سنتز و بررسی پایداری گرمایی نانومواد تغییرفاز دهنده هسته ــ پوسته دوغابی

عزیز باباپور*+
گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

غلام رضا کریمی
گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده: *بحران انرژی در قرن حاضر، بشر را به فکر استفاده از منبع‌های نوین انرژی رهنمون ساخته است. یکی از این منبع‌های بسیار کارآمد، مواد تغییرفازدهنده است. این مواد، افزون بر ذخیره انرژی به عنوان عایق‌های گرمایی نیز به کار می‌روند و استفاده از این مواد نیاز به سامانه‌های ایمن‌سازی مصرف انرژی را نیز، حذف می‌کند. این مواد با وجود همه برتری‌ها، مشکل‌هایی از جمله نشتی، کم بودن ضریب هدایت گرمایی دارند. بنابراین استفاده از نانوذره‌های فلزی، ساختار هسته ـ پوسته و غیره می‌تواند ویژگی آن‌ها را بهبود ببخشد. در این پژوهش، اکتادکان نرمال به عنوان هسته و متیل متا اکریلات به عنوان پوسته انتخاب شده‌اند تا نانومواد تغییر فازدهنده با ساختار هسته ـ پوسته سنتز شود. در این پژوهش از دستگاه‌هایی مانند TEM، DSC، SEM و سونیکتور استفاده شد. نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان داد که مواد تغییرفاز دهنده سنتز شده، قطر میانگین ۷۹ nm داشته و ساختار هسته ـ پوسته‌ای دارند. ازسویی، نانومواد تغییرفاز دهنده دوغابی پس از سیکل‌های بسیار ویژگی های گرمایی خود را حفظ می‌کنند و این می‌تواند به عنوان پارامتر مثبت در مدیریت گرمایی سامانه‌های گوناگون ارزیابی شود. به صورت کلی می‌توان نتیجه گرفت که مواد تغییرفازدهنده و کامپوزیت‌های آن برتری زیادی دارند و این مواد می‌توانند در مدیریت گرمایی نقش ارزنده و حیاتی داشته باشند.*

واژه‌های کلیدی: *نانو، مواد تغییرفازدهنده، نانوکامپوزیت، هسته ـ پوسته، دوغابی.*

KEYWORDS: *Nano; Phase change materials (PCMs); Nano-composite; Core-shell; Slurry;*

مقدمه

انرژی، شاهراه حیات همه فعالیت‌های بشری است. در چشم‌انداز گسترده‌تر، انرژی با مهم ساختن نقش آن در توسعه بخش‌های فن‌آوری، صنعتی، اقتصادی و اجتماعی، به عنوان سازمان دهنده اصلی تولید ثروت ملی عمل می‌کند. یک کشور توسعه‌یافته با منابع بالای انرژی و سامانه مدیریت صحیح انرژی، می‌تواند از کشورهای همسایه در حال توسعه خود، موقعیت اقتصادی بهتری داشته باشد. به عبارت

* عهده دار مکاتبات
+E-mail: Babapoor2006@yahoo.com, babapoor@uma.ac.ir

دیگر می‌توان گفت تقاضای انرژی با رشد اقتصاد جهانی، خود به خود افزایش می‌یابد. از زمان مطرح شدن بحران انرژی در پایان دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ میلادی تاکنون، افزایش بی‌وقفه‌ای در تقاضای انرژی وجود داشته است. امروزه با توجه به افزایش نیاز به انرژی و محدودیت سوخت‌های فسیلی به عنوان منابع رو به پایان و آلاینده محیط زیست، نیاز به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر بیش‌تر احساس می‌شود. یکی از انرژی‌هایی که کاربرد آن رو به افزایش است، انرژی گرمایی می‌باشد [۲، ۱].

برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی می‌توان از مواد تغییرفازدهنده[۱] و یا به اختصار PCM استفاده کرد. این مواد، ترکیب‌های آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب و ذخیره پنهان مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را درون خود دارند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد، در طی فرآیند تغییر فاز اتفاق می‌افتد. این مواد به هنگام تغییر فاز، گرما را از محیط جذب نموده و یا به محیط پس می‌دهند. ماده تغییر فازدهنده، قابلیت آن را دارد که انرژی نهفته گرمایی را بدون هیچ‌گونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه تغییر فاز، در درون خود حفظ نماید. ولی مواد تغییرفازدهنده، با تمام مزایایی که دارند مشکلاتی از جمله نبود پایداری شیمیایی، خورندگی، نشتی و کم بودن هدایت گرمایی دارند. این مشکل‌ها پژوهشگران را وادار ساخته است که به فکر بهبود و پایداری این مواد ارزشمند بیفتند که در این مسیر راهکارهای گوناگون بررسی شده‌اند. از جمله استفاده از پرکننده‌های فلزی، نانوذره‌های فلزی، فیلترهای الیاف یا نانوالیاف کربن و غیره باعث بهبود ویژگی‌های یاد شده می‌شود. به طور کلی، چهار راهکار عمده برای رفع مشکل‌های یاد شده به کار می‌رود: ۱) نگهداری در محفظه‌ها ۲) کپسوله کردن ۳) مخلوط کردن با پلیمرها ۴) استفاده از انواع فلزات یا نانوذره‌های فلزی. هرکدام از این روش‌ها، برتری‌ها و عیب‌هایی نیز دارند [۱۴-۲].

نانوذره‌های هسته ـ پوسته به تدریج بیشتر و بیشتر مورد توجه قرار گرفتند، چون این نانوذره‌ها در مرز بین شیمی ماده و بسیاری از رشته‌های دیگر، مانند الکترونیک، پزشکی، داروسازی، اپتیک و کاتالیست قرار گرفته‌اند. نانوذره‌های هسته ـ پوسته مواد بسیار کاربردی با ویژگی‌های اصلاح شده می‌باشند. گاهی اوقات ویژگی های ایجاد شده از ماده هسته یا پوسته می‌تواند به‌طور کامل متفاوت باشند. ویژگی را می‌توان با تغییر مواد تشکیل دهنده یا نسبت هسته به پوسته اصلاح کرد. به دلیل پوشش‌دهی ماده پوسته، ویژگی های ذره هسته مثل واکنش‌پذیری کاهش یافته و پایداری گرمایی می‌تواند اصلاح شود، بنابراین پایداری کلی ذره‌ها و پراکندگی ذره هسته افزایش می‌یابد. سرانجام نانوذره‌های هسته ـ پوسته، ویژگی‌های متمایز با توجه به اجزای سازنده و ویژگی‌های هرکدام از آن‌ها را به صورت همزمان نشان می‌دهد. این امر به ویژه در توانایی ذاتی دستکاری عامل‌های سطحی برای رسیدن به کاربردهای گوناگون مورد نیاز درست است. هدف از پوشش‌دهی ذره‌های هسته شامل اصلاح سطح، توانایی افزایش عملکرد، پایداری و پراکندگی، آزادشدن کنترل شده هسته، کاهش مصرف مواد گرانبها وغیره می‌باشد. گزارش‌های جداگانه از پژوهشگران گوناگون نیز این واقعیت را نشان می‌دهد که نانوذره‌های هسته ـ پوسته به طورگسترده‌ای در جاهای متفاوت از جمله زیست پزشکی، دارویی، کاتالیستی، الکترونیک، افزایش فوتولومینسانس، ایجاد بلورهای فوتونیک و غیره استفاده می‌شود. به ویژه در زمینه‌های پزشکی، بسیاری از این ذره‌ها در تصویربرداری زیستی، برچسب زدن سلول، آزاد شدن کنترل شده‌ی دارو، دارورسانی هدفمند و کاربردهای مهندسی بافت استفاده می‌شوند. افزون بر بهبود ویژگی‌های ماده، ذره‌های پوسته ـ هسته از نقطه نظر اقتصادی نیز مهم می‌باشند. ماده گرانبها را می‌توان به عنوان پوشش روی یک ماده ارزان برای کاهش مصرف ماده گرانبها در مقایسه با ساخت همان ذره از ماده خالص، به کار برد. نانوذره‌های هسته ـ پوسته همچنین به عنوان الگو برای ساخت ذره‌های توخالی بعد از حذف هسته یا با انحلال یا با کلسینه کردن استفاده می‌شوند. ذره‌های توخالی در حد میکرو و نانو، برای اهداف گوناگونی از جمله میکرورگ‌ها، بسترهای کاتالیستی، جاذب‌ها، مواد ساختاری سبک وزن و عایق‌های الکتریکی و گرمایی استفاده می‌شوند. روش‌های گوناگونی برای تولید ساختار هسته ـ پوسته مواد تغییرفازدهنده وجود دارد که از جمله می‌توان به روش الکتروریسی، روش دوغابی و ... اشاره کرد. در مقایسه روش دوغابی با روش نانوالیاف هسته ـ پوسته (الکتروریسی) می‌توان گفت که هر کدام برتری‌ها و عیب‌های خاصی دارند. اصلاً نوع استفاده و مکان کاربرد فراورده‌های آن‌ها با یک‌دیگر فرق می‌کنند [۱۵].

پس برای این‌که مواد PCM شکل پایدار داشته باشند آن‌ها را به صورت نانوکپسول تولید می‌کنند که این فرایند باعث می‌شود که سطح تماس این مواد بیش‌تر شده، از این رو هدایت گرمایی این مواد نیز بهبود می‌یابد [۱۶]. این فراورده‌های دوغابی جدید، برتری‌های ویژه‌ای دارند: (۱) ظرفیت گرمایی بالا (۲) دامنه دمایی تغییر فاز که این کاربردها را ساماندهی می‌کند. (۳) دامنه برودتی پایین (۴) نسبت انتقال گرمایی بالا (۵) در فشار پایین، قابل پمپاژ باشد. (۶) پایداری در طول ذخیره طولانی مدت (۷) نسبت سطح به حجم بیشتری داشته باشند تا نیروی محرکه قویتری برای تسریع در پدیده‌های انتقال مربوطه ایجاد کنند [۱۷،۱۸].

(۱) Phase change materials (PCMs)

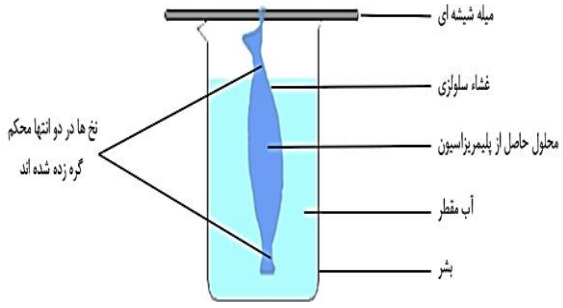
صباح [۱۹] و *همکاران*، یک جریان آرام از مواد تغییرفازدهنده میکروکپسوله را در هیت سینک میکروکانالی بررسی کردند. نتیجه های نشان داد که گرمای نهان مواد تغیرفازدهنده بر مخلوط کردن میکروکپسول‌ها تاثیر گذاشته و ضریب هدایت گرمایی این مواد افزایش پیدا کرده است. *کاندل*[۱] و *همکاران*[۲۰]، از نانومواد تغییرفازدهنده به عنوان نانوسیال در میکروکانال‌ها استفاده کردند و تأثیر چشمگیر این مواد را بر روی میزان عدد ناسلت بررسی کرده‌اند. *ژانگ*[۲] و *همکاران*، در یک پژوهشی، نانومواد‌تغییرفازدهنده را با روش پلیمریزاسیون امولسیونی به صورت هسته ـ پوسته تولید کرده‌اند. نتیجه‌های نشان داد که نسبت هسته ـ پوسته بر اندازه قطر و آنتالپی کامپوزیت سنتز شده تاثیر می‌گذارد. همچنین آن‌ها، پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد سنتز، ویژگی‌های‌گرمایی و کاربرد نانوکپسول‌های مواد تغییرفازدهنده در ذخیره انرژی گرمایی انجام داده‌اند [۲۵-۲۱]. *وو*[۳] و *همکاران* از دوغاب نانوکپسول‌های مواد تغییرفازدهنده به‌عنوان سامانه‌های خنک‌کننده پاششی استفاده کرده‌اند که حدود ۷۰ درصد افزایش انتقال گرما در مقایسه با آب خالص دیده شده است [۲۶].

با وجود پژوهش‌های یاد شده، خلاء اساسی در ارزیابی ویژگی‌های گرمایی پس از سیکل‌های بسیار گرمایی و گذشت زمان زیاد وجود دارد. از سویی این پژوهش‌ها در ایران، به ندرت انجام شده است. همچنین راکتور مورد استفاده برای سنتز مواد، نیز دارای نوآوری بود. بنابراین در این پژوهش، اکتادکان نرمال به عنوان هسته و متیل متا اکریلات به عنوان پوسته انتخاب شده‌اند تا نانومواد تغییر فازدهنده با ساختار هسته ـ پوسته سنتز شود. هدف اصلی از این پژوهش، سنتز نانومواد تغییر فازدهنده با ساختار هسته ـ پوسته برای بهبود ویژگی‌های گرمایی (مانند دما، آنتالپی و ...فرایندهای ذوب و انجماد) آن‌ها می‌باشد. نتیجه های این پژوهش می‌تواند در مدیریت گرمایی سامانه‌های گوناگون به صورت گسترده استفاده شوند.

بخش تجربی

مواد اولیه

اکتادکان[۴] نرمال و متیل متا اکریلات[۵] از شرکت سیگما آلدریچ خریداری شدند. سورفکتانت دودسیل سولفات سدیم[۶] و ۲،۲- دی آزوبیزوسوبوتیل‌نیتریل[۷] و غشاء سلولزی از شرکت مرک خریداری شدند.



شکل ۱- شمای غشای سلولزی

آماده‌سازی نمونه

در این روش اکتادکان نرمال به عنوان هسته و متیل متا اکریلات به عنوان پوسته عمل می‌کنند. در یک بشر، ۰/۱۵ گرم از دودوسیل‌دی‌سولفات‌سدیم با ۱۵ گرم آب دی‌یونیزه حل شد. سپس در ظرف دیگری، ۱ گرم از اکتادکان نرمال به ۰/۲۵ گرم محلول مونومر متیل متااکریلات با نسبت هسته ـ پوسته ۴ به ۱ با ۲/۵ گرم آغازگر ۲،۲ـ دی آزوبیزوسوبوتیل‌نیتریل اضافه شد. سپس این دو محلول را در یک ظرف ریخته و به مدت یک ساعت در دمای ۳۸ درجه سلسیوس به هم زده شد. سپس محلول توسط دستگاه سونیکیتور[۸] (Ultrasonic Cleaner Soner 203H Laftech, Australia,) به مدت ۱۵دقیقه سونیکیت شد تا خوب بهم زده شود. سپس محلول در یک بالن ۲۵ میلی‌لیتری ریخته شد. بالن را در دستگاه ویژه‌ای که برای این کار طراحی شده قرار داده و جریان گاز نیتروژن را به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق از روی نمونه، عبور داده شد تا اکسیژن‌زدایی کند. بالن در راکتور ناپیوسته که یک حمام روغن بود قرار داده شد تا در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ ساعت، واکنش پلیمریزاسیون صورت بگیرد. سوسپانسیون نانوکپسول‌ها با غشای سلولزی به مدت یک هفته دیالیز شد (مطابق شکل ۱) تا مواد واکنش نداده، ناخالصی‌ها و سورفکتانت‌ها را جدا کند و فراورده باقیمانده، دوغاب نانومواد تغییرفازدهنده است. مراحل گوناگون با موفقیت انجام شد که نمونه‌ای از ماده سنتز شده را در شکل (۲) دیده می‌شود.

برای آنالیز هسته ـ پوسته نیز از دستگاه TEM[۹] (TEM, EM10C-100 KV, Zeiss, Germany, resolution: 3.4 Å) استفاده شد. ویژگی‌های ریخت‌شناسی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی[۱۰] (MIRA3, FEG-SEM, Tescan, Czech) انجام شد.

(۱) Kondle
(۲) Zhang
(۳) Wu
(۴) Octadecane
(۵) $C_5H_8O_2$
(۶) Dodecyl sulfate sodium
(۷) $C_8H_{12}N_4$
(۸) Sonicator
(۹) Transmission electron microscopy (TEM)
(۱۰) Scanning electron microscopy (SEM)

شکل ۲- نانومواد دوغابی سنتز شده

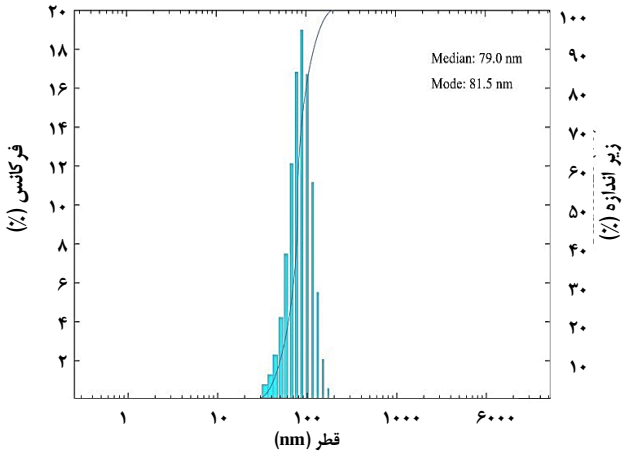
در این پژوهش ویژگی های گرمایی شامل دماهای ذوب و انجماد، ظرفیت گرمایی ویژه، گرمای نهان ذوب و انجماد با استفاده از دستگاه DSC[1] (Mettler Toledo DSC 822E/400, Switzerland) در بازه‌ی دمایی ۲۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس و با شدت ۱۰°C/min انجام شد.

نتیجه‌ها و بحث

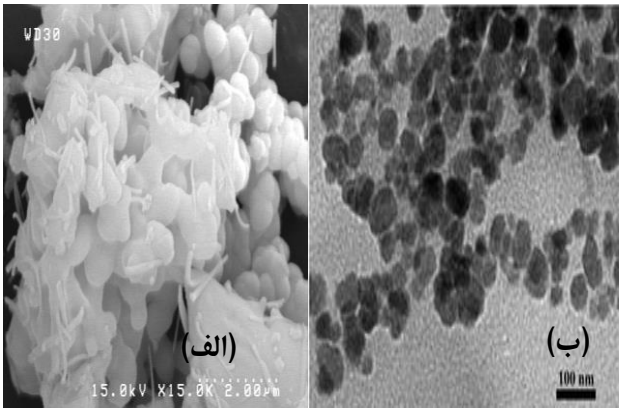
اندازه و ساختار نانوکامپوزیتها

نتیجه آزمایی PSA[2]، نمونه ماده ساخته شده در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طوری‌که در این شکل دیده می‌شود اندازه میانگین ذره‌های ساخته شده ۷۹ نانومتر می‌باشد که نتیجه بسیار قابل قبولی است.

برای شناسایی ریخت شناسی[3] و ساختار هسته ـ پوسته‌ای نمونه‌ها، آزمون‌های SEM و TEM انجام شد. نتیجه‌های مربوط به SEM و TEM در شکل ۴ نشان داده شده است. نتیجه ها نشان می‌دهد که مواد سنتز شده، ساختار هسته ـ پوسته به‌نسبت مناسبی دارند. بنابراین یکی از اهداف این پژوهش که سنتز مواد هسته ـ پوسته هست، تأمین شده است.



شکل ۳- آنالیز PSA دوغاب نانومواد تغییر فاز دهنده

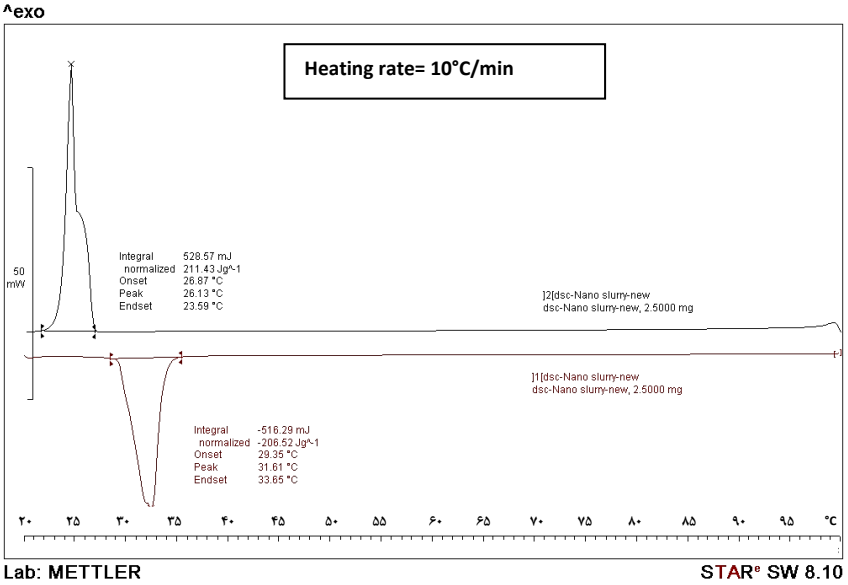


شکل ۴- الف): تصویر TEM دوغاب NanoPCM
ب): تصویر SEM دوغاب NanoPCM

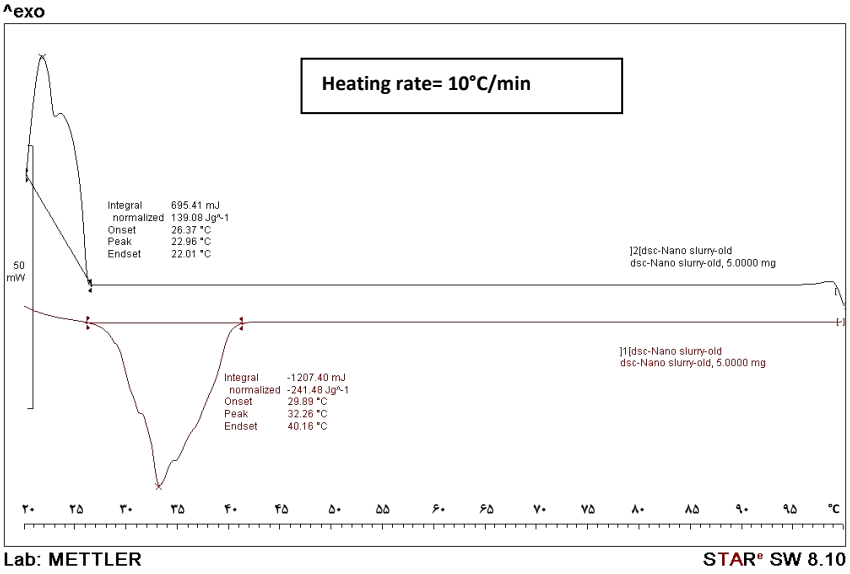
ویژگی های ترموفیزیکی

آنالیز DSC نمونه دوغاب NanoPCM در شکل (۵) نشان داده است. مسیر رفت (منحنی پایین و از چپ به راست) این شکل، فرایند ذوب و مسیر برگشت فرایند انجماد را نشان می‌دهد. همه دماها و آنتالپی‌های هر دو فرایند در این شکل، نشان داده شده است. منحنی ذوب (منحنی قرمز رنگ پایینی) با دمای Onset شروع شده و با Endset پایان می‌پذیرد. علامت exo^ نشانگر گرمازا بودن است. در فرایند ذوب، میزان آنتالپی ۲۰۶/۵۲ J/g، دماهای محدوده ذوب شامل Onset، Peak و Endset به ترتیب برابر ۲۹/۳۵، ۳۱/۶۱ و ۳۳/۶۵ درجه سلسیوس می‌باشند. در فرایند انجماد نیز این مقدارها به‌ترتیب ۲۱۱/۴۳ J/g، ۲۶/۸۷، ۲۶/۱۳ و ۲۳/۵۹ درجه سلسیوس می‌باشند.

(۱) Differential scanning calorimetry (DSC)
(۲) Particle size analyzer (PSA)
(۳) Morphology



شکل ۵- نتیجه‌های آنالیز DSC فراورده اولیه



شکل ۶- نتیجه‌های آنالیز DSC فراورده بعد از ۳۰۰ سیکل گرمایی

بررسی پایداری و عمر مفید محصول تولیدی

برای بررسی پایداری و اینکه محصول تولید شده، چقدر می‌تواند ویژگی‌های خود را حفظ کند ویژگی‌های ترموفیزیکی آن، در بازه‌های زمانی گوناگون بررسی شد. یعنی بعد از استفاده از این نانومواد در ۳۰۰ سیکل گرمایی، ویژگی‌های گرمایی آن، دوباره اندازه‌گیری شد که نتیجه‌های آن در شکل (۶) نشان داده شده است. در فرایند ذوب، میزان آنتالپی ۲۴۱/۴۸ J/g، دماهای Onset، Peak و Endset به ترتیب برابر ۲۹/۸۹، ۳۲/۲۶ و ۴۰/۱۶ درجه سلسیوس می‌باشند. در فرایند انجماد نیز این مقدارها به‌ترتیب ۱۳۹/۰۸ J/g، ۲۶/۳۷، ۲۲/۹۶ و ۲۲/۰۱ درجه سلسیوس می‌باشند. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود نتیجه‌های جالب و چشمگیری به‌دست آمده و فراورده تولیدی پس از این همه مدت و سیکل‌های گوناگون گرمایی تا حد زیادی، ویژگی‌های گرمایی خود را حفظ کرده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از اکتادکان نرمال به عنوان هسته و متیل متا اکریلات به عنوان پوسته استفاده شده تا نانومواد تغییر فازدهنده با ساختار هسته ـ پوسته سنتز شود که هدف اصلی سنتز نانومواد

تغییر فازدهنده با ساختار هسته ـ پوسته برای بهبود ویژگی‌های گرمایی (مانند دما، آنتالپی و ... فرایندهای ذوب و انجماد) آن‌ها بود. نتیجه ها نشان داد که کامپوزیت‌های سنتز شده در اندازه نانو بوده و ساختار هسته ـ پوسته به نسبت متناسبی دارند. نانومواد سنتز شده پس از سیکل‌های گوناگون، بخش عمده‌ای از ویژگی های گرمایی خود را حفظ کرده‌اند و این نشان می‌دهد که مواد یاد شده، پایداری گرمایی خوبی دارند که پایداری گرمایی یکی از هدف‌های بسیار مهم کامپوزیت‌های مواد تغییرفازدهنده است. نتیجه‌های این پژوهش می‌تواند در طراحی، ساخت و مدیریت گرمایی سامانه‌های گوناگون مورد استفاده فراوانی قرار بگیرد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۸

مراجع

[1] Sarlos G., Dauriat A., Energy: a Challenge for Humanity in the 21st Century. In: "*Proceedings of the International Conference on Energy and the Environment*", Shanghai, China pp1–5 (2003).

[۲] باباپور، عزیز؛ بخشوده‌نیا، یاسر؛ بخشوده‌نیا، محمد؛ مروری بر مدلسازی عددی و آنالیز کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان جهت کاهش مصرف انرژی، "*پنجمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد*"، اسفند (۱۳۹۲).

[۳] کریمی، هجیر؛ سبزه میدانی، محمدمهدی؛ مطالعه عددی تأثیر عامل‌های هندسی بر انتقال گرمای نانو سیال آب– Al_2O_3 در یک میکروکانال، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۴)**۳۵**: ۱۳۷ تا ۱۵۰ (۱۳۹۵).

[۴] اتابکی، فریبرز؛ یوسفی، محمد حسن؛ آل کرم، ایمان؛ بررسی و بهبود رسانایی پلی (۳،۴– اتیلن دی اکسی تیوفن): پلی (استایرن سولفونیک اسید) (PEDOT:PSS) با افزودن نانوذره‌های نقره و مایع یونی ۲–متیل ایمیدازولیوم، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۴)**۳۵**: ۳۹ تا ۴۸ (۱۳۹۵).

[۵] باباپور، عزیز؛ پیشکارآذری، رضا؛ گلستانه، سیدایمان؛ قاضی طباطبایی، زهره؛ شبیه‌سازی مدیریت حرارتی مواد نانوکامپوزیت تغییرفازدهنده توسط فناوری CFD، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۴)۳۷: ۱۹۵ تا ۲۱۰ (۱۳۹۷).

[۶] باباپور، عزیز؛ حقیقی، علیرضا؛ استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر راهی موثر جهت کاهش آلودگی محیط زیست، نشریه دو فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، سال پنجم، (۹)**۱**: ۴۰ تا ۵۰ (۱۳۹۷).

[7] Golestaneh S.I, Karimi G., Babapoor A., Torabi F., Thermal Performance of co-Electrospun Fatty Acid Nanofiber Composites in the Presence of Nanoparticles, *Appl. Energy* **212**: 552-564 (2018).

[8] Babapoor A., Azizi M.M., Karimi G., Thermal Management of a Li-ion Battery Using Carbon Fiber-PCM Composites, *Appl. Therm. Eng* ***82***: 281–290 (2015).

[9] Babapoor A., Karimi G., Thermal Properties Measurement and Heat Storage Analysis of Paraffin-Nanoparticles Composites Phase Change Material: Comparison and Optimization, *Appl. Therm. Eng*. **90:** 945-951 (2015).

[10] Babapoor A., Karimi G., Khorram M., Fabrication and Characterization of Nanofiber-Nanoparticle-Composites with Phase Change Materials by Electrospinning, *Appl. Therm. Eng* **99:** 1225-1235 (2016).

[11] Babapoor A., Karimi G., Sabbaghi S., Thermal Characteristic of Nanocomposite Phase Change Materials During Solidification Process, *J. Energy Storage* **7:** 74-81 (2016).

[12] Samimi F., Babapoor A., Azizi M.M., Karimi G., Thermal Management Analysis of a Li-Ion Battery Cell Using Phase Change Material Loaded with Carbon Fibers, *Energy* **96:** 355-371 (2016).

[13] Karimi G., Azizi M.M., Babapoor A., Experimental Study of a Cylindrical Lithium Ion Battery Thermal Management Using Phase Change Material Composites, *J. Energy Storage*. **8:** 168-174 (2016).

[14] Babapoor A., Karimi G., Golestaneh S.I., Ahmadi Mezjin M., Coaxial Electro-Spun PEG/PA6 Composite Fibers: Fabrication and Characterization, *Appl. Therm. Eng* **118:** 398-407 (2017).

[15] Chaudhuri R.G., Paria S., Core/shell Nanoparticles: Classes, Properties, Synthesis Mechanisms, Characterization, and Applications, *Chem. Rev*. **112**: 2373–2433 (2012).

[16] Wu W., Bostanci H., Chow L.C, Ding S.J, Hong Y., Su M., Kizito J.P., Gschwender L., Snyder C.E., Jet Impingement and Spray Cooling Using Slurry of Nano Encapsulated Phase Change Materials, *Int. J. Heat Mass Transfer* **54**: 2715–2723 (2011).

[17] Delgado M., Lázaro A., Mazo J., Zalba B., Review on Phase Change Material Emulsions and Microencapsulated Phase Change Material Slurries: Materials, Heat Transfer Studies and Applications, *Renewable Sustainable Energy Rev* **16**: 253-273 (2012).

[18] Zhang P., Ma Z.W., Wang R.Z., An Overview of Phase Change Material Slurries: MPCS and CHS, *Renewable Sustainable Energy Rev* **14**: 598–614 (2010).

[19] Sabbah R., Farid M.M., Al-Hallaj S., Micro-Channel Heat Sink with Slurry of Water with Micro-Encapsulated Phase Change Material: 3D-Numerical Study, *Appl. Therm. Eng* **29**: 445–454 (2008).

[20] Kondle S., Alvarado J.L., Marsh C., Laminar Flow Forced Convection Heat Transfer Behavior of a Phase Change Material Fluid in Microchannels, *J. Heat Transfer* **135**: 1-11 (2013).

[21] Dong Z., Shuo L., "Preparation and Property of Nano-Encapsulated Phase Change Material", School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Siping Road 1239, Shanghai, China (2009).

[22] Zhang H., Wang X., Fabrication and Performances of Microencapsulated Phase Change Materials Based on n-Octadecane Core and Resorcinol-Modified Melamine-Formaldehyde Shell, *Colloids Surf., A: Physicochemical and Engineering Aspects* **332**: 129–138 (2009).

[23] Zhang H., Wang X., Synthesis and Properties of Microencapsulated N-Octadecane with Polyurea Shells Containing Different Soft Segments for Heat Energy Storage and Thermal Regulation, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **93**: 1366–1376 (2009).

[24] Zhang H., Bon S.A.F., Zhao C.Y., Synthesis, Characterization and Thermal Properties of Novel Nanoencapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage, *Sol. Energy* **86**: 1149–1154 (2012).

[25] Zhang H., Wang X., Wu D., Silica Encapsulation of N-Octadecane via Sol-Gel Process: A Novel Microencapsulated Phase-Change Material with Enhanced Thermal Conductivity and Performance, *J. Colloid Interface Sci*. **343**: 246–255 (2010).

[26] Wu W., H. Bostanci H., Chow L.C., Ding S.J., Hong Y., Su M., Kizito J.P., Gschwender L., Snyder C.E., Jet Impingement and Spray Cooling Using Slurry of Nano-Encapsulated Phase Change Materials, *Int. J. Heat Mass Transfer* **54**: 2715-2723 (2011).