



مروری بر پیشرفت‌ها و چالش‌های مواد تغییر فاز دهنده

محمد مهدی نوری^{۱*}، حسین علی خنکدار^۲، حامد عزیزی^۳، مهدی غفاری^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده فرآیند، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

۲- استاد، عضو هیأت علمی دانشکده فرآیند، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

۳- استادیار، عضو هیأت علمی دانشکده فرآیند، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

۴- استادیار، عضو هیأت علمی دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه جامع گلستان-گرگان

* تهران، صندوق پستی ۱۱۲/۱۴۹۷۵، Mohamadmahdinoori0541@gmail.com

چکیده

داشتن یک سامانه تولید انرژی قابل اعتماد، کم‌هزینه و همیشه در دسترس، استفاده از سامانه‌های ذخیره کننده انرژی را به عنوان کاندید مهمی معرفی نموده است. روش‌های مختلفی برای ذخیره کردن انرژی‌های تجدیدپذیر وجود دارد که از میان آنها ذخیره انرژی گرمایی نهان به دلیل قابلیت ایجاد چگالی بالای ذخیره انرژی در دمای ثابت (دمای تغییر فاز ماده) از اهمیت بیشتری برخوردار است. مواد تغییر فاز دهنده به ترکیبات آلی یا معدنی گفته می‌شود که قابلیت جذب و ذخیره‌سازی مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را از طریق گرمای نهان ذوب دارند. با توجه به کارایی و قابلیت بالای مواد تغییر فاز دهنده در سامانه‌های ذخیره کننده انرژی، استفاده از این مواد در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از کشورهای پیشرفته جهان قرار گرفته است. هدف از ارائه این مقاله بررسی انواع مواد تغییر فاز دهنده، سامانه‌های به کارگیری و سایر پژوهش‌های انجام شده روی این مواد می‌باشد.

کلیدواژه‌گان: مواد تغییر فاز دهنده، ذخیره‌سازی انرژی، گرمای نهان

Review on Advances and Challenges of Phase Change Material (PCM)

Mohammad Mahdi Noori^{1*}, Hossein Ali Khonakdar², Hamed Azizi³, Mahdi Ghaffari⁴

1- Department of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute (IPPI).

2- Department of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute (IPPI).

3- Department of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute (IPPI).

۴- Polymer group, Faculty of Technical and Engineering, Gorgan, Iran

* P.O.B. 13115/14977 Tehran, Iran, Mohamadmahdinoori0541@gmail.com

Received: 22 April 2018 Accepted: 30 December 2018

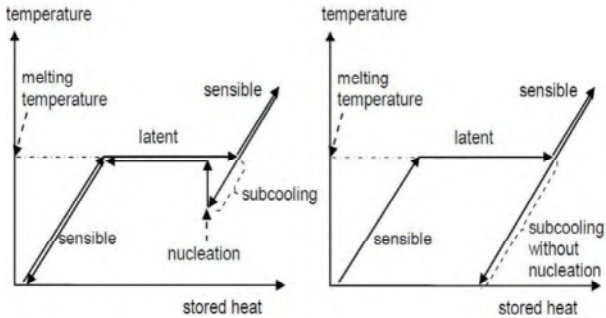
Abstract

Having a reliable, low-cost, and always available energy production system has announced the energy storage systems as an important candidate. There are different methods to store renewable energies, which the storage of latent heat energy is more important one because of its ability to generate high energy storage density at constant temperature (phase change phase). Organic or inorganic compounds that are capable of absorbing and storing large amounts of heat energy are called phase-change materials. Due to the high efficiency and high capacity of phase-change materials in energy storage systems, the use of these materials in recent years has attracted many developed countries. The purpose of this paper is to review the various types of phase-change materials, the application systems and the other researches on these materials.

Keywords: Phase Change Material, Energy Storage, Latent Heat

۱- مقدمه

بسیاری از مواد تغییر فاز دهنده بلافاصله بعد از سرد شدن زیر نقطه ذوبشان سخت (جامد) نیستند، اما بعد از یک دمای پایین‌تر از نقطه ذوبشان شروع به تبلور می‌کنند که این اثر را فوق تبرد (شکل ۲). برای مثال آب مایع می‌تواند در درجه حرارت زیر صفر متبلور شود اما اگر بسیار خالص باشد و یا مقدار آن کم باشد، حتی در زیر ۵°C -۱۵ نیز متبلور می‌شود [۶].



شکل ۲. اثر فوق تبرد، سمت چپ با هسته‌گذاری و سمت راست بدون هسته‌گذاری [۶]

در هنگام انرژی دادن، فرقی نمی‌کند مواد تغییر فاز دهنده ما فوق تبرد از خود نشان بدهد یا ندهد، اما در هنگام آزاد کردن انرژی، به خاطر فوق تبرد، زمانی که به دمای ذوب می‌رسد، گرمای نهان آزاد نمی‌گردد. اثر فوق تبرد باعث کاهش دما می‌شود و زیر دمای تغییر فاز شروع به کریستال شدن و گرمای نهان ذخیره شده در ماده را آزاد می‌نماید.

نکته‌ی مهم این است که اگر هسته‌گذاری اتفاق نیافتد، اصلاً آزادسازی انرژی صورت نمی‌پذیرد.

۲- سامانه‌های به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده

۲-۱ سامانه‌های جامد - جامد

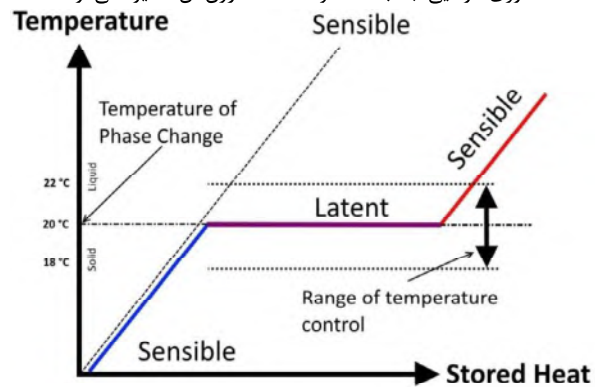
روش ذخیره‌سازی گرما با تغییر فاز جامد-جامد، جایگزین خوبی به جای تغییر فاز جامد-مایع در برخی کاربردها می‌تواند باشد. به عنوان مثال در کاربردهایی که جسم مورد نظر در حال حرکت است، نمی‌توان از سامانه جامد-مایع استفاده کرد، زیرا هنگامی که جامد به مایع تبدیل می‌شود، مایع در اثر حرکت ممکن است نشت پیدا کند و این مشکل‌ساز است. از این رو تمایل به استفاده از سامانه‌های جامد-جامد افزایش یافته است.

۲-۲ سامانه‌های جامد-مایع

کامپوزیت پارافین/پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) به عنوان شکل پایدار برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی براساس تغییر فاز جامد-مایع و تعیین خواص حرارتی پرداخته شده است. در این کامپوزیت، پارافین به عنوان ماده ذخیره کننده گرمای نهان و HDPE به عنوان ماده حمایت کننده است که به دلیل استحکام ساختاری آن، مانع از نشت پارافین ذوب شده می‌شود. بنابراین به کامپوزیت فرم پایدار مواد تغییر فاز دهنده گفته می‌شود. در این تحقیق دو نوع پارافین با نقطه ذوب ۴۲-۴۴°C (نوع اول) و ۵۶-۵۸°C (نوع دوم) و گرمای نهان ۱۹۲.۸ J/g و ۲۱۲.۴ J/g استفاده شد. بالاترین درصد جرمی برای هر دو نوع پارافین در کامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده بدون هیچ گونه نشت در حالت ذوب شده، ۷۷ درصد مشاهده شده است [۷].

امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر با سرعت قابل ملاحظه‌ای در حال پیشرفت می‌باشد. محققین در جهان بر این باورند که باید پایه انرژی از نفت خارج گردیده و تأمین آن از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی‌های آبی، بادی و خورشیدی صورت گیرد [۱]. روش‌های مختلفی برای ذخیره کردن انرژی‌های تجدیدپذیر را می‌توان نام برد که از میان آنها ذخیره انرژی گرمایی نهان به دلیل قابلیت ایجاد چگالی بالای ذخیره انرژی و خاصیت ذخیره انرژی در دمای ثابت از اهمیت بیشتری برخوردار است [۱]. به موادی که انرژی را به این روش در خود نگه می‌دارند، به اصطلاح مواد تغییر فاز دهنده می‌گویند.

این مواد ترکیبات آلی یا معدنی هستند که می‌توانند مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را درون خود به صورت پنهان جذب و ذخیره کنند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد، در طی فرآیند تغییر فاز (به عنوان مثال تغییر حالت از جامد به مایع یا بالعکس) اتفاق می‌افتد. این مواد به هنگام تغییر فاز از جامد به مایع یا از مایع به جامد، گرما را از محیط جذب کرده و یا به محیط پس می‌دهند. ماده تغییر فاز دهنده می‌تواند انرژی گرمایی را بدون هیچگونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه تغییر فاز، درون خود نگه دارد [۲، ۳]. در منطقه مستطیل مانند شکل ۱ که دمای ماده همچنان با انرژی گرمایی دادن ثابت است، فرآیند تغییر فاز در حال رخ دادن می‌باشد و در همین منطقه است که انرژی گرمایی جذب شده توسط ماده درون آن ذخیره می‌گردد.



شکل ۱. نمودار عملکرد مواد تغییر فاز دهنده [۴]

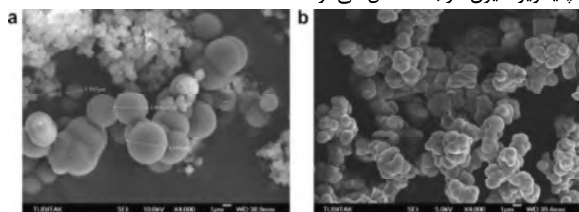
فاسد نشدن این مواد با گذشت زمان، اتلاف انرژی حرارتی کمتر نسبت به سایر روش‌های ذخیره‌سازی به دلیل عدم نیاز به انتقال انرژی به مسافت دور نسبت به محل جذب، غیر سمی بودن به دلیل ساختار آلی مواد، امکان ایجاد دمای یکنواخت‌تر در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز، نصب آسان در سامانه‌های خانگی، امکان استفاده از انرژی خورشیدی در طول شب و ... از جمله مزایای استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی می‌باشد [۵].

به هر حال مواد تغییر فاز دهنده هم مشکلاتی دارند از جمله؛ هدایت حرارتی پایین، فوق تبرد بالا، جدایی فازی آنها که مانع عملکرد مواد تغییر فاز دهنده به عنوان سامانه‌های مدیریت حرارتی می‌شود [۵].

^۱ High Density PolyEthylene

^۱Phase Change Material (PCM)
^۲Supercooling

کوچکتر از ۱۰۰ میکرومتر نیستند. مناسب‌ترین فرآیندهای شیمیایی انباشت ساده یا مرکب و یا پلیمریزاسیون درجا می‌باشند. روش انباشت به طور عمده، جدایی به دو فاز به صورت سامانه کلئیدی آب در روغن و یا روغن در آب می‌باشد که روش دوم برای حبس داخل کپسولی ماده تغییر فاز دهنده مناسب است. انباشت مرکب می‌تواند از طریق برهمکنش دو کلئید شارژ شده با بار مخالف، انجام شود؛ به این صورت که ماده سازنده هسته به شکل پخش به محلول پلیمری افزوده می‌شود و سپس مخلوط وارد فاز آبی دارای سطح فعال می‌شود. کلئیدهای مورد استفاده می‌توانند سامانه ژلاتین-صمغ عربی باشد که هر دو پلیمرهای طبیعی هستند. صمغ عربی در PH بالاتر از ۲،۲، شارژ منفی می‌گیرد [۸]. روش پلیمریزاسیون درجا برای تهیه میکروکپسول پلی اوره- فرم آلدئید، روش کاملاً موفقیت آمیزی جهت تولید میکروکپسول‌هایی با ظرفیت حرارتی بالاتر به نسبت محتوای ماده تغییر فاز دهنده‌شان می‌باشد (شکل ۴). ۷۷٪ میکروکپسول‌های با قطر کمتر از ۱۰۰ میکرومتر و ۹۰٪ میکروکپسول‌های با قطر کمتر از ۱۸۵ میکرومتر، از طریق روش پلیمریزاسیون درجا، حاصل می‌گردند.



شکل ۴. (الف) میکروکپسول پلی اوره- فرم آلدئید حاوی هسته n-اکتادکان، ۷۱۰k، ۴۰۰x (ب) میکروکپسول پلی یوره- فرم آلدئید حاوی هسته مخلوط n-اکتادکان و پلی اتیلن گلایکول ۷۵k، ۶۰۰x، ۴۰۰x [۴]

در برخی کاربردها به ویژه در بحث سیالات حامل انرژی، میکروکپسول‌های ماده تغییر فاز دهنده برای چرخه‌های مکرر مناسب نمی‌باشند، زیرا قطعات بزرگ ماده تغییر فاز دهنده میکروکپسول شده نه تنها ویسکوزیته سیال را افزایش داده، بلکه اغلب در اثر پمپ شدن، خرد می‌شوند. بنابراین نیاز به توسعه نانو کپسول‌های ماده تغییر فاز دهنده با اندازه کوچکتر نسبت به میکروکپسول‌ها، ضروری می‌باشد [۱۱].

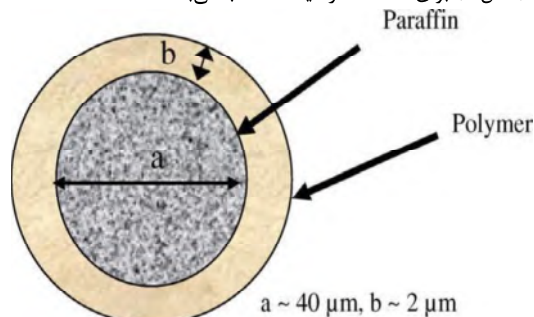
Cho و همکاران (۲۰۰۲)، میکروکپسول‌سازی اکتادکان به وسیله پلیمری شدن بین سطحی را مورد توجه قرار دادند. به وسیله این روش میکروکپسول‌هایی به قطر یک میکرومتر تولید گردید. روش مورد استفاده، واکنش چند تراکمی بین سطحی مونومرهای تولون ۲" و ۴ دی ایزوسیانات (TDI) و دی اتیلن تری آمین (DETA) در امولسیون بود. اکتادکان به عنوان مواد تغییر فاز دهنده فازی و یک سطح فعال نانینیک به عنوان امولسیون کننده (پخش کننده) استفاده گردید. میکروکپسول‌های تغییر فاز دهنده در دمای ۲۹-۳۰ C° تغییر فاز دادند. بازده کپسوله کردن با کاهش مقدار اکتادکان در کپسول‌ها، کاهش نشان داد. پوسته پلی اوره در اثر واکنش گروه‌های آمینی در DETA با گروه‌های ایزوسیانات که در سطح ذرات مواد تغییر فاز دهنده است، به وجود می‌آید [۱۱].

Taguchi و همکاران [۲۰۰۶]، با استفاده از ذرات پلیمر جاذب روغن، میکروکپسول‌های تغییر فاز دهنده را ساختند. n-pentadecane (n-pentadecane) به عنوان پوسته، جهت جذب به درون ذرات پلیمری جاذب روغن مورد استفاده قرار گرفتند.

توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شد که پارافین در شبکه HDPE پراکنده شده است. علاوه بر این به منظور بهبود هدایت حرارتی حالت پایدار پارافین/HDPE گرافیت پوسته پوسته (EG) توسط عملیات حرارتی در نسبت ۳ درصد وزنی به نمونه‌ها اضافه شد. در نتیجه هدایت حرارتی برای کامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده پارافین/HDPE حدود ۱۴ درصد و برای پارافین ۲ HDPE/ حدود ۲۴ درصد افزایش پیدا کرد. نتایج نشان داد که فرم پایدار کامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده پارافین/HDPE دارای پتانسیل بالا برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی و بهبود هدایت حرارتی است. علاوه بر این کامپوزیت‌ها با افزودن EG باعث کاهش هزینه مواد ذخیره کننده گرمای نهان می‌شود.

۲-۳ سامانه‌های کپسول‌سازی

حبس داخل کپسولی مواد تغییر فاز دهنده، تکنولوژی بسته‌بندی جدیدی در مقیاس میکرو است که می‌تواند این مواد را به خواص جدیدی مجهز نماید. استفاده از این تکنولوژی مزایای زیادی از جمله جلوگیری از پخش شدن ماده تغییر فاز دهنده درون ساختار، تبخیر کمتر، برهم‌کنش کمتر با محیط، افزایش سطح انتقال حرارت و جلوگیری از تغییرات ماکروسکوپیک هنگام تغییر فاز را در پی دارد [۸]. لازمه حبس داخل کپسولی میکرو، تولید میکروکپسول‌هایی است که به عنوان محفظه‌های کوچک عمل می‌کنند. در میکروکپسول‌ها ماده تغییر فاز دهنده به عنوان هسته و یک پلیمر یا یک ماده غیر آلی به عنوان پوسته قرار می‌گیرند [۹]. میکروکپسول‌هایی که دیواره‌هایی با قطر کمتر از ۲ میکرومتر و قطر ۲۰ تا ۴۰ میکرومتر دارند (شکل ۳) برای استفاده در الیاف مناسب می‌باشند.



شکل ۳. میکرو کپسول، ماده تغییر فاز دهنده در هسته و پلیمر در پوسته [۱۰]

میکروکپسول‌ها از طریق نشان دادن یک پوشش پلیمری نازک روی ذرات جامد کوچک یا قطرات مایع و یا از طریق پخش کردن جامد در مایع تولید می‌شوند. محتویات هسته کپسول (ماده فعال) توسط اصطکاک، فشار، پخش از میان دیواره پلیمری، انحلال پوشش دیواره پلیمری و یا تخریب زیستی آزاد می‌شود. تولید میکروکپسول‌ها می‌تواند از طریق روش‌های فیزیکی یا شیمیایی انجام شود. استفاده از برخی تکنیک‌ها به دلیل فرآیند پرهزینه و استفاده از حلال‌های آلی مضر برای سلامتی و محیط زیست، محدود شده است [۱۰].

روش‌های فیزیکی عمدتاً شامل بستر گریز از مرکز خشک کردن افشانه‌ای و بستر سیال می‌شود که البته قادر به تولید میکروکپسول‌های

- Expanded graphite
- Centrifugal bed
- Spray drying

fluidized bed

امولسیون و دوغاب میکروکپسول‌ها با استفاده از گرماسنجی (DSC)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، میکروسکوپی فازی، تجزیه‌کننده ابعاد، طیف سنجی مادون قرمز (FT-IR) و گرانروی سنجی مشخص گردید. برخی از نتایج جالب توجه به شرح زیر است:

الف: دوغاب میکروکپسول‌ها و امولسیون ماده تغییر فازدهنده تترادکان دو مایع انتقال حرارتی می‌باشند که دارای گرمای ویژه ظاهری بیشتری در محدوده انتقالی فازی خود می‌باشند.

ب: PS^۱، PMMA^۲، PEMA^۳ می‌توانند به عنوان پوسته، تترادکان را به صورت میکروکپسول درآورند. میکروکپسول‌ها دارای توزیع باریک اندازه ذرات می‌باشند. قطر میکروکپسول‌های تولیدی از ۱۰ تا ۲۵ میکرومتر تغییر می‌کرد.

ج: چه در مورد امولسیون تترادکان و چه در مورد دوغاب میکروکپسول‌ها، دمای ذوب (انتقال جامد به مایع) منطبق بر دمای دمای انجماد (تبدیل مایع به جامد) نبود. برای تترادکان حدود ۳ و برای آب حدود ۸ °C اختلاف دما بین دمای ذوب و انجماد وجود داشت که منجر به جذب بیشتر انرژی گرمایی گردید [۱۴].

۲-۴ سامانه‌های کولپلیم

ماده تغییر فازدهنده دارای ثبات ابعادی نوعی ماده مرکب می‌باشد که از ماده تغییر فازدهنده و ماده نگه‌دارنده تشکیل شده است. مزایای مهم این شکل از ماده تغییر فازدهنده، استفاده مستقیم بدون نیاز به حبس داخل کپسولی، ارزش اقتصادی و سهولت تهیه در ابعاد دلخواه می‌باشد. امروزه نوع جدیدی از ماده تغییر فازدهنده که دارای ثبات ابعادی از طریق الکتروسی کامپوزیت پلیمر/ ماده تغییر فازدهنده می‌باشند، به صورت الیاف بسیار ظریف (نانوالیاف) تهیه شده‌اند.

انواع مختلفی از الیاف دارای خاصیت تنظیم دما توسط روش‌های معمول ریسنجی نظیر ذوب رسی و ترریسی تهیه شده‌اند.

Zhang و همکاران [۲۰۰۵]، موفق به تولید الیاف دو جزئی مغزی-روکش دار از اکتادکان گردیدند. چپس‌های پلی‌اتیلن حاوی ۱۰ تا ۶۰٪ وزنی مواد تغییر فازدهنده به عنوان مغزی و پلی‌پروپیلن به عنوان روکش مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات الیاف و چپس‌ها با روش‌های مختلف مانند میکروسکوپ الکترونی پویشی، گرماسنجی پویشی و دیفرانسیل اشعه X مطالعه گردید. الیاف تولیدی دارای درصد ازدیاد طول پارگی بین ۲۴٪ تا ۳۸٪ بود. این الیاف قابل تبدیل به پارچه بودند. در این تحقیق از میکروکپسول‌های مواد تغییر فازدهنده تا ۴۰٪ به خوبی می‌توانست مورد استفاده قرار گیرد [۱۵].

در پژوهشی که توسط Chen و همکاران [۲۰۰۸]، صورت گرفت، نمونه ای از نانوالیاف تغییر فازدهنده تهیه شد که در این نمونه از لوریک اسید که یک اسید چرب می‌باشد به عنوان ماده تغییر فازدهنده و از پلی اتیلن ترفتالات به عنوان پلیمر لیفی و ماده نگه‌دارنده استفاده شده بود. این دو ماده با نسبت‌های مساوی در محلول ریسنجی وجود داشته و نانوالیافی با قطر متوسط

ابتدا میکروکپسول شامل مواد تغییر فازدهنده با پوسته متیل متاکریلات تهیه گردید. در آزمایشات انجام شده، حجم موثر MMA و زمان غوطه‌ور ساختن در روغن تغییر داده شد. قطر و خواص مکانیکی میکروکپسول‌ها اندازه‌گیری شد. ملاحظه گردید که با افزایش حجم MMA جذب شده، مقدار مواد تغییر فازدهنده نشت کرده از میکروکپسول‌ها کاهش یافت. در حقیقت با استفاده از این روش میکروکپسول با خاصیت کشسانی بهتر پوسته تهیه شد. از پلیمر جاذب روغن (Oleosorb PW-190) تجارتي استفاده گردید. n-پنتادکان دارای دمای ذوب ۱۰،۹ °C و گرمای نهان ذوب ۱۴۲ KJ/Kg بود. ابتدا مواد تغییر فازدهنده در پلیمر جاذب روغن غوطه‌ور و در حمام آب معلق می‌گردد، سپس مونومر MMA به آب اضافه شده و شروع کننده به آن افزوده می‌شود و پلیمریزاسیون به مدت ۶ ساعت ادامه می‌یابد [۱۲].

Shin و همکاران [۲۰۰۵]، از طریق پلیمری کردن در جای ملامین فرم آلدهید، میکروکپسول‌های حاوی ایکوزان^۱ ساختند. مشخصات میکروکپسول‌ها شامل اندازه ذرات، توزیع اندازه ذرات، شکل، خواص گرمایی و پایداری آنها اندازه‌گیری شد. میکروکپسول‌ها از طریق روش معمول پد کردن- خشک کردن- پختن با پارچه تریکو بافی شده پلی‌استر آمیخته شد تا پارچه تنظیم کننده دما به دست آید. خواص شستشویی و خواص حرارتی پارچه‌ها اندازه‌گیری شد. ملاحظه گردید که میکروکپسول‌ها کروی و حاوی پوسته ملامینی می‌باشند. میکروکپسول‌ها دارای استحکام و پایداری کافی بودند، به طوری که عملیات هم‌زدن در آب داغ و محلول قلیایی را تحمل می‌نمودند. با افزایش غلظت میکروکپسول‌ها ظرفیت ذخیره سازی حرارتی پارچه افزایش می‌یافت. پارچه‌ها دارای ظرفیت ذخیره سازی حرارتی ۰،۹۱ تا ۴،۴۴ J/g بودند. بعد از ۵ بار شستشو ۴۰٪ از ظرفیت ذخیره سازی حرارتی در پارچه باقی می‌ماند.

روش تهیه میکروکپسول بدین صورت است که برای تهیه پیش پلیمر ملامین فرم آلدهید، ۰،۱ ملامین و ۰،۳ فرم آلدهید ۳۷٪ در ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب آب مقطر که PH آن با محلول ۱۰٪ کربنات دو سود به مقدار ۸،۵ تا ۹ تنظیم شده بود، در دمای ۶۰ °C به مدت یک ساعت ترکیب شد. سپس با استفاده از یک همزن با سرعت ۶۰۰۰ دور بر دقیقه، امولسیون یکسان (۱۰ گرم سدیم لوریل سولفات (SLS) در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب) به دست آمد. امولسیون به دست آمده به محلول پیش پلیمر اضافه گردید و PH آن با اسید استیک به ۵ تا ۴ کاهش داده شد. پس از تنظیم PH مقدار ۰،۰۰۱ گرم پلی‌وینیل الکل به حمام حاوی امولسیون و پیش پلیمر اضافه شد و به مدت یک ساعت در دمای ۵۰ °C هم‌زدن ادامه یافت تا از جمع شدن میکروکپسول‌ها جلوگیری شود. سپس میکروکپسول‌ها صاف و با آب مقطر شستشو داده شد و در دمای اتاق خشک گردید [۱۳].

تولید و خواص فیزیکی- حرارتی امولسیون تترادکان و دوغاب میکروکپسول‌های حاوی تترادکان با پوسته‌هایی از پلیمرهای مختلف مورد توجه Yang و همکاران [۲۰۰۳] قرار گرفت. با استفاده از یک سطح فعال آب‌گریز و یک سطح فعال آب‌دوست امولسیون تترادکان تهیه گردید. در آزمایش دیگری با استفاده از پلی‌وینیل استات (PVA)، پلی‌استایرن (PS) و پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) از طریق پلیمریزه کردن درجا میکروکپسول تهیه گردید. با استفاده از سطح فعال مناسب، تترادکان و مونومر هر یک از پلیمرهای فوق به صورت معلق در آب درآمد و سپس شروع کننده به محلول اضافه گردید تا به مدت ۴ تا ۵ ساعت پلیمری شدن انجام گیرد. خواص

^۱Differential Scanning Calorimetry

^۲Transmission Electron Microscopy

^۳Fourier transform infrared spectroscopy

^۴Polystyrene

^۵Poly methyl methacrylate

^۶Poly ethyl methacrylate

فازدهنده می‌تواند حالت جامد خود را در طول پروسه‌ی انتقال حفظ کند [۱۷].

۳- دسته‌بندی مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فازدهنده به طور کلی از لحاظ ساختمانی به دو دسته که شامل مواد با ترکیبات آلی و غیر آلی می‌باشند، تقسیم بندی می‌شوند. مواد تغییر فاز دهنده با ترکیبات آلی (کربن دار) نیز به دو دسته‌ی پارافینی و غیر پارافینی طبقه بندی می‌شوند [۱۸].

۳-۱ نمک‌های غیر آلی هیدراته شده

نمک‌های غیر آلی هیدراته ترکیبات فلزی نمک‌های غیر آلی و یک جامد بلوری با فرمول عمومی AB.nH₂O می‌باشند. نمک گلابر (H₂O.Na₂SO₄) نمونه‌ی آشنایی از این دسته مواد است. این مواد دارای محدوده جذب و آزادسازی دمای ۴۰ - ۲۰ °C می‌باشند. تغییر شکل جامد-مایع نمک‌های هیدراته در واقع آب‌گیری از هیدرات‌های نمک است، اگرچه این فرآیند به صورت ترمودینامیکی به ذوب یا انجماد شبیه است. یک نمک هیدراته در هنگام ذوب به یک نمک هیدراته دیگر با تعداد مول کمتر آب تبدیل می‌شود. نمک‌های هیدراته مهم‌ترین گروه مواد تغییر فاز دهنده هستند که به طور گسترده برای سامانه‌های ذخیره انرژی گرمایی نهان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (جدول ۱). مهم‌ترین خصوصیات نمک‌های هیدراته عبارتند از: گرمای نهان ذوب بالا به ازای واحد حجم (در حدود ۳۵۰ مگاژول بر مترمکعب)، هدایت گرمایی نسبتاً بالا (تقریباً دو برابر پارافین‌ها و در حدود ۰/۵ وات بر متر درجه سانتیگراد) و تغییر حجم کم در هنگام ذوب. این گونه نمک‌ها خورنده نبوده، با پلاستیک‌ها سازگارند و سمیت کمی دارند. به علاوه، بسیاری از نمک‌های هیدراته جهت استفاده برای ذخیره‌سازی ارزان می‌باشند [۱۰].

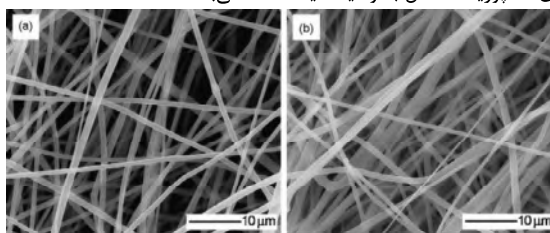
جدول ۱. نمک‌های هیدراته به عنوان مواد تغییر فاز دهنده [۱۸]

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m.K)	Density (kg/m ³)
H ₂ O	0 [1,5]	333 [1]	0.612 (liquid, 20 °C) [1]	998 (liquid, 20 °C) [1]
LiClO ₄ · 3H ₂ O	8.1 [6,7]	255 [6]	n.a.	979 (solid, 0 °C) [1]
ZnCl ₂ · 6H ₂ O	10 [6]	n.a.	n.a.	1720 [6]
K ₂ HPO ₄ · 6H ₂ O	13 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
NaOH · 3H ₂ O	15 [9]	n.a.	n.a.	n.a.
Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	15.4 [7]	n.a.	n.a.	n.a.
KF · 6H ₂ O	18 [8]	n.a.	n.a.	n.a.
Mn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	18.5 [16,7,9]	231 [16,9]	n.a.	1447 (liquid, 20 °C) [1]
				1455 (solid, 18 °C) [1]
				1480 [9]
				1730 (liquid, 20 °C) [10]
				1729 (liquid, 40 °C) [10]
				1795 (solid, 5 °C) [10]
CaCl ₂ · 6H ₂ O	29 [4,11]	190.8 [4,11]	0.540 (liquid, 38.7 °C) [4,11]	1562 (liquid, 32 °C) [4,11]
	29.2 [7]	171 [1,9]	0.560 (liquid, 61.2 °C) [1]	1486 (liquid) [1]
	29.8 [6]	174.4 [12]	1.088 (solid, 23 °C) [4,11]	1802 (solid, 24 °C) [4,11]
	29.7 [1,9]	192 [6]		1710 (solid, 23 °C) [1]
	29-39 [12]			1834 [12]
	30 [6]			1829 [6]
LiNO ₃ · 3H ₂ O	30 [6]	296 [6]	n.a.	n.a.
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	32 [1,9]	324 [1,9]	0.588 [1]	1485 (solid) [1]
	31-32 [12]			1498 [12]
Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	32-36 [12]	246.5 [12]	n.a.	1442 [12]
Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃	33 [6,7]	247 [6]	n.a.	n.a.
	34 [4,7,11]	114.8 [4,11]	n.a.	1946 (liquid, 16 °C) [4,11]
Na ₂ HPO ₄ · 12H ₂ O	35.5 [6]	265 [12]	n.a.	2194 (solid, 24 °C) [4,11]
	36 [12]	280 [6]	n.a.	1527 [12]
	36 [6]	281 [6]	n.a.	n.a.
	35.2 [7]			n.a.
Zn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	36 [4,7,11]	146.9 [4,11]	0.464 (liquid, 39.9 °C) [4,11]	1828 (liquid, 36 °C) [4,11]
	36.4 [1,9]	147 [1,9]	0.469 (liquid, 61.2 °C) [7]	1937 (solid, 24 °C) [4,11]
				2065 (solid, 14 °C) [1]
KF · 2H ₂ O	41.4 [7]	n.a.	n.a.	n.a.
K ₂ CO ₃ · 2H ₂ O	42 [6]	n.a.	n.a.	n.a.
K ₂ SO ₄ · 7H ₂ O	45 [6]	n.a.	n.a.	n.a.
Zn(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	45.5 [6]	n.a.	n.a.	n.a.
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	42.7 [7]	n.a.	n.a.	n.a.
	47 [6]			n.a.
Na ₂ HPO ₄ · 7H ₂ O	48 [7]	n.a.	n.a.	n.a.

Sozen و همکاران [۱۹۹۸]، در دو مقاله، پایدار ماندن تغییر فاز نمک گلوبر (سولفات سدیم) را مطالعه نمودند. این محققین معتقدند که سولفات سدیم یا نمک گلوبر (Glauber) وقتی به عنوان ماده تغییر فاز دهنده به هنگام کاربردهای متوالی با ذوب ناخواسته به کار می‌رود، نمک و آب از هم جدا می‌شوند. در نتیجه سولفات سدیم کارایی خود را از دست می‌دهد. در تجربه انجام گرفته، نمک گلوبر به صورت مایع در گلوله‌هایی به قطر ۲۵ میلی‌متر از

۷۱۰ نانومتر از آنها به دست آمد که گرمای نهان ذوب و کریستالیزاسیون آن به ترتیب ۷۰/۷۶ و ۶۲/۱۴ ژول بر گرم گزارش شده است [۱۶].

در پژوهش دیگری که توسط این افراد صورت گرفت، از استئاریل استئارات و پلی اتیلن ترفتالات استفاده گردید. برای نمونه، محلولی که نسبت استئاریل استئارات به پلی اتیلن ترفتالات در آن ۵۰ به ۱۰۰ بود، قطر متوسط نانوالیاف آن یک میکرومتر و انتالپی ذوب این نمونه نانوالیاف نیز ۵۳/۷۷ ژول بر گرم گزارش شده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی این نانوالیاف در شکل (۵) دیده می‌شود. شکل (۵) الف قبل از چرخه حرارتی و (ب) بعد از ۱۰۰ بار طی کردن چرخه حرارتی سرد و گرم کردن است. مشاهده شد که بعد از طی کردن چرخه حرارتی، هیچ تغییری در ساختار کامپوزیت ایجاد نشده و قطر و شکل الیاف مانند قبل از حرارت دادن می‌باشد که نشان دهنده پایداری کامپوزیت حاصل به وسیله الیاف PET می‌باشد [۱۶].



شکل ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف SS/PET، (الف) قبل و (ب) بعد از چرخه حرارتی [۱۶]

نوع جدیدی از مواد تغییر فاز جامد-جامد با ساختار مشبک آماده شد. در این مواد جدید، پلیمر سخت سلولز دی استات (CDA) به عنوان اسکلت و پلیمر منعطف پلی اتیلن گلیکول (PEG) به عنوان شاخه‌های زنجیره‌ای کاربرد دارد. مکانیسم انتقال در این پلیمر کاربردی، انتقال بین حالت آمورف و کریستالی PEG است. در طی انتقال، PEG گرمای نهان را می‌گیرد یا پس می‌دهد و همزمان کل کامپوزیت به صورت جامد باقی می‌ماند. تجربیات زیادی نشان می‌دهد که گرمای نهان مواد تغییر فازدهنده و استحکام مکانیکی و فاز انتقال حرارت به جرم مولکولی و درصد جرمی PEG بستگی دارد.

در تحقیق دیگری یک ماده ذخیره کننده انرژی براساس تغییر فاز جامد-جامد تولید شد. به این صورت که ابتدا مونومر-کوپلیمر حاوی پلی اتیلن گلیکول گروه عاملی آن تغییر می‌کند و یک واحد وینیل از طریق اصلاح گروه هیدروژن سنتز شد. در مرحله بعد توسط کوپلیمریزاسیون مونومر-کوپلیمر و فنیل اتیلن ماده ذخیره کننده انرژی براساس تغییر فاز جامد-جامد بدست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که مواد تغییر فاز جامد-جامد دارای خواص کریستالی عالی و انتالپی تغییر فاز بالا هستند.

در تحقیقی دیگر ماده ذخیره کننده انرژی براساس تغییر فاز جامد-جامد کوپلیمر پلی یورتان با ساختار بلوکی تشکیل شده از پلی اتیلن گلیکول با جرم مولکولی بالا (PEG) به عنوان بخش نرم، ۴-۴ دی فنیل متان دی سیانات (MDI) و ۴-۱ بوتان دی ال (BDO) به عنوان توسعه دهنده زنجیر ساخته شد. بررسی رفتار انتقال فاز و مورفولوژی کریستالی انجام شد. نتایج نشان داد که این مواد تغییر فاز دهنده، خواص انتقال فاز جامد-جامد را به عنوان مثال دمای انتقال مناسب، انتالپی انتقال بالا و پایداری حرارتی به خوبی نشان داد. این یک پلی یورتان با اثر ذخیره سازی خوب حرارت است و مکانیسم ذخیره حرارتی این مواد انتقال بین حالت آمورف و کریستالی قسمت نرم PEG از ماده تغییر فازدهنده و قسمت سخت به عنوان شبکه‌های فیزیکی است که حرکت زنجیره‌های مولکولی را در دماهای بالا محدود می‌کند. بنابراین این ماده تغییر



پارچه‌هایی که به این روش تکمیل شده‌اند، دارای خواص بهتری نسبت به پارچه ۱۰۰٪ پنبه‌ای بوده و پس از پخت دارای خواص جالب توجهی بودند. علاوه بر قابلیت ذخیره‌سازی گرما، برگشت‌پذیری، چرک ناپذیری و پرزدانه بهبود یافت [۲۱].

Ding و Li [۲۰۰۶]، ماده تغییر فاز دهنده جدیدی جهت ذخیره گرما از طریق واکنش تراکمی پلی‌اتیلن گلایکول با وزن مولکولی بالا (۱۰۰۰۰)، پنتاایتریتول (PE) و ۴-دی‌فنیل متان دی‌ایزوسیانات (MDI) ساختند. جهت تعیین ویژگی‌های ماده ساخته شده از DSC، FTIR، وزن‌سنجی حرارتی (TGA) و میکروسکوپ نوری پلاریزه (POM) استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مواد تغییر فاز دهنده حاصل خصوصیات تغییر فاز جامد-جامد دارد و آنتالپی تغییر فاز آن ۱۵۲٫۹۷ ژول بر گرم است و بلورینگی آن به ۸۱٫۷۶٪ می‌رسد [۱۷].

Chen و همکاران [۲۰۰۷]، الیاف مخلوط پلی‌اتیلن گلایکول و استات سلولز را به روش الکتروسیسی تولید نمودند که در آن پلی‌اتیلن گلایکول ماده تغییر فاز دهنده بود. نتایج نشان داد که الیاف به صورت استوانه‌ای یا سطحی صاف به دست می‌آید و الیاف تولید شده دارای توانایی کنترل کردن دما بودند. همچنین پلی‌اتیلن گلایکول در درون الیاف و روی الیاف قرار می‌گرفت. به نظر این محققین، چون این الیاف دارای قطر کمی بودند، گرمای نهان ذوب و بیشترین آنتالپی را از خود نشان می‌دادند. ۱۰۰ بار سرد و گرم کردن انجام پذیرفت و الیاف توانایی خود در کنترل دما را از دست ندادند [۲۲].

۳-۳ ترکیبات فلزی

این دسته شامل فلزات با نقطه ذوب پایین و اوتکتیک‌های فلزی است. این مواد فلزی به سبب وزنی که دارند به طور جدی به عنوان مواد تغییر فاز دهنده مورد توجه قرار نگرفته‌اند، اما هنگامی که حجم مدنظر قرار می‌گیرد، به واسطه داشتن گرمای ذوب به ازای واحد حجم بالا، برگزیدگان احتمالی می‌باشند. آن‌ها همچنین هدایت گرمایی بالا دارند. تفاوت اصلی میان این مواد فلزی و سایر مواد تغییر فاز دهنده، هدایت گرمایی بالای آنها می‌باشد. تعدادی از این ترکیبات فلزی، ترکیبات گالیوم، ایندیوم، کادمیوم، بیسموت، سرب و قلع می‌باشند [۵، ۱۹].

۳-۴ اوتکتیک‌ها

یک اوتکتیک، ترکیبی از دو یا چند جزء می‌باشد که هر کدام از آنها به صورت متجانس ذوب و منجمد شده و مخلوطی از بلورهای اجزا را در طول تبلور تشکیل می‌دهند. اوتکتیک به واسطه آن که با ترکیب مشخصی از بلورها منجمد شده و اجزا شانس برای جدایی ندارند، تقریباً همواره بدون تفکیک، ذوب و منجمد می‌گردند [۵، ۱۹].

Bo و همکاران [۱۹۹۹]، بر روی مخلوط‌های دوتایی تترادکان و هگزادکان به عنوان مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره سرما در سامانه‌های محدود سردکننده مطالعه کردند. آن‌ها خواص حرارتی گرید آزمایشگاهی تترادکان، هگزادکان و مخلوط‌های دوتایی آنها شامل نقطه انجماد، حرارت ذوب، پایداری حرارتی و انبساط حجمی طی فرآیند تغییر فاز را با استفاده از DSC بررسی کردند [۲۳].

۳-۵ انواع دیگر

جنس پلی‌پروپیلن قرار داده شد. گلوله‌ها می‌توانستند در یک محیط آبی حرکت کنند. این حرکت موجب بهتر شدن کارایی نمک گردید [۱۹].

۳-۲ پلی‌اتیلن گلایکول‌ها

پلی‌اتیلن گلایکول (PEG) ماده تغییر فاز دهنده مهم دیگری برای کاربردهای نساجی است که ارزان بوده و دارای چگالی ذخیره حرارتی متوسط (در حدود ۲۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم یا ۱۵۰ مگاژول بر متر مکعب) و محدوده وسیعی از دمای ذوب (۳،۲ تا ۶۸،۷ درجه سانتیگراد) می‌باشد. این ماده همچنین رفتار ذوب متجانس و مقاومت بیشتری در برابر خوردگی دارد [۱۱]. [۲۴]. واحد تکرار شونده پلی‌اتیلن گلایکول، اکسی اتیلن- $(O-CH_2-CH_2)_n$ می‌باشد که در انتهای هر زنجیر گروه هیدروکسیل وجود دارد (جدول ۲). دمای ذوب پلی‌اتیلن گلایکول وابسته به وزن مولکولی آن است، البته هنگامی که وزن مولکولی آن کمتر از ۲۰۰۰۰ می‌باشد [۱۸].

جدول ۲. انواع پلی‌اتیلن گلایکول به عنوان مواد تغییر فاز دهنده [۹]

Materials	Molecular weight	Melting point (°C) (approx. value)	Ref.
PEG 1000	1000	35	[28]
PEG 1500	1500	50	[29,30]
PEG 3400	3400	59	[29,30]
PEG8000	8000	60	[31]
PEG10000	10,000	62	[29,30]
PEG20000	20,000	63	[29,30]

Alkan و همکاران [۲۰۰۶]، پلی‌اتیلن گلایکول (PEG) را با پلیمرهای اکریلیک مانند پلی‌متیل متاکریلات مخلوط کردند و به عنوان مواد تغییر فاز دهنده جدید فرم پایدار معرفی و ویژگی‌های آن را با تکنیک‌های میکروسکوپ نوری، اسپکتروسکوپی و ویسکوزیته مشخص کردند. خواص ذخیره انرژی گرمای نهان مخلوط‌ها با استفاده از حرارت‌سنجی روبشی تفاضلی ارزیابی شد. در مخلوط‌های با فرم پایدار، PEG مانند مواد ذخیره کننده انرژی تغییر فاز دهنده عمل می‌کرد در حالی که پلیمرهای اکریلیک به دلیل خاصیت چسبندگی خود به عنوان مواد حمایت کننده کار می‌کردند تا ۸۰٪ وزنی PEG در مخلوط، هیچگونه نشی در ۱۰۰ سیکل سرد و گرم شدن اتفاق نمی‌افتاد. تاثیر متقابل بین اجزای مخلوط (PEG) و یکی از پلیمرهای اکریلیک با اسپکتروسکوپی مادون قرمز تبدیل فوریه و ویسکومتری آنالیز شد. خواص کلیدی (دمای ذوب و انجماد، گرمای نهان ذوب و انجماد مخلوط‌ها) با DSC ارزیابی شد. نتایج DSC نشان داد که به دلیل خواص حرارتی مطلوب به عنوان مواد تغییر فاز دهنده فرم پایدار جهت کاربردهای ذخیره انرژی مناسب هستند [۲۰].

Bruno و Vigo [۱۹۸۹]، پلی‌اتیلن گلایکول (PEG) با وزن مولکولی نسبتاً زیاد (۶۰۰ تا ۲۰۰۰۰) را به عنوان یک ماده ذخیره کننده و رهاساز گرما مورد بررسی قرار دادند. پارچه‌های متفاوتی از قبیل پارچه ۱۰۰٪ پنبه‌ای، ۵۰/۵۰ پنبه-پلی‌استر، الیاف شیشه، پشم و اکریلیک مورد آزمایش قرار گرفتند. از مواد اتصال دهنده مولکول‌ها مانند دی‌متیلول دی‌هیدروکسی اتیلن اوره (DMDHEU) و کاتالیزورهایی مانند سیتریک اسید و MgCl₂·6H₂O استفاده شد. پارچه در محلول آبی PEG، DMDHEU و کاتالیست قرار گرفت و سپس پارچه بین غلتک‌هایی فشرده و آب‌گیری شد و پس از خشک کردن اولیه در دمای ۷۰ تا ۸۵ °C، در دمای ۱۰۰ تا ۱۵۰ °C خشک گردید.

DSC
FTIR
Dimethyloldihydroxyethylene Urea

eutectic



دهنده خصوصیات موثرتر و تغییر فاز پایدارتری نسبت به هنگامی که لوله در وضعیت عمودی قرار دارد، دارند. ظرفیت ذخیره حرارت از حد انتظار پایین‌تر بود و بازده متوسط ذخیره حرارت ۵۰٪ به دست آمد که بقیه این انرژی عملاً تلف شده است [۲۶].

مخلوط اسید چرب و پلی‌متیل متاکریلات به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده پایدار مورد توجه Sari و Alkan [۲۰۰۷]، قرار گرفته است. اسیدهای چرب شامل استئاریک اسید، پالمیتیک اسید، میریستیک اسید و لوریک اسید در حلال کلروفرم حل شده یا محلول پلی‌متیل متاکریلات در همین حلال مخلوط و به صورت فیلم درآمده و مورد آزمایش قرار گرفته است. ملاحظه گردید که این نوع مواد تغییر فازدهنده پایدار هستند و در تثبیت حرارتی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [۲۷].

Sari و Karaipekli [۲۰۰۷]، خواص مخلوط اتکتیک کاپریک اسید (CA) و پالمیتیک اسید (PA) به عنوان ماده تغییر فازدهنده در دمای پایین (LHTES) را مطالعه کردند. نتایج DSC نشان داد مخلوط فوق با نسبت وزنی (CA:76.5/PA:23.5) ماده تغییر فاز دهنده مناسبی است، با نقاط ذوب و انجماد به ترتیب ۲۱.۸۵ °C و ۲۲.۱۵ °C، و گرمای نهان ذوب و انجماد به ترتیب ۱۷۱.۲۲ و ۱۷۳.۱۶ گرم بر ژول و آن را برای کاربردهای گرمایش، تهویه و هواسازی مناسب می‌کند. مخلوط فوق همچنین در دراز مدت ویژگی حرارتی خود را حفظ می‌کند [۲۷].

۳-۶ هیدروکربن‌های خطی با زنجیر بلند (پارافین)

هیدروکربن‌های خطی آب‌گریز محصول فرعی پالایش نفت خام بوده که فرمول عمومی آنها C_nH_{2n+2} می‌باشد. تبلور زنجیر (CH₃-) مقدار زیادی گرمای نهان آزاد می‌کند. همچنین نقطه ذوب و گرمای نهان ذوب با افزایش طول زنجیر افزایش می‌یابند [۲۸]. این مواد از لحاظ شیمیایی بی‌اثر بوده، در زیر دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد پایدار هستند، تغییر حجم کمی هنگام ذوب دارند و در حالت مایع، فشاربخار آنها پایین است. به دلیل وجود این خواص، سامانه‌های دارای پارافین چرخه‌ای انجماد-ذوب بسیار طولانی دارند. این محصولات غیر سمی، قابل اطمینان، قابل پیش بینی، ارزان و غیر خوردنده بوده و دارای خاصیت هسته گذاری خودبه خودی می‌باشند [۲۹]، [۳۰].

ذوب و انجماد هیدروکربن‌های دارای ۱۳ تا ۱۸ اتم کربن، در محدوده ۵/۵ تا ۶۱/۴ درجه سانتیگراد است. با انتخاب تعداد اتم کربن، تغییر فاز می‌تواند در محدوده دمایی مطلوبی صورت پذیرد (جدول ۴).

Lee و Choi [۱۹۹۸]، موضوع شکل‌شناسی مخلوط پلی‌اتیلن با جرم

مخصوص زیاد و پارافین را مورد توجه قرار دادند. به نظر این محقق شکل ساختاری مخلوط است که هنگام مایع شدن نقش اساسی را در نشت پارافین بازی می‌کند. پارافین به عنوان ماده‌ای است که می‌تواند در حین سرد شدن (متبلور شدن) حرارت ایجاد نماید و گرمایی را که در هنگام گرم شدن در خود ذخیره کرده است، پس بدهد. پارافین برای تثبیت دمای اتاق در محدوده مناسب مورد استفاده قرار گرفته است. ملاحظه شد که قابلیت ذخیره‌سازی مخلوط پلی‌اتیلن و پارافین وابسته به ساختار گویچه ای اسفروولیتیک در سطح نمونه می‌باشد. در ۸۰ بار دوره سرد کردن و گرم کردن ملاحظه گردید که مخلوط پلی‌اتیلن با وزن مولکولی زیاد با پارافین، بهتر از مخلوط پلی‌اتیلن با وزن مولکولی کم و پارافین در ذخیره‌سازی انرژی عمل می‌کند [۳۱]

مواد آلی غیر پارافینی بیشترین مواد تغییر فاز دهنده این گروه بوده که خواص گوناگونی دارند. تعداد زیادی از استرها، اسیدهای چرب، الکل‌ها و گلاکول‌ها برای ذخیره انرژی مناسب تشخیص داده شده‌اند (جدول ۳). این مواد قابل احتراق بوده و نباید در معرض دماهای بالا، شعله و عوامل اکسیدکننده قرار بگیرند [۱۸].

جدول ۳. انواع اسیدهای چرب به عنوان مواد تغییر فاز دهنده [۵]

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m.K)	Density (kg/m ³)
Propyl palmitate	10 [9]	186 [9]	n.a.	n.a.
Isopropyl palmitate	11 [34]	95-100 [34]	n.a.	n.a.
Capro-lauric acid + pentadecane (90:10)	17.3 [35]	182.2 [35]	n.a.	n.a.
Isopropyl stearate	14-18 [34]	146-142 [34]	n.a.	n.a.
Caprylic acid	16 [4,11]	148.3 [4,11]	0.149 (liquid, 38.6 °C) [4,11]	901 (liquid, 30 °C) [4,11]
	16.3 [1]	149 [1]	0.148 (liquid, 67.7 °C) [1]	962 (liquid, 80 °C) [1]
			0.148 (liquid, 20 °C) [1]	981 (solid, 13 °C) [4,11]
				1033 (solid, 10 °C) [1]
Capro-lauric acid (65 mol%/35 mol%)	18.0 [36]	148 [36]	n.a.	n.a.
Butyl stearate	19 [9]	140 [9]	n.a.	n.a.
Capro-lauric acid (45-55%)	21 [9]	143 [9]	n.a.	n.a.
Dimethyl sebacate	21 [34]	126-131 [34]	n.a.	n.a.
30% Malic acid + 70% Capric acid	24 [11]	147.7 [11]	0.164 (liquid, 39.1 °C) [11]	888 (liquid, 25 °C) [11]
Vinyl stearate	25-29 [34]	122 [34]	n.a.	n.a.
Capric acid	32 [4,11]	152.3 [4,11]	0.153 (liquid, 38.3 °C) [4,11]	878 (liquid, 45 °C) [4,11]
	31.5 [1]	153 [1]	0.152 (liquid, 55.5 °C) [1]	916 (liquid, 40 °C) [1]
			0.149 (liquid, 90 °C) [1]	1008 (solid, 24 °C) [4,11]
Methyl-12 hydroxy-stearate	42-43 [34]	126-126 [34]	n.a.	n.a.
Lauric acid	42-44 [1]	179 [1]	0.147 (liquid, 50 °C) [1]	962 (liquid, 60 °C) [11]
	44 [11]	177.4 [11]		870 (solid, 50 °C) [11]
Myristic acid	49-51 [37]	204.5 [37]	n.a.	1007 (solid, 24 °C) [11]
	54 [1]	187 [1]		984 (liquid, 55 °C) [11]
	58 [1]	186.8 [11]		844 (liquid, 80 °C) [11]
Palmitic acid	64 [4,11]	185.4 [4,11]	0.162 (liquid, 68.4 °C) [4,11]	998 (solid, 24 °C) [11]
	61 [28,39]	203.4 [28,39]	0.159 (liquid, 80.1 °C) [11]	850 (liquid, 65 °C) [4,11]
	63 [1]	187 [1]	0.165 (liquid, 80 °C) [1]	947 (liquid, 80 °C) [1]
Stearic acid	69 [4,11]	202.5 [4,11]	0.172 (liquid, 70 °C) [1]	989 (solid, 24 °C) [4,11]
	66-61 [29,60]	186.2 [29,60]		848 (liquid, 70 °C) [4,11]
	70 [1]	203 [1]		987 (solid, 24 °C) [4,11]

% in weight, n.a.: not available.

Keles و همکاران [۲۰۰۵]، از مخلوط اوتکتیک، اسید لوریک و اسید میریستیک به عنوان مواد تغییر فاز دهنده در کاربردهای گرم‌کردن دمای پایین استفاده کردند. اسید لوریک (LA) نقطه ذوب ۴۲.۶ °C و اسید میریستیک (MA) نقطه ذوب ۵۲.۲ °C مواد تغییر فاز دهنده‌ای هستند که نقاط ذوب کاملی دارند و این مسئله می‌تواند استفاده آن‌ها را در کاربردهای دمای پایین، مانند گرم کردن فضای گلخانه محدود سازد. اما ایجاد مخلوطی از آن‌ها می‌تواند دمای ذوب را به مقدار مناسب برساند. در این مطالعه، آنالیز حرارتی بر مبنای تکنیک DSC نشان می‌دهد که مخلوط ۶۶٪ وزنی LA، مخلوط اوتکتیک می‌سازد که دمای ذوب ۳۴.۲ °C و گرمای نهان ذوب ۱۶۶.۸ ژول بر گرم دارد. نتایج DSC و نتایج تجربی نشان می‌دهد که این مخلوط با ویژگی‌های ترموفیزیکی و حرارتی خود می‌تواند ماده قابل‌ای برای کاربردهای ذخیره سازی انرژی دمای پایین باشد [۲۴].

Ozonur و همکاران [۲۰۰۶]، در مقوله ذخیره‌سازی انرژی حرارتی با مواد تغییر فاز دهنده، میکروکپسول‌سازی مخلوط اسیدهای چرب نارگیل را مورد مطالعه قرار دادند. میکروکپسول‌ها با در نظر گرفتن شکل هندسی، دمای انتقال فاز، اندازه متوسط ذره، پایداری شیمیایی و تعداد سیکل‌های حرارتی که می‌توانستند داشته‌باشند، مشخص می‌شدند.

قطر میکروکپسول‌های تهیه شده در این تحقیق حدود یک میلی‌متر بود. مخلوط‌ها شکل هندسی خود را حتی بعد از ۵۰ سیکل حرارتی ذوب و انجماد در محدوده دمایی ۲۲ تا ۳۴ °C حفظ کردند. مخلوط ژلاتین و صمغ عربی بهترین ماده برای دیواره میکروکپسول‌های حاوی مخلوط اسیدهای چرب نارگیل شناخته شد [۲۵].

Kaygosuz و Sari [۲۰۰۱]، بر روی سامانه‌های ذخیره انرژی حرارتی با استفاده از اسید استئاریک به عنوان ماده تغییر فاز دهنده کار کردند. پارامترهایی مانند زمان گذر و بسط مرز مشترک جامد-مایع همانند اثر سرعت جریان حرارت بر پایداری تغییر فاز اسید استئاریک به عنوان مواد تغییر فاز دهنده مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که پایداری ذوب مواد تغییر فاز دهنده در جهت شعاعی بهتر از جهت محوری است. هنگامی که لوله مبدل حرارتی در وضعیت افقی است، مواد تغییر فاز

جدول ۴ انواع پارافین به عنوان مواد تغییر فاز دهنده [۱۸]

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m.K)	Density (kg/m ³)
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	4.8 [1]	165 [1]	n.a.	n.a.
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	9 [1]	153 [1]	n.a.	n.a.
Polypropylene E-6000	0 [4,11]	99.6 [4,11]	0.167 (liquid, 30.6 °C) [4,11]	1.022 (liquid, 20 °C) [4,11]
Diurethyl-sulfonate (DMS)	16.9 [28]	85.7 [28]	0.185 (liquid, 69.9 °C) [11]	1278 (solid, 7 °C) [4,11]
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	20-22 [29]	152 [29]	n.a.	n.a.
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	22-24 [11]	177.5 [4,11]	0.189 (liquid, 38.6 °C) [4,11]	1136 (liquid, 25 °C) [4,11]
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	22-24 [11]	189 [1]	0.187 (liquid, 67.0 °C) [11]	1232 (solid, 4 °C) [4,11]
1-Dodecanol	26 [9]	200 [9]	0.21 (solid) [1]	0.769 (liquid, 70 °C) [1]
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	28 [1]	244 [1]	0.148 (liquid, 40 °C) [30]	0.900 (solid, 20 °C) [1]
1-Tetradecanol	28 [9]	205 [9]	0.15 (solid) [1]	0.814 (solid, 20 °C) [1]
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	42-44 [1]	189 [1]	0.23 (solid) [1]	0.774 (liquid, 70 °C) [1]
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	46-49 [1]	190 [1]	0.21 (solid) [1]	0.765 (liquid, 70 °C) [1]
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	38-40 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	0.910 (solid, 20 °C) [1]
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	64 [4,11]	175.6 [4,11]	0.167 (liquid, 63.5 °C) [4,11]	0.769 (liquid, 70 °C) [1]
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	64 [4,11]	175.6 [4,11]	0.167 (liquid, 63.5 °C) [4,11]	0.912 (solid, 20 °C) [1]
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	66 [4,11]	190.0 [4,11]	0.146 (solid, 23.6 °C) [4,11]	0.920 (solid, 20 °C) [1]
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	66 [4,11]	189 [1]	0.159 (solid) [1]	0.920 (solid, 20 °C) [1]
Paraffin C ₁₂ -C ₁₈	66-68 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	1085 (liquid, 70 °C) [4,11]
Hydroxy	71 [4,11]	118.2 [4,11]	n.a.	1212 (solid, 25 °C) [4,11]
Propionamide	79 [1]	168.2 [1]	n.a.	0.830 (liquid, 70 °C) [1]
Naphthalene	80 [4,11]	147.7 [4,11]	0.132 (liquid, 83.8 °C) [4,11]	0.930 (solid, 20 °C) [1]
Erythritol	119.0 [31]	339.8 [31]	0.144 (solid, 49.9 °C) [4,11]	1480 (solid, 20 °C) [1]
HDPE	100-130 [32]	200 [32]	0.110 (solid, 66.6 °C) [4,11]	976 (liquid, 75 °C) [4,11]
Formic acid polybutadiene (TPB)	145 [33]	144 [33]	0.236 (liquid, 140 °C) [31]	1166 (solid, 24 °C) [1]
n.a.: not available.				

است. چندین نوع از HDPE و پارافین امتحان شدند. از میکروسکوپ الکترونی روبشی و DSC برای تعیین ساختار و خواص استفاده گردید [۳۴].

Akgun و همکاران [۲۰۰۷]، مایع و انجماد شدن پارافین به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده را مورد مطالعه تجربی قرار دادند. این ماده در یک مبدل حرارتی مورد استفاده قرار گرفت. در فضاهای وسط لوله داخلی و خارجی، مبدل ماده تغییر فاز دهنده قرار می‌گرفت. ماده انتقال دهنده حرارت آب بود که دمای ورود و خروج آن کنترل می‌شد. هدف اصلی در این مقاله بدست آوردن شکل هندسی مناسب برای محل انبار مواد تغییر فاز دهنده بود. نتایج تحقیق نشان داد که لوله با محیط مخروطی شکل مناسب‌ترین شیوه برای انبار مواد تغییر فاز دهنده و ذخیره انرژی است [۳۵].

در جایی که سرعت زیاد تبادل حرارتی مورد نیاز است، به مواد تغییر فاز دهنده مواد هادی حرارتی اضافه می‌گردد. Frusteri و همکاران [۲۰۰۶]، تاثیر افزایش الیاف کربن به مواد تغییر فاز دهنده معدنی را مورد توجه قرار دادند. تاثیر این مواد به صورت عددی و محاسبه‌ای مورد توجه قرار گرفت. یک مدل نظری ارائه گردید و ملاحظه شد که مدل ارائه شده با نتایج اندازه‌گیری شده دارای موافقت قابل توجهی است [۳۶].

خدادادی و حسین‌زاده [۲۰۰۷]، با افزودن مقادیر معین نانو ذرات به مواد تغییر فاز دهنده متداول مانند آب، مشاهده کردند که استفاده از این مواد قابلیت زیادی در کاربردهای ذخیره انرژی ایجاد می‌کند. به طور خاص، سرعت بالای آزاد کردن گرما در این مواد در مقایسه با مواد تغییر فاز دهنده های معمولی و نیز قابلیت بیشتر انتقال حرارت، امکان استفاده آنها را در کاربردهای گوناگون انرژی محتمل می‌کند [۳۷].

Karaieklı و همکاران [۲۰۰۷]، برای افزایش هدایت حرارتی استناریک Expanded Graphite (EG) و الیاف کربن (CF) استفاده کردند. نتایج DSC نشان می‌دهد که افزودن این مواد بر مقدار ظرفیت گرمای نهران استناریک اسید چندنان تاثیر ندارد. با استفاده از افزودنی‌های فوق هدایت حرارتی این ماده تغییر فاز دهنده حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ درصد افزایش می‌یابد [۳۸].

Mehrali و همکاران [۲۰۱۳]، به بررسی خواص نانو کامپوزیت پارافین و نانو اکسید گرافن پرداختند. در این پژوهش به تهیه و بررسی خواص حرارتی و پایداری نانو کامپوزیت با فرم پایدار پرداخته شد. با افزایش نانو اکسید گرافن، ضریب هدایت حرارتی از ۰.۳۰۵ به ۰.۹۸۵ (W/mk) افزایش پیدا کرد. همچنین نتایج DSC نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانو آنتالپی کاهش یافته است و حضور نانو باعث جلوگیری از تشکیل تبلور می‌شود [۳۹].

Nourani و همکاران [۲۰۱۵]، به بررسی هدایت حرارتی پارافین با نانو اکسید آلومینیوم (Al₂O₃) از طریق پایدار کننده سدیم استناریل-۲- لاکتات (SSL) پرداختند. SSL به عنوان پایدار کننده سبب پخش شدن بهتر نانو در پارافین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، افزایش نانو اکسید آلومینیوم تاثیر خاصی بر دمای انتقال فاز ندارد اما بر گرمای نهران ذوب تاثیر گذاشته و بیشتر از ۷٪ و تا نزدیکی ۱۳٪ کاهش داده است. همچنین اضافه کردن نانو باعث افزایش سرعت گرم شدن و زودتر رسیدن به یک دمای خاص می‌شود. به عبارتی اضافه کردن نانو اکسید آلومینیوم، موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود [۴۰].

Peng و همکاران [۲۰۰۴]، کامپوزیت‌های مواد ذخیره‌کننده انرژی (TES) را مورد توجه قرار دادند. در این تحقیق از دو نوع پارافین که دارای دمای ذوب در محدوده ۵۰-۶۰ °C و ۴۴-۵۸ °C بودند، به عنوان مواد تغییر فاز دهنده استفاده شد. ابتدا پارافین در دمای ۸۰ °C ذوب و به محلول آب و Triton X100 (نوعی پایدار کننده) در حال هم‌زدن اضافه شدند. مخلوط سپس با افزودن آب، سرد گردید. در این صورت ذرات پارافین جامد پس از صاف کردن با کاغذ صافی به دست آمد. ذرات پارافین با رزین اپوکسی با درصدهای مختلف مخلوط گردید و مخلوط این دو بین دو صفحه فلزی به صورت فیلم در آمد و در دمای محیط پخت شد. از طرف دیگر، پارافین در محیط نیتروژن در دمای ۳۰۰ °C با رزین گرمانرم SEBS (ترموپلاستیک الاستومری بر پایه استایرن و اتیلن بوتیلن) مخلوط و فیلم تهیه شده دوباره با رزین روکش داده شد. ملاحظه گردید که کامپوزیت‌ها دارای انتقال فاز جامد به جامد هستند و ماده تغییر فاز دهنده در هنگام تغییر فاز در محیط پلیمری دیگری محفوظ می‌ماند. خواص فیزیکی کامپوزیت‌های ساخته شده (گرمای نهران، ضریب هدایت حرارتی، مدول مکانیکی ساختار) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که کامپوزیت‌های تهیه شده می‌توانند مواد تغییر فاز دهنده را درون خود نگهداری کنند [۴۲].

Mengjin و همکاران [۲۰۰۸]، امکان تولید الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA) و پارافین را مورد بررسی قرار دادند. روش ریسندگی تر، روش ترکیبی بود که پلی‌وینیل الکل زمینه را تشکیل می‌داد تا پارافین‌ها را به صورت ذراتی در خود قرار دهد. پارافین به صورت ماده تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی عمل می‌کرد. چون پارافین غیر قطبی و پلی‌وینیل الکل قطبی است، پارافین به صورت ذرات پایدار می‌ماند. برخی از خواص این الیاف مانند استحکام، پایداری حرارتی و شکل توسط دستگاه‌های DSC و TGA و استحکام‌سنج اندازه‌گیری شد. ملاحظه گردید که وقتی درصد پارافین کمتر از ۳۰٪ بود، الیاف پایداری حرارتی خوبی داشته و استحکام آن به ۲۱۶ سانتی‌نیوتون بر تکس و ازدیاد طول تا حد پارگی آن به ۱۹.۹٪ و گرمای نهران آن به ۲۴.۴۵ ژول بر گرم می‌رسید و با هر بار شستشو هم خواص خود را حفظ می‌کرد [۳۳].

Xin و Hong [۲۰۰۰]، تهیه ترکیب پلی‌اتیلن- پارافین را به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده جامد- مایع با فرم پایدار مورد مطالعه قرار دادند. این نوع از مواد تغییر فاز دهنده فرم پایدار، ترکیبی است که شامل یک پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده پخش شده و یک HDPE به عنوان ماده نگهدارنده



بنابراین خواص منحصر به فرد خود در بهبود انتقال حرارت را از دست می‌دهند. همچنین پایداری ترکیبات نانو کامپوزیتی مواد تغییر فاز دهنده در طول چرخه تغییر فاز یک فاکتور مهم در تاثیر گذاری آن‌ها برای سامانه‌های خورشیدی می‌باشد که به ندرت مورد مطالعه قرار گرفته اند. پایداری نمونه‌های نانو کامپوزیتی حاوی SSL و کسرهای وزنی مختلف نانو Al_2O_3 در مقایسه با نمونه فاقد SSL و حاوی ۲٫۵ درصد Al_2O_3 مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که حضور SSL به عنوان عامل سطح فعال باعث پایداری نمونه شده در حالی که نمونه فاقد SSL پس از یک روز کاملاً ته‌نشین شده است و پایدار نیست [۴۶].

Sobolciak و همکاران [۲۰۱۷]، نانو کامپوزیتی از مواد تغییر فاز دهنده بر پایه LLDPE و پارافین با گرافیت منبسط شده را طراحی کردند. با افزایش غلظت Ex-G در گرمای محسوس ماده تغییر فاز دهنده کاهش مشاهده شد. هر چه درصد وزنی واکس پارافین در کامپوزیت بیشتر باشد، گرمای نهان کامپوزیت بیشتر می‌شود. همچنین اضافه شدن Ex-G زمان مورد نیاز برای ذوب و جامد شدن ماده تغییر فاز دهنده را کاهش می‌دهد که دلیل آن افزایش هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده با افزایش جز Ex-G می‌باشد که هدایت حرارتی از ۰٫۲۵۲، برای نمونه فاقد Ex-G به ۱٫۳۲۹ W/mC برای مواد تغییر فاز دهنده شامل ۱۵ درصد وزنی Ex-G، افزایش یافت [۴۷].

۴- نتیجه‌گیری

یکی از سیاست‌های مهم بخش انرژی در کشور، جایگزینی منابع تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی و استفاده از سوخت‌های با صرفه و مطابق با استانداردهای محیط‌زیست می‌باشد. به همین دلیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر همانند انرژی خورشیدی به جای سوخت‌های فسیلی مد نظر سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت قرار گرفته است. با توجه به کارایی بالای مواد تغییر فاز دهنده در ذخیره‌سازی انرژی، استفاده از آنها در سامانه‌های ذخیره کننده انرژی از انرژی خورشیدی، مورد توجه بسیاری از کشورهای جهان می‌باشد. ایران نیز از نظر دارا بودن مناطق آفتاب‌خیز فراوان از قابلیت بالایی جهت استفاده از انرژی خورشیدی برخوردار است. مناسب‌ترین مناطق برای استفاده از این انرژی در جنوب شرق و مرکز کشور شامل استان‌های یزد، فارس، اصفهان، کرمان و سیستان و بلوچستان است. با توجه به تغییرات آب و هوایی زیاد در کشور استفاده از این سامانه‌ها می‌تواند تا حدود زیادی باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی و کاهش هزینه‌های سامانه‌های حرارتی و برودتی به کار رفته در کشور باشد.

از طرف دیگر چالش‌های زیادی برای استفاده از این مواد پیش روی قرار دارد. به عنوان مثال، استفاده از این مواد و ترکیب آن‌ها درون البسه، نیاز به روش‌ها و استانداردهای جدیدی دارد. علاوه بر این، بهبود خواص مکانیکی، ماندگاری و کاربردپذیری این مواد نیز تحت شرایط مختلف، نیاز زیادی به زمان دارد. چالش اصلی توسعه ساختار البسه-ماده تغییر فاز دهنده و روش کاربرد آن‌ها می‌باشد. حبس داخل کپسولی ماده تغییر فاز دهنده درون پوسته پلیمری یک گزینه بدیهی است که باعث تحمیل مقداری وزن مرده به ماده فعال می‌شود. حبس داخل کپسولی کارآمد، بازده حبس داخل کپسولی، ثبات حین استفاده و تعبیه کپسول‌ها درون ساختار پارچه، برخی از موارد بوده که باید مورد توجه قرار گیرند. چالش دیگری که در این‌باره مطرح است ماندگاری این

Li [۲۰۱۳]، به بررسی تاثیر افزایش نانو گرافیت به پارافین برای افزایش هدایت حرارتی پرداخت. مشاهده شد که پارافین و نانو گرافیت در مقیاس نانو باهم مخلوط شدند. همچنین با افزایش درصد نانو، هدایت حرارتی افزایش یافت. در نمونه حاوی ۱۰٪ نانو گرافیت، هدایت حرارتی به $0.9362 \text{ (W/m k}^\circ)$ افزایش یافت [۴۱]. همچنین مشاهده شد که با افزایش درصد نانو، دمای ذوب تغییر چندانی نکرده اما گرمای نهان ذوب کاهش یافته است.

Ho و همکاران [۲۰۰۹]، به تهیه و بررسی خواص مواد مواد تغییر فاز دهنده بر پایه پارافین و نانو اکسید آلومینیوم پرداختند. نتایج DSC و KD2 نشان می‌دهد که با افزایش نانو همانطور که انتظار می‌رفت، گرمای نهان ذوب کاهش و ضریب هدایت حرارتی افزایش یافته است [۴۲].

Xu و همکاران [۲۰۱۵]، کامپوزیتی از مواد تغییر فاز دهنده شامل پارافین و ورمیکولیت منبسط شده^۱ با نسبت ۰٫۶ به ۱ را برای توسعه ذخیره سازی انرژی حرارتی در بتن های سبک طراحی کردند. این کامپوزیت دارای دمای ذوب 27°C و گرمای نهان 77.6 J/g و چگالی توده کمتر از 1500 Kg/m^3 می‌باشد. همچنین این کامپوزیت عایق حرارتی عالی و عملکرد ذخیره‌سازی حرارتی خوبی دارد [۴۳].

Mu و همکاران [۲۰۱۶] مواد تغییر فاز دهنده ای بر پایه HDPE و دو نوع واکس پارافینی با نقاط ذوب $(56-58)$ و $(18-23)^\circ \text{C}$ را با استفاده از اکسترودر دو مرحله‌ای در دمای 120°C و به مدت کمتر از ۳۰ ثانیه آماده کردند. کامپوزیت آماده شده دارای گرمای نهان 89 J/g می‌باشد و مقادیر آنتالپی برای واکس پارافینی با دمای ذوب بالاتر با افزایش درصد این واکس در آلیاژ کاهش می‌یابد. هر دو واکس تاثیر نرم کنندگی بر HDPE دارند و در این آلیاژ پدیده کوکریستالیزاسیون دیده شد. با افزایش درصد واکس‌های پارافینی به HDPE تنش و کرنش کاهش می‌یابد و بر خواص مکانیکی تاثیر منفی می‌گذارد، اما خواص مکانیکی آلیاژ با واکس پارافینی با دمای ذوب بالاتر بهتر از آلیاژ دیگر می‌باشد [۴۴].

Karaipekli و همکاران [۲۰۱۷]، کامپوزیتی از مواد تغییر فاز دهنده شامل پارافین (C20) و پرلیت منبسط شده را طراحی کردند که برای افزایش هدایت حرارتی این کامپوزیت از کربن نانو تیوب استفاده شد. مشخص شد که اضافه کردن بالای ۶۰ درصد پرلیت منبسط شده موجب نشی می‌شود و باید کمتر از ۶۰ درصد باشد. نتایج نشان داد که اجزای کامپوزیت باهم سازگارند و C20 که به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است، به خوبی در ساختار ماتریس کربن نانو تیوب/ پرلیت منبسط شده (CNT/EXP) نفوذ کرده است. نتایج TGA نشان می‌دهد که این کامپوزیت مقاومت حرارتی بهتری نسبت به نمونه C خالص دارد. علاوه بر آن تاثیر بر هدایت حرارتی مورد بررسی قرار گرفت و معلوم شد که نمونه حاوی CNT هدایت حرارتی بهتر و بیشتری در حدود 133.3 درصد نسبت به نمونه بدون CNT دارد [۴۵].

Nourani و همکاران [۲۰۱۶]، مواد تغییر فاز دهنده نانو کامپوزیتی پایدار بر پایه پارافین و نانو اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) را با استفاده از عامل سطح فعال SSL^۲ تهیه کردند، که در این تحقیق نقش SSL به عنوان عامل سطح فعال بهبود پخش نانو ذرات Al_2O_3 با نسبت‌های ۲٫۵، ۵، ۷٫۵ و ۱۰ درصد وزنی در پارافین می‌باشد. نسبت جرمی SSL به Al_2O_3 ۱ به ۳٫۵ است. نانو ذرات معدنی معمولاً پخش محدودی در حلال‌های آلی مانند پارافین دارند،

^۱Expanded vermiculite
^۲Expanded Perlite
^۳Carbon Nano Tube
^۴sodium stearyl lactylate

^۱Expanded graphite



- microencapsulated phase change materials (PCM). IV. Performance properties and hand of fabrics treated with PCM microcapsules," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 97, no. 3, pp. 910–915, 2005.
- [14] R. Yang, H. Xu, and Y. Zhang, "Preparation, physical property and thermal physical property of phase change microcapsule slurry and phase change emulsion," *Sol. energy Mater. Sol. cells*, vol. 80, no. 4, pp. 405–416, 2003.
- [15] X. X. Zhang, X. C. Wang, X. M. Tao, and K. L. Yick, "Energy storage polymer/MicroPCMs blended chips and thermo-regulated fibers," *J. Mater. Sci.*, vol. 40, no. 14, pp. 3729–3734, 2005.
- [16] C. Chen, L. Wang, and Y. Huang, "A novel shape-stabilized PCM: electrospun ultrafine fibers based on lauric acid/polyethylene terephthalate composite," *Mater. Lett.*, vol. 62, no. 20, pp. 3515–3517, 2008.
- [17] W.-D. Li and E.-Y. Ding, "Preparation and characterization of cross-linking PEG/MDI/PE copolymer as solid–solid phase change heat storage material," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 91, no. 9, pp. 764–768, 2007.
- [18] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 251–283, 2003.
- [19] Z. Z. Sozen, J. R. Grace, and K. L. Pinder, "Thermal energy storage by agitated capsules of phase change material. 1. Pilot scale experiments," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 27, no. 4, pp. 679–684, 1988.
- [20] C. Alkan, A. Sari, and O. Uzun, "Poly (ethylene glycol)/acrylic polymer blends for latent heat thermal energy storage," *AIChE J.*, vol. 52, no. 9, pp. 3310–3314, 2006.
- [21] T. L. Vigo and J. S. Bruno, "Improvement of various properties of fiber surfaces containing crosslinked polyethylene glycols," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 2, pp. 371–379, 1989.
- [22] C. Chen, L. Wang, and Y. Huang, "Electrospinning of thermo-regulating ultrafine fibers based on polyethylene glycol/cellulose acetate composite," *Polymer (Guildf.)*, vol. 48, no. 18, pp. 5202–5207, 2007.
- [23] H. Bo, E. M. Gustafsson, and F. Setterwall, "Tetradecane and hexadecane binary mixtures as phase change materials (PCMs) for cool storage in district cooling systems," *Energy*, vol. 24, no. 12, pp. 1015–1028, 1999.
- [24] S. Keleş, K. Kaygusuz, and A. Sari, "Lauric and myristic acids eutectic mixture as phase change material for low-temperature heating applications," *Int. J. Energy Res.*, vol. 29, no. 9, pp. 857–870, 2005.
- [25] Y. Özönür, M. Mazman, H. Ö. Paksoy, and H. Evliya, "Microencapsulation of coco fatty acid mixture for thermal energy storage with phase change material," *Int. J. Energy Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 741–749, 2006.
- [26] A. Sari and K. Kaygusuz, "Thermal energy storage system using stearic acid as a phase change material," *Sol. Energy*, vol. 71, no. 6, pp. 365–376, 2001.
- [27] A. Karaipekli and A. Sari, "Capric acid and palmitic acid eutectic mixture applied in building wallboard for latent heat thermal energy storage," *J. Sci. Ind. Res. (India)*, vol. 66, no. 6, p. 470, 2007.
- [28] G. Nelson, "Application of microencapsulation in textiles," *Int. J. Pharm.*, vol. 242, no. 1, pp. 55–62, 2002.
- [29] S. Kim and L. T. Drzal, "High latent heat storage and

محصولات پس از مصرف‌های مکرر است. تلفیق فناوری نانوالیاف با دانش مواد تغییر فازدهنده، فرصت مناسبی برای برطرف کردن مشکلات پیش رو و در نهایت، دستیابی به منابع جدید انرژی می‌باشد که البته پیش از استفاده عملی گسترده از این تکنولوژی، لازم است تا مسائل مختلف مد نظر طی تحقیق و پژوهش مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] خبرنامه انجمن انرژی خورشیدی سال هشتم شماره "۲۹"، ۲۰۱۲.
- [2] J. Baker, "New technology and possible advances in energy storage," *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4368–4373, 2008.
- [3] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, 2009.
- [4] J. Skovajsa, M. Koláček, and M. Zálešák, "Phase change material based accumulation panels in combination with renewable energy sources and thermoelectric cooling," *Energies*, vol. 10, no. 2, 2017.
- [5] A. M. Khudhair and M. M. Farid, "A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials," *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 2, pp. 263–275, 2004.
- [6] N. Kumar and D. Banerjee, "Phase Change Materials," in *Handbook of Thermal Science and Engineering*, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 2213–2275.
- [7] A. Sari, "Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid–liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties," *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 13, pp. 2033–2042, 2004.
- [8] E. Onder, N. Sarier, and E. Cimen, "Encapsulation of phase change materials by complex coacervation to improve thermal performances of woven fabrics," *Thermochim. Acta*, vol. 467, no. 1, pp. 63–72, 2008.
- [9] C. Alkan, A. Sari, A. Karaipekli, and O. Uzun, "Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 1, pp. 143–147, 2009.
- [10] S. Mondal, "Phase change materials for smart textiles—An overview," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 11, pp. 1536–1550, 2008.
- [11] J.-S. Cho, A. Kwon, and C.-G. Cho, "Microencapsulation of octadecane as a phase-change material by interfacial polymerization in an emulsion system," *Colloid Polym. Sci.*, vol. 280, no. 3, pp. 260–266, 2002.
- [12] Y. Taguchi, H. Yokoyama, H. Kado, and M. Tanaka, "Preparation of PCM microcapsules by using oil absorbable polymer particles," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 301, no. 1, pp. 41–47, 2007.
- [13] Y. Shin, D. Yoo, and K. Son, "Development of thermoregulating textile materials with



- composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 134, pp. 373–381, 2017.
- [46] M. Nourani, N. Hamdami, J. Keramat, A. Moheb, and M. Shahedi, “Preparation of a stable nanocomposite phase change material (NCPCM) using sodium stearoyl lactylate (SSL) as the surfactant and evaluation of its stability using image analysis,” *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 404–411, 2016.
- [47] A. Karaipekli *et al.*, “Thermal characteristics of expanded perlite / paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes,” *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 372–382, 2016.
- [30] H. Liu and H. B. Awbi, “Performance of phase change material boards under natural convection,” *Build. Environ.*, vol. 44, no. 9, pp. 1788–1793, 2009.
- [31] C. H. Lee and H. K. Choi, “Crystalline morphology in high-density polyethylene/paraffin blend for thermal energy storage,” *Polym. Compos.*, vol. 19, no. 6, pp. 704–708, 1998.
- [32] S. Peng, A. Fuchs, and R. A. Wirtz, “Polymeric phase change composites for thermal energy storage,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 93, no. 3, pp. 1240–1251, 2004.
- [33] J. Mengjin, S. Xiaoqing, X. Jianjun, and Y. Guangdou, “Preparation of a new thermal regulating fiber based on PVA and paraffin,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 92, no. 12, pp. 1657–1660, 2008.
- [34] Y. Hong and G. Xin-shi, “Preparation of polyethylene–paraffin compound as a form-stable solid-liquid phase change material,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 64, no. 1, pp. 37–44, 2000.
- [35] M. Akgün, O. Aydın, and K. Kaygusuz, “Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 2, pp. 669–678, 2007.
- [36] F. Frusteri, V. Leonardi, S. Vasta, and G. Restuccia, “Thermal conductivity measurement of a PCM based storage system containing carbon fibers,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 25, no. 11, pp. 1623–1633, 2005.
- [37] J. M. Khodadadi and S. F. Hosseinizadeh, “Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 34, no. 5, pp. 534–543, 2007.
- [38] A. Karaipekli, A. Sari, and K. Kaygusuz, “Thermal conductivity improvement of stearic acid using expanded graphite and carbon fiber for energy storage applications,” *Renew. Energy*, vol. 32, no. 13, pp. 2201–2210, 2007.
- [39] M. Mehrali, S. T. Latibari, M. Mehrali, H. S. C. Metselaar, and M. Silakhori, “Shape-stabilized phase change materials with high thermal conductivity based on paraffin/graphene oxide composite,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 67, pp. 275–282, 2013.
- [40] M. Nourani, N. Hamdami, J. Keramat, A. Moheb, and M. Shahedi, “Thermal behavior of paraffin-nano-Al₂O₃ stabilized by sodium stearoyl lactylate as a stable phase change material with high thermal conductivity,” *Renew. Energy*, vol. 88, pp. 474–482, 2016.
- [41] M. Li, “A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity,” *Appl. Energy*, vol. 106, pp. 25–30, 2013.
- [42] C.-J. Ho and J. Y. Gao, “Preparation and thermophysical properties of nanoparticle-in-paraffin emulsion as phase change material,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 36, no. 5, pp. 467–470, 2009.
- [43] B. Xu, H. Ma, Z. Lu, and Z. Li, “Paraffin / expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cement-based composites,” *Appl. Energy*, vol. 160, pp. 358–367, 2015.
- [44] M. Mu, P. A. M. Basheer, W. Sha, Y. Bai, and T. McNally, “Shape stabilised phase change materials based on a high melt viscosity HDPE and paraffin waxes,” *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 68–82, 2016.
- [45] A. Karaipekli, A. Biçer, A. Sari, and V. V. Tyagi, “Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin

