Journal of Fisheries Science and Technology
Vol. 5, No. 2, Summer 2026, pp. 197–210
DOI: 10.48311/jfst.2026.124735.82493

RECERCH ARTICLE

Optimization of the thermal behavior of a eutectic mixture based on edible fatty acids as a phase change material (PCM) for the preservation of seafood

Kobra Ziyaei[1], Seyed Mahdi Ojagh [*1], Moloud Nourani [2], Hooman Radfar [1]
1- Department of Fisheries, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Department of Food Science and Technology, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Introduction: Thermal energy storage using phase change materials (PCMs) is one of the most sustainable methods of energy management. PCMs with high latent heat can store thermal energy when available and release it effectively when needed, making them attractive for passive temperature control in food cold chain logistics. Among various PCM candidates, fatty acids are particularly suitable due to their congruent melting behavior, non-toxicity, and tunable phase change temperatures achievable through eutectic mixing. Binary eutectic mixtures of fatty acids exhibit melting points lower than those of individual components, enabling their application in specific temperature windows such as the 2–8°C range required for chilled food preservation. Nonanoic acid (NA) and capric acid (CA) are medium-chain saturated fatty acids that are non-toxic, biodegradable, and commercially available at high purity. Their molecular structures allow for the formation of eutectic mixtures with tunable phase change temperatures, making them suitable candidates for food cold chain applications. While the eutectic combination of NA and CA has been explored for air conditioning applications, its potential for seafood cold chain logistics remains underexamined. Furthermore, the addition of surfactants such as sodium stearate to fatty acid eutectics has been shown to modulate supercooling and latent heat in other systems, yet its effect on the NA-CA system has not been systematically reported. This study evaluates the thermal properties of binary eutectic mixtures of nonanoic acid and capric acid as a novel renewable PCM for food cold chain applications. The specific objectives were to determine the optimal eutectic ratio of NA and CA within the 2–8°C range, to evaluate the effect of sodium stearate at two concentration levels (0.5% and 5%) on phase change temperature, latent heat, and supercooling, and to assess the suitability of the developed PCM for seafood cold chain applications.

Methodology: Nonanoic acid and capric acid were purchased commercially and their purity was determined by gas chromatography (GC). Binary eutectic mixtures of NA and CA were prepared at various mass ratios (88:12, 75.8:24.2, 70:30, 50:50, 34.7:65.3, and 30:70, NA:CA) by melting and homogenizing the components under magnetic stirring. The thermal properties of the mixtures were characterized using differential scanning calorimetry (DSC) under a nitrogen atmosphere. Each sample was subjected to a heating–cooling cycle at a heating rate of 10°C/min over the temperature range of −50°C to 40°C. The onset melting and freezing temperatures and the latent heats of melting and freezing were determined from the DSC thermograms. The optimal eutectic ratio was identified based on a phase change temperature within the 2–8°C range combined with maximal latent heat. Subsequently, sodium stearate was added to the optimal binary mixture at 0.5% and 5% (w/w) to investigate its effect on phase change temperature, latent heat, and supercooling, and the resulting ternary systems were characterized using the same DSC protocol.

ARTICLE INFO

Key words:
Phase change material
Eutectic mixture
Thermal properties
Fatty acids
Cold chain

Corresponding author:
Email address: ojagh@ut.ac.ir

Received: 30 April 2026 | Revised: 6 July 2026 | Accepted: 16 August 2026 | Published online: 24 August 2026

© Authors 2026. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

Results: GC analysis showed purities of 97.63% for nonanoic acid and 98.92% for capric acid, consistent with the specified grades and suitable for thermal property measurements. DSC analysis of the binary mixtures at various mass ratios identified the eutectic composition at 65.3% NA and 34.7% CA (w/w). This mixture exhibited a single melting peak, confirming eutectic behavior with no phase separation. The binary eutectic mixture consisting of 65.3% NA and 34.7% CA exhibited thermal properties suitable for food cold chain application, with melting and freezing temperatures of 7.11°C and 4.45°C, respectively, and latent heat values of −124.46 J/g (melting) and 124.57 J/g (freezing). The onset melting temperature of 7.11°C falls squarely within the 2–8°C target range, and the close agreement between melting and freezing enthalpies indicates thermally reversible phase transition behavior, a prerequisite for repeated cycling in cold chain applications. The effect of sodium stearate addition was concentration-dependent: the addition of 0.5% sodium stearate maintained the latent heat (123.83 J/g freezing; −123.73 J/g melting) and phase change temperature (6.11°C melting; 2.80°C freezing), preserving the relative balance of thermal properties, whereas higher concentrations (5%) led to decreased latent heat and increased supercooling, as evidenced by a larger gap between melting and freezing onset temperatures. The 0.5% formulation therefore represents the preferred composition for further development. The thermal properties of the developed PCM compare favorably with those reported for similar fatty acid eutectics, and the freezing onset of 4.45°C ensures that the material releases stored cold energy within the desired range. The finding that 0.5% sodium stearate maintains latent heat while slightly depressing the melting temperature is practically advantageous, as the reduced melting point (6.11°C) provides a small safety margin below the upper limit of the 2–8°C range, potentially extending the duration of effective temperature control. These results indicate that the NA-CA eutectic mixture, particularly with 0.5% sodium stearate, meets the thermal requirements for seafood cold chain applications and warrants further evaluation under practical conditions.

Discussion and conclusion: The eutectic composition of 65.3% NA and 34.7% CA exhibited a melting onset of 7.11°C and latent heat of −124.46 J/g, which compare favorably with values reported for fatty acid eutectics designed for similar temperature ranges. The single melting peak confirms complete miscibility of the two fatty acids, which is essential for stable and repeatable thermal performance, and the close agreement between melting and freezing enthalpies indicates thermally reversible phase transition behavior suitable for repeated cycling. The onset melting temperature lies within the 2–8°C range required for chilled seafood preservation, while the freezing onset ensures that stored cold energy is released within the desired temperature window. The concentration-dependent effect of sodium stearate indicates that low-level addition preserves the balance between energy storage capacity and temperature match, whereas excessive surfactant disrupts crystallization and increases supercooling, highlighting the importance of optimizing additive concentration.

بهینه‌سازی رفتار حرارتی مخلوط یوتکتیک بر پایه‌ی اسیدهای چرب خوراکی به عنوان ماده تغییر فاز دهنده (PCM) جهت نگهداری مواد غذایی دریایی

کبری ضیایی[۱]، سید مهدی اجاق*[۱]، مولود نورانی[۲]، هومن رادفر[۱]

۱- گروه شیلات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- گروه صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

چکـــــیده

یکی از پایدارترین روش‌های مدیریت انرژی، ذخیره‌سازی انرژی حرارتی با استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCM) تجدیدپذیر است. PCMهای دارای گرمای نهان بالا می‌توانند انرژی حرارتی را در زمان در دسترس بودن ذخیره کرده و در صورت نیاز به‌طور مؤثر آزاد کنند. در این پژوهش، خواص حرارتی مخلوط‌های یوتکتیک دوتایی شامل نونانوئیک اسید (NA) و کاپریک اسید (CA) به عنوان نوع جدیدی از PCM تجدیدپذیر ارزیابی شد. خلوص اسیدهای چرب با آنالیز کروماتوگرافی گازی (GC) تعیین و به ترتیب ۹۷/۶۳ درصد برای نونانوئیک اسید و ۹۸/۹۲ درصد برای کاپریک اسید گزارش شد. پس از تهیه مخلوط‌های یوتکتیک با نسبت‌های مختلف، نتایج نشان داد که مخلوط یوتکتیک دوتایی متشکل از ۶۵/۳ درصد نونانوئیک اسید و ۳۴/۷ درصد کاپریک اسید، دارای خواص حرارتی مطلوبی برای کاربرد به‌عنوان PCM در زنجیره سرد مواد غذایی است. این ویژگی‌ها شامل دمای ذوب ۷/۱۱ درجه سانتی‌گراد، دمای انجماد ۴/۴۵ درجه سانتی‌گراد، گرمای نهان انجماد ۱۲۴/۵۷ ژول بر گرم و گرمای نهان ذوب ۱۲۴/۴۶- ژول بر گرم بود. سپس برای بهبود خواص حرارتی، سدیم استئارات به عنوان یک سورفکتانت آنیونی در غلظت‌های مختلف وزنی به نسبت بهینه اضافه شد. نتایج نشان داد که افزودن ۰/۵ درصد سدیم استئارات، ضمن حفظ گرمای نهان (۱۲۳/۸۳ ژول بر گرم (انجماد) و ۱۲۳/۷۳- ژول بر گرم (ذوب)) و دمای تغییر فاز (ذوب ۶/۵۱ و انجماد ۲/۸۰ درجه سانتی‌گراد)، تعادل نسبی خواص حرارتی را حفظ می‌کند، در حالی که غلظت‌های بالاتر منجر به کاهش گرمای نهان و افزایش فوق‌سرمایش شدند. با توجه به دمای تغییر فاز این PCM در محدوده استاندارد نگهداری سرد، استفاده از آن در اشکال مختلف زنجیره سرد از جمله بسته‌بندی، حمل‌ونقل و سردخانه‌های نگهداری فرآورده‌های گوشتی به‌ویژه محصولات دریایی توصیه می‌شود. این PCM با جذب و آزادسازی گرمای نهان می‌تواند نوسانات دمایی را جبران کرده و ضمن کاهش مصرف انرژی، کیفیت محصول را حفظ کند.

کـــلید واژه‌ها: ماده تغییر فاز ، ترکیب یوتکتیک ، خواص حرارتی ، اسیدهای چرب، زنجیره سرد

نوع مقـاله

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

تاریخ چاپ الکترونیکی: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲

***نویسنده مسئول:**

ojagh@ut.ac.ir»

مقدمه

دما یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت مواد غذایی، به ویژه محصولات دریایی، است و کنترل آن در طی نگهداری و حمل و نقل به ویژه در طول زنجیره‌ی سرد می‌تواند تأثیر بسزایی بر کیفیت نهایی محصول داشته باشد (Hu et al., 2023). با این حال، کنترل دما نیازمند مصرف مقدار زیادی انرژی است که با ضرورت صرفه‌جویی در انرژی و حفاظت از محیط زیست در تضاد است. در حال حاضر، بیش از ۱۸ درصد از تأمین انرژی جهان از منابع تجدیدپذیر صورت می‌گیرد و تقاضا برای آن در آینده نیز رو به افزایش خواهد بود (Nazir et al., 2019). با این وجود، ماهیت متناوب منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند انرژی خورشیدی) کاربرد شبانه‌روزی آن‌ها را در صنایع غذایی محدود می‌سازد. از این رو، رفع تضاد میان کنترل دما و مصرف انرژی، یکی از دغدغه‌های اصلی پژوهشگران در شرایط کنونی است (Hu et al., 2023).

فناوری ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES)[1] می‌تواند بهره‌وری مصرف انرژی را افزایش داده و به‌طور مؤثر عدم‌تطابق میان عرضه و تقاضای انرژی را از نظر زمانی، مکانی و شدتِ جریان انرژی برطرف سازد (Zalba et al., 2003). به‌طور کلی، TES را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد: ذخیره‌سازی گرمای محسوس، ذخیره‌سازی گرمای نهان، ذخیره‌سازی گرمای ترموشیمیایی و ذخیره‌سازی گرمای جذبی (Yang et al., 2021). در میان این روش‌ها، ذخیره‌سازی گرمای نهان به دلیل مزایایی همچون ظرفیت بالای ذخیره‌سازی گرما و حجم کمِ سیستم ذخیره‌سازی، بیشترین کاربرد را دارد (Wang et al., 2022) و در همین میان، ذخیره‌سازی انرژی به صورت گرمای نهان با استفاده از مواد تغییرفازدهنده[2] (PCMs) از مزایای برجسته‌ای برخوردار است. مزایایی همچون چگالی بالای ذخیره‌سازی انرژی، هزینه پایین، عدم خورندگی و پایداری شیمیایی مطلوب (Wu et al., 2018; Alehosseini and Jafari, 2019) موجب شده است که PCMها به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته و در حوزه‌های گوناگونی همچون صنایع غذایی (Alehosseini and Jafari, 2019)، نساجی (Hu et al., 2020)، پزشکی (Wu et al., 2021) و ساخت‌وساز (Tyagi et al., 2021) به کار گرفته شوند. بنابراین انتخاب ماده مناسب برای ذخیره گرما، عاملی بسیار مهم در بهینه‌سازی بازده حرارتی، توجیه‌پذیری اقتصادی و دوام سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی مبتنی بر گرمای نهان[3] (LHTES) است (Hu et al., 2023).

در صنعت غذا، عملکرد کنترل دما به اندازه نقش ذخیره‌سازی انرژی در مواد تغییر فاز اهمیت دارد. PCMهای مورد استفاده در صنایع غذایی و برای دماهای پایین باید دارای آنتالپی ذوب و انجماد قابل‌توجه، رسانایی گرمایی و عملکرد تبادل حرارت مناسب باشند. درمیان انواع PCMهای مختلف، اسیدهای چرب که در دسته ترکیبات آلی غیرپارافینی قرار می‌گیرند، از نظر عملکردی بهتر از سایر انواع PCMها عمل می‌کنند. برخی از مزایای این مواد عبارتند از: ویژگی‌های ذوب و تبلور هم‌زمان، آنتالپی ذوب بالا، غیرقابل‌اشتعال بودن، نرخ انبساط حجمی ناچیز در فرآیند گذار فاز جامد-مایع، هزینه پایین،

[1] Thermal energy storage
[2] Phase change materials
[3] Latent heat thermal energy storage

پایداری حرارتی و شیمیایی مطلوب پس از آزمون‌های چرخه‌ای گرمایش و سرمایش و دسترس‌پذیری آسان (Wang et al., 2022).

در میان اسیدهای چرب مختلف، اسید لوریک (LA)، اسید استئاریک (SA)، اسید میریستیک (MA)، اسید کاپریلیک (CA) و اسید پالمیتیک (PA) پرکاربردترین اسیدهای چرب به عنوان PCM می‌باشند (Keleş et al., 2005). Sari و همکاران (۲۰۰۵) با ترکیب سه اسید چرب LA، MA و PA در نسبت‌های وزنی مختلف مخلوط‌های یوتکتیک با نقاط ذوب متفاوت تهیه و سپس با استفاده از روش کالریمتری روبشی تفاضلی (DSC)، خواص حرارتی آنها را مورد بررسی قرار دادند (Sari et al., 2005). همچنین Liu یک PCM کامپوزیت متشکل از مخلوط یوتکتیک سه اسید چرب LA، MA و SA و گرافیت منبسط‌شده (EG) معرفی کردند که دارای نقطه ذوب ۲۹/۰۵ درجه سانتی‌گراد و نقطه انجماد ۲۹/۳۸ درجه سانتی‌گراد بود (Liu et al., 2014). Hu و همکاران (۲۰۲۶) نیز یک کامپوزیت PCM بر پایه سه اسید چرب LA، کاپریک اسید و اکتانوئیک اسید ساختند. این PCM دارای دمای تغییر فاز ۳/۱ درجه سانتی‌گراد و گرمای نهان آن ۱۰۴/۹ ژول بر گرم بود که توانست محدوده ۲ تا ۸ درجه‌ی سانتی‌گراد را به مدت ۵۶۰ دقیقه حفظ کند (Hu et al., 2026). بنابراین، با توجه به اهمیت مصرف انرژی و جلوگیری از نوسانات دمایی در طول زنجیره سرد و اهمیت بسیار بالای آن در محصولات غذایی، تهیه PCMهای اختصاصی و مناسب برای دماهای سرد و ارزیابی عملکرد آن‌ها در شرایط عملی، امری ضروری به نظر می‌رسد. از همین‌رو، در این پژوهش، ابتدا نونانوئیک اسید (NA) و کاپریک اسید (CA) به عنوان اجزای اصلی برای تشکیل یک PCM یوتکتیک دوجزئی انتخاب شدند. سپس، دمای بهینه مخلوط یوتکتیک نونانوئیک اسید و کاپریک اسید با استفاده از آنالیز DSC مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، به منظور بهبود خواص حرارتی، سدیم استئارات به عنوان یک سورفکتانت آنیونی (نمک سدیم اسید استئاریک) به نسبت بهینه اضافه شد و اثر آن بر دمای تغییر فاز، گرمای نهان و رفتار انجماد مخلوط با آنالیز DSC ارزیابی گردید. در نهایت، با توجه به دمای تغییر فاز به‌دست‌آمده، پتانسیل کاربرد این PCM در زنجیره سرد محصولات شیلاتی مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آنالیز کروماتوگرافی گازی (GC)

جهت تعیین خلوص اسیدهای چرب، آنالیز کروماتوگرافی گازی (GC) انجام شد. استری‌کردن اسیدهای چرب برای تزریق به دستگاه GC، طبق روش Firestone و همکاران (۱۹۸۹) صورت گرفت (Firestone, 1989). بدین منظور، پس از افزودن ۵ میلی‌لیتر سود متانولی ۲ درصد به اسیدهای چرب، نمونه‌ها ورتکس و سپس به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب جوش قرار داده شدند. پس از سرد شدن، ۳ میلی‌لیتر BF_3 (تری‌فلوراید بور) به محلول اضافه شد و پس از ورتکس، به مدت ۲ تا ۳ دقیقه در حمام جوش قرار گرفتند. در ادامه، ۱ میلی‌لیتر هگزان و آب نمک به نمونه‌ها اضافه گردید و در نهایت فاز رویی

تشکیل‌شده جهت بررسی خلوص و شناسایی ترکیبات به دستگاه GC (PHILIPS) مجهز به ستون کاپیلاری (BPX70; SGE, 60 m × 0.25 mm i.d., film thickness 0.25 μm)و آشکارساز FID تزریق شد.

آنالیز حرارتی اسیدهای چرب (DSC)

به دلیل اهمیت خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده، خواص فیزیکی هر یک از مواد تشکیل دهنده‌ی PCM و مخلوط یوتکتیک آن‌ها در حین تغییر فاز، با استفاده از دستگاه DSC (DSC25 شرکت TA Instruments، آمریکا؛ محدوده دمایی: ۹۰- تا ۷۲۵ درجه سانتی‌گراد؛ در محیط نیتروژن با نرخ ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه) اندازه‌گیری شد. به همین منظور ۵ میلی‌گرم از هر نمونه در یک ظرف دربسته و در محدوده دمایی ۶۰- تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد (دو سیکل سرمایش و گرمایش) با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه حرارت داده شدند (Nourani et al., 2018). نقاط ذوب/ انجماد، آنتالپی، گرمای نهان ذوب/تبلور و دماهای تغییر فاز یوتکتیک نهایی از روی منحنی‌های DSC تعیین گردیدند.

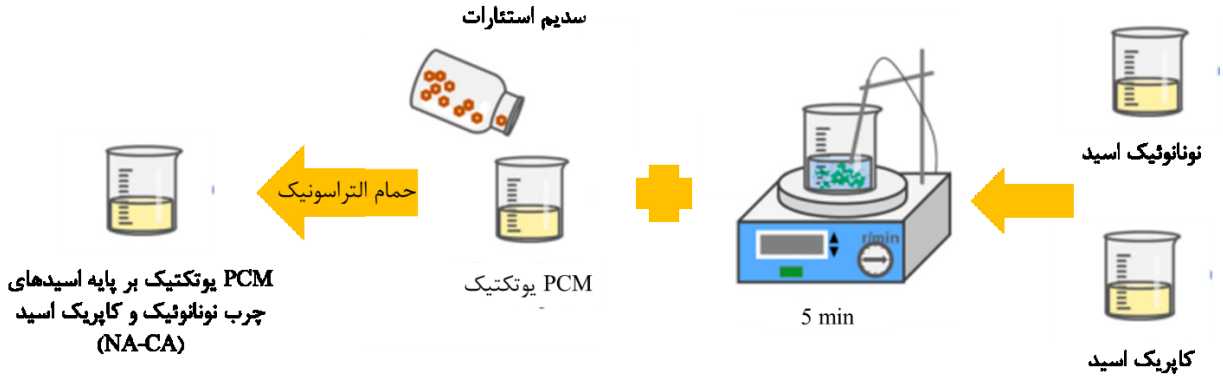
تهیه ماده تغییر فاز یوتکتیک بر پایه اسیدهای چرب

سامانه یوتکتیک تغییر فاز بر پایه اسید چرب از طریق روش اختلاط و با استفاده از از نونانوئیک اسید و کاپریک اسید تهیه شد، بدین صورت که مقادیر وزنی مختلفی از دو اسید چرب با یکدیگر مخلوط شدند تا ترکیب مناسبی که منجر به تشکیل PCM یوتکتیک شود، تعیین گردد. به طور کلی فرآیند آماده‌سازی شامل تهیه ۱۰ گرم از مخلوط نمونه حاوی نسبت‌های وزنی متنوعی از نونانوئیک و کاپریک اسید بود (مطابق جدول ۱). به‌طور خلاصه، ابتدا مقدار مشخصی از کاپریک اسید در یک بشر شیشه‌ای ریخته شد و بشر روی هات‌پلتی با دمای ثابت ۴۰ درجه سانتی‌گراد (دمایی بالاتر از نقطه ذوب هر دو اسید چرب) قرار گرفت تا از ذوب شدن کامل مواد و امکان اختلاط مناسب اطمینان حاصل شود. سپس نونانوئیک اسید به‌آرامی و هم‌زمان با هم‌زدن مداوم با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه (با استفاده از مگنت همزن) به مخلوط اضافه شد تا ترکیب مورد نظر حاصل شود. هر مخلوط به مدت ۵ دقیقه در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد هم زده شد. پس از افزودن سدیم استئارات به مخلوط پایه، مخلوط‌ها به مدت ۵ دقیقه در حمام التراسونیک (فرکانس ۱۸۰ کیلو هرتز، توان ۲۲۰ وات با حالت پالس ۱۰۰) تیمار شدند تا پراکندگی یکنواخت سدیم استئارات در مخلوط حاصل شود (Yu et al., 2026). هر نمونه در آزمون DSC تحت دو سیکل متوالی گرمایش - سرمایش قرار گرفت و سازگاری نتایج دو سیکل از نظر دما و آنتالپی تغییر فاز، در محدوده دمایی مرتبط با کاربرد زنجیره سرد، بررسی و تأیید شد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری‌ها بر تعیین خلوص مواد و خواص ترموفیزیکی ذاتی آن‌ها متمرکز بودند، تحلیل آماری مبتنی بر تکرار بر داده‌ها اعمال نشد.

جدول ۱- نسبت‌های وزنی مختلف اسیدهای چرب مورد استفاده جهت ساخت PCM یوتکتیک

سهم کاپریک اسید (درصد)	سهم نونانوئیک اسید (درصد)	PCM
۱۲	۸۸	۱
۲۴/۲	۷۵/۸	۲

۳	۷۰	۳۰
۴	۵۰	۵۰
۵	۳۴/۷	۶۵/۳
۶	۳۰	۷۰



شکل ۱- شکل شماتیک فرآیند ساخت PCM بر پایه‌ی مخلوط یوتکتیک اسیدهای چرب نونانوئیک و کاپریک اسید (NA-CA)

نتایج

آنالیز شناسایی اسیدهای چرب (GC)

نتایج آنالیز شناسایی اسیدهای چرب با کروماتوگرافی گازی در جدول ۲ گزارش شده است. نتایج نشان داد خلوص نونانوئیک اسید ۹۷/۶۳ درصد و کاپریک اسید ۹۸/۹۲ درصد است (جدول ۲). این مقادیر با استانداردهای گزارش‌شده برای شرکت تولید کننده آنها (مرک) هم خوانی دارد. خلوص بالای ۹۷ درصد برای هر دو اسید چرب نشان می‌دهد که مواد اولیه مورد استفاده از کیفیت مناسب برای ساخت PCM برخوردارند. از آنجا که خواص حرارتی مخلوط‌های یوتکتیک (دمای تغییر فاز و آنتالپی ذوب) به شدت به خلوص اجزای تشکیل‌دهنده وابسته است (Sohns et al., 1981; Sari et al., 2006). این سطح از خلوص تضمین می‌کند که ناخالصی‌های جزئی تأثیر معناداری بر دمای تغییر فاز و آنتالپی ذوب مخلوط یوتکتیک NA-CAندارند. علاوه بر این، خلوص یکنواخت مواد اولیه، تکرارپذیری ساخت و پایداری نتایج در طی چرخه‌های حرارتی متوالی را نیز تضمین می‌کند.

جدول ۲- نتایج آنالیز کروماتوگرافی گازی نمونه‌های اسید چرب (بر حسب درصد)

نونانوئیک اسید	کاپریک اسید	اسید چرب
۹۷/۶۳۰	-	C9:0
-	۹۸/۹۲	C10:0

C16:0	۰/۶۴۸	۰/۸۷۷
C16:1	-	۰/۹۰۴
C18:0	۰/۱۲۰	-
C18:1(n-9) C	۰/۲۵۵	۰/۴۷۹
C18:2(n-6) C	۰/۰۵۶	۰/۱۰۴

آنالیز حرارتی اسیدهای چرب (DSC)

پیش از تهیه‌ی مخلوط یوتکتیک بر پایه اسیدهای چرب به عنوان PCM، ترموگرام اسیدهای چرب نونانوئیک و کاپریک اسید با استفاده از DSC اندازه‌گیری و ثبت شد. خواص حرارتی (دمای ذوب و گرمای نهان) مواد تشکیل دهنده به عنوان مرجعی برای تحلیل قابلیت اطمینان حرارتی آنها در طول فرآیند ساخت PCM و سپس فرآیند تغییر فاز در گذر زمان می‌باشد. بر اساس نتایج (جدول ۳)، در طول فرآیند ذوب، دمای تعادلی آغازین تغییر فاز (دمای Onset معادل دمایی است که در آن فرآیند تغییر فاز (ذوب یا انجماد) آغاز می‌شود) و دمای پیک (دمای Peak معادل دمایی است که در آن بیشترین سرعت فرآیند تغییر فاز (ذوب یا انجماد) رخ می‌دهد) برای کاپریک اسید به ترتیب ۷۹/۲۹ و ۳۲/۲۹ درجه سانتی‌گراد و گرمای نهان ذوب (ΔH) ۱۷۰/۴۲- ژول بر گرم ثبت شد. در حالی که این مقادیر برای نونانوئیک اسید به ترتیب ۸/۰۹ و ۱۲/۵۲ درجه سانتی گراد و ۷۴- ژول بر گرم گزارش شد که برای هر دو مورد این نتایج با داده‌های موجود در متون علمی مطابقت دارند (Wang et al., 2017; Ayaz et al., 2025).

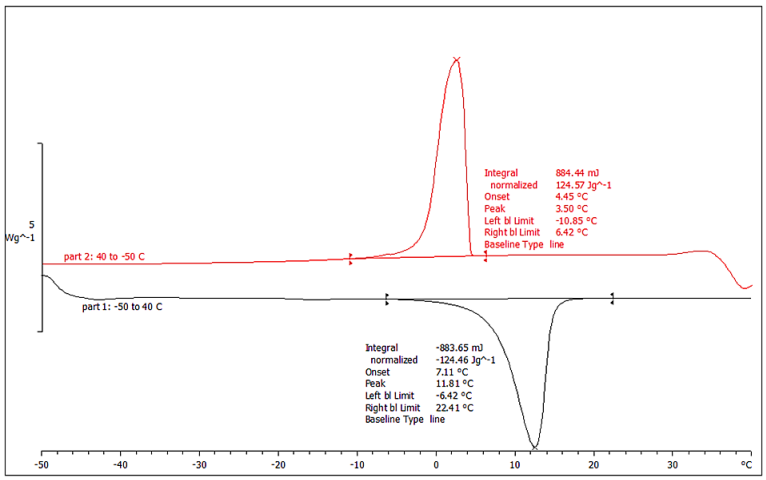
جدول ۳- خواص حرارتی نونانوئیک و کاپریک اسید

نام اسید چرب	دمای شروع (Onset) (°C)	دمای پیک (°C)	آنتالپی (ژول/ گرم)
نونانوئیک اسید	۸/۰۹	۱۲/۵۲	-۷۴
کاپریک اسید	۲۹/۷۹	۳۲/۲۹	-۱۷۰/۴۲

تهیه یوتکتیک PCM بر پایه‌ی اسیدهای چرب (NA-CA) و خواص حرارتی آن

خواص حرارتی نسبت‌های مختلف اسیدهای چرب برای تهیه‌ی یک سامانه تغییر فاز یوتکتیک دوجزئی ابتدا با استفاده از روش T-history و سپس بهینه‌ترین با استفاده از DSC اندازه‌گیری شدند و نتایج آن نیز در شکل ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج مناسب‌ترین یوتکتیک در نسبت ۶۵/۳ درصد نونانوئیک اسید به ۳۴/۷ درصد کاپریک اسید مشاهده گردید و به عنوان مخلوط پایه معرفی گردید. دمای ذوب (Onset) و گرمای نهان NA-CA به ترتیب ۷/۱۱ درجه سانتی‌گراد و ۱۲۴/۴۶- ژول بر گرم هستند. همچنین دمای انجماد (Onset) و گرمای نهان انجماد آن نیز به ترتیب برابر ۴/۴۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۲۴/۵۷ ژول بر گرم می‌باشد. بدیهی است که دمای تغییر فاز PCM یوتکتیک، پایین‌تر از دمای مواد خالص و تک‌جزئی است. در مخلوط دوجزئی NA-CA تنها یک پیک گرماگیر (اندوترمیک) و یک پیک گرماده (اگزوترمیک)

مشاهده می‌شود؛ همچنین، منحنی DSC مشابه منحنی اجزا مخلوط یوتکتیک است که نشان می‌دهد مخلوط یوتکتیک دوجزئی NA-CA یک یوتکتیک مناسب تشکیل می‌دهد.



شکل ۲- ترموگرام یوتکتیک NA-CA با نسبت جرمی ۶۵/۳ به ۳۴/۷ درصد. نمودارهای سرمایش و گرمایش

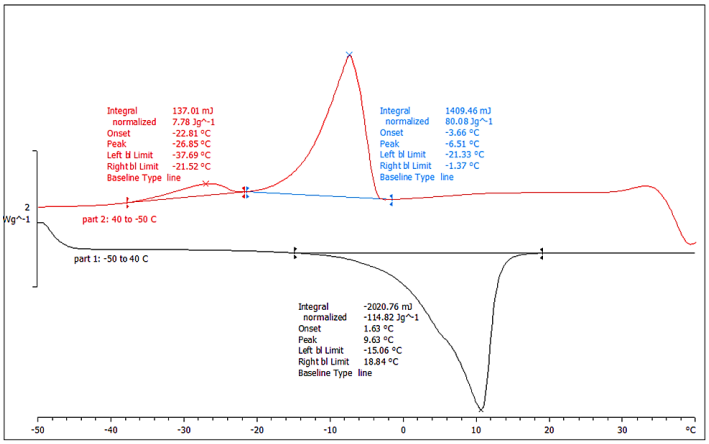
تعیین مقدار جرمی بهینه اسیدهای چرب در PCMهای یوتکتیک ضروری است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نسبت جرمی اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط یوتکتیک، تأثیر مستقیمی بر دمای تغییر فاز و گرمای نهان سیستم نهایی دارد. برای مثال، در مخلوط دوجزئی کاپریلیک اسید-نونانوئیک اسید، نسبت جرمی ۸:۲ به همراه گرافیت منبسط‌شده (نسبت ۹:۱) منجر به دستیابی به نقطه ذوب ۶/۸۴ درجه سانتی‌گراد و گرمای نهان ۱۰۸/۷۵ کیلوژول بر کیلوگرم شده است که برای کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی مناسب گزارش شده است (Wang et al., 2017).

نسبت جرمی دو اسید چرب به طور قابل‌توجهی دمای تغییر فاز و آنتالپی مخلوط یوتکتیک را تعیین می‌کند. برای مخلوط NA-CA، مدل‌سازی نظری بر پایه معادله شرودر نشان می‌دهد که این سیستم در محدوده کسر مولی مشخصی، رفتار یوتکتیک با دمای تغییر فاز در محدوده دماهای پایین از خود نشان می‌دهد که آن را برای صنایع غذایی و نگهداری مناسب می‌سازد (Kahwaji and White, 2018). با این حال، این داده‌ها حاصل پیش‌بینی نظری هستند. در عمل، داده‌های تجربی حاصل از DSC می‌توانند به دلایلی مانند خلوص مواد اولیه، نرخ گرمایش/سرمایش، و معیار انتخاب دمای مشخصه (دمای Onsetدر مقابل دمای پیک) با پیش‌بینی نظری انحراف داشته باشند. برای مثال، در مطالعات مخلوط‌های یوتکتیک اسید چرب، انحراف بین نسبت جرمی یوتکتیک محاسبه‌شده و اندازه‌گیری‌شده اغلب به خطاهای تجربی DSC، ناخالصی اسیدهای چرب و خطاهای ناشی از محاسبات نسبت داده می‌شود (Ke et al., 2017). بنابراین، اگرچه مدل‌سازی نظری چارچوب مفیدی برای غربالگری اولیه فراهم می‌کند، تعیین تجربی نسبت بهینه از طریق DSC برای هر سیستم خاص ضروری است.

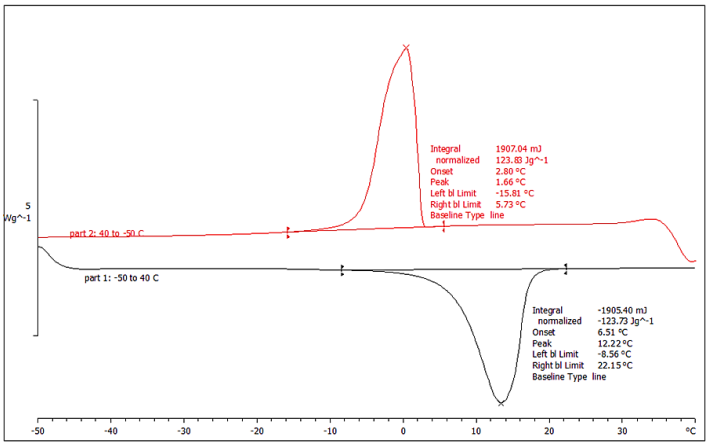
کاربردPCMهای اسید چرب در زنجیره سرد تنها به مطالعات بنیادی نسبت یوتکتیک محدود نمی‌شود، بلکه در صنایع مختلف غذایی و دارویی، به‌ویژه در نگهداری محصولات حساس به دما، نیز کاربردهای گسترده‌ای دارند. در حوزه دارویی و زنجیره سرد واکسن، Zhao و همکاران (۲۰۲۱) از PCM یوتکتیک دودسیل الکل-اسید لوریک در جعبه‌های عایق با پنل‌های خلأ استفاده کردند. این سیستم در دمای محیط ۳۱ درجه سانتی‌گراد، محدوده ۲ تا ۸ درجه سانتی‌گراد را تا ۱۰ ساعت حفظ کرد (Zhao et al., 2021). علاوه بر این در حوزه نگهداری مواد غذایی نیز مطالعه Hu و همکاران (۲۰۲۶) یک سیستم سه‌جزئی از کاپریک اسید-لوریک اسید-اکتانوئیک اسید را ارائه دادند. کامپوزیت تولید شده در این مطالعه با دمای تغییر فاز ۳/۱ درجه سانتی‌گراد و آنتالپی نهان ۱۰۴/۹ ژول بر گرم، در محیط شبیه‌سازی شده یخچال، محدوده ۲ تا ۸ درجه سانتی‌گراد را به مدت ۵۶۰ دقیقه حفظ کرد که به ترتیب ۳۶ و ۷۷ درصد طولانی‌تر از تترادکان و آب بود (Hu et al., 2026) اخیرا مطالعات اثرات هم افزایی اسیدهای چرب به عنوان PCM را با ترکیبات ضد میکروب نیز مورد بررسی قرار دارند. بر اساس مطالعات آنها این سیستم نه تنها به عنوان بافر حرارتی عمل کرد، بلکه با افزایش دما و ذوب PCM، ترکیبات ضد میکروب مانند سینامالدهید به صورت پاسخ‌ده به دما آزاد شد و خطر میکروبی ناشی از قطع زنجیره سرد را کاهش داد (Wu et al., 2026; Yang et al., 2026).

به طور کلی افزودن ترکیبات مختلف به سامانه‌های تغییر فاز با اهداف متفاوتی انجام می‌شود. برخی افزودنی‌ها با هدف هسته‌زایی و کاهش پدیده فوق‌سرمایش به آنها اضافه می‌شوند. فوق‌سرمایش، به عنوان پدیده‌ای رایج در فرآیند انجماد در سیستم‌های ذخیره‌سازی سرد، می‌تواند بسته به نوع کاربرد، دارای اثرات مفید و مخرب باشد که باید مورد توجه قرار گیرد. به‌طور کلی، فوق‌سرمایش منجر به کاهش دمای تغییر فاز و تأخیر در وقوع آن می‌شود. در این حالت، برای آزادسازی گرمای نهان به اختلاف دمای بیشتری نیاز است که این امر بر بازدهی سیستم‌های ذخیره‌سازی سرد تأثیر منفی می‌گذارد (Jing et al., 2025). از همین‌رو مطالعات مختلف برای رفع این مشکل، از عوامل هسته‌زا مختلف مانند نانوافزودنی‌های کربنی شامل نانولوله‌های کربنی چند جداره، گرافـــن (Zou et al., 2018)، مریستیک اسید (Fauzi et al., 2013)، زینک اکساید (Chakraborty et al., 2022) استفاده کردند. برخی افزودنی‌های دیگر نیز به منظور تأثیر بر دمای تغییر فاز و گرمای نهان مورد بررسی قرار می‌گیرند برای مثال، افزودن نانوذرات به اسیدهای چرب می‌تواند دمای تغییر فاز و گرمای نهان را تحت تأثیر قرار دهد. Santhanam و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که پراکنده‌سازی نانوذرات SiO_2، TiO_2، CuO و ZnO در اسید لوریک، نه تنها رسانایی گرمایی را افزایش می‌دهد، بلکه دمای تغییر فاز و گرمای نهان را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Santhanam et al., 2024). همچنین، افزودن سورفکتانت‌های اسیدی نیز به مخلوط‌های یوتکتیک اسید چرب می‌تواند دمای تغییر فاز را کاهش و گرمای نهان را افزایش دهد (Fauzi et al., 2013). سدیم استئارات یکی از ترکیباتی است که به طور خاص درPCMهای اسید چرب به عنوان سورفکتانت و عامل اصلاح خواص حرارتی بررسی شده است. Fauzi و همکاران (۲۰۱۳) با افزودن ۵ درصد سدیم استئارات به مخلوط یوتکتیک اسید میریستیک-اسید پالمیتیک نشان دادند که دمای تغییر فاز از ۴۶/۷۳ به ۴۱/۸۱ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت و گرمای نهان ذوب از ۱۵۵/۴۳ به ۱۹۱/۸۵ ژول بر گرم افزایش یافت (Fauzi et al., 2013). بر این اساس، در پژوهش حاضر نیز سدیم استئارات در غلظت‌های

مختلف به مخلوط یوتکتیک NA-CA اضافه شد. با این حال، نتایج با یافته‌های Fauzi و همکاران متفاوت بود. افزودن ۵ درصد سدیم استئارات اثر منفی چشمگیری داشت و گرمای نهان ذوب را کاهش داد و دمای انجماد را به ۳/۶۶- درجه سانتی‌گراد رساند (شکل ۳). در مقابل، غلظت ۰/۵درصد سدیم استئارات توانست تعادل نسبی را حفظ کند و دمای ذوب را حدود ۶/۵۱ (دمای Onset) درجه سانتی‌گراد و گرمای نهان ۱۲۳/۷۳- ژول بر گرم را در محدوده مطلوب زنجیره سرد (۲ تا ۸ درجه سانتی‌گراد) نگه دارد (شکل ۴). این تفاوت رفتار را می‌توان احتمالا به تفاوت ساختاری اسیدهای چرب پایه در مخلوط یوتکتیک نسبت داد (اسیدهای چرب زنجیره کوتاه C9/C10 در برابر زنجیره بلندC14/C16) با این وجود، دمای انجماد این مخلوط یوتکتیک نیز برای زنجیره سرد نیز مناسب می باشد.



شکل ۳- ترموگرام یوتکتیک NA-CA با نسبت جرمی ۶۵/۳ به ۳۴/۷ درصد و ۵ درصد سدیم استئارات. نمودارهای سرمایش و گرمایش



شکل ۴- ترموگرام یوتکتیک NA-CA با نسبت جرمی ۶۵/۳ به ۳۴/۷ درصد و ۰/۵ درصد سدیم استئارات. نمودارهای سرمایش و گرمایش

نتیجه گیری نهایی

در این پژوهش، مخلوط یوتکتیک NA-CA به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده برای کاربرد در زنجیره سرد محصولات شیلاتی تهیه شد و خواص حرارتی آن با آنالیز DSC بررسی شد. نتایج نشان داد که نسبت وزنی۶۵/۳ به ۳۴/۷ درصد به عنوان نسبت یوتکتیک بهینه، با دمای تغییر فاز ذوب (Onset) ۷/۱۱ درجه سانتی‌گراد و گرمای نهان ۱۲۴/۴۶- ژول بر گرم، در محدوده دمایی ۲ تا ۸ درجه سانتی‌گراد تغییر فاز می‌دهد. افزودن ۰/۵ درصد سدیم استئارات به این نسبت، ضمن حفظ گرمای نهان در حد ۱۲۳/۷۳- ژول بر گرم و دمای تغییر فاز ۶/۵۱ درجه سانتی‌گراد، تعادل نسبی خواص حرارتی را حفظ کرد؛ در مقابل، غلظت‌های بالاتر سدیم استئارات (۵ درصد) اثر منفی بر خواص حرارتی داشتند و منجر به کاهش گرمای نهان و افزایش فوق‌سرمایش شدند. با توجه به دمای تغییر فاز به‌دست‌آمده که در محدوده استاندارد نگهداری سرد محصولات شیلاتی قرار می‌گیرد، مخلوط PCM یوتکتیک تهیه‌شده پتانسیل به‌کارگیری در اشکال مختلف زنجیره سرد، از جمله بسته‌بندی و حمل‌ونقل و سردخانه‌های نگهداری را دارد؛ با این حال، اثبات عملکرد واقعی آن در این کاربردها نیازمند ارزیابی‌های تجربی در مقیاس واقعی است. این ماده می‌تواند با جذب و آزادسازی گرمای نهان، نوسانات دمایی ناشی از قطع برق یا تغییرات محیطی را در مدت مشخصی جبران کند، اما ادعای قطعی درباره کاهش مصرف انرژی یا تضمین کیفیت و ماندگاری محصول، مستلزم مطالعات تکمیلی در سامانه‌های واقعی است.

نقش نویسندگان

کبری ضیایی: ایده‌پردازی و طراحی مفهومی پژوهش؛ روش‌شناسی؛ انجام پژوهش و جمع‌آوری داده‌ها؛ تحلیل علمی و آماری داده‌ها؛ مدیریت و سازمان‌دهی داده‌ها؛ تهیه نمودارها و شکل‌ها؛ نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله؛ بازبینی علمی و ویرایش مقاله.

سید مهدی اجاق: ایده‌پردازی و طراحی مفهومی پژوهش؛ روش‌شناسی؛ تحلیل علمی و آماری داده‌ها؛ مدیریت و سازمان‌دهی داده‌ها؛ نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله؛ بازبینی علمی و ویرایش مقاله.

مولود نورانی: ایده‌پردازی و طراحی مفهومی پژوهش؛ روش‌شناسی؛ انجام پژوهش و جمع‌آوری داده‌ها؛ تحلیل علمی و آماری داده‌ها؛ مدیریت و سازمان‌دهی داده‌ها؛ نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله؛ بازبینی علمی و ویرایش مقاله.

هومن رادفر: روش‌شناسی؛ اعتبارسنجی نتایج؛ ویرایش مقاله.

تأییدیه اخلاقی

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافعی در ارتباط با انجام این پژوهش و انتشار نتایج آن وجود ندارد.

منابع

Alehosseini, E., & Jafari, S. M. (2019). Micro/nano-encapsulated phase change materials (PCMs) as emerging materials for the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, *91*, 116-128.

Ayaz, H., Cruz, J. L., Alves, M. H., Bousquet, A., Le Bechec, M., & Bédécarrats, J. P. (2025). Insights on the degradation of capric acid as phase change material for long-term applications. *Journal of Energy Storage*, *140*, 119068.

Chakraborty, A., Noh, J., Shamberger, P., & Yu, C. (2022). In-operando crystallization study of zinc nitrate hexahydrate using zinc oxide nucleators. *Energy Storage*, *4*(6), e372.

Fauzi, H., Metselaar, H. S., Mahlia, T. M. I., Silakhori, M., & Nur, H. (2013). Phase change material: optimizing the thermal properties and thermal conductivity of myristic acid/palmitic acid eutectic mixture with acid-based surfactants. *Applied Thermal Engineering*, *60*(1-2), 261-265.

Firestone, D. (1989). Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society.

Hu, C., Sha, L., Huang, C., Luo, W., Li, B., Huang, H., ... & Zhang, K. (2023). Phase change materials in food: Phase change temperature, environmental friendliness, and systematization. *Trends in Food Science & Technology*, *140*, 104167.

Hu, R., Liu, Y., Shin, S., Huang, S., Ren, X., Shu, W., ... & Luo, X. (2020). Emerging materials and strategies for personal thermal management. *Advanced Energy Materials*, *10*(17), 1903921.

Hu, X., Wu, G., Feng, C., Zhang, Y., Cheng, R., & Liu, N. (2026). Preparation and characterization of corn straw biochar doped ternary fatty acid composite phase change materials. *Journal of Energy Storage*, *149*, 120418.

Jing, D., Liu, G., Li, Y., Xiong, T., Xing, M., & Yan, G. (2025). A systematic review of supercooling in the solidification for cold storage: theoretical analysis, behavioral characteristics and control technologies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *250*, 127336.

Kahwaji, S., & White, M. A. (2018). Data supporting the prediction of the properties of eutectic organic phase change materials. *Data in brief*, *17*, 724-730.

Ke, H. (2017). Phase diagrams, eutectic mass ratios and thermal energy storage properties of multiple fatty acid eutectics as novel solid-liquid phase change materials for storage and retrieval of thermal energy. *Applied Thermal Engineering*, *113*, 1319-1331.

Keleş, S., Kaygusuz, K., & Sarı, A. (2005). Lauric and myristic acids eutectic mixture as phase change material for low-temperature heating applications. *International journal of energy research*, *29*(9), 857-870.

Liu, C., Yuan, Y., Zhang, N., Cao, X., & Yang, X. (2014). A novel PCM of lauric–myristic–stearic acid/expanded graphite composite for thermal energy storage. *Materials Letters*, *120*, 43-46.

Ma, K., Zhang, X., Ji, J., Han, L., Ding, X., & Xie, W. (2021). Application and research progress of phase change materials in biomedical field. *Biomaterials science*, *9*(17), 5762-5780.

Nazir, H., Batool, M., Osorio, F. J. B., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., ... & Kannan, A. M. (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *129*, 491-523.

Nourani, M., Hamdami, N., & Keramat, J. (2018). Preparation and evaluation of a stable nanoalumina-paraffin composite: Melting rate investigation using image analysis. *Journal of Dispersion Science and Technology*, *39*(10), 1385-1393.

Santhanam, H., Ali, H. M., & Sharma, R. K. (2024). Thermal performance enhancement of lauric acid using nanomaterials as composite phase change material. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(27), 38618-38627.

Sarı, A. (2005). Eutectic mixtures of some fatty acids for low temperature solar heating applications: Thermal properties and thermal reliability. *Applied thermal engineering*, *25*(14-15), 2100-2107.

Sarı, A. (2006). Eutectic mixtures of some fatty acids for latent heat storage: thermal properties and thermal reliability with respect to thermal cycling. *Energy conversion and management*, *47*(9-10), 1207-1221.

Sohns, J., Seifert, B., & Hahne, E. (1981). The effect of impurities on the melting temperature and the heat of fusion of latent heat storage materials. *International Journal of Thermophysics*, *2*(1), 71-87.

Tyagi, V. V., Chopra, K., Kalidasan, B., Chauhan, A., Stritih, U., Anand, S., ... & Kothari, R. (2021). Phase change material based advance solar thermal energy storage systems for building heating and cooling applications: A prospective research approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *47*, 101318.

Wang, Z., Huang, G., Jia, Z., Gao, Q., Li, Y., & Gu, Z. (2022). Eutectic fatty acids phase change materials improved with expanded graphite. *Materials*, *15*(19), 6856.

Wang, Z., Liu, S., Ma, G., Xie, S., Du, G., Sun, J., & Jia, Y. (2017). Preparation and properties of caprylic-nonanoic acid mixture/expanded graphite composite as phase change material for thermal energy storage. *International Journal of Energy Research*, *41*(15), 2555-2564.

Wang, Z., Ma, G., Liu, S., Jing, Y., Sun, J., & Jia, Y. (2017). A novel binary mixture of caprylic acid/nonanoic acid as latent heat storage for air conditioning and cooling. *Energy and Buildings*, *145*, 259-266.

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*.

Wu, Y., Chen, C., Jia, Y., Wu, J., Huang, Y., & Wang, L. (2018). Review on electrospun ultrafine phase change fibers (PCFs) for thermal energy storage. *Applied Energy*, *210*, 167-181.

Yang, L., Chen, L., Chen, J., Xiao, D., & Dong, A. (2026). Cellulose based microcapsules with binary phase change core for dual-functional thermal buffering and responsive antimicrobial food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 125650.

Yang, T., King, W. P., & Miljkovic, N. (2021). Phase change material-based thermal energy storage. *Cell Reports Physical Science*, *2*(8).

Yu, T., Qiu, X., Delgado, M., Lázaro, A., & Hu, Y. (2026). Polysaccharide–protein complex-stabilized Pickering phase change material emulsions for low-temperature thermal energy storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150706.

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

Zou, D., Ma, X., Liu, X., Zheng, P., & Hu, Y. (2018). Thermal performance enhancement of composite phase change materials (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for the potential application in lithium-ion power battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *120*, 33-41.