POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

مواد تغییر فاز دهنده نانو تقویت شده: مبانی و کاربردها

چکیده

مواد تغییر فاز دهنده (PCM[1]) ذخیره انرژی حرارتی را به شکل گرمای نهان در طول انتقال فاز امکان‌پذیر می‌نماید. PCMها به‌طور قابل‌توجهی کارایی سیستم‌های انرژی خورشیدی را با ذخیره انرژی اضافی که می‌تواند در زمان اوج تقاضا مورد استفاده قرار گیرد، بهبود می‌بخشد. به همین ترتیب، آن‌ها همچنین به کاهش تقاضای کلی انرژی از طریق تنظیم حرارتی منفعل کمک می‌نمایند. با این وجود، شارژ و تخلیه انرژی حرارتی به دلیل ماهیت رسانایی پایین محیط ذخیره انرژی محدود شده است. بررسی تحقیقات مختلفی برای بهبود ویژگی‌های حرارتی PCMها از طریق تکنیک‌هایی مانند الف) پراکندگی نانوذرات، ب) قرار دادن فین‌ها و ج) PCMهای آبشاری در حال انجام است. در میان تکنیک‌های ذکر شده در بالا، پراکندگی نانوذرات قابل اعتماد و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. این مواد به اصطلاح PCMهای نانو تقویت‌شده (NePCM[2]) هستند که به دلیل بهبود خواص حرارتی و پایداری طولانی مدت، فرایندهای شارژ و تخلیه واحدهای ذخیره انرژی حرارتی (TES[3]) را تسهیل می‌نمایند. این مطالعه بررسی جامع با مفاهیم و استنباط‌ها بر روی تحقیقات انجام شده با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده نانو تقویت‌شده (NePCM) در سال‌های اخیر ارائه می‌نماید. در ابتدا، این مطالعه روش‌های سنتز بسیار ترجیح داده شده NePCM را علاوه بر تکنیک‌های مشخصه‌سازی مورفولوژیکی و ترموفیزیکی آن مورد بحث قرار می‌دهد. سپس، بیشتر تمرکز بر تاثیر افزودنی‌های نانوبعدی متمایز مانند صفر بعدی (0D[4])، یک بعدی (1D[5])، دو بعدی (2D[6]) و سه بعدی (3D[7]) در ادغام با PCM به‌طور مفصل مورد بحث قرار می‌گیرد. بحث جامعی در مورد PCMهای با نانوذرات پراکنده در حال ظهور و هیبریدی با تأکید بر الف) مکانیسم برهمکنش نانوذرات و مواد تغییر فاز دهنده (PCM) و ب) تأثیر بر افزایش خواص ترموفیزیکی (نقطه ذوب، هدایت حرارتی، ظرفیت

[1] Phase Change Materials
[2] nano-enhanced PCMs
[3] thermal energy storage
[4] zero-dimensional
[5] one-dimensional
[6] two-dimensional
[7] three-dimensional

گرمای نهان، انتشار حرارتی، و پایداری حرارتی) NePCMها مورد بحث قرار می‌گیرند. در واقع، ادغام نانومواد در ماتریس PCM منجر به تغییراتی در هدایت حرارتی و آنتالپی ذخیره گرما شد. با نانومواد NePCM افزایش 80 تا 150 درصدی در PCM آلی را نشان می‌دهد زیرا نسبت ادغام نانومواد آن‌ها حدود 1 تا 2 درصد است، در حالی که برای شکل و بهبود پایداری در شکل PCM 700 تا 900 درصد در هدایت حرارتی مشاهده می‌شود. با این حال، کاهش آنتالپی ذخیره‌سازی گرما به دلیل ادغام نانومواد در کسر وزنی 5 تا 20 درصد وجود داشت. علاوه بر این، در این مطالعه مروری، بینش‌هایی در مورد پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای مهم برای تقویت NePCM در زمینه کاربردهای حرارتی پیشرفته ادغام شده است. انتظار می‌رود این مطالعه مروری دارای مقدار مرجع خاص باشد که بینش قابل‌توجهی را در اختیار خوانندگان قرار دهد تا ویژگی‌های اساسی NePCM را بیشتر بررسی نمایند. علاوه بر این، از آنجایی که بعد از چارچوب اهداف توسعه پایدار (SDG[1]) توسط سازمان ملل در سال 2015، علاقه نگران کننده‌ای در زمینه TES وجود دارد، پیش بینی می‌شود که این مطالعه مروری با ارائه بینش‌های فنی در جهت تقویت منابع انرژی تجدیدپذیر با کمک TES تأثیر قابل‌توجهی بر SDG-7 مقرون به صرفه و انرژی پاک بگذارد.

کلمات کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده نانو تقویت شده، نانومواد، هدایت حرارتی، ذخیره انرژی حرارتی، شیمی سطحی نانوذرات، گرمای نهان.

Keywords: Nano-enhanced phase change materials, Nanomaterials, Thermal conductivity, Thermal energy storage, Interfacial chemistry of nanoparticles, Latent heat.

نتیجه‌گیری

این مطالعه گسترده به بررسی دنیای پیچیده نانو افزودنی‌ها در PCM می‌پردازد و نشان می‌دهد که چگونه ابعاد بر هدایت حرارتی تأثیر می‌گذارد. ادغام افزودنی‌های نانو به‌طور قابل توجهی عملکرد PCM را تغییر می‌دهد و اندازه منافذ، مورفولوژی، ساختار و بارگذاری به‌عنوان عوامل کلیدی در حال ظهور هستند. جهت‌گیری نانو افزودنی‌ها نقش تعیین کننده‌ای در کارایی PCM ایفا می‌نماید. ترکیب نانوساختارهای سه بعدی با اندازه منافذ کوچکتر به‌عنوان توسعه محوری برای افزایش عملکرد PCM شناخته شده است. عملیات سطحی افزودنی‌های نانو یک بعدی و دو بعدی پراکندگی نانوذرات را افزایش می‌دهد اما تأثیر پیچیده‌ای بر هدایت حرارتی دارد. نشان داده شده است که افزودنی‌های نانو سه بعدی منفرد نسبت به نمونه‌های هیبریدی کارآمدتر هستند و به دلیل مزایای ساختاری ذاتی‌شان، عملکرد بهتری را ارائه می‌دهند. تشکیل شبکه رسانای سه بعدی منسجم با استفاده از

[1] sustainable development goals

افزودنی‌های نانو هیبریدی همچنان چالش است اما نوید رسانایی حرارتی بالاتر با بارهای افزودنی کمتر را دارد. استفاده از PCM برای ذخیره انرژی حرارتی می‌تواند به رفع عدم تطابق بین تقاضا و عرضه انرژی کمک نماید. NePCM به‌طور موثر بر مسائل مربوط به رسانایی حرارتی پایین، ماهیت قابل اشتعال و ناپایداری فاز غلبه می‌نماید در نتیجه قابلیت اطمینان PCM را برای طیف گسترده‌ای از برنامه‌های تنظیم حرارتی تضمین می‌نماید. پیامدهای نانومواد محققان و دانشمندان زیادی را به خود جذب نموده است که می‌خواهند پتانسیل NePCM را کشف نمایند. این بررسی بر پتانسیل تحول‌آفرین NePCM در ذخیره‌سازی انرژی و مدیریت حرارتی تأکید نموده و بر نیاز به تحقیق و توسعه مداوم برای غلبه بر چالش‌های فعلی و افزایش کاربرد عملی تأکید می‌نماید. در این پژوهش مروری، نویسندگان خلاصه‌ای جامع از پیشرفت‌های NePCM از نظر سنتز ارائه می‌نمایند. تعامل اساسی بین نانومواد و PCM باعث افزایش خواص ترموفیزیکی و برنامه‌های کاربردی پیشرفته با تمرکز بر عوامل محیطی و اقتصادی می‌شود.

• PCMهای متداول و PCM نانومواد پراکنده برای ذخیره انرژی حرارتی و برای کاربردهای تنظیم حرارتی در نظر گرفته شده‌اند. تا آنجا که به PCMهای معمولی مربوط می‌شود، آن‌ها نرخ شارژ و دشارژ ضعیفی را به دلیل رسانایی حرارتی پایین نشان می‌دهند که باعث تاخیر در فعال‌سازی PCM به سمت سیستم‌های تنظیم حرارتی می‌شود. متعاقباً، PCM جذب نوری بسیار پایینی را ارائه می‌دهد و آن را برای ذخیره انرژی خورشیدی علیرغم پتانسیل ذخیره انرژی توصیه نمی‌نماید. با تعداد کمی PCM، هسته‌زایی در دمای انجماد آن‌ها اتفاق نمی‌افتد و باعث ایجاد درجه‌ای از فراسرمایش می‌شود. این به معنای واقعی کلمه فرآیند ذخیره سازی گرما را مختل می‌نماید زیرا PCM در حالت مایع در طول ذوب باقی می‌ماند (که باعث ذخیره انرژی می‌شود). برخی از PCMها نیز در طی عملیات چرخه حرارتی مکرر مستعد جداسازی فاز هستند. در حالی که PCM با نانومواد پراکنده شبکه‌های حرارتی مناسبی را ایجاد نموده و نرخ شارژ و دشارژ را بهبود می‌بخشد، به‌طور متوسط افزایش نرخ شارژ برای PCM نانوکامپوزیت حدود 90 تا 110 درصد است، در حالی که برای PCM شکل پایدار و شکل، نرخ شارژ تقریباً 700 تا 900 درصد افزایش می‌یابد. مزیت اضافی در مورد جذب نوری، ماهیت تاریک و توانایی جذب پرتوهای نور به دلیل بازتاب‌های متعدد در ساختار منحصر به فرد نانومواد است. NePCM همچنین شروع تبلور را تسهیل نموده و باعث ایجاد اثر هسته‌زایی می‌شود که مسائل فراسرمایش و جداسازی فاز را کاهش می‌دهد.

• NePCMها از طریق تکنیک‌های تک، دو، سه و چهار مرحله‌ای سنتز می‌شوند. تعداد کمتری از مراحل در آماده‌سازی NePCM دخیل هستند؛ با این حال، ترکیب‌های مختلف نانومواد و PCM به روش‌های آماده‌سازی متفاوتی نیاز دارند. بر اساس تحقیقات و بررسی‌های موجود، فرآیندهای کپسوله‌سازی و پایداری شکل خسته‌کننده

هستند زیرا بر کنترل مسئله نشتی و ناپایداری فاز متمرکز هستند. با این حال، PCM شکل پایدار نانو تقویت شده به‌طور گسترده برای PCM آلی توسعه یافته است. کمترین تعداد PCM شکل پایدار نانو تقویت شده با استفاده از هیدرات‌های نمک معدنی وجود دارد زیرا انتظار می‌رود مولکول‌های هیدرات در طول آماده‌سازی تبخیر شوند.

• نانوتکنولوژی دلیل اصلی توسعه نانومواد بوده است که عمدتاً خواص ترموفیزیکی PCM را افزایش می‌دهند. ویژگی‌های مطلوب با توجه به معماری نانو مواد از نظر اندازه، شکل و ساختار منحصر به فرد به‌دست آمده است. سه دسته از نانومواد در درجه اول برای پراکندگی با ماتریس PCM در نظر گرفته می‌شوند: الف) افزودنی‌های فلزی که به شکل پودر و فوم فلزی هستند. ب) افزودنی‌های کربنی که بسته به ابعادشان به‌صورت 0D، 1D، 2D و 3D دسته‌بندی می‌شوند و از افزودنی‌های نانو فولرین، CNT/CNF، گرافن و گرافیت استفاده می‌نمایند و ج) مواد افزودنی پلیمری. نانومواد 1 بعدی شبکه حرارتی مناسب را تسهیل می‌نمایند در حالی که مستعد تجمع هستند. نانومواد دو بعدی سطح بهتری را برای بهبود رسانایی حرارتی و توانایی ذخیره انرژی ارائه می‌دهند در حالی که چگالی پایین این مواد باعث شناور شدن در صورت وجود مواد اضافی می‌شود. نانومواد سه بعدی از کانال‌های حرارتی پراکنده در چند جهت پشتیبانی می‌نمایند، همچنین این مواد برای PCM شکل پایدار بیشتر ترجیح داده می‌شوند.

• مکانیسم تماس نانومواد و ماتریس PCM از نظر برهمکنش واندروالس، نیروی جاذبه بین مولکولی، پیوند هیدروژنی در مولکول‌های PCM، عامل‌دار شدن سطح، نقش مویرگی و کشش سطحی، اثر هسته‌زایی و جذب نوری NePCM توسعه‌یافته به‌طور مفصل مورد بحث و استنباط قرار گرفته‌اند.

• تغییر دمای ذوب منوط به تأثیر متقابل نیروهای بین مولکولی، پیوند مولکولی و ویژگی‌های ساختاری نانوذرات با ماتریس PCM است. تغییر در دمای انتقال فاز PCM نانوکامپوزیت با نانومواد ابعادی متفاوت حدود 8- تا 20 درصد است. با این حال، این با PCMهای شکل پایدار متفاوت است. در حالی که شبکه حرارتی بر هدایت حرارتی NePCM، سرعت گروه فونون و میانگین مسیر آزاد بین فونون‌ها تأثیر می‌گذارد. اکثر تحقیقات افزایش رسانایی حرارتی را به میزان 80 تا 120 درصد (محدوده بین 0.4 و 0.8 W/(m·K)) با پراکندگی نانومواد در کسر وزنی کمتر از 1.5 درصد نشان می‌دهند، در حالی که غلظت نانومواد در PCMهای شکل پایدار افزایش می‌یابد و بنابراین افزایش هدایت حرارتی غالب است (محدوده بین 2 و 8 W/(m·K)).افزایش رسانایی حرارتی نانوکامپوزیت PCM سرعت شارژ را افزایش می‌دهد و تخلیه سریع را امکان‌پذیر می‌سازد که برای تنظیم حرارتی قابل‌توجه نیست. همچنین غلظت بالای نانومواد پتانسیل ذخیره انرژی را کاهش می‌دهد. متعاقباً، توانایی ذخیره‌سازی انرژی تحت

تأثیر نیروی جاذبه بین مولکولی بین نانومواد و PCM قرار می‌گیرد، پیوندهای قوی‌تری را ممکن می‌سازد و حرارت ورودی بالاتری را برای انتقال فاز می‌طلبد. نانوذرات گرمای نهان PCMها را کاهش می‌دهند و چگالی انرژی را کاهش می‌دهند. با این حال، برخی از NePCMها مقادیر گرمای نهان را در محدوده ایده‌آل برای کاربردهای TES (80-120 J/g) اما در برخی شرایط کمتر از این محدوده حفظ نموده‌اند. برای متعادل نمودن ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی، انتخاب نانوذرات و ادغام آن‌ها بسیار مهم است.

• هدایت حرارتی پایین مانع اصلی برای شارژ و تخلیه سریع PCM است. تحقیقات موجود مشکل فوق الذکر را از طریق الف) پراکندگی پرکننده‌های رسانای حرارتی (نانومواد) و ب) کپسوله‌سازی درون پوسته‌ها حل می‌نماید. به دلیل ویژگی‌های حرارتی استثنایی و چگالی پایین، نانومواد مبتنی بر کربن نسبت به پرکننده‌های حرارتی مبتنی بر فلز و سرامیک برتری دارند. گرافیت منبسط شده، آئروژل/فوم‌های گرافن رسانایی حرارتی را بیش از سایر نانومواد کربنی بهبود می‌بخشد.

• با توجه به پایداری حرارتی و قابلیت اطمینان PCM آلی در طول عملیات پیوسته، PCMهای نانوذرات پراکنده به‌طور فعال با استفاده از مدیریت حرارتی باتری، سیستم‌های حرارتی خورشیدی و سیستم‌های فتوولتائیک آزمایش می‌شوند. همه کاربردهای فوق الذکر به مقدار کم NePCM در مقایسه با کاربردهای تنظیم حرارتی ساختمان نیاز دارند. تا آنجا که به گرمایش و سرمایش ساختمان مربوط می‌شود، PCM با وجود رسانایی حرارتی اندک، نسبت به NePCM ترجیح داده می‌شود زیرا سنتز NePCM برای مقادیر زیاد خسته کننده است. ایجاد صنایع با تکنیک‌های قابل اعتماد و آسان برای توسعه NePCM، کاربرد تجاری آن را تسریع خواهد نمود.

• دمای ذوب، گرمای محسوس/ نهان و هدایت حرارتی ملاحظات مهمی در هنگام انتخاب PCM برای ذخیره‌سازی حرارتی هستند. هرچند نه به دلیل بی‌ثباتی بازار هزینه‌ها را نیز باید در نظر گرفت. ملاحظات اقتصادی، ایمنی و زیست محیطی باید برای محیط زیست بیشتر در نظر گرفته شود سیستم ذخیره‌سازی حرارتی مناسب تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مانند ابزارهای بهینه‌سازی نیز در انتخاب و توسعه PCM مفید هستند.

• اگرچه کارهای تحقیقاتی متعددی بر افزایش هدایت حرارتی PCM با استفاده از نانومواد متمرکز شده است. آگاهی و سیاست‌های دسترسی NePCMهای توسعه‌یافته پس از استفاده طولانی مدت بی‌پاسخ مانده است. پیشرفت فناوری برای جداسازی نانومواد از PCM پس از استفاده طولانی مدت قبل از دفع در محیط زیست نیازهای نوظهوری دارد.

• هوش مصنوعی پتانسیل بسیار زیادی برای بهبود استفاده از مواد با افزایش انتقال فاز در مقیاس نانو دارد. سیستم‌های NePCM را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی مانند طراحی و بهینه‌سازی مواد، مدل‌سازی پیش‌بینی، بهینه‌سازی فرآیند، سنجش و نظارت و بهینه‌سازی کنترل، برای کاربردهای مختلفی مانند TES، عایق‌سازی ساختمان، سرمایش الکترونیکی و موارد دیگر بهینه نمود. راه‌حل‌های مدیریت حرارتی و ذخیره‌سازی انرژی به لطف ادغام هوش مصنوعی با NePCM از افزایش کارایی، قابلیت اطمینان و پایداری بهره می‌برند.

Reference

Said, Z., Pandey, A. K., Tiwari, A. K., Kalidasan, B., Jamil, F., Thakur, A. K., ... & Ali, H. M. (2024). Nano-enhanced phase change materials: Fundamentals and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, *104*, 101162.

DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecs.2024.101162

ترجمه و ویرایش: دانیال ابراهیم‌زاده