

مواد تغییر فاز دهنده و کاربرد آنها در منسوجات

محمد سیف پور، مهدی نوری*، جواد مختاری

گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، ایران

تاریخ دریافت: ۸۹/۰۶/۲۲ تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۹/۲۰

چکیده

استفاده از سیستم های ذخیره گرمای نهان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) راه موثری برای ذخیره انرژی است و جزو منابع تجدیدپذیر و جدید انرژی به حساب می آید. مواد تغییر فاز دهنده طی فرآیند ذوب، انرژی گرمایی را به صورت گرمای نهان ذخیره کرده و طی انجماد این انرژی را آزاد می کنند. امروزه استفاده از این مواد در منسوجات به بهبود خواص گرمایی و سرمایی آنها کمک کرده است. روش های مختلفی نظیر روکش دادن، تورق آ و حبس داخل کپسولی برای این منظور وجود دارد. همچنین یکی از جدیدترین رویکردهای دانش مواد تغییر فاز دهنده، استفاده از فناوری نانوالیاف به منظور پایداری ابعادی این مواد می باشد. در این مقاله انواع مختلف مواد تغییر فاز دهنده و کاربرد آنها در منسوجات مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- مقدمه

می تواند توسط استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (Phase Change Material) حاصل شود. یکی از راه های موثر ذخیره انرژی گرمایی، به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده می باشد.

تکنولوژی جادادن میکروکپسول های مواد تغییر فاز دهنده درون منسوج و الیاف تنظیم کننده دما در اوایل دهه ۱۹۸۰ در برنامه تحقیقاتی ناسا توسعه یافت. هدف اصلی استفاده از این پارچه ها در لباسهای فضانوردان، برای محافظت در برابر تغییرات دمایی بسیار بالا در فضای خارجی بود [۳،۴].

امروزه تولیدکنندگان می توانند از مواد تغییر فاز دهنده در سطح وسیعی برای بهبود راحتی گرمایی پوشاک استفاده کنند. در این مقاله انواع مختلف مواد تغییر فاز دهنده و جنبه های کاربردی آنها در منسوجات

امروزه مصرف جهانی انرژی در حدود $4/1 \times 10^{20}$ ژول در سال است. با توجه به افزایش جمعیت و رشد اقتصاد، میزان تقاضا برای انرژی تا سال ۲۰۵۰ دو برابر مقدار کنونی خواهد شد [۱]. در حال حاضر یکی از چالش های کارشناسان، ذخیره انرژی در شکل مناسب است. این امر منجر به ذخیره انرژی مازاد و اقتصادی تر شدن سیستم از طریق کاهش اتلاف انرژی و هزینه سرمایه می شود [۲]. اصول بنیادی علم به طور گسترده ای برای تولید منسوجات نو و ابتکاری استفاده می شود. یکی از این اصول تغییر فاز است، یعنی تبدیل از یک حالت فیزیکی به حالتی دیگر. امروزه الیاف و منسوجاتی که خاصیت تطبیق دارند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند. این خاصیت

کلمات کلیدی

مواد تغییر فاز دهنده،
ذخیره انرژی گرمایی،
حبس داخل کپسولی،
نانوالیاف

1- Phase Change Material (PCM)

2- Lamination

*مسئول مکاتبات، پیام نگار: mnouri69@guilan.ac.ir

مورد بررسی قرار می گیرد.

به صرفه تر می باشند. بنابراین کلیه سیستم های ذخیره انرژی نهان می بایست دست کم دارای سه جزء زیر باشند:

۲- روش های ذخیره انرژی

خصوصیات اساسی هر سیستم ذخیره انرژی با استفاده از فاکتورهای چگالی انرژی (Wh/kg)، چگالی توان (W/kg)، بازده سیکل (%)، دشارژ خود به خود، عمر سیکل و طول عمر بر مبنای سال تشریح می شود [۵]. برخی از روش های ذخیره انرژی به شرح ذیل می باشد:

۱-۲- ذخیره انرژی مکانیکی

سیستم های ذخیره انرژی مکانیکی شامل ذخیره انرژی گرانشی، ذخیره انرژی هوای فشرده و چرخ دوار^۱ می باشد.

۲-۲- ذخیره انرژی الکتریکی

ذخیره انرژی توسط باتری ها نمونه ای از ذخیره انرژی الکتریکی است.

۳-۲- ذخیره انرژی گرمایی

انرژی گرمایی می تواند توسط تغییر انرژی درونی ماده به شکل های گرمای محسوس، گرمای نهان و یا ترکیبی از اینها ذخیره شود.

• ذخیره گرمای محسوس: در ذخیره گرمای محسوس (SHS)^۲ انرژی گرمایی توسط افزایش دمای جامد یا مایع ذخیره می شود. آب به واسطه ی ارزان بودن و داشتن گرمای ویژه بالا، بهترین SHS مایع محسوب می گردد.

• ذخیره گرمای نهان: ذخیره گرمای نهان (LHS)^۳ بر مبنای جذب یا رهاسازی گرما هنگام تغییر فاز ماده از جامد به مایع است.

۴-۲- ذخیره انرژی ترموشیمیایی

سیستم های ترموشیمیایی وابسته به انرژی جذب شده یا رها شده هنگام شکستن یا تغییر فرم پیوندهای مولکولی در یک واکنش شیمیایی کاملاً بازگشت پذیر می باشند.

از میان روش های مذکور، ذخیره انرژی گرمایی نهان به دلیل قابلیت ایجاد چگالی بالای ذخیره انرژی و خاصیت ذخیره انرژی در دمای ثابت (دمای تغییر فاز ماده ی تغییر فاز دهنده) از اقبال بیشتری برخوردار است [۲].

۳- فرآیند تغییر فاز

تغییر فاز می تواند به فرم های زیر صورت گیرد: جامد-جامد، جامد-مایع، جامد-گاز، مایع-گاز و بالعکس. در تبدیل جامد-جامد، گرما هنگام تغییر حالت بلورین ماده، ذخیره می شود. در تغییر فاز جامد-جامد، مایع یا گازی تولید نشده و نیاز به حبس داخل کپسولی نیست، اما به رغم تمامی این مزایا، تعداد کمی از این مواد تغییر فاز دهنده جامد-جامد شناخته شده می باشند [۶].

تبدیل جامد-مایع گرمای نهان کمتری نسبت به مایع-گاز دارد اما با تغییر کمتری در حجم همراه است (در حدود ۱۰٪ یا کمتر)، بنابراین جهت استفاده در سیستم های ذخیره انرژی گرمایی، مقرون

۱- ماده ی تغییر فاز دهنده مناسب که نقطه ذوب آن در محدوده مطلوب باشد،

۲- سطح مبدل حرارتی مناسب،

۳- محفظه نگهدارنده سازگار با ماده ی تغییر فاز دهنده [۷].

دمای ماده تغییر فاز دهنده در طول فرآیند ذوب و انجماد تقریباً ثابت می ماند. انتقال حرارت بالا بدون تغییر محسوس دما باعث شده تا مواد تغییر فاز دهنده به عنوان یک منبع قابل توجه برای ذخیره گرمایی در فرآیندهای عملی مطرح گردند.

۴- خصوصیات مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده استفاده شده در طراحی سیستم های ذخیره حرارتی، باید دارای خصوصیات زیر باشند:

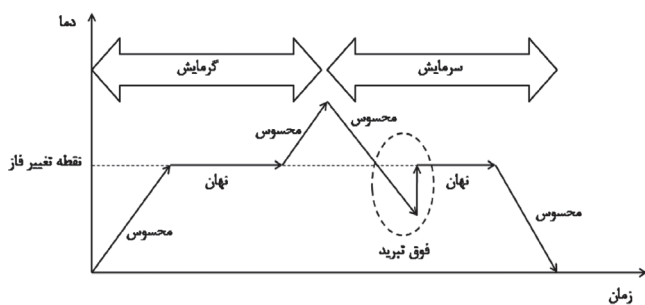
الف. خواص حرارتی: دمای تغییر فاز مناسب، گرمای نهان تغییر فاز بالا، انتقال حرارت خوب؛

ب. خواص فیزیکی: تعادل فاز مطلوب، چگالی بالا، تغییر حجم کم، فشار بخار پایین، تغییر فاز تجدید پذیر^۴؛

ج. خواص سینتیکی: عدم فوق تبرید^۵، نرخ تبلور کافی؛

د. خواص شیمیایی: پایداری شیمیایی بلند مدت، سازگاری با مواد ساختاری سیستم، عدم سمیت، عدم خطر احتراق؛

ه. خواص اقتصادی: در دسترس بودن، قیمت مناسب، قابلیت بازیافت. یکی از مشکلات تغییر فاز تجدید پذیر، جدایی فاز است. جدایی فاز زمانی اتفاق می افتد که فازهای دارای ترکیب های گوناگون به صورت ماکروسکوپی از هم جدا شوند. فوق تبرید نیز اثری است که در آن دما به صورت قابل توجهی به زیر دمای ذوب می رسد تا زمانی که ماده شروع به انجماد و آزادسازی گرما کند (شکل ۱). اگر به این دما نرسیم، ماده تغییر فاز منجمد نشده و تنها گرمای محسوس را ذخیره می کند [۸].



شکل ۱- تغییر دما طی فرآیند ذوب و انجماد

۵- انواع مختلف مواد تغییر فاز دهنده

استفاده از ذخیره انرژی گرمایی مواد تغییر فاز دهنده دارای نقطه ذوبی بین ۱۵ تا ۳۵ درجه سانتیگراد دارند، یکی از موثرترین ایده ها

1- Flywheel

2- Sensible Heat Storage

3- Latent Heat Storage

4- Cycling stability

5- Supercooling

گلایکول، اکسی اتیلن_n(-O-CH₂-CH₂-) می باشد که در انتهای هر زنجیر گروه هیدروکسیل وجود دارد. دمای ذوب پلی اتیلن گلایکول وابسته به وزن مولکولی آن است، البته هنگامی که وزن مولکولی آن کمتر از ۲۰۰۰۰ می باشد.

۴-۵- ترکیبات فلزی

این دسته شامل فلزات با نقطه ذوب پایین و اوتکتیک های فلزی است. این مواد فلزی به سبب وزنی که دارند، به طور جدی به عنوان مواد تغییر فاز دهنده مورد توجه قرار نگرفته اند. اما هنگامی که حجم مدنظر قرار می گیرد، به واسطه داشتن گرمای ذوب به ازای واحد حجم بالا، برگزیدگان احتمالی می باشند. آنها همچنین هدایت گرمایی بالا دارند. تفاوت اصلی میان این مواد فلزی و سایر مواد تغییر فاز دهنده، هدایت گرمایی بالای آنها می باشد. تعدادی از این ترکیبات فلزی، ترکیبات گالیوم، ایندیوم، کادمیوم، بیسموت، سرب و قلع می باشند.

۵-۵- اوتکتیک ها

یک اوتکتیک، ترکیبی از دو یا چند جزء می باشد که هر کدام از آنها به صورت متجانس ذوب و منجمد شده و مخلوطی از بلورهای اجزا را در طول تبلور تشکیل می دهند. اوتکتیک به واسطه آنکه با ترکیب مشخصی از بلورها منجمد شده و اجزا شانس برای جدایی ندارند، تقریباً همواره بدون تفکیک، ذوب و منجمد می گردند.

۵-۶- انواع دیگر

مواد آلی غیر پارافینی بیشترین مواد تغییر فاز دهنده این گروه بوده که خواص گوناگونی دارند. تعداد زیادی از استرها، اسیدهای چرب، الکل ها و گلایکول ها برای ذخیره انرژی مناسب تشخیص داده شده اند. این مواد قابل احتراق بوده و نباید در معرض دماهای بالا، شعله و عوامل اکسیدکننده قرار بگیرند.

۶- تقویت کننده هدایت گرمایی برای مواد تغییر فاز دهنده

هدایت گرمایی اکثر مواد تغییر فاز دهنده برای تامین نرخ تبادل گرمای لازم بین ماده تغییر فاز دهنده و بستر، بسیار کم است. هدایت گرمایی مواد تغییر فاز دهنده می تواند توسط استفاده از پرکننده فلزی، فیلتر های الیاف یا نانوالیاف کربن و غیره، تقویت شود. الیاف کربن مقاومت بالایی در برابر خوردگی و حملات شیمیایی داشته که این امر سبب سازگاری با اغلب مواد تغییر فاز دهنده می گردد. هدایت گرمایی نانوالیاف کربن به طور قابل توجهی بالاست و چگالی آنها کمتر از ۲۲۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که کمتر از فلزاتی است که معمولاً به عنوان افزودنی استفاده می شوند. بنابراین از الیاف یا نانوالیاف کربن به عنوان تقویت کننده هدایت گرمایی مواد تغییر فاز دهنده در کاربردهای نساجی استفاده می گردد. نانوالیاف کربن توسط روش های ذوب و اختلاط برشی می توانند به مواد تغییر فاز دهنده وارد شوند. افزایش نرخ انتقال حرارت در اثر زیاد شدن سطح جانبی، یک اصل شناخته شده می باشد. در سیستم های گرمایشی و سرمایشی

برای بهره برداری موثر از این نوع مواد در زمینه نساجی است. برخی از انواع مواد تغییر فاز دهنده در ادامه توضیح داده شده اند:

۵-۱- نمک های غیر آلی هیدراته شده

نمک های غیر آلی هیدراته ترکیبات فلزی نمک های غیر آلی و یک جامد بلوری با فرمول عمومی AB.nH₂O می باشند. نمک گلابر (H₂O.Na₂SO₄) نمونه آشنایی از این دسته مواد است. این مواد دارای محدوده جذب و آزادسازی دمای ۴۰-۲۰ درجه سانتیگراد می باشند. تغییر شکل جامد- مایع نمک های هیدراته در واقع آب گیری از هیدراسیون 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 می شود. نمک های هیدراته مهمترین گروه مواد تغییر فاز دهنده هستند که به طور گسترده برای سیستم های ذخیره انرژی گرمایی نهان مورد مطالعه قرار گرفته اند. مهم ترین خصوصیات نمک های هیدراته عبارتند از: گرمای نهان ذوب بالا به ازای واحد حجم (در حدود ۳۵۰ مگاژول بر مترمکعب)، هدایت گرمایی نسبتاً بالا (تقریباً دو برابر پارافین ها و در حدود ۰/۵ وات بر متر درجه سانتیگراد) و تغییر حجم کم در هنگام ذوب. اینگونه نمک ها خورنده نبوده، با پلاستیک ها سازگارند و سمیت کمی دارند. به علاوه، بسیاری از نمک های هیدراته جهت استفاده در ذخیره سازی ارزان می باشند [۳].

۵-۲- هیدروکربن های خطی با زنجیر بلند (پارافین)

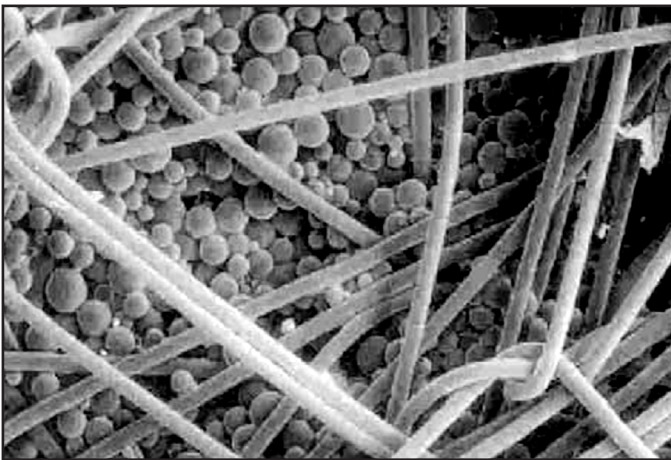
هیدروکربن های خطی آب گریز محصول فرعی پالایش نفت خام بوده که فرمول عمومی آنها C_nH_{2n+2} می باشد. تبلور زنجیر- (CH₂) مقدار زیادی گرمای نهان آزاد می کند. همچنین نقطه ذوب و گرمای نهان ذوب با افزایش طول زنجیر افزایش می یابند [۹]. این مواد از لحاظ شیمیایی بی اثر بوده، در زیر دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد پایدار هستند، تغییر حجم کمی هنگام ذوب دارند و در حالت مایع، فشار بخار آنها پایین است. به دلیل وجود این خواص، سیستم های دارای پارافین چرخه ای انجماد- ذوب بسیار طولانی دارند. این محصولات غیر سمی، قابل اطمینان، قابل پیش بینی، ارزان و غیر خورنده بوده و دارای خاصیت هسته گذاری خودبه خودی می باشند [۱۰-۱۲]. ذوب و انجماد هیدروکربن های دارای ۱۳ تا ۱۸ اتم کربن، در محدوده ۵/۵ تا ۶۱/۴ درجه سانتیگراد است. با انتخاب تعداد اتم کربن، تغییر فاز می تواند در محدوده دمایی مطلوبی صورت پذیرد.

۵-۳- پلی اتیلن گلایکول ها

پلی اتیلن گلایکول (PEG)^۱ 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) می باشد. این ماده همچنین رفتار ذوب متجانس و مقاومت بیشتری در برابر خوردگی دارد [۱۳، ۱۶]. واحد تکرارشونده پلی اتیلن

۷-۲- پوشش دهی

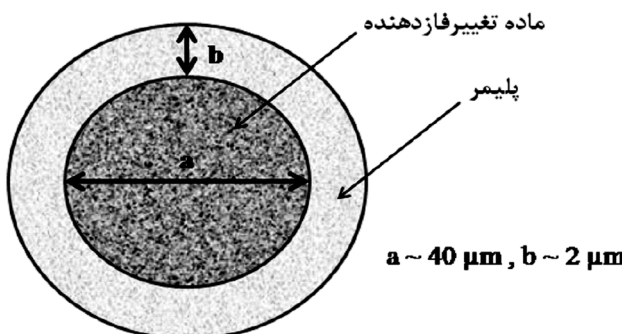
ترکیب پوششی که برای نساجی مفید است، شامل ماده تغییر فاز دهنده دیسپرس شده در اتصال دهنده پلیمری، سطح فعال، دیسپرس کننده، ضد کف و غلظت دهنده می باشد. هیدروکربن های پارافینی، مواد تغییر فاز دهنده ای هستند که ترجیح داده می شوند. ماده تغییر فاز دهنده توسط پوششی با استفاده از پلیمرهایی نظیر اکریلیک، پلی یورتان و غیره روی منسوج عمل می شود. فرآیندهای پوشش دهی گوناگونی نظیر Knive-over-roll, Knive-over-air, Pad-dry-cure, Gravure, Dip coating و Transfer coating برای این منظور مناسب می باشند. یک نمونه از این پوشش دهی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- پوشش میکروکپسول های ماده تغییر فاز دهنده روی سطح الیاف [۹]

۷-۳- تورق

ماده تغییر فاز دهنده می تواند درون فیلم نازکی از پلیمر ترکیب شده و توسط تورق روی سطح داخلی پارچه قرار گیرد. برای مثال میکروکپسول ها با فوم پلی یورتان مخلوط شده و این فوم توسط فرآیند تورق روی پارچه عمل می شود. ساختار لانه زنبوری عالی به دست آمده در طول تشکیل فوم، امکان ایجاد هوای محبوس را به وجود آورده و عایق بودن را افزایش می دهد. وجود میسل های ماده تغییر فاز دهنده نیز به راحتی قابل تشخیص است (شکل ۴).



شکل ۵- میکروکپسول، ماده تغییر فاز دهنده در هسته و پلیمر در پوسته

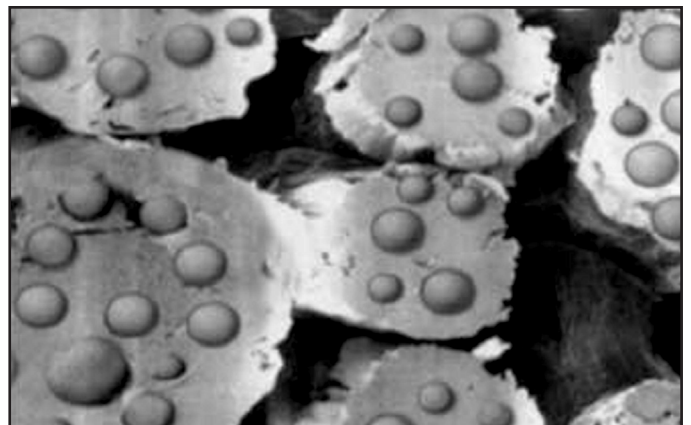
نیز برای دستیابی به انتقال حرارت مناسب، اختلاف دما بین دمای هوا و نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده بایستی بین ۵-۳ درجه سانتیگراد باشد [۱۴]. خواص حرارتی ماده تغییر فاز دهنده اصلاح شده از طریق دیسپرس کردن نانوالیاف کربن درون آن، بهبود می یابد. در اثر این اصلاح، نرخ سرماییش در طول فرآیند انجماد نانوکامپوزیت جدید با افزایش نسبت جرمی نانوالیاف کربن افزایش می یابد. در تحقیقی که توسط Wang و همکارانش صورت گرفت، افزودن β -آلمینیوم نیتريد به نوعی از پلی اتیلن گلايکول، باعث افزایش هدایت حرارتی از $0.3847 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ به $0.7661 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ شده است [۱۵].

۷-۴- ترکیب مواد تغییر فاز دهنده با منسوجات

مواد تغییر فاز دهنده ای که در دمایی کمتر یا بیشتر از دمای بدن تغییر فاز می دهند، برای استفاده در کاربردهای نساجی مناسب می باشند. از آنجا که تغییر فاز یک فرآیند دینامیک است، بنابراین مواد، بسته به میزان فعالیت فیزیکی بدن و دمای بیرون، دائماً از حالتی به حالت دیگر تغییر می کنند. خاصیت تنظیم دما در الیاف بشر ساخت توسط افزودن میکروکپسول های ماده تغییر فاز دهنده درون محلول پلیمری قبل از اکستروژن لیف قابل حصول می باشد. در این فرآیند میکروکپسول های ماده تغییر فاز دهنده درون لیف گنجانده می شوند. تکنیک های پوشش دهی^۱، تورق، اکستروژن الیاف مصنوعی دو جزئی و ریخته گری تزریقی^۲ برخی از فرآیندهای مناسب بوده که برای به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده درون ماتریکس منسوج استفاده می گردند [۱۶].

۷-۱- تکنولوژی الیاف

به کارگیری ماده تغییر فاز دهنده درون لیف ابتدا نیاز به حبس داخل کپسولی آن دارد. مواد تغییر فاز دهنده می توانند به پلیمر مایع یا محلول پلیمری ماده پایه افزوده شده و سپس لیف توسط یکی از روش های متداول نظیر خشک یا ترریسی و اکستروژن پلیمر مذاب، ریسیده شوند. یک نمونه از این الیاف در شکل ۲ نشان داده شده است.

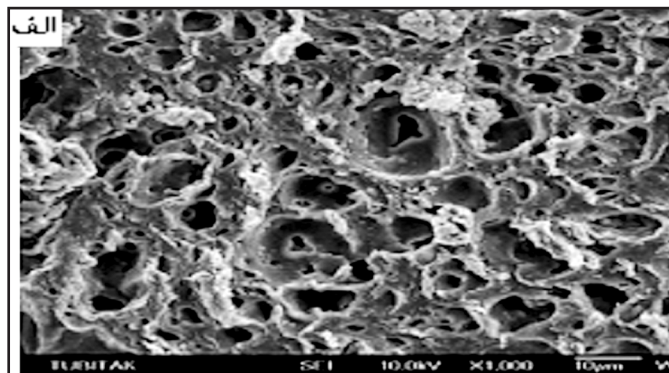


شکل ۲- میکروکپسول های ماده تغییر فاز دهنده درون لیف [۹]

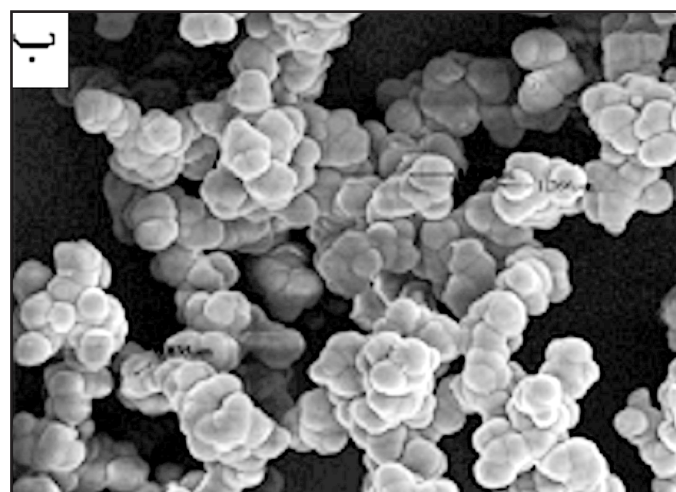
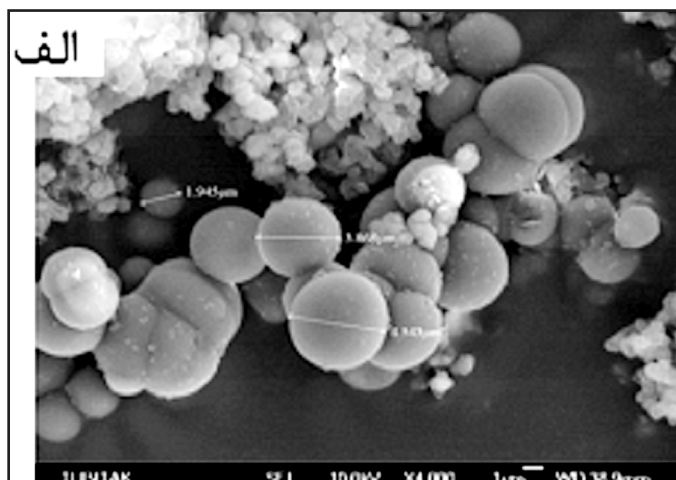
1- Coating

2- Injection molding

روش های فیزیکی عمدتاً شامل Spray drying, Centrifugal bed و Fluidized bed می باشد که البته قادر به تولید میکروکپسول های کوچکتر از ۱۰۰ میکرومتر نیستند. مناسب ترین فرآیندهای شیمیایی انباشت^۱ ساده یا مرکب و یا پلیمریزاسیون در جا^۲ می باشند. روش انباشت به طور عمده، جدایی به دو فاز به صورت سیستم کلوئیدی آب در روغن و یا روغن در آب می باشد که روش دوم برای حبس داخل کپسولی ماده تغییر فاز دهنده مناسب است. انباشت مرکب می تواند از طریق برهم کنش دو کلوئید شارژ شده با بار مخالف، انجام شود؛ به این صورت که ماده سازنده هسته به شکل دیسپرس به محلول پلیمری افزوده می شود و سپس مخلوط وارد فاز آبی دارای سطح فعال می شود. کلوئیدهای مورد استفاده می توانند سیستم ژلاتین- صمغ عربی باشد که هر دو پلیمرهای طبیعی هستند. صمغ عربی در pH بالاتر از ۲/۲، شارژ منفی می گیرد [۱۷]. روش پلیمریزاسیون در جا، روش کاملاً موفقیت آمیزی جهت تولید میکروکپسول هایی با ظرفیت حرارتی بالاتر به نسبت محتوای ماده تغییر فاز دهنده شان می باشد (شکل ۶). ۷۷٪ میکروکپسول های با قطر کمتر از ۱۰۰ میکرومتر و ۹۰٪ میکروکپسول های با قطر کمتر از ۱۸۵ میکرومتر، از طریق روش پلیمریزاسیون در جا، حاصل می گردند.



شکل ۴- پلی یورتان حاوی n-هگزادکان:
(الف) بزرگنمایی ۱۰۰۰X، (ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰X [۳]



شکل ۶- (الف) میکروکپسول پلی یوره- فرم آلدهید حاوی هسته n-اکتادکان، ۱۰kV، ۴۰۰۰X، (ب) میکروکپسول پلی یوره- فرم آلدهید حاوی هسته مخلوط n-اکتادکان و پلی اتیلن گلاکول ۵kV، ۴۰۰۰X، ۶۰۰ [۳]

۸- حبس داخل کپسولی

حبس داخل کپسولی مایعات و جامدات، تکنولوژی بسته بندی جدیدی در مقیاس میکرو است که می تواند منسوجات را به خواص جدیدی مجهز کند. استفاده از این تکنولوژی مزایای زیادی از جمله جلوگیری از دیسپرس شدن ماده تغییر فاز دهنده درون ساختار، تبخیر کمتر، برهم کنش کمتر با محیط، افزایش سطح انتقال حرارت، افزایش زمان مجاز نگهداری کالا روی پارچه و عدم ایجاد هرگونه اثر منفی روی خواص منسوج و جلوگیری از تغییرات ماکروسکوپیک هنگام تغییر فاز را در پی دارد [۱۷، ۱۸]. لازمه حبس داخل کپسولی میکرو، تولید میکروکپسول هایی است که به عنوان محفظه های کوچک عمل می کنند. در میکروکپسول ها ماده تغییر فاز دهنده به عنوان هسته و یک پلیمر یا یک ماده غیر آلی به عنوان پوسته قرار می گیرند [۱۹]. میکروکپسول هایی که دیواره هایی با قطر کمتر از ۲ میکرومتر و قطر ۲۰ تا ۴۰ میکرومتر دارند (شکل ۵) برای استفاده در الیاف مناسب می باشند. میکروکپسول ها از طریق نشان دادن یک پوشش پلیمری نازک روی ذرات جامد کوچک یا قطرات مایع و یا از طریق دیسپرس کردن جامد در مایع تولید می شوند. محتویات هسته کپسول (ماده فعال) توسط اصطکاک، فشار، پخش از میان دیواره پلیمری، انحلال پوشش دیواره پلیمری و یا تخریب زیستی آزاد می شود.

تولید میکروکپسول ها می تواند از طریق روش های فیزیکی یا شیمیایی انجام شود. استفاده از برخی تکنیک ها به دلیل فرآیند پرهزینه و استفاده از حلال های آلی مضر برای سلامتی و محیط زیست، محدود شده است.

1- Coacervation
2- In-situ polymerization

در برخی کاربردها به ویژه در بحث سیالات حامل انرژی، میکروکپسول‌های ماده تغییر فاز دهنده برای چرخه های مکرر مناسب نمی باشند. زیرا قطعات بزرگ ماده تغییر فاز دهنده میکروکپسول شده نه تنها ویسکوزیته سیال را افزایش داده، بلکه اغلب در اثر پمپ شدن، خرد می شوند. بنابراین نیاز به توسعه نانو کپسول های ماده تغییر فاز دهنده با اندازه کوچکتر نسبت به میکروکپسول ها، ضروری می باشد.

تکنولوژی نانو کپسول ها به طور گسترده‌ای در رنگ های پزشکی و عطرها استفاده می شود. روش پلیمریزاسیون در جا، یکی از روش های مناسب تولید نانو کپسول ها است [۲۰]. Zhang و همکارانش نوعی نانو کپسول ماده تغییر فاز دهنده را توسط پلیمریزاسیون در جا تهیه کردند که رزین ملامین- فرمالدهید به عنوان پوسته و TiO_2 اکتادکان/سیکلوهگزان به عنوان هسته در آن به کار رفته بود. اما بزرگی قطعات نانو کپسول هنوز به بزرگی ۷۷۰ نانومتر بود. پلیمریزاسیون مینی امولسیون روش یک مرحله ای مناسبی برای تولید نانو کپسول است. Park و همکارانش نانوذرات پلی استایرن حاوی ماده تغییر فاز دهنده پارافینی را از این روش تولید کردند [۲۱].

۱۰- کاربردهای منسوجات حاوی مواد تغییر فاز دهنده

کاربردهای منسوجات حاوی مواد تغییر فاز دهنده شامل البسه، پتو، پزشکی، عایق بندی، محافظتی و بسیاری دیگر است. در ادامه، مختصری از کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده در زمینه نساجی توضیح داده می شود.

۱۰-۱- فضاوردی

از نخستین مصارف تکنولوژی مواد تغییر فاز دهنده، استفاده در دستکش ها و لباس های فضاوردی است که از فضاوردان در برابر سرمای زیاد، محافظت می کند.

۱۰-۲- البسه ورزشی

گرمای تولید شده توسط بدن حین فعالیت ورزشی اغلب به مقدار لازم به محیط اطراف انتقال داده نشده و این امر باعث بروز تنش حرارتی می شود. وجود ماده تغییر فاز دهنده می تواند این گرمای اضافی را جذب نموده و در فرصت مناسب آن را آزاد کند. دستکش های اسنوبرد، لباس زیر و لباس کوهنوردی، لباس زیر برای دوچرخه سواری و دو، چکمه های اسکی، چکمه های کوهنوردی، چکمه های راننده های رالی، کلاه و دستکش موتورسواری و کفش گلف مثال هایی از کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده در البسه ورزشی می باشند.

۱۰-۳- لوازم خواب

میکروکپسول های تعبیه شده درون لحاف، بالش و تشک ها،

در برخی کاربردها به ویژه در بحث سیالات حامل انرژی، میکروکپسول‌های ماده تغییر فاز دهنده برای چرخه های مکرر مناسب نمی باشند. زیرا قطعات بزرگ ماده تغییر فاز دهنده میکروکپسول شده نه تنها ویسکوزیته سیال را افزایش داده، بلکه اغلب در اثر پمپ شدن، خرد می شوند. بنابراین نیاز به توسعه نانو کپسول های ماده تغییر فاز دهنده با اندازه کوچکتر نسبت به میکروکپسول ها، ضروری می باشد.

تکنولوژی نانو کپسول ها به طور گسترده‌ای در رنگ های پزشکی و عطرها استفاده می شود. روش پلیمریزاسیون در جا، یکی از روش های مناسب تولید نانو کپسول ها است [۲۰]. Zhang و همکارانش نوعی نانو کپسول ماده تغییر فاز دهنده را توسط پلیمریزاسیون در جا تهیه کردند که رزین ملامین- فرمالدهید به عنوان پوسته و TiO_2 اکتادکان/سیکلوهگزان به عنوان هسته در آن به کار رفته بود. اما بزرگی قطعات نانو کپسول هنوز به بزرگی ۷۷۰ نانومتر بود. پلیمریزاسیون مینی امولسیون روش یک مرحله ای مناسبی برای تولید نانو کپسول است. Park و همکارانش نانوذرات پلی استایرن حاوی ماده تغییر فاز دهنده پارافینی را از این روش تولید کردند [۲۱].

۹- آزمایش منسوجات حاوی مواد تغییر فاز دهنده

مورفولوژی ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده و ذوب نشده توسط میکروسکوپ نوری پلاریزه شده (POM)^۱ بررسی می شود. POM نشان می دهد که پیش از دمای انتقال کوپلیمر، با افزایش دما اسفروولیت ها تغییری نمی کنند؛ اما هنگامی که دما به نقطه انتقال می رسد، اسفروولیت ها کم رنگ شده و در نهایت ناپدید می شوند. تکنیک هایی که در حال حاضر برای اندازه گیری گرمای نهان ذوب و دمای ذوب استفاده می شوند، عبارتند از: DTA^۲ و DSC^۳. در روش های DTA و DSC، نمونه و ماده مرجع با نرخ ثابت حرارت داده می شوند. اختلاف دما بین آنها به نسبت اختلاف در شار حرارتی بین دو ماده و نمودار DSC است.

ماده مرجع توصیه شده آلومینا (Al_2O_3) است. گرمای نهان ذوب با محاسبه سطح زیر پیک مشخص شده و دمای ذوب توسط تانژانت نقطه ای که بیشترین شیب را در قسمت مربوط به پیک دارد، تخمین زده می شود.

از سوی دیگر، خواص تنظیم دمای منسوج حاوی ماده تغییر فاز دهنده توسط اندازه گیری نرخ سرمایش سطحی مشخص می شود. اندیس های قابلیت تنظیم حرارتی (ΔT_{td} و I_d)، عایق بندی حرارتی استاتیک (I_s)، و شدت حس ذهنی حرارتی (TPI)^۴ منسوجاتی که دارای ماده تغییر فاز دهنده هستند، توسط دستگاهی که تست هوشمند زیردست پارچه (FIHT)^۵ نامیده می شود اندازه گیری می شود. اندیس عایق بندی حرارتی استاتیک

1- Polarized Optical Microscopy
2- Differential thermal analysis

3- Differential scanning calorimetry
4- Thermal psychosensory intensity

5- Fabric Intelligent Hand Tester

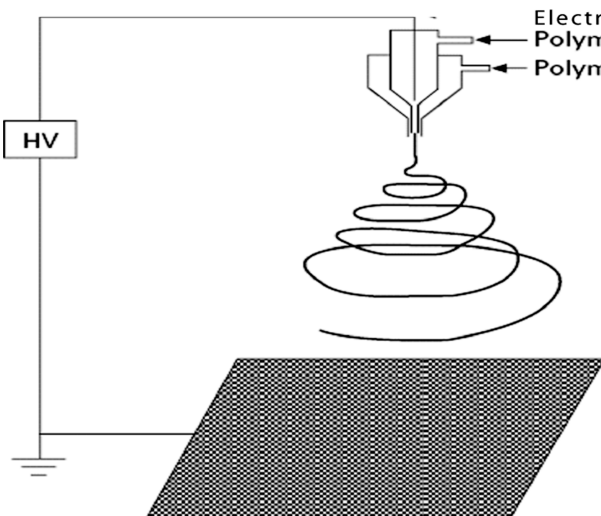
کمی از این الیاف دارای خاصیت تنظیم دما ایجاد خواهند شد. الکتروریسی روش جایگزین مناسبی برای رفع این نقیصه می باشد. به لحاظ تئوری، تقریباً تمام پلیمرهای محلول شامل کopolymerهای با شاخه های جانبی دارای وزن مولکولی به اندازه کافی بالا، می توانند الکتروریسی گردند. کاربرد نانوالیاف حاصله در زمینه های گوناگونی نظیر بهداشتی، بیوتکنولوژی، دفاعی و نظامی، محیط زیست، ذخیره و تولید انرژی می باشد [۲۵].

در پژوهشی که توسط Chen و همکارانش [۲۶] صورت گرفت، نمونه ای از این نانوالیاف تغییر فاز دهنده تهیه شد که در این نمونه از لوریک اسید که یک اسید چرب می باشد به عنوان ماده تغییر فاز دهنده، و از پلی اتیلن ترفتالات به عنوان پلیمر لیفی و ماده نگهدارنده استفاده شده بود.

این دو ماده با نسبت های مساوی در محلول ریسنده گی وجود داشته و نانوالیافی با قطر متوسط 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.

در پژوهش دیگری که توسط این افراد صورت گرفت، از استئاریل استئارات و پلی اتیلن ترفتالات استفاده گردید [۲۷]. برای نمونه، محلولی که نسبت استئاریل استئارات به پلی اتیلن ترفتالات در آن ۵۰ به ۱۰۰ بود، قطر متوسط نانوالیاف آن یک میکرومتر و آنتالپی ذوب این نمونه نانوالیاف نیز ۵۳/۷۷ ژول بر گرم گزارش شده است. تصویر SEM این نانوالیاف در شکل ۷ دیده می شود.

روش دیگر، الکتروریسی هم محور مذاب^۱ است که توسط McCann و همکارانش برای تولید نانوالیاف تغییر فاز دهنده استفاده شد که در این نانوالیاف، هسته شامل هیدروکربن با زنجیر بلند و پوسته دی اکسید تیتانیوم- پلی وینیل پیرولیدون می باشد [۲۸]. در این روش از نازلی مشابه شکل ۸ استفاده شد.



شکل ۸- دستگاه مورد استفاده در تولید نانوالیاف هسته- پوسته [۲۹]

کنترل فعال دما در رختخواب را امکان پذیر می سازند. هنگامی که بدن گرم می شود، گرمای اضافه جذب شده و بدن خنک می ماند و هنگامی که بدن سرد شود گرمای جذب شده آزاد شده و بدن همچنان گرم نگه داشته می شود.

۱۰-۴- کاربردهای پزشکی

پارچه های عمل شده با PEG در مصارف پزشکی و بهداشتی که انتقال مایعات و خواص ضد میکروبی مورد انتظار را تامین می نمایند (نظیر باندهای جراحی و پوشک)، قابل استفاده می باشند. همچنین منسوجات حاوی مواد تغییر فاز دهنده که می توانند دمای پوست را در محدوده راحتی ثابت نگه دارند، در بانداژها کاربرد دارند.

۱۰-۵- سایر کاربردها

مواد تغییر فاز دهنده در منسوجات مربوط به خودرو، نظیر روکش صندلی ها نیز استفاده می شود. روکش داخلی سقف اتومبیل، کلاه های ایمنی آتش نشانان و کارگران، لباس آتش نشانان و غواصان نمونه های دیگری از کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در نساجی می باشند.

۱۱- پایدارسازی ابعادی ماده تغییر فاز دهنده از طریق ساختار نانولیفی

ماده تغییر فاز دهنده دارای ثبات ابعادی نوعی ماده مرکب می باشد که از ماده تغییر فاز دهنده و ماده نگه دارنده تشکیل شده است. مزایای مهم این شکل از ماده تغییر فاز دهنده، استفاده مستقیم بدون نیاز به حبس داخل کیسولی، ارزش اقتصادی و سهولت تهیه در ابعاد دلخواه می باشد. امروزه نوع جدیدی از ماده تغییر فاز دهنده که دارای ثبات ابعادی از طریق الکتروریسی کامپوزیت پلیمر/ ماده تغییر فاز دهنده می باشند، به صورت الیاف بسیار ظریف (نانوالیاف) تهیه شده اند.

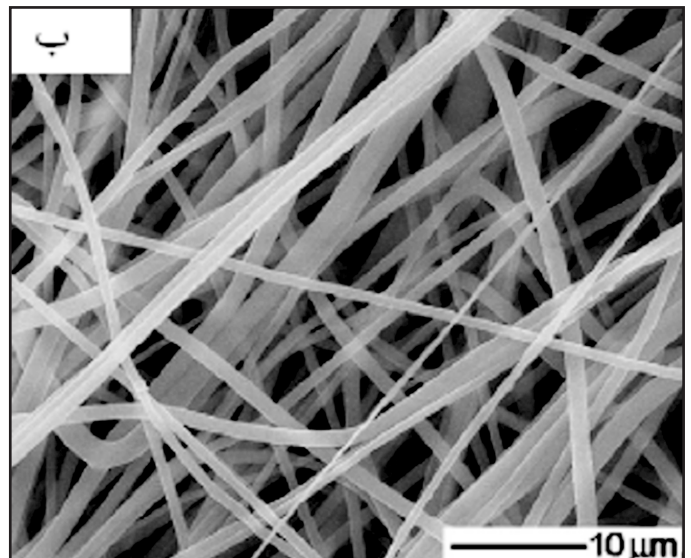
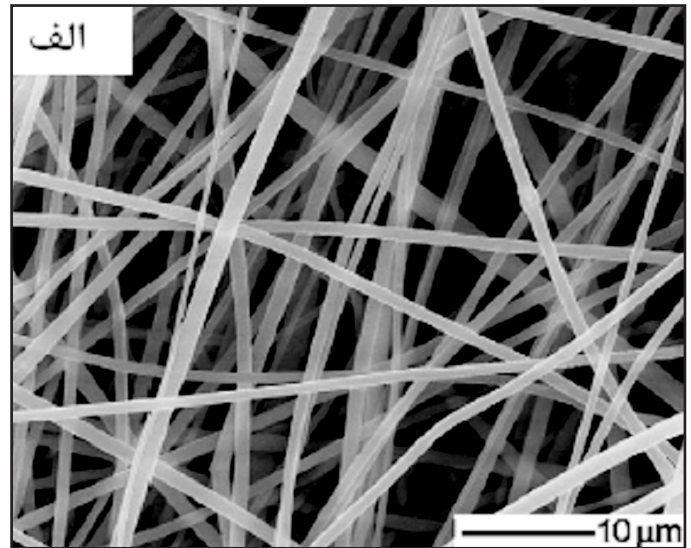
انواع مختلفی از الیاف دارای خاصیت تنظیم دما توسط روش های معمول ریسنده گی نظیر ذوب ریسی و ترریسی تهیه شده اند. Zhang و همکارانش با قرار دادن مواد تغییر فاز دهنده میکرو درون لیف از طریق ذوب ریسی و ترریسی، الیاف تنظیم کننده دما تولید نمودند [۲۴]. Hu و همکارانش نیز با کopolymerیزه نمودن پلی اتیلن گلیکول و پلی اتیلن ترفتالات و ذوب ریسی آن، الیاف تغییر فاز دهنده ای تولید کردند که خواص تغییر فاز جامد- جامد از خودش نشان می داد [۲۴].

محدوده دمای تغییر فاز و آنتالپی این الیاف توسط کنترل وزن مولکولی و نسبت ماده تغییر فاز دهنده افزوده شده، کنترل می شود. اما مشکل اصلی این روش های معمول ریسنده گی در آن است که به واسطه ضعیف بودن فرآیند پذیری بسیاری از پلیمرها و مواد تغییر فاز دهنده برای استفاده در این روش های ریسنده گی، تنها انواع

دستیابی به منابع جدید انرژی می باشد که البته پیش از استفاده عملی گسترده از این تکنولوژی، لازم است تا مسائل مختلفی در مرحله تحقیق و توسعه مورد بررسی قرار گیرد.

۱۳- مراجع

- [1] C. Liang, X. Lingling, S. Hongbo, Z. Zhibin, Microencapsulation of butyl stearate as a phase change material by interfacial polycondensation in a polyurea system, *Energy Conversion and Management*, 50, 723–729, 2009.
- [2] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Budhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318–345, 2009.
- [3] S. Mondal, Phase change materials for smart textiles—An overview, *Applied Thermal Engineering*, 28, 1536–1550, 2008.
- [4] J. Mengjin, S. Xiaoqing, X. Jianjun, Y. Guangdou, Preparation of a new thermal regulating fiber based on PVA and paraffin, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92, 1657–1660, 2008.
- [5] J. Baker, New technology and possible advances in energy storage, *Energy Policy*, 36, 4368–4373, 2008.
- [6] Q. Meng, J. Hu, A poly(ethylene glycol)-based smart phase change material, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92, 1260–1268, 2008.
- [7] A. F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2438–2458, 2008.
- [8] H. Mehling, L. F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM, Springer-Verlag Pub. Berlin, Heidelberg, 2008.
- [9] G. Nelson, Application of microencapsulation in textiles, *International Journal of Pharmaceutics*, 242, 55–62, 2002.
- [10] S. Kim, L. T. Drzal, High latent heat storage and high thermal conductive phase change materials using exfoliated graphite nanoplate-



شکل ۷- تصویر SEM نانوالیاف SS/PET: (الف) قبل و (ب) بعد از چرخه حرارتی [۲۷]

۱۲- آینده استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در نساجی

چالش های زیادی برای استفاده از این مواد پیش روی قرار دارد. به عنوان مثال، استفاده از این مواد و ترکیب آنها درون منسوج، نیاز به روش ها و استانداردهای جدیدی دارد. علاوه بر این، بهبود خواص مکانیکی، ماندگاری و کاربردپذیری این مواد نیز تحت شرایط مختلف، نیاز به زمان زیادی دارد. چالش اصلی توسعه ساختار منسوج- ماده تغییر فاز دهنده و روش کاربرد آنها می باشد. حبس داخل کپسولی ماده تغییر فاز دهنده درون پوسته پلیمری یک گزینه بدیهی است که باعث تحمیل مقداری وزن مرده به ماده فعال می شود. حبس داخل کپسولی کارآمد، بازده حبس داخل کپسولی، ثبات حین استفاده و تعبیه کپسول ها درون ساختار پارچه، برخی از موارد تکنولوژیکی بوده که باید مورد توجه قرار گیرند. چالش دیگری که در این باره مطرح است ماندگاری این محصولات پس از مصارف مکرر است. تلفیق فناوری نانوالیاف با دانش مواد تغییر فاز دهنده، فرصت مناسبی برای برطرف کردن مشکلات پیش رو و در نهایت،

- lets, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93, 136–142, 2009.
- [11] Z. Jin, Y. Wang, J. Liu, Z. Yang, Synthesis and properties of paraffin capsules as phase change materials, *Polymer*, 49, 2903–2910, 2008.
- [12] H. Liu, H. B. Awbi, Performance of phase change material boards under natural convection, *Building and Environment*, 44, 1788–1793, 2009.
- [13] W. Wang, X. Yang, Y. Fang, J. Ding, Preparation and performance of form-stable polyethylene glycol/silicon dioxide composites as solid-liquid phase change materials, *Applied Energy*, 86, 170–174, 2009.
- [14] V. Butala, U. Stritih, Experimental investigation of PCM cold storage, *Energy and Buildings*, 41, 354–359, 2009.
- [15] W. Wang, X. Yang, Y. Fang, J. Ding, J. Yan, Enhanced thermal conductivity and thermal performance of form-stable composite phase change materials by using β -Aluminum nitride, *Applied Energy*, 86, 1196–1200, 2009.
- [16] N. Sarier, E. Onder, The manufacture of microencapsulated phase change materials suitable for the design of thermally enhanced fabrics, *Thermochimica Acta*, 452, 149–160, 2007.
- [17] E. Onder, N. Sarier, E. Cimen, Encapsulation of phase change materials by complex coacervation to improve thermal performances of woven fabrics, *Thermochimica Acta*, 467, 63–72, 2008.
- [18] L. Xing, L. Hongyan, W. Shujun, Z. Lu, C. Hua, Preparation and thermal properties of form-stable paraffin phase change material encapsulation, *Solar Energy*, 80, 1561–1567, 2006.
- [19] C. Alkan, A. Sarı, A. Karaipekli, O. Uzun, Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93, 143–147, 2009.
- [20] G. Fang, H. Li, F. Yang, X. Liu, S. Wu, Preparation and characterization of nano-encapsulated n-tetradecane as phase change material for thermal energy storage, *Chemical Engineering Journal*, 153, 217–221, 2008.
- [21] Y. Fang, S. Kuang, X. Gao, Z. Zhang, Preparation and characterization of novel nanoencapsulated phase change materials, *Energy Conversion and Management*, 49, 3704–3707, 2008.
- [22] B. Ying, Y. Kwok, Y. Li, Q. Zhu, C. Yeung, Assessing the performance of textiles incorporating phase change materials, *Polymer Testing*, 23, 541–549, 2004.
- [23] M. Rady, Granular phase change materials for thermal energy storage: Experiments and numerical simulations, *Applied Thermal Engineering*, 29, 3149–3159, 2009.
- [24] C. Chen, L. Wang, Y. Huang, Electrospinning of thermo-regulating ultrafine fibers based on polyethylene glycol/cellulose acetate composite, *Polymer* 48, 5202–5207, 2007.
- [25] C. Chen, L. Wang, Y. Huang, Morphology and thermal properties of electrospun fatty acids/polyethylene terephthalate composite fibers as novel form-stable phase change materials, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92, 1382–1387, 2008.
- [26] C. Chen, L. Wang, Y. Huang, A novel shape-stabilized PCM: Electrospun ultrafine fibers based on lauric acid/polyethylene terephthalate composite, *Material letters*, 62, 3515–3517, 2008.
- [27] C. Chen, L. Wang, Y. Huang, Ultrafine electrospun fibers based on stearyl stearate/polyethylene terephthalate composite as form stable phase change materials, *Chemical engineering journal*, 150, 269–274, 2009.
- [28] C. Chen, L. Wang, Y. Huang, Crosslinking of the electrospun polyethylene glycol/cellulose acetate composite fibers as shape-stabilized phase change materials, *Materials letters*, 63, 569–571, 2009.
- [30] P. J. Brown, K. Stevens, *Nanofibers and Nanotechnology in Textiles*, Woodhead Publishing Limited, UK, 2007.