

واژه‌های کلیدی:

مواد تغییر فازی
نانوکپسول
گرمای نهان ذوب
ذخیره و جذب انرژی

مروری بر نانوکپسوله کردن مواد تغییر فازی

هدیه نیک‌پوریان، احمدرضا بهرامیان*

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر

چکیده ...

امروزه با توجه به افزایش رو به رشد نیاز به انرژی و محدودیت سوخت‌های فسیلی به عنوان منابع رو به اتمام و آلاینده محیط زیست، نیاز به استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی بیشتر احساس می‌شود. یکی از انرژی‌هایی که کاربرد آن رو به افزایش است، انرژی حرارتی محیط زندگی ما است. از جمله موادی که می‌تواند به عنوان ذخیره‌کننده انرژی حرارتی مورد استفاده قرار گیرد، مواد تغییر فازی هستند. مواد تغییر فازی موادی هستند که از طریق ذوب یا انجماد، در دمای معینی قابلیت جذب، ذخیره و آزادسازی مقادیر بالای انرژی را دارند. مواد تغییر فازی با ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان نقش مهمی در افزایش بازدهی، صرفه‌جویی در مصرف و جلوگیری از هدررفتن انرژی دارند. برای جلوگیری از نشست مواد تغییر فازی سامانه، این مواد باید به روش‌هایی کپسوله یا پایدار شوند. هدف از کپسوله کردن، ایجاد کپسول جدار نازک، با درصد جرمی بالا از مواد تغییر فازی و بازدهی مطلوب جذب و دفع گرما است. در این تحقیق ضمن معرفی مواد تغییر فازی، با مرور تلاش‌های تحقیقاتی صورت گرفته در این زمینه به بررسی روش‌های نانوکپسوله کردن مواد تغییر فازی و تأثیر آن روی توزیع اندازه نانوکپسول‌ها و بازدهی کپسوله کردن، پرداخته می‌شود. همچنین سعی می‌شود با توجه به تجربیات دیگر محققان و با شاخص‌های بازدهی و پایداری جریان، روش‌های کارآمدی معرفی و پیشنهاد شوند.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

abahramian@modares.ac.ir

امقدمه

تقسیم می‌کنند. دمای تغییر فاز یوتکتیک‌ها کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد، دمای تغییر فاز مواد آلی و هیدرات نمک‌ها بالای صفر درجه سانتی‌گراد است. دمای کاربردی این مواد بین ۴ تا ۱۱۷ درجه سانتی‌گراد است [۴].

مواد تغییر فازی آلی شامل واکس‌های پارافینی، اسیدهای چرب و پلیمرها هستند. مواد تغییر فازی آلی در مقایسه با نمک‌ها (مواد تغییر فازی غیر آلی) خواص انتقال حرارت ضعیف‌تر، چگالی کم، احتمال آتش‌گیری ولی قیمت بالاتری دارند [۱]. واکس‌های پارافینی شامل مخلوطی از زنجیرهای پارافینی خطی یا نرمال آلکان‌ها هستند. گرمای نهان ذوب این مواد مربوط به بلوری شدن زنجیر هیدروکربنی است.

مواد تغییر فازی غیر آلی شامل نمک‌های هیدراته، فلزات و نمک‌ها هستند. نمک‌های هیدراته، آلیاژ نمک غیر آلی و آب، به شکل جامد بلوری هستند. فرایند تغییر فاز جامد-مایع در این مواد، به صورت آب‌زدایی و آب‌پوشی نمک است. محدوده دمای ذوب این ترکیبات، ۷ تا ۱۱۷ درجه سانتی‌گراد است. این محدوده دمای متناسب با دمای عملکرد سامانه‌های خنک‌کننده یا سردکننده است. این مواد جزء مواد ذخیره‌کننده انرژی هستند و توانایی ذخیره‌سازی انرژی بالایی دارند [۲]. به صورت کلی دسته‌بندی مواد تغییر فازی در شکل (۱) گزارش شده است.

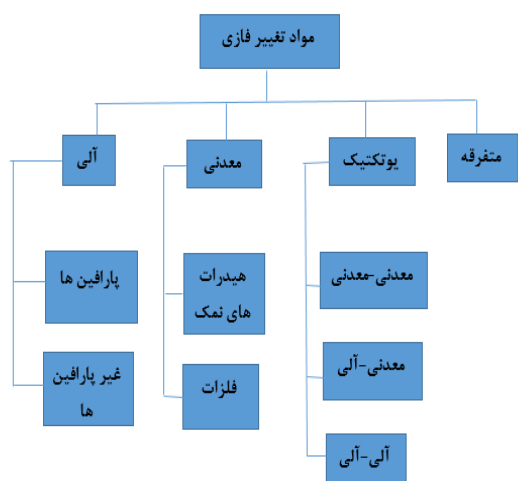
با توجه به افزایش نیاز به سامانه‌های گرمایش/سرمایش در دهه اخیر، افزایش نیاز به انرژی الکتریکی و کاهش سوخت‌های فسیلی، چگونگی ذخیره انرژی حرارتی و استفاده از مواد تغییر فازی در این زمینه به طور ویژه، مسئله اصلی تحقیقات در ۲۰ سال اخیر بوده است. استفاده از گرمای نهان و مواد تغییر فازی، یکی از بهترین راه‌های ذخیره‌سازی انرژی و کاهش مصرف منابع موجود و جلوگیری از اتلاف انرژی است [۱]. یکی از خواص برجسته مواد تغییر فازی این است که این مواد، در محدوده دمایی مشخصی تغییر فاز می‌دهند. این مواد با افزایش دمای محیط، گرم می‌شوند تا به نقطه ذوب خود برسند. با رسیدن به این نقطه علی‌رغم افزایش دما، دمای این مواد و محیط اطراف آن، به دلیل اینکه ماده در حال تغییر فاز است، ثابت مانده، در برابر افزایش دما مقاومت نشان می‌دهد [۲]. این مواد در صورت استفاده در ساختمان، از طریق چرخه‌های متوالی ذوب و انجماد (چرخه حرارتی) در تغییرات شدید دمای هوا، مقادیر زیادی حرارت را با محیط تبادل نموده، از این طریق دمای هوای متعادل‌تری برای فضای داخل ساختمان فراهم می‌آورد.

۲ اسلوب ذخیره‌سازی گرمای نهان

ذخیره‌سازی گرمای نهان زمانی رخ می‌دهد که ماده دچار تغییر فاز می‌شود. این نوع ذخیره‌سازی براساس جذب و آزادسازی انرژی است. تغییر فاز می‌تواند به صورت جامد-جامد، جامد-مایع، جامد-گاز و مایع-گاز صورت گیرد. در تغییر فاز جامد-جامد، گرما به صورت تغییر ماده از حالت بلوری به حالت بلوری دیگر اتفاق می‌افتد. این تغییر فاز اصولاً دارای توانایی ذخیره‌سازی پایین‌تر و تغییر حجم کمتری نسبت به تغییر فاز جامد-مایع است. ولی از لحاظ شرایط نگه‌داری و ظرف‌های نگه‌دارنده نسبت به حالات دیگر مشکلات کمتری دارد. تغییر فاز جامد-گاز و مایع-گاز دارای گرمای نهان تغییر فاز بالایی هستند، ولی تغییر حجم زیاد آن‌ها در هنگام تغییر فاز، مشکلاتی از لحاظ نگه‌داری ایجاد می‌کند [۳].

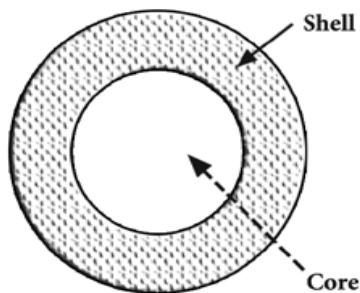
۳ دسته‌بندی مواد تغییر فازی

مواد تغییر فازی را بر مبنای دمای تغییر فازشان به سه دسته یوتکتیک‌ها (eutectics)، مواد معدنی و مواد آلی



شکل ۱ دسته‌بندی مواد تغییر فازی [۱]

۴ اسلوب عملکرد مواد تغییر فازی



شکل ۳ طرح‌واره کپسول [۸]

افزایش سرعت انتقال حرارت، پایداری مکانیکی و حرارتی ماده تغییر فازی و جلوگیری از اثرات زیست محیطی این مواد است که موجب می‌شود سامانه‌های تغییر فازی در صنایع غذایی، ساختمانی و کیسه‌های خون نیز قابل استفاده باشند [۴]. کپسول امکان جابه‌جایی مواد مایع و گازی شکل را به شکل جامد فراهم می‌کند. همچنین با استفاده از کپسول، مواد خطرناک و سمی را می‌توان جابه‌جا کرد. امروزه با توجه به افزایش نسبت سطح به حجم، افزایش سرعت انتقال حرارت و همچنین مزیت‌های دیگر، کپسوله کردن مواد تغییر فازی در مقیاس نانومتر در مقایسه با ماکرو و میکرومتر از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

۶ روش‌های سنتز نانوکپسول‌های مواد تغییر فازی

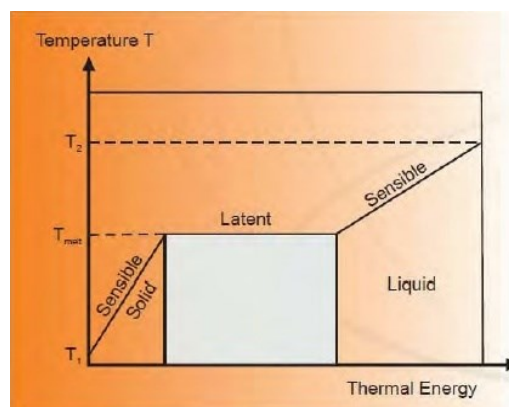
در مطالعاتی که انجام شده، روش پلیمری شدن بین سطحی برای سنتز نانوکپسول‌ها و میکروکپسول‌ها استفاده شده است [۱۱]. در این روش با قرارگیری دو فاز پیوسته و غیر پیوسته در کنار هم و افزودن مونومر به سامانه، مونومرها خود را به فصل مشترک دو فاز رسانده و در فاز مخالف نفوذ می‌کنند. دو مونومر با هم واکنش می‌دهند و پلیمر در فصل مشترک دو فاز تشکیل می‌شود [۱۱]. پلیمری شدن بین سطحی، به سه روش امولسیون، تعلیقی و مینی‌امولسیون انجام می‌شود.

در یک کار تحقیقاتی [۱۲]، نانوکپسول St-MMA/n-octadecane (استایرن-متیل متاکریلات) به روش پلیمری شدن مینی‌امولسیون سنتز شده است. در این روش مونومرهای تشکیل‌دهنده پوسته (استایرن و اتیل استات) و ماده تغییر فازی (n-octadecane) به همراه شروع‌کننده (آزو بیس ایزو بوتیرو نیتریل) را به عنوان فاز غیر پیوسته در کنار هم تحت هم‌زن مکانیکی قرار دادند

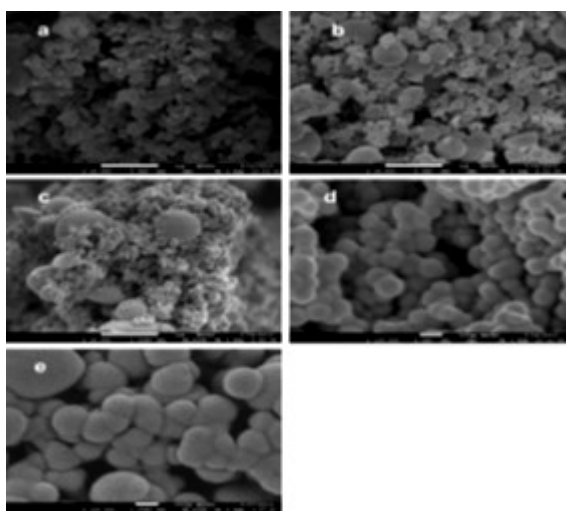
مواد تغییر فازی برای ذخیره انرژی حرارتی در طی فرایند گرم شدن محیط، به صورت موازی با محیط گرم می‌شوند تا زمانی که به دمای ذوب خود برسند. پس از رسیدن به این دما، علی‌رغم اینکه دمای محیط همچنان به روند افزایشی خود ادامه می‌دهد، دمای این مواد و البته محیط اطراف آن، به دلیل این که در حال تغییر فاز است، ثابت می‌ماند و در برابر افزایش دما مقاومت می‌کنند. در واقع، طی این بازه زمانی که معمولاً چند ساعت به طول می‌انجامد، ماده تغییر فازی مقدار زیادی حرارت در خود جذب کرده ولی این حرارت را صرف افزایش دمای خود نمی‌کند، بلکه این گرما را صرف تغییر فاز خود از حالت جامد به مایع کرده، در خلال فرایند تغییر فاز، دمای خود و محیط اطراف خود را ثابت نگه می‌دارد.

۵ کپسوله کردن مواد تغییر فازی

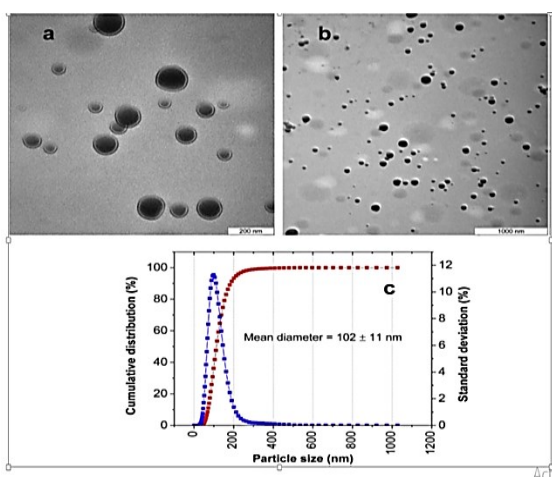
کپسول حاوی هسته و پوسته است (شکل ۳) که، مواد تغییر فازی به عنوان هسته، می‌توانند در حین تغییر حالت جامد-مایع، انرژی نهان حرارتی را جذب، ذخیره و آزاد کنند. پوسته می‌تواند از جنس مواد پلیمری باشد. فرایند کپسوله کردن در مقیاس ماکرو، میکرو و نانومتر انجام می‌شود و به منظور ایجاد پوشش در اطراف مواد تغییر فازی انجام می‌گیرد. هدف اصلی کپسوله کردن، نگه‌داشتن مذاب یا جامد ماده تغییر فازی در سامانه و عدم جاری شدن مایع به خارج از سامانه است. مهم‌ترین مزیت کپسوله کردن، عدم اختلاط یا واکنش با فضای اطراف، آسان و قابل انعطاف بودن،



شکل ۲ نحوه عملکرد مواد تغییر فازی [۳]



شکل ۴ تصاویر FESM مربوط به نانوکپسول
(n-octadecane/استایرن-متیل متاکریلات)،
(a) نمونه ۱A، (b) نمونه ۲A، (c) نمونه ۳A، (d) نمونه ۴A [۱۲]



شکل ۵a و b تصاویر TEM
(c) توزیع اندازه ذرات نانوکپسول
n-octadecane/St-MMA با DLS [۱۲]

افزایش میزان استایرن به متیل متاکریلات و کاهش قطبیت سامانه بوده است. در این تصاویر، نانوکپسول‌ها کروی، با اندازه غیر یکنواخت و سطح خشن هستند. درحالی‌که در تصویر d، اندازه ذرات یکنواخت، با سطح نرم و کروی هستند.

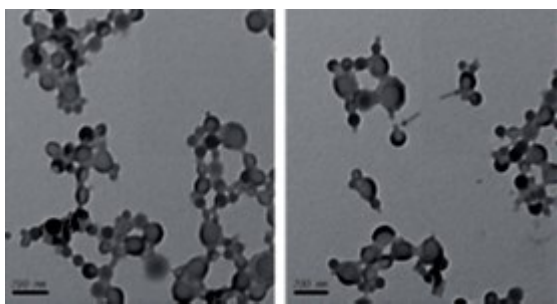
با تحلیل تصاویر (شکل ۵) حاصل از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، کپسوله شدن موفقیت‌آمیز n-octadecane (ماده تغییر فازی) توسط پوسته کوپلیمری اثبات شده است.

و مقداری محلول آبی ماده فعال در سطح (حاری بخش آب‌دوست و آب‌گریز) به همراه مقدار زیادی آب به عنوان فاز آبی به فاز غیر پیوسته اضافه کردند و تحت دور همزن بالا به مدت ۱۰ دقیقه قرار دادند. بعد از گذشت مدت زمانی امولسیون آب در روغن تشکیل شد و به منظور کوچک شدن ذرات، امولسیون را تحت امواج مافوق صوت قرار دادند. سپس، به منظور انجام فرایند پلیمری‌شدن، سامانه را تحت دمای مشخص به مدت ۵ ساعت قرار دادند و در نهایت نانوکپسول‌های سنتز شده را جداسازی کردند. مطالعات انجام شده روی تغییر نسبت جرمی مونومرهای تشکیل‌دهنده پوسته با توجه به جدول ۱ نسبت استایرن به متیل متاکریلات اثر آن بر بازده کپسوله کردن و متوسط قطر اصلی نانوذرات انجام شده است. افزایش این نسبت موجب افزایش بازده کپسوله کردن شده است. اما در نمونه ۲A و ۳A نسبت به نمونه ۱A، با توجه به بالاتر بودن این نسبت، بازده کپسوله کردن کمتر است. این پدیده ناشی از شکسته شدن پوسته نازک نانوکپسول و نشسته شدن ماده تغییر فازی به بیرون از کپسول بوده است.

همچنین تأثیر این تغییرات روی ریزساختار نانوکپسول‌ها با توجه به شکل ۴ به این صورت است که، در تصویر a، b و c، فرایند هسته‌گذاری ثانویه اتفاق افتاده است که علت آن

جدول ۱ ترکیبات تشکیل‌دهنده نانوکپسول
(n-octadecane/استایرن-متیل متاکریلات)
و توزیع اندازه ذرات و بازده کپسوله کردن [۱۲].

نمونه	متوسط قطر اصلی ذرات (nm)	نسبت جرمی استایرن به متیل متاکریلات	بازده کپسوله کردن
۱ A	۱۵۲	۲	۴۰/۹
۲ A	۲۳۶	۳	۳۱/۱
۳ A	۱۴۶	۳/۵	۳۵/۹
۴ A	۱۰۲	۴	۴۵/۱



شکل ۶ تصاویر TEM نانوکپسول PS/n-tetradecane [۱۵]

در کار تحقیقاتی دیگری [۱۳]، بررسی‌ها روی نانوکپسوله کردن (پلی استایرن کومتیل متاکریلات/ بوتیل پالمیتات) به روش پلیمری شدن تعلیقی انجام شده است. در این پژوهش، فاز آبی (آب مقطر و پایدارکننده) و فاز آلی (بوتیل پالمیتات، شروع کننده، استایرن و متیل متاکریلات) تهیه شده است. فاز آبی را به درون فلاسک سه دهانه، تحت اتمسفر نیتروژن و دمای ۸۰ درجه سانتی گراد اضافه کردند. سپس فاز آلی را به آرامی به فلاسک سه دهانه اضافه کردند. پلیمری شدن بعد از گذشت ۴ ساعت انجام شد. اثر متغیر سرعت همزن روی توزیع اندازه ذرات نانوکپسول با استفاده از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (شکل ۷) گزارش شده است. مشاهده شد با افزایش سرعت همزن، اندازه ذرات نانوکپسول کوچک تر شده که دلیل آن، جلوگیری از فرایند هسته گذاری ثانویه و کنترل فرایند تشکیل هسته در مرحله نخست هسته گذاری است. با توجه به شکل ۷، حالت بهینه در قسمت D با سرعت همزن ۱۲۰۰ (rpm) است که، شکل نانوکپسول‌ها کروی، با اندازه یکنواخت و با سطح تقریباً نرم هستند. در حالی که در قسمت‌های دیگر (c, b و d) اندازه نانوکپسول‌ها غیر یکنواخت و با سطحی خشن هستند.

همچنین، وجود عوامل تعلیق کننده هیبریدی (در دور همزن ۸۰۰ rpm)) موجب کاهش اندازه ذرات نانوکپسول و تا حدودی باریک تر شدن توزیع اندازه ذرات نانوکپسول ماده تغییر فازی شده است. به طوری که توزیع اندازه ذرات نانوکپسول، با توجه به شکل ۸، بین ۵ تا ۱۲۰ (nm)، قطر متوسط نانوکپسول ۷۰ (nm) و توزیع تک اوجی شده است. در مطالعات انجام شده، روش پلیمری شدن بین سطحی، برای سنتز نانوکپسول‌ها و میکروکپسول‌ها استفاده شده است. چکیده‌ای از شرایط پلیمری شدن دیگر محققان، در

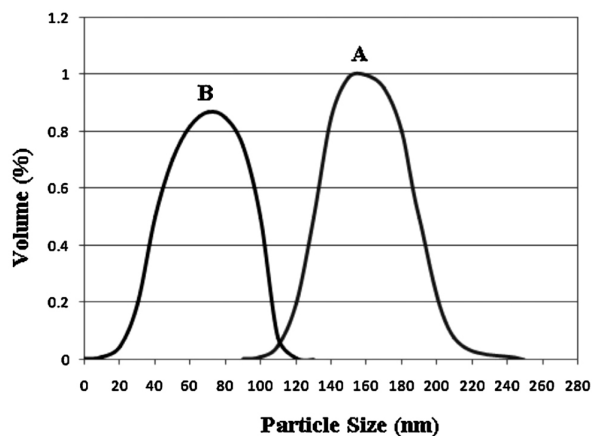
در شکل ۵ (a)، قسمت‌های تیره شامل هسته (ماده تغییر فازی) و قسمت‌های روشن شامل پوسته کوپلیمر است. شکل ۵ (b)، توزیع نانومتری ذرات نانوکپسول را نشان می‌دهد. با توجه به منحنی توزیع اندازه ذرات (c)، اندازه ذرات نانوکپسول بین ۶۳ تا ۱۲۹ (nm) تغییر کرده است. توزیع ذرات باریک و متوسط قطر اصلی نانوکپسول‌ها ۱۰۲+۱۱ (nm) است.

در کار مشابهی [۱۵]، تأثیر سرعت و زمان همزن بر روی اندازه ذرات و درصد تبدیل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق (جدول ۲) نشان می‌دهد، با افزایش دور همزن، درصد تبدیل ابتدا افزایش و سپس کمی کاهش یافته است. زمانی که دور همزن ۶۰ (rpm) بوده درصد تبدیل به حداکثر مقدار خود (۹۵٪) رسیده است. می‌توان این گونه تحلیل کرد که افزایش دور همزن موجب شده تا ذرات اطراف همزن در اثر برخورد با هم و ایجاد اصطکاک، افزایش دما پیدا کنند و به دنبال آن حباب‌های موجود در نمونه نشت کرده، ذرات کوچک تری را ایجاد کرده‌اند. همچنین با افزایش زمان همزن از ۱۰ به ۵۰ دقیقه، کاهش در اندازه ذرات مشاهده شده که علت آن را می‌توان به شکست ذرات به اندازه‌های کوچک تر با گذشت زمان نسبت داد.

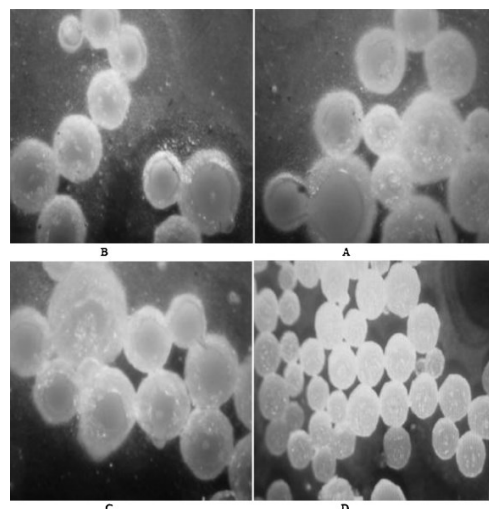
زمان هم زدن و دور همزن بر ریز ساختار نانوکپسول‌ها اثر دارد. با توجه به شکل ۶، در شرایط مطلوب (دور همزن ۵۰ rpm و زمان ۳۰ دقیقه) نانوکپسول‌ها تقریباً کروی هستند و فرایند کپسوله شدن با موفقیت انجام شده است. پوسته با خطوط تیره رنگ در اطراف هسته (ماده تغییر فازی) روشن دیده می‌شود.

جدول ۲ تأثیر دور و زمان همزن روی متوسط قطر ذرات و درصد تبدیل [۱۵]

دور همزن (rpm)	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
زمان (min)	۱۰	۲۰	۳۰	۳۵	۴۰	۵۰
متوسط قطر ذرات (nm)	۲۱۲	۱۹۸	۱۷۰	۱۶۸	۱۷۳	۱۷۹
درصد تبدیل	۵۶	۷۰	۸۸	۹۵	۹۴	۹۴



شکل ۸ توزیع اندازه ذرات نانوکپسول تهیه شده با روش پلیمری شدن تعلیقی (A) بدون عوامل تعلیق‌کننده هیبریدی (B) در حضور عوامل تعلیق‌کننده هیبریدی (۸۰۰ rpm) [۱۳]



شکل ۷ تصاویر SEM مربوط به نانوکپسول (PScMMA/ButhylPalmitate) در سرعت‌های متفاوت همزن (۸۰۰: a, ۱۰۰۰: c, ۱۲۰۰: d و ۱۳) [۱۳]

جدول ۳ مقالات مروری سال‌های اخیر در رابطه با نانوکپسوله کردن مواد تغییر فازی

سال	۲۰۱۲	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶
محقق	C.Y.zhao	Feiyi	Y.Fang	Y.Fang	M.Z.Hosseini	Y.Konoklu	B.Mohammadi
هسته	n-octadecane	n-dodecanol	n-tetradecane	n-doteriacetone	n-octadecane	Hexadecane	Buthyl Palmitate
پوسته	پلی اتیل - متااکریلات	پلی متیل - متااکریلات	پلی استایرن	پلی استایرن	پلی استایرن - متیل - متااکریلات	پلی استایرن - کو اتیل - آکریلات	پلی استایرن - کو متیل متااکریلات
دما (°C)	۷۰	۸۰	۶۰	۵۵	۸۵	۷۰-۸۰	۸۰
زمان (h)	۲۴	۴	۵	۳۵ (min)	۶	۴	۴
همزن (rpm)	۶۰۰	۳۰۰	۸۰۰۰	۶۰۰۰	۶۰۰		۸۰۰
آغازگر	آزوبیس ایزو - بوتیرونیتریل	آزوبیس ایزو - بوتیرونیتریل	آزوبیس ایزو - بوتیرونیتریل	آزوبیس ایزو - بوتیرونیتریل	آزوبیس ایزو - بوتیرونیتریل	آمونوم - پراکسودی - سولفات	آزوبیس ایزو - بوتیرونیتریل
روش پلیمری شدن	مینی امولسیون	مینی امولسیون	مینی امولسیون	مینی امولسیون	مینی امولسیون	امولسیون	محلول تعلیقی
گرمای نهان ذوب (J/g)	۱۸۹/۵	۱۰۷/۹	۹۸/۷۱	۱۷۴/۸	۱۷۰/۰۹	۱۹۶/۰۹	۷۰/۸
بازده کپسوله کردن (%)	۸۹/۵	۸۲/۲	۸۹	۶۱/۲۳	۴۵/۱	۸۷/۰۹	۶۵

به بازده گرمایی سامانه کمک کند، بدون جریان پذیری مواد تغییر فازی، پوسته هم نقش نگهدارنده و هم نقش ماده تغییر فازی را خواهد داشت.

۷ نتیجه گیری

در تمام تحقیقات انجام شده، وجود پوسته از منظر جلوگیری از نشت، مفید است، ولی از نظر این که جزئی به سامانه مواد تغییر فازی اضافه می شود و کسر جرمی ماده تغییر فازی را کاهش می دهد، کارایی حرارتی سامانه را کاهش می دهد. این گروه تحقیقاتی پیشنهاد می دهد برای رفع نسبی مشکل کاهش بازده حرارتی که به جرم ماده تغییر فازی در سامانه بستگی دارد، از پوسته گرمانرم الاستومر استفاده شود. در این صورت بخش گرمانرم پوسته نیز گرمای نهان ذوب نشان می دهد و به کارایی حرارتی سامانه (با حفظ ثبات و جلوگیری از نشت ماده تغییر فازی) کمک می کند.

جدول ۳ به صورت خلاصه جمع آوری شده است. با توجه به جدول ۳ می توان این گونه استنباط کرد که بازده کپسوله کردن مواد تغییر فازی و اندازه نانوکپسولها به عوامل مختلفی همچون، نوع پلیمری شدن، دمای واکنش و سرعت همزن وابسته است. براساس تحقیقات انجام شده تمامی پوسته ها به گونه ای انتخاب شدند که موجب کاهش زیاد گرمای نهان ذوب مواد تغییر فازی شدند. یکی از مشکلات اصلی کپسوله کردن مواد تغییر فازی این است که با حضور پوسته، میزان مواد تغییر فازی شدیداً کاهش می یابد. این امر باعث کاهش بازده عملکرد مواد تغییر فازی می شود. با بررسی های انجام شده و درک این موضوع به عنوان مشکل مشترک، پیشنهاد زیر می تواند بسیار سازنده و جذاب باشد. اگر بتوان پوسته را از جنس مواد گرمانرم الاستومر ساخت، که در محدوده دمای ذوب هسته (مواد تغییر فازی)، فاز گرمانرم آن ذوب شود و گرمای ذوب آن

مراجع

1. Zhang G.H., Bon S.A., Zhao C. Y., Synthesis, Characterization and Thermal Properties of Novel Nanoencapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. *Solar Energy*, 86, 1149-1154, **2012**.
2. Latibari S.T., Synthesis, Characterization and Thermal Properties of Nanoencapsulated Phase Change Materials Via Sol-gel Method, *Energy*, 61, 664-672, **2013**.
3. Shannaq Al., Farid M. M., Roencapsulation of Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage Systems, *Advances in Thermal Energy Storage Systems. Methods and Applications*, 247-284, **2014**.
4. Chen C., Guo H., Lio Y., Wang C., A New Kind of Phase Change Material (PCM) for Energy-storing Wallboard, *Energy and Buildings*, 40, 882-890, **2008**.
5. Huang M., Eames P., Ewitt N., The Application of a Validated Numerical Model to Predict the Energy Conservation Potential of Using Phase Change Materials in the Fabric of a Building, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 1951-1960, **2006**.
6. Sarı A., Alkane C., Bicer A., Altuntas A, Bihgin C, Micro/nanoencapsulated n-Nonadecane with Poly (Methyl methacrylate) Shell for Thermal Energy Storage, *Energy Conversion and Management*, 86, 614-621, **2014**.
7. Kwetta D. N., Haghghat F., Thermal Energy Storage with Phase Change Material a State of the Art Review, *Sustainable Cities and Society*, 10, 87-100, **2014**.
8. Yu F., Chen ZH., Zeng XR., Gao XN., Poly (Methyl Methacrylate) Copolymer Nanocapsules Containing Phase-change Material (N-dodecanol) Prepared Via Miniemulsion Polymerization, *Journal of Applied Polymer Science*, 551-556, **2015**.
9. Do T., Ko YG., Chan Y., Choi US., Encapsulation of Phase Change Material with Water-absorbable Shell for Thermal Energy Storage, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3, 2874-2881, **2015**.
10. Cheng R., Pomiomowski M., Wang X., A New Method to Determine Thermophysical Properties of PCM-Concrete Brick, *Applied Energy*, 112, 988-998, **2013**.
11. Su W., Darkwa J., Kokogiannakis G., Review of Solid-Liquid Phase Change Materials and Their Encapsulation Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 373-391, **2015**.
12. Konuklu Y., Paksoy H.O., Unal M., Nanoencapsulation of N-alkanes with Poly (Styrene-co-ethylacrylate) Shells for Thermal Energy Storage. *Applied Energy*, 150, 335-340, **2015**.
13. Mohammadi B., Nagafi FS., Ranjbar H., Mohammadi J., Zakaryazadeh M., Nanoencapsulation of Butyl Palmitate in Polystyrene-co-methyl Methacrylate Shell for Thermal Energy Storage Application, *Energy and Buildings*, 118, 99-105, **2016**.
14. Fuensanta M., Paiphansiri U., Romero MO., Thermal Properties of a Novel Nanoencapsulated Phase Change Material for Thermal Energy Storage, *Thermochimica Acta*, 565, 95-101, **2013**.
15. Fang Y., Yu H., Wan W., Gao X., Preparation and Thermal Performance of Polystyrene/n-tetradecane Composite Nanoencapsulated Cold Energy Storage Phase Change Materials, *Energy Conversion and Management*, 76, 430-436, **2013**.