود. دلیل این تغییر، گرمای نهان ذوب بالای RT8HC یعنی می‌تواند مقدار زیادی گرما را بدون افزایش محسوس دمای خود جذب کند. باعث جلوگیری از نشت در هنگام ذوب و افزایش پایداری در چرخه‌های حرارتی می‌شود، در نتیجه کنترل دما دقیق‌تر انجام شده، نوسانات دمایی کاهش می‌یابد و در نهایت زمان ماندگاری محصول افزایش پیدا

1- Hight density polyethylene (HDPE)

2- Rubitherm (RT8HC)

می‌کند (Xu *et al.*, 2023). سانگ و همکاران (Song, Guo, He, & Zhang, 2024) از پارافین با دمای ذوب ۴ درجه سلسیوس در قفسه‌های سردخانه نگهداری سیب با بسته‌بندی پلی‌پروپیلن[1] استفاده کردند. نتایج نشان داد نوسانات دمایی ۳۱٪ کاهش یافت و مدت نگهداری سیب از ۹۰ روز به ۱۱۲ روز افزایش یافت. دلیل این افزایش ماندگاری گرمای نهان بالای پارافین بود که که هنگام افزایش دما ذوب شده و مقدار زیادی گرما را جذب می‌کند بدون آن‌که دمای اطراف به سرعت افزایش یابد که این ویژگی باعث کاهش نوسانات دمایی، حفظ زنجیره سرد، کاهش رشد میکروبی، کند شدن واکنش‌های فساد و در نهایت افزایش ماندگاری می‌شود و همچنین مزیت کپسوله کردن پارافین نسبت به حالت معمولی این است که باعث جلوگیری از نشت در هنگام ذوب و افزایش پایداری در چرخه‌های حرارتی می‌شود، در نتیجه کنترل دما دقیق‌تر انجام شده، نوسانات دمایی کاهش می‌یابد و در نهایت زمان ماندگاری محصول افزایش پیدا می‌کند (Song *et al.*, 2024).

پلی‌اتیلن گلیکول[2] یک ماده تغییر فاز از نوع پلی‌اتیلن گلیکول با وزن مولکولی متوسط است که دارای گرمای نهان ذوب بالا و رفتار ذوب/انجماد برگشت‌پذیر می‌باشد. این PCM هنگام افزایش دما، انرژی حرارتی را به‌جای بالا رفتن سریع دما صرف تغییر فاز از جامد به مایع می‌کند، بنابراین نقش یک بافر حرارتی را ایفا کرده و از نوسانات دمایی جلوگیری می‌کند. وو و همکاران (Wu *et al.*, 2026) از PEG به‌عنوان PCM درون ماتریس PVA استفاده کردند و آن را با روش الکتروریسی کپسوله‌سازی نمودند. در این فرآیند، محلول حاوی PVA وPEG تحت میدان الکتریکی قوی از نازل کشیده شد و با تبخیر حلال، نانوفیبرهایی تشکیل شد که در آن‌ها PEG به‌صورت محبوس فیزیکی در ساختار الیاف قرار گرفت. این نوع کپسوله‌سازی موجب جلوگیری از نشت ماده تغییر فاز، افزایش پایداری حرارتی و توزیع یکنواخت PCM در شبکه پلیمری شد و در نتیجه توانایی سیستم در تنظیم و تثبیت دما بهبود یافت و دمای محصول برای مدت طولانی‌تری (حدود ۴ تا ۶ ساعت) در محدوده مطلوب حفظ گردید (Wu *et al.*, 2026). به‌طور کلی در مجموع، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که کپسوله‌سازی مواد تغییر فاز در ماتریس‌های پلیمری با جلوگیری از نشت فاز مایع، افزایش پایداری چرخه‌ای و بهبود انتقال کنترل‌شده گرما، موجب عملکرد مؤثرتر این مواد در تنظیم دمای بسته‌بندی می‌شود. این ویژگی‌ها با کاهش نوسانات حرارتی و حفظ شرایط بهینه نگهداری، به‌طور مستقیم در بهبود کیفیت محصول و افزایش زمان ماندگاری مواد غذایی نقش دارند (Bidiyasar, Kumar, & Jakhar, 2024; Yuan *et al.*, 2024).

چالش‌ها و محدودیت‌ها

با وجود کاربردهای گسترده و مزایای عملکرد PCMs در سامانه‌های بسته‌بندی هوشمند، همچنان چالش‌های علمی و فنی قابل‌توجهی در مسیر به‌کارگیری صنعتی آن‌ها وجود دارد. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، هزینه بالای سنتز و فرآوری PCM ها است، به‌ویژه در مورد ترکیباتی که نیازمند اصلاح شیمیایی یا استفاده از نانوساختارها برای بهبود هدایت حرارتی هستند. چنین فرآیندهایی نه‌تنها هزینه تولید را افزایش می‌دهند، بلکه مقیاس‌پذیری صنعتی را نیز با مشکل مواجه می‌سازند. از سوی دیگر، پایداری فیزیکی پایین و احتمال نشت PCM در طی چرخه‌های ذوب و انجماد یکی از مسائل اساسی در طراحی سیستم‌های بسته‌بندی است، زیرا نشت حتی در مقادیر کم می‌تواند سبب از دست رفتن ظرفیت حرارتی و آلودگی محصول شود (Tony, 2021). در همین راستا، توسعه راهکارهایی مانند کپسوله‌سازی، تثبیت شکل و اصلاح سطح برای جلوگیری از نشت مورد توجه قرار گرفته است، هرچند این روش‌ها نیز ممکن است موجب افزایش هزینه و پیچیدگی فرآیند شوند. چالش دیگر، انتخاب PCM با محدوده دمایی انتقال فاز مناسب است؛ به‌گونه‌ای که دمای ذوب آن با شرایط نگهداری ماده غذایی هدف هم‌خوانی داشته باشد تا عملکرد حرارتی مؤثر حاصل شود. بنابراین، بهبود ویژگی‌های ترمودینامیکی، افزایش پایداری فیزیکی و کاهش هزینه تولید از محورهای اصلی تحقیقات جاری برای توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند مبتنی بر PCMs به‌شمار می‌رود (Dardari *et al.*, 2025).

نتیجه‌گیری

در مجموع، مرور مطالعات نشان می‌دهد که PCMs یکی از امیدوارکننده‌ترین راهکارها برای توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند با قابلیت مدیریت حرارتی در زنجیره تأمین مواد غذایی هستند. این مواد با کاهش نوسانات دمایی، نقش مؤثری در حفظ کیفیت، افزایش ایمنی و افزایش ماندگاری محصولات فسادپذیر ایفا کرده و در عین حال می‌توانند مصرف انرژی و ضایعات غذایی را کاهش دهند. بررسی مطالعات نشان داد که در میان PCM های آلی، پارافین‌ها، اسیدهای چرب به‌ویژه لوریک، کاپریک و پالمتیک اسید و نیز پلی‌اتیلن گلیکول، به‌دلیل پایداری شیمیایی، ظرفیت مناسب ذخیره گرمای نهان و سازگاری با سامانه‌های بسته‌بندی، بیشترین کاربرد را داشته‌اند. در مقابل، PCMهای غیرآلی مانند نمک‌های هیدراته و استات سدیم تری‌هیدرات، اگرچه هدایت حرارتی و ظرفیت ذخیره انرژی بالاتری دارند، اما چالش‌هایی نظیر سوپرکولینگ، جدایش فازی و کاهش

1- Polyprppylene (PP)

2- Polyethylene glycol (PEG)

پایداری چرخه‌ای، استفاده گسترده از آن‌ها را محدود کرده است. مطالعات همچنین نشان دادند که استفاده از سامانه‌های کامپوزیتی، کپسوله‌سازی میکرو و نانو، فناوری الکتروریسی و به‌کارگیری نانوذرات رسانای حرارتی، مؤثرترین راهکارها برای رفع محدودیت‌های PCMها از جمله نشت، هدایت حرارتی پایین و افت عملکرد در چرخه‌های حرارتی هستند. این راهبردها امکان به‌کارگیری موفقPCM ها را در فیلم‌ها، پوشش‌ها و نانوالیاف بسته‌بندی فراهم کرده و عملکرد آن‌ها را در شرایط واقعی زنجیره سرد بهبود بخشیده‌اند. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، هنوز چالش‌هایی نظیر بهبود پایداری بلندمدت، افزایش زیست‌سازگاری، کاهش هزینه تولید و ارزیابی عملکرد این سامانه‌ها در مقیاس صنعتی باقی مانده است. ازاین‌رو، پژوهش‌های آینده باید بر توسعه PCMهای پایدار و مقرون‌به‌صرفه، طراحی سامانه‌های چندعملکردی و ادغام آن‌ها با فناوری‌های هوشمند نظیر حسگرهای دما و شاخص‌های زمان–دما متمرکز شوند. چنین رویکردی می‌تواند زمینه توسعه نسل جدید بسته‌بندی‌های هوشمند را فراهم کرده و نقش مهمی در ارتقای ایمنی مواد غذایی، کاهش ضایعات و دستیابی به اهداف توسعه پایدار ایفا کند.

روندهای آتی و پیشنهادهای پژوهشی

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در توسعه مواد تغییر فاز برای بسته‌بندی هوشمند، هنوز فاصله قابل توجهی میان نتایج آزمایشگاهی و کاربرد صنعتی این فناوری وجود دارد. ازاین‌رو، پژوهش‌های آینده باید بر طراحی PCMهای زیست‌پایه با دمای تغییر فاز قابل تنظیم، افزایش هدایت حرارتی بدون کاهش ظرفیت گرمای نهان و توسعه سامانه‌های شکل‌پایدار با مقاومت چرخه‌ای بالا متمرکز شوند. همچنین، بهینه‌سازی روش‌های ریزکپسوله‌سازی، نانوکپسوله‌سازی و الکتروریسی به‌منظور کاهش نشت و افزایش دوام عملکرد، از مهم‌ترین اولویت‌های پژوهشی محسوب می‌شود.

از سوی دیگر، بررسی ایمنی تماس مستقیم PCMها با مواد غذایی، ارزیابی مهاجرت احتمالی ترکیبات، تدوین استانداردهای قانونی و انجام مطالعات اقتصادی برای امکان‌سنجی تولید در مقیاس صنعتی، از الزامات تجاری‌سازی این فناوری است. علاوه بر این، ادغام PCMها با فناوری‌های نوین مانند حسگرهای هوشمند، شاخص‌های زمان–دما، اینترنت اشیا و هوش مصنوعی می‌تواند نسل جدیدی از بسته‌بندی‌های هوشمند را ایجاد کند که علاوه بر کنترل فعال دما، قابلیت پایش لحظه‌ای شرایط نگهداری، پیش‌بینی فساد محصول و مدیریت هوشمند زنجیره سرد را نیز داشته باشند. تحقق این اهداف می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی، افزایش ماندگاری مواد غذایی، کاهش ضایعات و توسعه پایدار صنعت بسته‌بندی ایفا کند.

منابع تأمین مالی

بودجه این کار توسط کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، با کد رهگیری ۵۰۰۰۷۱۳۶ تامین شده است.

میزان مشارکت نویسندگان

حنانه یزدانبخش: مدیریت داده‌ها، تحقیق و بررسی، نوشتن پیش‌نویس اصلی. **سودابه اله مرادی:** نوشتن پیش‌نویس اصلی. **محمدهادی مرادیان:** بررسی و ویرایش متن. **مریم عزیزی لعل آبادی:** مفهوم‌سازی، تأمین مالی، مدیریت پروژه، نظارت، منابع، بررسی و ویرایش متن.

سپاسگزاری

کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه با شماره گرنت ۵۰۰۰۷۱۳۶، مجوز و بودجه این مطالعه را اعطا کرد.

References

1. Abedi-Firoozjah, R., Azimi-Salim, S., Afrah, A., Yekta, R., Assadpour, E., Azizi-Lalabadi, M., & Jafari, S.M. (2024). Freshness/spoilage monitoring of protein-rich foods by betacyanin-loaded gelatin/carboxymethyl cellulose halochromic labels. *Future Foods*, *10*, 100458. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100458
2. Aguiar, M., Gaspar, P.D., & da Silva, P.D. (2023). Thermal management of short-range distribution of perishable food products using phase change materials in packaging: Real-time field data acquisition. *Energies*, *16*(13), 5191. https://doi.org/10.3390/en16135191
3. Al-Ahmed. A., Mazumder, M.A.J., Salhi, B., Sari, A., Afzaal, M., & Al-Sulaiman, F.A. (2021). Effects of carbon-based fillers on thermal properties of fatty acids and their eutectics as phase change materials used for thermal energy storage: a review. *Journal of Energy Storage*, *35*, 102329. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102329
4. Al-Gunaid, T., Sobolčiak, P., Chriaa, I., Karkri, M., Mrlik, M., Ilčíková, M., . . . Krupa, I. (2023). Phase change materials designed from Tetra Pak waste and paraffin wax as unique thermal energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, *64*, 107173. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107173
5. Antunes, J.L., Silva, P.D., & Gaspar, P.D. (2025). Thermal behavior of alveoli with phase change materials in fruit packaging. *Applied Sciences*, *15*(4), 1924. https://doi.org/10.3390/app15041924

6. Azizi-Lalabadi, M., Rahimzadeh-Sani, Z., Feng, J., Hosseini, H., & Jafari, S.M. (2023). The impact of essential oils on the qualitative properties, release profile, and stimuli-responsiveness of active food packaging nanocomposites. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63*(13), 1822-1845. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1971154
7. Azizi-Lalabadi, M., Rafiei, L., Divband, B., & Ehsani, A. (2020). Active packaging for Salmon stored at refrigerator with Polypropylene nanocomposites containing 4A zeolite, ZnO nanoparticles, and green tea extract. *Food Science & Nutrition, 8*(12), 6445-6456. https://doi.org/10.1002/fsn3.1934
8. Bahrami, S., & Sablani, S.S. (2025). Phase change materials in food packaging: a review. *Food and Bioprocess Technology, 18*(4), 3100-3123. https://doi.org/10.1007/s11947-024-03564-0
9. Bayram, B., Ozkan, G., Kostka, T., Capanoglu, E., & Esatbeyoglu, T. (2021). Valorization and application of fruit and vegetable wastes and by-products for food packaging materials. *Molecules, 26*(13), 4031. https://doi.org/10.3390/molecules26134031
10. Bhatlawande, A.R., Ghatge, P.U., Shinde, G.U., Anushree, R., & Patil, S.D. (2024). Unlocking the future of smart food packaging: biosensors, IoT, and nano materials: AR Bhatlawande *et al*. *Food Science and Biotechnology, 33*(5), 1075-1091. https://doi.org/10.1007/s10068-023-01486-9
11. Bidiyasar, R., Kumar, R., & Jakhar, N. (2024). A critical review of polymer support-based shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage applications. *Energy Storage, 6*(4), e639. https://doi.org/10.1002/est2.639
12. Carvalho, L.G., de Carvalho, A.P.A., & Conte-Junior, C.A. (2025). Bioactive compounds, antimicrobial properties of Açaí (*Euterpe oleracea* mart.) and its processing residues–insights for smart packaging and green chemistry. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 65*, 103540. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103540
13. Chalivendula, S.R., & Tarigonda, H. (2025). Recent advances in organic phase change materials for thermal energy storage: a review on sustainable development applications. *International Journal of Thermophysics, 46*(6), 88. https://doi.org/10.1007/s10765-025-03559-9
14. Chen, H., Xuan, J., Deng, Q., & Gao, Y. (2022). WOOD/PCM composite with enhanced energy storage density and anisotropic thermal conductivity. *Progress in Natural Science: Materials International, 32*(2), 190-195. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2022.01.002
15. Chen, Q., Chang, C., & Zhang, L. (2021). Surface engineering of cellulose film with myristic acid for high strength, self-cleaning and biodegradable packaging materials. *Carbohydrate Polymers, 269*, 118315. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118315
16. Dardari, O., Sair, S., El Idrissi, A., Benjelloun, G.R., Ait Ousaleh, H., Maati, H., . . . Amadine, O. (2025). Development of temperature-regulating CR/PVA bionanocomposite films with phase change materials and antibacterial properties for ice cream packaging. *Food Chemistry, 480*, 1434. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143492
17. Deka, H., Naseem, A., Bhansali, A.A., Mabood, M.F., Gangawane, K.M., & Sablani, S.S. (2026). Phase change materials-based biodegradable packaging for perishable food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 25*(1), e70404. https://doi.org/10.1111/1541-4337.70404
18. Duquesne, M., Mailhé, C., Doppiu, S., Dauvergne, J.-L., Santos-Moreno, S., Godin, A., . . . Palomo del Barrio, E. (2021). Characterization of fatty acids as biobased organic materials for latent heat storage. *Materials, 14*(16), 4707. https://doi.org/10.3390/ma14164707
19. Güngör Ertuğral, T., & Alkan ,C. (2021). Synthesis of thermally protective PET–PEG multiblock copolymers as food packaging materials. *Polymers and Polymer Composites, 29*(9_suppl), S1125-S1133. https://doi.org/10.1177/09673911211045683
20. Harini, R., Sunil, C., & Natarajan, V. (2026). Mechanistic suppression of spoilage in Indian mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) using phase change materials: An integrated volatile and metabolite profiling approach. *Journal of Food Science, 91*(7), e71255. https://doi.org/10.1111/1750-3841.71255
21. Hassoun, A., Dankar, I., Bhat, Z., & Bouzembrak, Y. (2024). Unveiling the relationship between food unit operations and food industry 4.0: A short review. *Heliyon, 10*(20). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39388
22. Hu, C., Yao, C., Sun, Y., Chen, Z., Zhu, X., Wang, S., . . . Huang, C. (2025). Electrostatic spinning packaging for food temperature management—phase change energy storage and radiative cooling characteristics. *Advanced Composites and Hybrid Materials, 8*(3), 255. https://doi.org/10.1007/s42114-025-01332-y
23. Jafarpour, M., Fathi, M., & Soltanizadeh, N. (2023). Encapsulation of polyethylene glycol as a phase change material using alginate microbeads to prevent temperature fluctuation-Case study: Fish packaging. *Food Hydrocolloids, 134*, 108029. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108029
24. Jain, N.K., Paliwal, D., & Jain, P. (2024). Experimental investigation of dodecanoic acid–tetradecanoic acid–dodecanol ternary mixture based nanoparticle enriched-phase change material for food preservation applications.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 09544089241285099. https://doi.org/10.1177/09544089241285099

25. Liu, P., Chen, X., Li, Y., Cheng, P., Tang, Z., Lv, J., . . . & Wang, G. (2022). Aerogels meet phase change materials: fundamentals, advances, and beyond. *ACS Nano, 16*(10), 15586-15626. https://doi.org/10.1021/acsnano.2c05067
26. Liu, P., Cui, X., Wang, Y., Zhang, Z., Rao, J., Jiang, S., & Gu, X. (2023). Preparation and characterization of lauric acid/modified fly ash/graphene composite as low-cost and eco-friendly phase change materials for thermal energy storage. *Energies, 16*(15), 5666. https://doi.org/10.3390/en16155666
27. Liu, Q., Zhang, J., Liu, J., Sun, W., Xu, H., & Liu, C. (2023). Self-healed inorganic phase change materials for thermal energy harvesting and management. *Applied Thermal Engineering, 219*, 119423. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119423
28. Mehling, H., Brütting, M., & Haussmann, T. (2022). PCM products and their fields of application-An overview of the state in 2020/2021. *Journal of Energy Storage, 51*, 104354. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104354
29. Nabi, L., & Nourani, M. (2023). Biodegradable form stable phase change material for cold storage packaging of meat. *Meat Science, 201*, 109188. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109188
30. Pahamli, Y., & Valipour, M.S. (2021). Application of phase change materials in refrigerator and freezer appliances: A comprehensive review. *Journal of Heat and Mass Transfer Research, 8*(1), 87-104. https://doi.org/10.22075/jhmtr.2021.21860.1316
31. Pasha, A.M. (2026). Phase-change material-based thermal management for energy-efficient and sustainable food preservation systems. https://doi.org/10.11648/j.ajmme.20261001.11
32. Pereira, A., Marques, M.A., Alves, J., Morais, M., Figueira, J., Pinto, J.V., & Moreira, F.T. (2024). Irreversible colorimetric bio-based curcumin bilayer membranes for smart food packaging temperature control applications. *RSC Advances, 14*(13), 8981-8989. https://doi.org/10.1039/d4ra01411a
33. Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2023). *Multifunctional phase change materials: fundamentals, properties and applications*: Elsevier.
34. Png, Z.M., Soo, X.Y.D., Chua, M.H., Ong, P.J., Suwardi, A., Tan, C.K.I., . . . & Zhu, Q. (2022). Strategies to reduce the flammability of organic phase change Materials: A review. *Solar Energy, 231*, 115-128. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.057
35. Qazanfarzadeh, Z., Kadivar, M., Shekarchizadeh, H., & Porta, R. (2021). Secalin films acylated with capric acid chloride. *Food Bioscience, 40*, 100879. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100879
36. Rahimi-Khoigani, S., & Hamdami, N. (2023). Effect of improved latent heat storage system on the temperature fluctuations and quality of foods. *Food Control, 146*, 109542. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109542
37. Rahimi-Khoigani, S., & Hamdami, N. (2025). Optimization of latent heat storage system performance in food packaging. *Journal of Food Engineering, 398*, 112604. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2025.112604
38. Rivera, D.R., & Moraga, N.O. (2024a). Energy analysis of convective freezer cabinet with PCMs and salmon-fillet during charging, discharging and normal operation processes by CFD modeling. *Journal of Energy Storage, 83*, 110558. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110558
39. Sarkar, S., Mestry, S., & Mhaske, S. (2022). Developments in phase change material (PCM) doped energy efficient polyurethane (PU) foam for perishable food cold-storage applications: A review. *Journal of Energy Storage, 50*, 104620. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104620
40. Singh, J., Parvate, S., Dixit, P., & Chattopadhyay, S. (2020). Facile synthesis of microencapsulated 1-dodecanol (PCM) for thermal energy storage and thermal buffering ability in embedded PVC film. *Energy & Fuels, 34*(7), 8919-8930. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01019
41. Song, D.-H., Hoa, V.B., Kim, H.W., Khang, S.M., Cho, S.-H., Ham, J.-S., & Seol, K.-H. (2021). Edible films on meat and meat products. *Coatings, 11*(11), 1344. https://doi.org/10.3390/coatings11111344
42. Song, L., Guo, W., He, Z., & Zhang, P. (2024). Thermal, economic and food preservation performances of a refrigerated warehouse equipped with on-shelf phase change material. *International Journal of Refrigeration, 165*, 16-30. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.02.002
43. Swetha, T.A., Bora, A., Mohanrasu, K., Balaji, P., Raja, R., Ponnuchamy, K., . . . & Arun, A. (2023). A comprehensive review on polylactic acid (PLA)–Synthesis, processing and application in food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules, 234*, 123715. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123715
44. Tas, C.E., & Unal, H. (2021). Thermally buffering polyethylene/halloysite/phase change material nanocomposite packaging films for cold storage of foods. *Journal of Food Engineering, 292*, 110351. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110351
45. Thanakkasaranee, S., & Seo, J. (2021). Tunable temperature-responsive permeable composite films using polyethylene glycol as a phase change material. *Food Packaging and Shelf Life, 28*, 100683. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100683

46. Tony, M.A. (2021). Recent frontiers in solar energy storage via nanoparticles enhanced phase change materials: Succinct review on basics, applications, and their environmental aspects. *Energy Storage*, *3*(4), e238. https://doi.org/10.1002/est2.238
47. Vennapusa, J.R., Konala, A., Dixit, P., & Chattopadhyay, S. (2020). Caprylic acid based PCM composite with potential for thermal buffering and packaging applications. *Materials Chemistry and Physics*, *253*, 123453. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123453
48. Vennapusa, J.R., Singh, J., & Chattopadhyay, S. (2022). Curding of milk in incubator utilizing latent heat of lauric acid in winter. *Energy Storage*, *4*(3), e307. https://doi.org/10.1002/est2.307
49. Wang, X., Li, W., Huang, Y., Zhang, S., & Wang, K. (2023). Study on shape-stabilised paraffin-ceramsite composites with stable strength as phase change material (PCM) for energy storage. *Construction and Building Materials*, *388*, 131678. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131678
50. Wang, Q., Xu, D., & Wang, Q. (2024). Novel PVA-based foams for cold chain logistics with high efficiency. *Polymer*, *302*, 127092. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127092
51. Wu, T., Dong, Y., Zhu, W., Xie, Z., Jiang, T., Yu, X., . . . & Zhong, T. (2026). Phase change material-based antibacterial nanoparticles for short-term preservation of cooked meat during temperature abuse. *npj Science of Food*. https://doi.org/10.1038/s41538-026-00808-5
52. Xu, X., Zhou, Y., Zhang, S., Zhai, X., & Zhang, X. (2023). Preparation and heat transfer model of stereotyped phase change materials suitable for cold chain logistics. *Journal of Energy Storage*, *60*, 106610. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106610
53. Yenare, R., Chandrakant, S., Panchal, H., Bongale, A., Roy, A., Naik, N., Chan, C. K., Dixit, S., & Singh, S. (2026). Investigation on PCM-Based cold storage performance under variable charging temperatures and layout configurations. *Energy Conversion and Management: X*, 101854. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101854
54. Yuan, K., Chen, Q., Qin, M., Gao, S., Wang, Q., Gao, S., . . . & Zou, R. (2024). Micro/nano encapsulated phase change materials: preparation, principle, and emerging advances in medical field. *Advanced Functional Materials*, *34*(23), 2314487. https://doi.org/10.1002/adfm.202314487
55. Zahid, I., Farooq, M., & Farhan, M. (2023). Phase change materials (PCMs). In *Nano Enhanced Phase Change Materials: Preparation, Properties and Applications* (pp. 11-44): Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5475-9_2
56. Zare, M., & Mikkonen, K.S. (2023). Phase change materials for life science applications. *Advanced Functional Materials*, *33*(12), 2213455. https://doi.org/10.1002/adfm.202213455
57. Zhang, N., Zhang, Z., Li, J., & Cao, X. (2024). Performance analysis and prediction of hybrid battery thermal management system integrating PCM with air cooling based on machine learning algorithm. *Applied Thermal Engineering*, *257*, 124474. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124474
58. Zhang, Q., Liu, C., Wu, X., Zhang, X., Song, J., Li, Y., & Mao, Y. (2024). Preparation and thermal properties of latent functional thermal fluid based on size-controllable phase change nanocapsules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *275*, 113031. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113031
59. Zhang, S., Zhu, Y., Zhang, H., Xu, F., Sun, L., Xia, Y., . . . & Li, B. (2022). Cadmium Sulfide—reinforced double-shell microencapsulated phase change materials for advanced thermal energy storage. *Polymers*, *15*(1), 106. https://doi.org/10.3390/polym15010106
60. Zhang, Y., Dai, L., & Yang, C. (2025). Dual-mode thermal management in gelatin-based smart packaging films: Integrating phase change thermal buffering and passive radiative cooling .*Chemical Engineering Journal*, 169251. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.169251
61. Zhao, J., Sun, J., Li, Y., Xia, R., Zhang, W., Wang, B., . . . & Guo, H. (2022). Wood-plastic materials with organic–inorganic hybrid phase change thermal storage as novel green energy storage composites for building energy conservation. *Journal of Materials Science*, *57*(5), 3629-3644. https://doi.org/10.1007/s10853-021-06861-7
62. Zhao, Q., Wong, S.-Y., Zhang, Y., Lim, P.-C., Sivaraja, V. K., Ngo, A. C.-Y., . . . & Li, X. (2025). Biobased phase change material packaging for dark chocolate: Enhanced thermal management against temperature fluctuations. *Food Packaging and Shelf Life*, *52*, 101632. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101632