مقاله ترویجی

جلوگیری از افزایش دمای محصولات غذایی بسته‌بندی شده در زنجیره سرد با استفاده از مواد جاذب انرژی حرارتی

الهام آل‌حسینی [۱]، سید مهدی جعفری [۲×]

تاریخ دریافت مقاله: تیرماه ۱۳۹۸

تاریخ پذیرش مقاله: آبان ماه ۱۳۹۸

چکیده

استفاده از سامانه‌های ذخیره و انتقال انرژی گرمای نهان با استفاده از مواد تغییر فازدهنده راه‌حل مؤثری برای ذخیره و انتقال انرژی است که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجّه بوده است. این مواد در حین ایجاد تغییر فاز، انرژی حرارتی را ذخیره نموده و در موارد لزوم با تغییر فاز معکوس آن را آزاد می‌کنند. مواد تغییر فازدهنده قابلیت حفظ انرژی گرمای نهان را بدون هیچ گونه تغییری حتّی پس از هزاران چرخه فاز، در درون خود دارند. مواد تغییر فازدهنده جامد – مایع به سه دسته مواد آلی (واکس‌های پارافین، اسیدهای چرب و ...)، معدنی (نمک‌های هیدراته، فلزات و نمک‌ها) و یوتکتیک‌ها تقسیم می‌شوند. از سوی دیگر، بسته‌بندی‌های مواد غذایی نقش بسیار مهمی در حفاظت و نگهداری مواد غذایی در طی فرآیندهای ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و در نهایت تحویل آن به مصرف‌کننده بر عهده دارند. یکی از راه‌های افزایش عمر نگهداری محصولات غذایی، جلوگیری از نوسانات دمایی ماده غذایی در طی نگهداری و حمل‌ونقل، استفاده از مواد تغییر فاز در بسته‌بندی مواد غذایی می‌باشد. اخیراً استفاده از مواد تغییر فازدهنده در سامانه‌های انتقال و بسته‌بندی مواد غذایی (همچون گوشت، بستنی و ...) مورد توجّه محققین قرار گرفته است. در این مطالعه، ضمن معرفی مواد تغییر فازدهنده و انواع آن‌ها، به ارزیابی روش‌های تحقیقاتی انجام شده و کاربردهای آن‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی

بسته‌بندی مواد غذایی، حفظ کیفیت، مواد تغییر فازدهنده، نوسانات دمایی

۱- مقدمه

امروزه ضرورت و اهمیت بسته‌بندی مواد غذایی به منظور محافظت از کیفیت محتویات بسته از زمان تولید تا مصرف کاملاً مشخص است. به عبارت دیگر، بسته‌بندی از طریق کنترل انتقال جرم بین ماده غذایی، مواد بسته‌بندی و اتمسفر محیط از ایجاد آسیب‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در محصولات غذایی جلوگیری می‌کند [۱]. با توجّه به وابستگی پلیمرهای مصنوعی متنوع به سوخت‌های فسیلی، افزایش قیمت نفت و همچنین مشکلات زیست محیطی ایجاد شده توسط این مواد، مسئله ذخیره انرژی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در حال حاضر، یکی از چالش‌های کارشناسان،

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران(Elham.alehosseini@gmail.com).

۲- استاد گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

(× نویسنده مسئول: smjafari@gau.ac.ir).

ذخیره انرژی به شکل مناسب است که این امر منجر به ذخیره انرژی مازاد و اقتصادی‌تر شدن سامانه از طریق کاهش اتلاف انرژی و هزینه سرمایه می‌شود[۲]. به طور کلی دو سامانه ذخیره‌سازی انرژی حرارتی محسوس[1] و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان[2] وجود دارند که با توجّه به دوره ذخیره‌سازی مورد نیاز، می‌توانند استفاده شوند. در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی محسوس، گرما به محیط ذخیره‌کننده انتقال می‌یابد که منجر به یک افزایش دما در محیط ذخیره‌کننده می‌شود. انتقال حرارتی که در زمان تغییر حالت یک ماده از یک فاز به فاز دیگر صورت می‌گیرد، گرمای نهان نامیده می‌شود. تغییر گرمای نهان معمولاً از تغییر گرمای محسوس در یک دمای معین بسیار بیشتر است که به گرمای ویژهٔ آن بستگی دارد [۳، ٤]. به منظور مدیریت حرارتی در برخی از فرآیندهای حرارتی از گروهی از مواد که دارای ویژگی‌های مناسبی مانند گرمای نهان بالا، دمای تغییر فاز مناسب و تغییر حجم کم در هنگام تغییر فاز است، استفاده می‌شود. از این مواد اصطلاحاً به عنوان مواد تغییر فاز دهنده[3] نام برده می‌شود [٤].

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 اتّفاق 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 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 [۵]. از این رو، در ذخیره‌سازی گرمای نهان معمولاً از مواد تغییر فازدهنده جامد – مایع استفاده می‌شود که طی فرآیند تغییر حالت از جامد به مایع، انرژی را ذخیره می‌کنند. این مواد قابلیت حفظ انرژی گرمای نهان را بدون هیچ گونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه فاز، در درون خود دارند و از پیوندهای شیمیایی برای ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی استفاده می‌کنند [۶–۸]. به طور کلی از مواد تغییر فاز دهنده معمولاً زمانی استفاده می‌شود که بین زمان وجود انرژی و مصرف آن اختلاف وجود داشته باشد. از این مواد در صنایع مختلف از جمله ذخیره انرژی خورشیدی، مخابرات، الکترونیک، خودروها، ماهواره‌ها، پزشکی، پوشاک و نساجی، تثبیت‌کننده دما در حمل‌ونقل، صنایع غذایی، بسته‌بندی، ساختمان و ... استفاده می‌شود [٤].

با توجّه به این نکته که یکی از راه‌های افزایش عمر نگهداری محصولات غذایی، جلوگیری از نوسانات دمایی ماده غذایی در طی نگهداری و حمل‌ونقل است، بنابراین می‌توان از مواد تغییر فازدهنده در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده کرد، لذا در این مطالعه، ضمن معرفی مواد تغییر فازدهنده و انواع آن‌ها، به ارزیابی روش‌های تحقیقاتی صورت گرفته و کاربردهای آن‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی پرداخته می‌شود.

۲– مواد تغییر فازدهنده

مطالعه مواد تغییر فا دهنده از سال ۱۹۴۰ آغاز شد. این مواد، ترکیباتی هستند که قابلیت جذب و ذخیره نهان مقادیر زیادی از انرژی حرارتی را در خود دارند. ذخیره انرژی حرارتی در این مواد، در طی تغییر فاز (به عنوان مثال در مواد تغییر فازدهنده جامد – مایع، تغییر حالت از جامد به مایع و یا بالعکس) اتّفاق می‌افتد [۳، ۴، ۹]. مواد تغییر فازدهنده در مقایسه با مواد ذخیره‌کننده حرارت محسوس دارای دانسیته ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بالاتری می‌باشند و می‌توانند مقدار زیادی انرژی را در یک دمای ثابت جذب یا آزاد نمایند. مواد تغییر فازدهنده‌ای که در طراحی سامانه‌های ذخیره‌سازی حرارتی استفاده می‌شوند باید دارای ویژگی‌های حرارتی (دمای تغییر فاز مناسب، گرمای نهان تغییر فاز بالا و انتقال حرارت خوب)،

1- Sensible Thermal Energy Storage
2- Latent Thermal Energy Storage
3- Phase Changing Materials (PCMs)

سینتیکی (عدم فوق تبرید[1] و نرخ تبلور کافی)، فیزیکی (تعادل فازی مطلوب، تغییر حجم کم، چگالی بالا، فشار بخار پایین و تغییر فاز تجدیدپذیر[2])، شیمیایی (سازگار با مواد ساختاری سامانه، پایداری شیمیایی، عدم احتراق و عدم سمّیّت) و اقتصادی (قیمت پایین، در دسترس بودن و قابلیت بازیافت) باشند [۶، ۱۰-۱۲].

دمای کاربردی مواد تغییر فازدهنده بین ۴۰- تا ۱۱۷+ درجه سانتی‌گراد است. مواد تغییر فاز دهنده جامد – مایع بر مبنای دمای تغییر فاز به سه دسته مواد آلی، معدنی و یوتیکتیک تقسیم می‌شوند. دمای تغییر فاز یوتیکتیک‌ها کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد و دمای تغییر فاز مواد آلی و معدنی بالای صفر درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۶]. مواد تغییر فازی آلی شامل: واکس‌های پارافینی، اسیدهای چرب، الکل‌ها و گلیکول‌ها هستند. پارافین‌ها (هیدروکربن‌های خطی با زنجیره بلند) محصول فرعی پالایش نفت خام بوده و فرمول عمومی آن‌ها C_nH_{2n+2} می‌باشد. گرمای نهان ذوب این مواد مربوط به بلوری شدن زنجیره هیدروکربنی می‌باشد و نقطه ذوب و گرمای نهان ذوب آن‌ها با افزایش طول زنجیر افزایش می‌یابند. مواد تغییر فاز آلی در مقایسه با مواد تغییر فاز معدنی خواص انتقال حرارت پایین‌تر و چگالی کمی دارند [۶، ۱۳-۱۵].

مواد تغییر فازدهنده معدنی شامل: نمک‌های هیدراته، فلزات و نمک‌ها هستند. نمک‌های هیدراته مهم‌ترین گروه مواد تغییر فازدهنده هستند که به طور گسترده برای سامانه‌های ذخیره انرژی گرمایی نهان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. آن‌ها آلیاژ نمک معدنی و آب بوده و به شکل جامد بلوری با فرمول عمومی $AB.nH_2O$ می‌باشند. فرآیند تغییر فاز جامد – مایع در این مواد، به صورت آب‌زدایی و آب‌پوشی نمک است. از مهم‌ترین ویژگی‌های نمک‌های هیدراته می‌توان به گرمای نهان ذوب بالا به ازای واحد حجم و هدایت حرارتی نسبتاً بالا اشاره نمود [۶، ۱۰، ۱۶].

یوتیکتیک‌ها[3] ترکیبی از دو یا چند جزء می‌باشند که هر کدام از آن‌ها به صورت متجانس ذوب و منجمد شده و مخلوطی از بلورهای اجزاء را در طول تبلور تشکیل می‌دهند. یوتیکتیک به واسطه آنکه با ترکیب مشخصی از بلورها منجمد شده و اجزاء شانسی برای جدایی ندارند، تقریباً همواره بدون تفکیک، ذوب و منجمد می‌شوند [۶، ۱۰].

از آنجایی که مواد تغییر فازدهنده در طیف گسترده‌ای از نقاط ذوب وجود دارند، مهم‌ترین ویژگی تعیین‌کننده کاربرد این مواد، نقطه ذوب آن‌ها می‌باشد. معمولاً از مواد تغییر فازی که در دمای زیر ۱۵ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند، در خنک کردن و تهویه هوای اتاق استفاده می‌شوند. همچنین برای کاهش دما در مکان‌هایی که امکان بالا رفتن دما به صورت ناگهانی وجود دارد، از مواد تغییر فازدهنده‌ای که در بالای ۹۰ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند، استفاده می‌شود [۱۷، ۱۸]. علاوه بر نقطه ذوب مواد تغییر فازدهنده، در طراحی سامانه‌های ذخیره انرژی حرارتی که بر مبنای این مواد عمل می‌کنند، باید مواردی مانند مناسب بودن ماده تغییر فازدهنده با دمای ذوب مورد نظر، استفاده از مبدل حرارتی با سطح تبادل حرارتی مناسب و همچنین به کارگیری محفظه نگهدارنده ماده تغییر فازدهنده که قابلیت جذب تغییرات حجم این مواد به هنگام تغییر فاز را داشته باشد، در نظر گرفت [۱۹].

۳- عملکرد مواد تغییر فازدهنده جامد – مایع

این مواد تغییر فازدهنده برای ذخیره انرژی حرارتی، در طی فرآیند گرم شدن محیط، به صورت موازی با محیط گرم می‌شوند، تا زمانی که به دمای تغییر فاز خود (ذوب) برسند.

۱- فوق تبرید اثری است که در آن، دما به صورت قابل توجّهی به زیر دمای ذوب می‌رسد، تا زمانی که ماده شروع به انجماد و آزادسازی گرما نماید. اگر به این دما نرسیم، ماده تغییر فاز منجمد نشده و تنها گرمای محسوس را ذخیره می‌کند.

2- Cycling Stability

3- Eutectics

شکل ۱- عملکرد مواد تغییر فاز دهنده جامد- مایع

پس از رسیدن به این دما، علی‌رغم اینکه دمای محیط همچنان افزایش می‌یابد، دمای این مواد و البته محیط اطراف آن‌ها ثابت بوده و در برابر افزایش دما مقاومت می‌کنند. در طی این بازه زمانی که معمولاً چندین ساعت به طول می‌انجامد، ماده تغییر فازدهنده مقدار زیادی حرارت را در خود جذب نموده و این حرارت را صرف تغییر فاز خود از حالت جامد به مایع نموده و در حین انجام این فرآیند، دمای خود و محیط اطراف خود را ثابت نگه می‌دارد(شکل ۱) [۸].

٤- روش‌های استفاده از مواد تغییر فازدهنده

به دلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی اکثر مواد تغییر فازدهنده رایج در صنعت، استفاده از آن‌ها موجب کاهش کارایی و بازده در سامانه‌های ذخیره انرژی حرارتی می‌شود و در نتیجه چنین سامانه‌هایی با عدم توجیه اقتصادی مناسب روبرو می‌باشند. به منظور ارتقای کارایی در این سامانه‌ها می‌توان از روش‌هایی همچون: سطوح گسترش یافته، چند ماده تغییر فازدهنده، میکرو[1] و نانو[2] کپسوله کردن و افزایش هدایت حرارتی این مواد استفاده نمود. هدایت حرارتی مواد تغییر فازدهنده با استفاده از پرکننده‌های فلزی، نانوالیاف کربن یا فیلترهای الیاف و ... تقویت می‌شود. نانوالیاف کربن در برابر خوردگی شیمیایی مقاومت بالایی داشته و با اغلب مواد تغییر فازدهنده سازگار هستند [۲۰]. همچنین هدایت حرارتی این الیاف به طور قابل توجّهی بالا بوده و چگالی آن‌ها کمتر از فلزاتی است که معمولاً به عنوان افزودنی استفاده می‌شوند [۲۱].

علاوه بر این، با توجّه به قابلیت جاری شدن و نشت مواد تغییر فازدهنده در فاز مایع، معمولاً این مواد به صورت ماکرو[3]، میکرو و یا نانو کپسوله می‌شوند که تفاوت آن‌ها در اندازه کپسول‌های تولیدی می‌باشد. در فرآیند کپسول نمودن مواد تغییر فازدهنده، هسته معمولاً شامل ماده تغییر فازدهنده، کسر کوچکی از مواد با قابلیت هدایت حرارتی بسیار بالا و نانوذرّاتی با نقطه ذوب بالاتر نسبت به مواد تغییر فازدهنده می‌باشند. پوسته نیز لایه نازکی از نانوذرّات خنثی با قابلیت هدایت حرارتی بالا می‌باشد.

مواد تغییر فازدهنده موجود در هسته کپسول‌ها می‌توانند در حین تغییر فاز، انرژی حرارتی نهان را جذب و آزاد نمایند. کپسول‌های تولیدی می‌توانند به صورت تک هسته (هسته توسط پوسته احاطه شده است)، چند هسته

1- Micro Capsule
2- Nano Capsule
3- Macro Capsule

(تعداد زیادی هسته در داخل یک پوسته قرار دارند) و ماده زمینه (ماده هسته به طور یکنواخت در ماده پوسته توزیع شده است) باشند [۳، ۱۰].

برای حل مشکل اشتعال‌پذیری پارافین می‌توان از هیدروکسیدهای فلزی مانند هیدروکسید منیزیم و تری هیدرات آلومینیوم استفاده کرد. این هیدروکسیدها به صورت پودر نانومتری به مواد تغییر فازدهنده اضافه می‌شوند. همچنین به دلیل سمّی بودن رزین‌های فرمالدهید از مواد معدنی مانند دی‌اکسید سیلیکون[1] به عنوان پوسته استفاده می‌شود و مواد تغییر فازدهنده مانند پارافین در درون آن قرار می‌گیرد [۲۲].

علاوه بر این، برای پایداری ماده تغییر فازدهنده می‌توان از ساختار نانوالیاف این مواد استفاده نمود. امروزه نوع جدیدی از ثبات ابعادی از طریق الکتروریسی[2] ماده تغییر فازدهنده و کامپوزیت پلیمر انجام شده است [۲۳].

مواد تغییر فاز دهنده دارای پتانسیل‌های کاربردی زیادی در زمینه کنترل حرارتی[3] و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی[4] که تفاوت اصلی در این دو زمینه مربوط به ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فازدهنده است. در برخی از کاربردهای این مواد در زمینه کنترل حرارتی، بهتر است از مواد تغییر فازدهنده‌ای با ضریب هدایت حرارتی پایین استفاده شود. این در حالی است که استفاده از مواد تغییر فازدهنده با ضریب هدایت حرارتی پایین، یک مشکل اساسی در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی محسوب می‌شوند [۴].

۵- کاربرد مواد تغییر فازدهنده در بسته‌بندی مواد غذایی

در صنایع غذایی از مواد تغییر فازدهنده برای مدیریت، ذخیره‌سازی و نقل و انتقال انرژی در بخش‌هایی مانند فرآیندهای حرارتی، چیلرها، مخازن دوجداره نگهداری غذایی و ... استفاده می‌شود (شکل ۲) [۴، ۲۴-۲۷].

شکل ۲- کاربرد مواد تغییر فازدهنده در صنایع غذایی

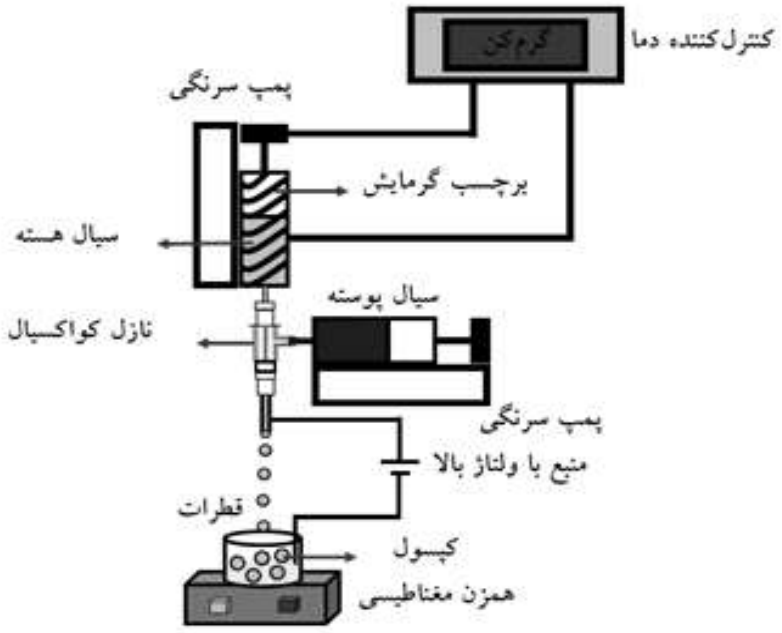
1- Silicon Dioxide (SiO_2)
2- Electrospinning
3- Thermal Control
4- Thermal Energy Storage

دیواهستین و پیتاکسوریرت[1](۲۰۰۶) اثرات استفاده از پارافین به عنوان ماده تغییر فازدهنده را برای ذخیره‌سازی گرمای نهان در طی فرآیند خشک کردن سیب‌زمینی شیرین مورد بررسی قرار دادند. سامانه آن‌ها از یک کمپرسور[2]، کنترل‌کننده دما، گرمکن و یک ظرف استوانه‌ای برای ذخیره گرمای نهان تشکیل شده بود. نتایج نشان داد که سامانه‌های ذخیره گرمای نهان می‌توانند انرژی را به هنگام خشک کردن سیب‌زمینی شیرین در حدود ۳۴ و ۴۰ درصد در هنگام استفاده از سرعت هوای ورودی ۱ و ۲ متر بر ثانیه ذخیره کنند [۲۸]. همچنین بال[3] و همکاران (۲۰۰۹) نیز از پارافین به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده در طراحی یک خشک‌کن خورشیدی استفاده کردند. آن‌ها بیان نمودند که می‌توان از این سامانه برای خشک نمودن محصولات کشاورزی در دماهای یکنواخت و متوسط در حدود ۴۵ تا ۷۵ درجه سانتی‌گراد استفاده کرد [۲۹]. در تحقیقی دیگر، از سیلیکات کلسیم نانو ساختار[4](NCS) و روبی‌ترم[5] *RT6* (با نقطه ذوب ۸ درجه سانتی‌گراد) برای بهبود ظرفیت بافر حرارتی در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده شد. نتایج نشان داد که دمای داخل بسته برای مدّت ۵ ساعت در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته می‌شود؛ این در حالی است که دمای بیرون تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است [۳۰]. در مطالعهٔ دیگری از لوله‌های حرارتی حاوی مواد تغییر فازدهنده در طراحی یخچال‌های ویترینی استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از مواد تغییر فازدهنده موجب بهبود توزیع دمای ماده غذایی می‌شود [۳۱]. ۰ سینتیک[6] خشک کردن انگور دانه‌دار در یک خشک‌کن خورشیدی بررسی شد. این خشک‌کن از یک اتاقک مخصوص خشک کردن، یک کلکتور[7] هوای خورشیدی و کلکتور دیگر حاوی ماده تغییر فازدهنده تشکیل شده بود [۳۲]. در تحقیقی دیگر، ایساککیموتو[8] و همکاران (۲۰۱۳) از مواد تغییر فازدهنده در طراحی یک خشک‌کن خورشیدی استفاده کرده و بیان نمودند که راندمان کلکتور با کاهش شدّت جریان جرمی افزایش می‌یابد و این افزایش می‌تواند با کاهش در اتلاف حرارت همراه با کاهش دمای متوسط کلکتور در ارتباط باشد [۳۳]. پریز- ماسیا[9] و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش الکتروریسی میکرو و نانو ساختارهایی را بر پایه زئین و دودکان (نوعی پارافین با دمای انتقال ۱۰- درجه سانتی‌گراد) تولید کردند. آن‌ها بیان نمودند که می‌توان از ساختارهای تولید شده در بسته‌بندی‌های هوشمند مواد غذایی (برای کنترل دمای نگهداری به خصوص در زنجیره سرد مواد غذایی) استفاده کرد [۳۴]. همچنین آن‌ها در مطالعه‌ای دیگر از پلی‌کاپرولاکتون[10] و پلی‌لاکتید[11] به همراه دودکان به عنوان ماده تغییر فازدهنده استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ساختارهای حاوی مواد تغییر فازدهنده موجب بهبود چشمگیری در ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی می‌شوند و می‌توانند در بسته‌بندی‌های هوشمند مواد غذایی، دارویی و پزشکی مورد استفاده قرار گیرند [۳۵]. اُرا[12] و همکاران (۲۰۱۳) بیان کردند که استفاده از مواد تغییر فازدهنده (*RT-2*) در ظروف نگهداری غذا می‌تواند موجب ثابت نگهداشتن دمای محصول در زمان‌های طولانی‌تر شود [۲۷]. در تحقیقی از E-21 به عنوان مواد تغییر فازدهنده در ظروف نگهداری بستنی استفاده شد. نتایج نشان داد که طراحی ظروفی که در آن‌ها از ۱۰ میلی‌متر ماده تغییر فازدهنده در زیر و ۲۰ میلی‌متر در اطراف استفاده شده بود، موجب حفظ بهتر کیفیت بستنی در طی نگهداری می‌شود [۲۶]. چالکو ساندووال[13] و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش الکتروهیدودینامیک ساختارهایی را بر پایه مواد تغییر فازدهنده (ترکیب *RT-4*:*RT4* با نسبت ۴۶:۵۴ (وزنی/وزنی) و با دمای انتقال

1- Devahastin and Pitaksuriyarat
2- Compressor
3- Bal
4- Nano-Structured Calcium Silicate (NCS)
5- *Rubitherm*
6- Kinetics
7- Collector
8- Esakkimuthu
9- Pérez-Masiá
10- Polycaprolactone
11- Polylactide
12- Oró
13- Chalco-Sandoval

فاز ۱/۵- درجه سانتی‌گراد) و پلی‌کاپرولاکتون، پلی‌استایرن[1] و پلی‌استایرن مقاوم[2] تولید نمودند. نتایج نشان داد که می‌توان از این ساختارها در سامانه‌های ذخیره انرژی برای کاربردهای سرد کردن مواد غذایی استفاده کرد [۳۶]. امیدی ارجنکی[3] (۱۳۹۵) از تترادکان به عنوان ماده تغییر فازدهنده در بسته‌بندی گوشت برای جلوگیری از نوسانات دمایی در طی حمل‌ونقل استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با قرار دادن تترادکان در همه حالات (بالا - پایین، پایین و بالای گوشت) می‌توان تا حدودی دمای سرد گوشت و کیفیت آن را حفظ نمود و تترادکان[4] به هنگام مواجه گوشت با دماهای پایین (۵/۱۲ درجه سانتی‌گراد) قابلیت بیشتری در حفظ دمای سرد نسبت به زمانی که گوشت در دماهای بالا (۳۰ درجه سانتی‌گراد) قرار می‌گیرد، دارد. همچنین با قرار گرفتن تترادکان در هر دو قسمت گوشت میزان ماندگاری در دمای سرد بیشتر از بقیه حالات قرارگیری ماده تغییر فازدهنده بود[۳۷].

جنت‌خواه[5] و همکاران(۱۳۹۶) از مواد تغییر فازدهنده با دمای تغییر فاز ۵۱ تا ۵۳ درجه سانتی‌گراد در محفظه یک خشک‌کن خورشیدی جهت ذخیره‌سازی حرارت استفاده نمودند. هنگامی که دمای محفظه خشک‌کن به بیش از ۵۳ درجه سانتی‌گراد رسید، مواد تغییر فاز داده، انرژی حرارتی ذخیره شده خود را به محفظه خشک‌کن دادند و تا حدودی از افت دمای محفظه جلوگیری نمودند [۳۸]. در تحقیقی دیگر، چالکو ساندووال و همکاران (۲۰۱۷) الیافی با استفاده از روبیترم *RT5* به عنوان ماده تغییر فازدهنده (نوعی پارافین با دمای انتقال ۵ درجه سانتی‌گراد) و پلی‌استایرن تولید نموده (بازده کپسول‌سازی حدود ۷۸ درصد) و بیان کردند که الیاف تولیدی ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی را بهبود می‌بخشد [۳۹]. شماتیکی از الکتروریسی مواد تغییر فازدهنده در (شکل ۳) آورده شده است.



شکل ۳- الکتروریسی مواد تغییر فازدهنده

1- Polystyrene
2- High-Impact Polystyrene
3- Omidyarjanki
4- Tetradecane
5- Jannatkhah

٦- نتیجه گیری

هدف اصلی از بسته‌بندی، حفظ و نگهداری ویژگی‌های محصولات غذایی درون بسته است. مواد تغییر فازدهنده دارای پتانسیل‌های کاربردی زیادی در زمینه کنترل حرارتی و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی می‌باشند. مواد تغییر فازدهنده در اثر تغییر فاز، انرژی را جذب نموده و در زمان بعدی با تغییر فاز معکوس آن را آزاد می‌نمایند. این مواد در واقع گرمای نهان را ذخیره می‌نمایند و از پیوندهای شیمیایی برای ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی حرارتی استفاده می‌کنند که نقش مهمی در افزایش بازدهی، صرفه‌جویی در مصرف و جلوگیری از هدر رفتن انرژی دارند، لذا یکی از راه‌های افزایش عمر نگهداری محصولات غذایی و جلوگیری از نوسانات دمایی ماده غذایی در طی نگهداری و حمل‌ونقل، استفاده از مواد تغییر فازدهنده در بسته‌بندی مواد غذایی می‌باشد. اخیراً به کارگیری مواد تغییر فازدهنده در سامانه‌های انتقال و بسته‌بندی مواد غذایی همچون: گوشت، بستنی و ... مورد توجّه محققین قرار گرفته است.

۷- منابع

1. Robertson, G. L. (2005). "***Food packaging: Principles and practice.***" CRC press.
2. Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C., & Buddhi, D. (2009). "**Review on thermal energy storage with phase change materials and applications.**" Renewable and Sustainable energy reviews, 13(2), 318.
3. Zhang, N., Yuan, Y., Cao, X., Du, Y., Zhang, Z., & Gui, Y. (2018). "**Latent heat thermal energy storage systems with solid–liquid phase change materials: A review.**" Advanced Engineering Materials.
4. Fleischer, A. S. (2015). "***Thermal energy storage using phase change materials: Fundamentals and applications.***" Springer.
5. Al Shannaq, R., & Farid, M. (2015). "**Microencapsulation of phase change materials (pcms) for thermal energy storage systems.**" In Advances in thermal energy storage systems, (pp. 247): Elsevier.
6. Su, W., Darkwa, J., & Kokogiannakis, G. (2015). "**Review of solid–liquid phase change materials and their encapsulation technologies.**" Renewable and Sustainable energy reviews, 48, 373.
7. Demirbas, M. F. (2006). "**Thermal energy storage and phase change materials: An overview.**" Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 1(1), 85.
8. Mondal, S. (2008). "**Phase change materials for smart textiles–an overview.**" Applied Thermal Engineering, 28(11-12), 1536.
9. Tay, N. H. S., Liu, M., Belusko, M., & Bruno, F. (2017). "**Review on transportable phase change material in thermal energy storage systems.**" Renewable and Sustainable energy reviews, 75, 264.
10. Giro-Paloma, J., Martínez, M., Cabeza, L. F., & Fernández, A. I. (2016). "**Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (mpcm): A review.**" Renewable and Sustainable energy reviews, 53, 1059.
11. Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). "**Phase change materials for thermal energy storage.**" Progress in materials science, 65, 67.
12. Oró, E., de Gracia, A., Castell, A., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). "**Review on phase change materials (pcms) for cold thermal energy storage applications.**" Applied Energy, 99, 513.

13. Jin, Z., Wang, Y., Liu, J., & Yang, Z. (2008). **"Synthesis and properties of paraffin capsules as phase change materials."** Polymer, 49(12), 2903.
14. Kim, S., & Drzal, L. T. (2009). **"High latent heat storage and high thermal conductive phase change materials using exfoliated graphite nanoplatelets."** Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(1), 136.
15. Liu, H., & Awbi, H. B. (2009). **"Performance of phase change material boards under natural convection."** Building and Environment, 44(9), 1788.
16. Zhang, G. H., Bon, S. A. F., & Zhao, C. Y. (2012). **"Synthesis, characterization and thermal properties of novel nanoencapsulated phase change materials for thermal energy storage."** Solar Energy, 86(5), 1149.
17. Elgafy, A., & Lafdi, K. (2005). **"Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials."** Carbon, 43(15), 3067.
18. Rahimi, M., Ranjbar, A., Ganji, D., Sedighi, K., & Hosseini, M. (2014). **"Experimental investigation of phase change inside a finned-tube heat exchanger."** Journal of Engineering, 2014.
19. Nagano, K., Takeda, S., Mochida, T., Shimakura, K., & Nakamura, T. (2006). **"Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building mass thermal storage—heat response in small scale experiments."** Energy and Buildings, 38(5), 436.
20. Zhang, D., Tian, S., & Xiao, D., (2006). **"Pcm/nano-graphite composite and its application as thermal energy storage in green building in china."** In International Conference" The case of energy autonomy: Storing Renewable Energies"(IRES I), Gelsenkirchen/Germany, (pp. 31).
21. Butala, V., & Stritih, U. (2009). **"Experimental investigation of pcm cold storage."** Energy and Buildings, 41(3), 354.
22. Sioshansi, R., & Denholm, P. (2010). **"The value of concentrating solar power and thermal energy storage."** IEEE Transactions on Sustainable Energy, 1(3), 173.
23. Wu, Y., Chen, C., Jia, Y., Wu, J., Huang, Y., & Wang, L. (2018). **"Review on electrospun ultrafine phase change fibers (pcfs) for thermal energy storage."** Applied Energy, 210, 167.
24. Lu, W., & Tassou, S. (2013). **"Characterization and experimental investigation of phase change materials for chilled food refrigerated cabinet applications."** Applied Energy, 112, 1376.
25. Oro, E., Miro, L., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). **"Thermal analysis of a low temperature storage unit using phase change materials without refrigeration system."** International journal of refrigeration, 35(6), 1709.
26. Oró, E., De Gracia, A., & Cabeza, L. F. (2013). **"Active phase change material package for thermal protection of ice cream containers."** International journal of refrigeration, 36(1), 102.
27. Oró, E., Cabeza, L. F., & Farid, M. M. (2013). **"Experimental and numerical analysis of a chilly bin incorporating phase change material."** Applied Thermal Engineering, 58(1-2), 61.

28. Devahastin, S., & Pitaksuriyarat, S. (2006). **"Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product."** Applied Thermal Engineering, 26(14-15), 1705.
29. Bal, L., Sudhakar, P., Satya, S., & Naik, S., (2009). **"Solar dryer with latent heat storage systems for drying agricultural food products."** In Proceedings of the international conference on food security and environmental sustainability).
30. Johnston, J. H., Grindrod, J. E., Dodds, M., & Schimitschek, K. (2008). **"Composite nano-structured calcium silicate phase change materials for thermal buffering in food packaging."** Current Applied Physics, 8(3-4), 508.
31. Lu, Y., Zhang, W., Yuan, P., Xue, M., Qu, Z., & Tao, W. (2010). **"Experimental study of heat transfer intensification by using a novel combined shelf in food refrigerated display cabinets (experimental study of a novel cabinets)."** Applied Thermal Engineering, 30(2-3), 85.
32. Çakmak, G., & Yıldız, C. (2011). **"The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with pcm-based solar integrated collector."** Food and bioproducts processing, 89(2), 103.
33. Esakkimuthu, S., Hassabou, A. H., Palaniappan, C., Spinnler, M., Blumenberg, J., & Velraj, R. (2013). **"Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications."** Solar Energy, 88, 144.
34. Pérez-Masiá, R., López-Rubio, A., & Lagarón, J. M. (2013). **"Development of zein-based heat-management structures for smart food packaging."** Food Hydrocolloids, 30(1), 182.
35. Perez- Masia, R., Lopez- Rubio, A., Fabra, M. J., & Lagaron, J. M. (2013). **"Biodegradable polyester- based heat management materials of interest in refrigeration and smart packaging coatings."** Journal of Applied Polymer Science, 130(5), 3251.
36. Chalco-Sandoval, W., Fabra, M. J., López-Rubio, A., & Lagaron, J. M. (2015). **"Optimization of solvents for the encapsulation of a phase change material in polymeric matrices by electro-hydrodynamic processing of interest in temperature buffering food applications."** European polymer journal, 72, 23.
37. Omidyarjanki, N., Soltanizadeh, N., & Hamdami, N., (2016). **"Feasibility of using phase change materials to maintain meat temperature during temperature fluctuations."** In The first international congress and the 24th national congress of food science and technology of Iran. (In Persian)
38. Jannatkhah, J., Ghaebi, H., & Najafi, B. (2017). **"Development and evaluation of a solar dryer augmented with phase change materials (pcm)."** Agricultural mechanization and systems research, 18(68), 89. (In Persian)
39. Chalco-Sandoval, W., Fabra, M. J., López-Rubio, A., & Lagaron, J. M. (2017). **"Use of phase change materials to develop electrospun coatings of interest in food packaging applications."** Journal of Food Engineering, 192, 122.

آدرس نویسنده

گلستان – گرگان – میدان بسیج – دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان– دانشکده صنایع غذایی