

مروری بر مدیریت هوشمند انرژی در صنایع نفت و گاز با نانوجندسازه مواد تغییر فاز دهنده

عزیز باباپور^{۱*}، میلاد مقدم^۲، محمد شفقتی^۳، علی شکوری^۲، میلاد محمد نیا^۲ و زینب قربانی^۲

۱. استاد گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۳. دانشجوی دکتری گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

دریافت: بهمن ۱۴۰۳ بازنگری: اسفند ۱۴۰۳ پذیرش: اسفند ۱۴۰۳



<https://doi.org/10.30495/JACR1.1404.1198816>

چکیده

امروزه باتوجه به افزایش نیاز به انرژی و محدودیت سوخت‌های فسیلی به‌عنوان منابع رو به اتمام و آلاینده محیط‌زیست، نیاز به منابع انرژی تجدیدپذیر بیشتر از پیش احساس می‌شود. یک‌سوم کل انرژی مصرف‌شده در جامعه را بخش صنعت تشکیل می‌دهد که بخش چشمگیری از آن در نهایت به‌دلیل ناکارآمدی تبدیل به گرمای تلف‌شده می‌شود. یکی از انرژی‌هایی که کاربردی روبه افزایشی دارد، انرژی گرمایی است. برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی می‌توان از روش‌های متفاوتی مانند مواد تغییر فاز دهنده استفاده کرد که حین تغییر فاز، انرژی گرمایی را ذخیره و به‌هنگام نیاز آزاد کند. برای افزایش کارایی از نانوجندسازه مواد تغییر فاز دهنده که اثرهای گوناگونی مانند افزایش ظرفیت گرمایی، افزایش ضریب انتقال گرما، پایداری گرمایی و شیمیایی دارند، می‌توان در صنایع متفاوت مانند صنایع نفت و گاز استفاده کرد. در این پژوهش، به بررسی انواع ذخیره‌سازی انرژی گرمایی با تکیه بر نانوجندسازه مواد تغییر فاز دهنده در صنایع نفت و گاز پرداخته شده است. در این راستا، مقایسه بین دو نوع نانوذره در فرایند ذوب مواد تغییر فاز دهنده در شرایط متفاوت و بررسی بازده گرمایی آن‌ها صورت پذیرفته است.

واژه‌های کلیدی: نفت، گاز، مواد تغییر فاز دهنده، نانوجندسازه‌ها.

مقدمه

که می‌توانند در ذخیره انرژی گرمایی هم مؤثر باشند. یکی از مهم‌ترین مزایای مواد تغییر فاز دهنده در دما و حجم ثابت، تراکم ذخیره‌سازی گرمایی بالای آن‌ها است. جذب گرما به‌وسیله این مواد را حالت ذوب و فرایند گرمادهی این مواد به محیط را انجماد یا جامدسازی می‌گویند. در نتیجه این مبادله گرمایی،

امروزه به‌دلیل افزایش مصرف انرژی و کاهش منابع انرژی تجدیدناپذیر، استفاده از روش‌های جدید برای بالابردن بازدهی و جلوگیری از اتلاف انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مواد تغییر فاز دهنده بازدهی بالایی در سامانه‌های گرمایی دارند

کافی انرژی در دسترس باشد؛ ولی سامانه قادر به استفاده از آن با نرخ موردنیاز نباشد. باتوجه به مشکل رسانندگی گرمایی کم PCM چندین طرح و سامانه برای افزایش انتقال گرما هم به صورت عددی و هم به صورت تجربی ارائه شده است. مطالعه‌های افزایش انتقال گرما PCMها را می‌توان به صورت قراردادن PCM در یک فلز، افزودن ذره‌های فلزی با رسانندگی گرمایی بالاتر از مواد تغییرفازدهنده، ماکرو و میکرو پوشینه‌دارسازی PCM، استفاده از ماده چندسازه -گرافیت PCM و استفاده از لوله‌های پره‌دار، گروه‌بندی کرد [۷ و ۹].

در سال‌های اخیر، به مواد چندسازه‌ای بسیار با الیاف فیبری تقویت شده (FPR^۳)، به علت مقاومت خوب در برابر خوردگی و ویژگی انعطاف‌پذیری زیاد در طراحی، توجه ویژه‌ای شده است. متأسفانه چندسازه‌ها محدودیت‌هایی مانند: ویژگی تأثیر، قیمت، اشتعال‌پذیری دارند. به همین دلیل گروه جدیدی از نانочندسازه‌ها مطرح شده‌اند. نانочندسازه به طور گسترده به عنوان شامل یک نانوماده افزودنی در یک بستر است. نسبت بالای این نانوافزودنی‌ها در نانочندسازه‌ها موجب افزایش قابل توجه ویژگی مکانیکی و گرمایی بسیار بسترها می‌شود و کمترین تأثیر را بر هزینه و فرایندپذیری دارند. متداول‌ترین نوع نانочندسازه‌هایی که امروزه مطالعه می‌شوند، برپایه رس‌های سیلیکات لایه‌ای بسیاری طبیعی هستند که از ادغام یک بسیار در خاک رس ایجاد می‌شوند. از دیگر مواد افزودنی که در حال حاضر به طور فعال مطالعه می‌شوند، نانوالیاف‌هایی مانند نانوالیاف کربن و نانولوله‌ها هستند [۱۰ تا ۱۲].

ذخیره‌سازی/انرژی با مواد تغییرفازدهنده

مواد تغییرفازدهنده موادی هستند که در دمای ویژه‌ای ذوب و یا منجمد می‌شوند. این مواد قابلیت ذخیره‌سازی مقدار زیادی انرژی به دلیل تغییرفاز خود را دارند. گرمایی که در این مواد به دلیل تغییر فاز (گرمای نهان) ذخیره می‌شود به مراتب بالاتر از گرمای ذخیره‌شده به دلیل تغییر دما (گرمای محسوس)

نخستین تغییر از جامد به مایع و یا برعکس است. ذخیره‌سازی انرژی به دو صورت استفاده از گرمای محسوس و گرمای نهان انجام می‌گیرد. ذخیره‌سازی انرژی به روش گرمای محسوس با تغییرهای دما و در روش گرمای نهان با تغییر فاز انجام می‌شود [۱ و ۲]. مطالعه بر روی مواد تغییرفازدهنده در سال ۱۹۴۹ توسط تلکس و ریموند^۱ [۳] انجام شده بود که تا دهه ۷۰ به آن توجه زیادی نشد. در سال ۱۹۷۱ مطالعه‌ای بر روی طراحی سامانه حفاظت گرمایی برای آزمایشگاه و خودرو فضایی (ماه‌پیما)، توسط هیل، هوور و اونیل^۲ انجام شد [۴]. در سال‌های پایانی دهه ۷۰ مطالعاتی بر روی چگونگی استفاده از ذخیره‌سازی گرمایی بر پایه مواد تغییرفازدهنده در مقیاس کوچک برای سفینه‌های فضایی و پس از آن در مقیاس بزرگ برای ساختمان‌ها و سامانه‌های انرژی خورشیدی برای مقابله با بحران انرژی در جهان انجام شد [۵ و ۶]. مطالعه‌های زیادی در مورد ویژگی‌ها و کارکردهای آن‌ها انجام شده است. به طور عمده باتوجه به چگالی ذخیره انرژی بالا در طول تغییر فاز در داخل گستره دمایی کوچک، برای مثال، ۸۰ برابر گرمای بیشتر برای افزایش دمای یخ صفر درجه سلسیوس به ۱ درجه سلسیوس نسبت به همان مقدار آب صفر درجه، موردنیاز است. PCM^۳ها چگالی ذخیره انرژی بالایی در طول تغییر فاز در گستره دمایی کوچک دارند. برای مثال، گرمای هم‌جوشی موردنیاز برای ذوب یخ بسیار بیشتر از گرمای محسوسی است که برای افزایش دمای آب به دست آمده، لازم است. یخ برای ذوب شدن به J/g ۳۳۳/۵۵ انرژی نیاز دارد، در حالی که آب برای افزایش یک درجه بیشتر به J/g ۴/۱۸ انرژی نیاز دارد [۷ و ۸]. معیار اصلی برای انتخاب PCM برای یک برنامه ویژه، دمای تغییر فاز آن است. گرچه عامل‌های دیگر نیز باید بررسی شود. این عامل‌ها شامل گرمای نهان، چرخه پایداری و رسانندگی گرمایی است.

از سوی دیگر در سامانه‌های ذخیره‌سازی گرمایی مقدار رسانندگی پایین یک نقطه ضعف است. زیرا ممکن است مقدار

^۱. Telkes and Raymond

^۲. Hale, Hoover and O'Neil

^۳. Phase change materials (PCM)

^۴. Fibrous polymer reinforced (FPR)

بررسی شده است. روش‌های مکانیکی بر روش‌های متفاوت فراصوت متمرکز شده‌اند. این روش‌ها به‌خوبی کار می‌کنند، زیرا طول الیاف و درهم‌تنیدگی را کاهش می‌دهند، همچنین، مقادیر زیادی کربن آریخت تولید می‌کنند و مزایای نانو تقویت‌کنندگی را افزایش می‌دهند [۱۸ و ۱۹].

تقویت‌کننده‌ها می‌توانند به‌طور هم‌زمان استحکام، مدول و چقرمگی رزین‌های تمیز را بهبود بخشند و درعین‌حال کمترین تأثیر را بر سایر ویژگی‌مانند T_g^2 و فرایندپذیری داشته باشند. بکر^۳ و همکارانش این موضوع را برای گستره وسیعی از سامانه‌های رزین اپوکسی با کارایی بالا نشان دادند که پیشرفت‌های زیادی در چقرمگی (تا ۲۰۰ درصد) و مدول (تا ۲۰ درصد) به‌دست آمد. همچنین، قابلیت نانورس‌ها را برای سفت‌کردن مواد چندسازه‌ای FPR از راه سازوکار تقویت‌کننده تکمیلی نشان می‌دهد. جدای از مدل و استحکام، کرنش خمشی به شکست نیز برای یک سامانه رزین اپوکسی اصلاح‌شده با خاک‌رس ۵ درصد وزنی افزایش می‌یابد. بهبودهای کمتری برای ضریب انبساط گرمایی (CTE^4) و بازده زغال به‌دست می‌آید درحالی‌که T_g تنها اندکی به خطر افتاده است، ولی هنوز در حدود ۱۷۰ درجه سلسیوس است. این بهبودها در ویژگی دلگرم‌کننده است. زیرا صنایع نفت و گاز به‌طور فزاینده‌ای به دنبال مواد چندسازه‌ای به‌عنوان راه‌حل‌هایی برای مشکل‌های خوردگی هستند [۲۰ و ۲۱].

نانوذره‌های منیزیم هیدروکسید کارکرد بهتری نسبت به ریزذره متناظر برای نرخ آزادسازی گرما چندسازه اتیلن وینیل استات (EVA^5) و انتشار کربن مونوکسید و کربن دی‌اکسید دارند، درحالی‌که زمان اشتعال برای میکروچندسازه کوتاه‌تر است، نانوچندسازه نیز در هر دو مورد دمای تخریب و سطح انتشار دود نیز بهبود می‌یابد. تا ۳۲ درصد بهبود در سرعت انتشار گرما در پلی‌پروپیلن، تنها با ۲ درصد حجمی افزودنی،

است. به‌طوری‌که محاسبه‌ها و تجربه‌ها نشان می‌دهند، انرژی ذخیره‌شده با ویژگی گرمای نهان (تغییر فاز مواد) ۴ تا ۱۵ برابر بیشتر از انرژی ذخیره‌شده به‌دلیل گرمای محسوس به‌دست‌آمده از تغییرهای قابل‌توجه دما در جرم ثابت است. این نکته و ویژگی‌های دیگر کاربرد مواد تغییرفازدهنده را در معماری امروز و ساختمان‌سازی سبک، افزایش می‌دهد. در طول ۴۰ سال گذشته مواد تغییرفازدهنده‌ای مانند هیدرات‌های نمک، موم‌های پارافین، اسیدهای چرب، ترکیب‌های آلی و غیرآلی شناخته شده‌اند [۱۱ تا ۱۴].

استفاده از نانوچندسازه‌ها در صنایع نفت و گاز

سیلیکات‌های لایه‌ای بسیار (PLS^1) از لایه‌های انباشته سیلیکات هشت‌وجهی با ضخامت ۱ نانومتر تشکیل شده‌اند. این گروه از نانوچندسازه‌ها به‌دلیل دسترسی آسان و ویژگی شیمیایی درونی شناخته‌شده آن‌ها به‌طور گسترده و ویژه‌ای مطالعه شده‌اند. استفاده از سیلیکات‌های لایه‌ای بسیار برای بهبود ویژگی مکانیکی مانند مدول، چقرمگی، استحکام و مقاومت در برابر گرما و درعین‌حال کاهش نفوذپذیری گاز و اشتعال‌پذیری آن‌ها در طیف گسترده‌ای از بسترهای بسیار ترموپلاستیک و ترموست در سطوح افزودنی نشان‌داده‌شده است. اصل اساسی تشکیل نانوچندسازه شامل انتقال بسیار به سیلیکات لایه‌ای و جداکردن یا متورم‌کردن لایه‌های سیلیکات و افزایش فاصله بین لایه‌ها است. اگر فاصله بین لایه‌ها به‌گونه‌ای افزایش یابد که لایه‌ها به‌طور کامل و تصادفی در بستر بسیار پراکنده شوند، گفته می‌شود که سیلیکات لایه‌برداری شده است [۱۴ تا ۱۷].

استفاده از نانولوله‌های کربنی یا نانوالیاف، به‌دلیل ویژگی مکانیکی بسیار عالی خود، بسیار امیدوارکننده هستند. پراکندگی در بسترهای بسیار به‌دلیل درهم‌تنیدگی بالای الیاف آن‌ها و نیروهای بین مولکولی مانند واندروالس و نسبت بالای ابعاد الیاف، سخت شده است. پراکندگی نانوالیاف کربن در بسترهای بسیار به‌طور گسترده‌ای با روش‌های مکانیکی یا شیمیایی

¹. Polymer layered silicates (PLS)

². The Glass-transition temperature (TG)

³. Becker

⁴. Coefficient of thermal expansion

⁵. Ethylene vinyl acetate

یافت شد. این نتیجه بهبود یکپارچگی مکانیکی لایه محافظ است که به عنوان یک لایه عایق گرمایی و مانعی برای تخریب فرآورده‌ها به فاز گاز عمل می‌کند. یکی دیگر از ویژگی‌های تقویت‌کننده نانو، افزایش قابل توجه ویژگی سدکنندگی است. در صنعت نفت و گاز، مخازن تحت فشار به وفور در انواع فشارها از بسیار کم تا بسیار زیاد استفاده می‌شود. مخازن فشارقوی، برای مثال، در استوانه‌های ذخیره گاز نیتروژن مایع (پایین دست) و مخازن انباشته (بالادست) که در آن فشارهای عملیاتی در ناحیه ۳۰۰۰ psi معمولی است، استفاده می‌شود. استفاده از مواد چندسازه‌ی FPR بر روی فلزها برای مخازن تحت فشار به دلیل کاهش وزن و همچنین، مقاومت در برابر خوردگی و کارکرد خستگی انجام می‌شود. با این حال، نقطه ضعف اصلی، ویژگی ضربه‌پذیری ضعیف این مواد است که می‌تواند به طور قابل توجهی کمتر از فلزها باشد. به کارگیری روش‌های نانوچندسازه در این منطقه به دلیل مزیت دوگانه بهبود هم‌زمان چقرمگی و ویژگی سدکنندگی، قابلیت قابل توجهی دارد. سطح پایین افزودنی نیز از این جهت سودمند است که کمترین تأثیر را بر شرایط پردازش خواهد داشت. این یک نکته مهم برای ساخت مخازن تحت فشار است، زیرا آن‌ها به طور عمده از راه یک فرایند سیم‌پیچی رشته‌ای ساخته می‌شوند که فرایندی است که الزامات سختی از نظر گران‌روی و واکنش‌پذیری دارد. همان‌طور که به عصر هیدروژن می‌رویم، پیش‌بینی می‌شود که نیازهای سد حتی بیشتر شود و نانوچندسازه‌ها به خوبی می‌توانند نقش مهمی در برآورده کردن این نیاز ایفا کنند [۲۲ و ۲۳].

نمونه‌ای از نانوچندسازه مواد تغییر فاز دهنده در تجهیزات صنعت نفت و گاز

تای^۱ و همکارانش نتیجه‌های به دست آمده از انجام آزمایش بر روی لوله در مخزن پر شده با PCM را برای کاربرد ذخیره‌سازی سرد ارائه دادند. آن‌ها مخازن مجهز به سامانه‌های یک، دو و چهار لوله را مقایسه کردند. ظرفیت ذخیره انرژی

نمونه‌ای از نانوچندسازه مواد تغییر فاز دهنده در تجهیزات صنعت نفت و گاز

تای^۱ و همکارانش نتیجه‌های به دست آمده از انجام آزمایش بر روی لوله در مخزن پر شده با PCM را برای کاربرد ذخیره‌سازی سرد ارائه دادند. آن‌ها مخازن مجهز به سامانه‌های یک، دو و چهار لوله را مقایسه کردند. ظرفیت ذخیره انرژی

¹. Tai

². Antoni Gil

³. Kabbara

آن‌ها آزمایش دو PCM متفاوت پالمیتیک اسید و پارافین RT60 را انجام دادند که با دمای انتقال مشابه مشخص می‌شدند. این سامانه ذخیره‌سازی بخشی از سامانه تولید هم‌زمان میکرو بود که در فضای اداری اعمال می‌شد. سه سامانه^۳ TES از نظر مدت‌زمان مراحل ذخیره‌سازی و تخلیه و از نظر نرخ انتقال گرما مناسب با یکدیگر مقایسه شدند. نویسندگان به این نتیجه رسیدند که بهترین سامانه در نظر گرفته‌شده در پژوهش شرح داده‌شده در مقاله، سامانه‌ای بود که از پالمیتیک اسید استفاده می‌کرد. این سامانه کارکرد بهتری در هنگام تخلیه، قابلیت ذخیره‌سازی بیشتر و هزینه کمتر برای سامانه گرمایش نشان داد. نویسندگان مشکل‌های قابل‌توجهی را در مورد این نوع طراحی مبدل گرمایی نشان ندادند [۳۰].

تأثیر پره‌های لوله‌ها و نانوذره‌های HTF در فرایند ذوب مواد تغییرفازدهنده

اثرهای جرم‌های متفاوت نانوذره‌های^۴ GQD و SWCNTs^۵ بر فرایند ذوب مواد تغییرفازدهنده در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب انتقال گرما رسانندگی را افزایش داده است، ولی در کسرهای جرمی بالاتر، ذوب مواد تغییرفازدهنده به‌طور چشمگیر تغییر نکرده است، زیرا افزایش کسر جرمی نانوذره‌ها، چگالی^۶ HTF را افزایش و نیروی شناوری را کاهش می‌دهد. بنابراین، رسانندگی طبیعی کاهش خواهد یافت. افزون‌براین، نقاط چپ و راست HTF ذوب کمتری را نشان می‌دهند. به این دلیل که وجود پره‌های جانبی از همرفت طبیعی ناشی از ذوب مواد تغییرفازدهنده در نقاط پایین‌تر انتقال گرما جلوگیری می‌کند، درحالی‌که بیشترین مقدار ذوب در نیمکره بالایی انتقال گرما و بین دو باله رخ داده که به دلیل انتقال گرما از مرکز HTF است [۳۳ و ۳۴].

طبیعی در مرحله ذخیره‌سازی نقش مهمی ایفا می‌کند، ولی در مرحله تخلیه مشخص شد که مهم‌ترین آن رسانندگی است. آن‌ها همچنین، دریافتند که دمای ورودی سیال انتقال گرما تأثیر بیشتری بر کارکرد سامانه نسبت به نرخ جریان انتقال گرما دارد و به این نتیجه رسیدند که رفتار گرمایی کلی PCM در مخزن آزمایش شده مشابه هندسه‌های ذخیره گرمایی منتشر شده دیگری است. با این حال، نویسندگان تأکید می‌کنند که نتیجه‌های انتقال گرما برای این هندسه خاص برای طراحی‌های آینده مبدل‌های گرمایی مبتنی بر PCM و برای ایجاد قوانین طراحی برای این نوع مبدل‌های گرمایی ارزشمند است [۲۷]. گوو^۱ و همکارانش نتیجه‌های آزمایش‌ها را برای کانتینر ذخیره انرژی گرمایی با تماس مستقیم ارائه می‌کنند. طبق این پژوهش‌ها این نوع راه حل کارکرد ذخیره‌سازی و تخلیه خوبی را به جز مسدود شدن توسط مواد تغییرفازدهنده رسوب شده در مرحله اولیه فرایند ذخیره‌سازی نشان می‌دهد. آن‌ها راه حلی را در قالب تشکیل کانال‌های سریع با بخاری‌های برقی پیشنهاد می‌کنند و به مسئله مسدود شدن می‌پردازند و به این نتیجه رسیدند که روش مناسبی برای حل مشکل ذکر شده برای سامانه ذخیره‌سازی انرژی گرمایی سیار تماس مستقیم، به‌ویژه با نرخ انتشار کم گرما است [۲۸]. کابارا و همکارانش سامانه ذخیره انرژی گرمایی مبتنی بر مواد تغییرفازدهنده را با PCM محصور شده در استوانه‌ها بررسی کردند. آن‌ها سامانه را از نظر ظرفیت ذخیره‌سازی و نرخ انتقال گرما به PCM تجزیه و تحلیل کردند. نویسندگان تأکید کردند که دمای ورودی مهم‌ترین عامل در این آزمایش بود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که همه مواد داخل لوله‌ها ذوب نمی‌شوند و برای آزمایش‌های بیشتر باید در انتقال گرما به PCM از سیال انتقال گرما بهبودهایی صورت گیرد [۲۹]. پریئو^۲ و همکارانش نتیجه‌ها را برای سامانه ذخیره‌سازی انرژی گرمایی مبتنی بر مبدل‌های گرمایی صفحه‌ای PCM در مقایسه با مخزن آب ارائه کردند.

¹. Guvo

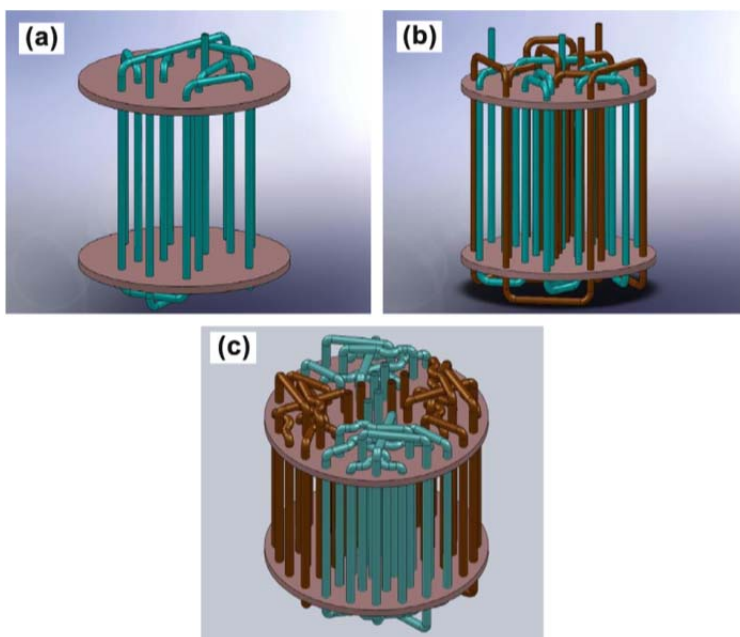
². Prieto

³. Thermal energy storage (TES)

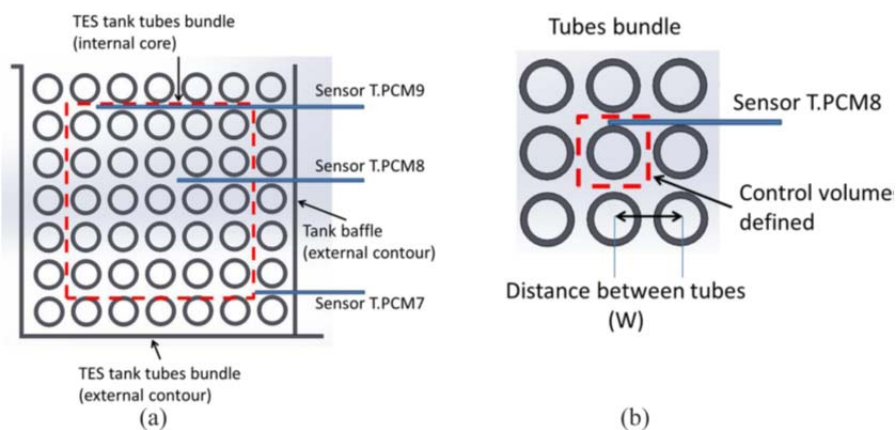
⁴. Graphene quantum dot (GQD)

⁵. Single wall carbon nanotubes (SWCNTs)

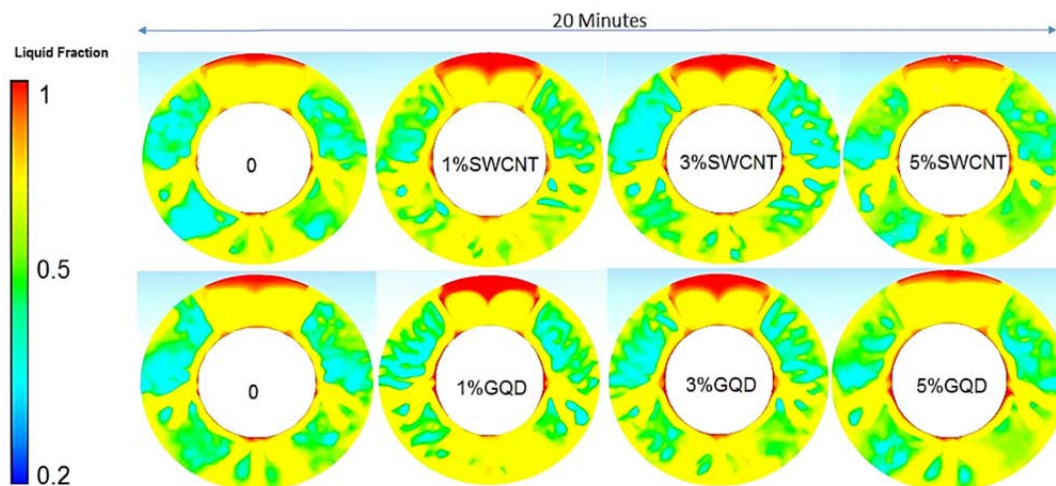
⁶. Heat transfer fluid (HTF)



شکل ۱ یک مخزن‌های استوانه‌ای پر شده با PCM با یک لوله (a)، دو لوله (b) و چهار لوله (c) پیچیده شده در آنها [۲۴] (دارای مجوز از ناشر مربوط)



شکل ۲ کانتور خارجی و هسته داخلی گروه لوله‌ها، شامل موقعیت حسگر دما (a) و حجم کنترل تعریف شده برای محاسبه رسانندگی مؤثر PCM (ب) [۲۵] (دارای مجوز از ناشر مربوط)

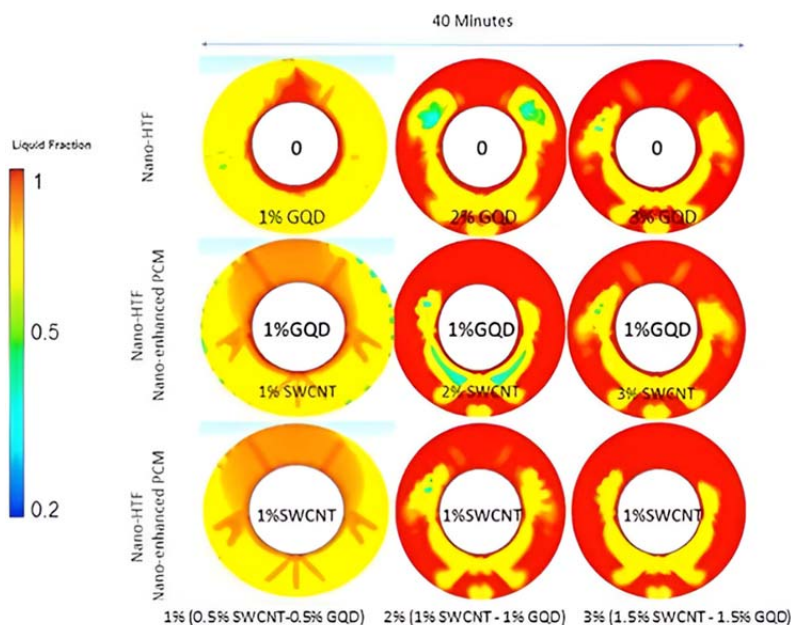


شکل ۳ اثرهای مقدارهای متفاوت نانوذره‌های GQD و SWCNTs بر فرایند ذوب مواد تغییرفازدهنده [۳۳] (دارای مجوز از ناشر مربوط)

تسریع می‌کند؛ زیرا سطوح انتقال گرما افزایش یافته است، ولی باگذشت زمان بیشتر از فرایند و پدیدارشدن یک حالت مخلوط در مواد تغییرفازدهنده، این ترکیب از صعود گرداب‌های گرمایی به‌دلیل رسانندگی طبیعی جلوگیری می‌کند. به‌طوری‌که روند ذوب مواد تغییرفازدهنده کند شده است. همچنین، لازم به ذکر است که با این ساختار، زمان ذوب مواد تغییرفازدهنده در مقایسه با حالت عادی ۲۰ دقیقه کاهش می‌یابد. بهترین حالت برای ذوب مواد تغییرفازدهنده استفاده از ۱/۵ درصد GQD و ۱/۵ درصد SWCNT (در مجموع ۳ درصد) بود. زیرا افزون بر افزایش رسانندگی گرمایی کل مواد تغییرفازدهنده، به‌دلیل چگالی کمتر GQD نسبت به SWCNT، مقدار چگالی موردنظر کاهش و نیروی شناوری و رسانندگی طبیعی افزایش می‌یابد که موجب کوتاه‌شدن زمان ذوب می‌شود [۳۳ تا ۳۶].

تأثیر پره‌های لوله‌ها و نانوذره‌ها در فرایند ذوب مواد تغییرفازدهنده

مقایسه بین دو نوع نانوذره در فرایند ذوب مواد تغییرفازدهنده در شرایط متفاوت در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد نانوذره‌ها در مواد تغییرفازدهنده، نقطه ذوب مواد تغییرفازدهنده افزایش می‌یابد. زیرا درصدی بالاتر نانوذره‌ها در مواد تغییرفازدهنده، رسانندگی گرمایی کل مواد تغییرفازدهنده را افزایش می‌دهد که در نتیجه موجب تسریع فرایند ذوب مواد تغییرفازدهنده در ابتدای فرایند ذوب می‌شود که به‌طور کلی به رسانندگی گرمایی وابسته است. درحالی‌که افزایش نانوذره‌ها موجب افزایش چگالی و گرادیان گرانش و کاهش نیروی شناوری و رسانندگی طبیعی می‌شود. ساختار پره به‌طور کلی ذوب مواد تغییرفازدهنده را



شکل ۴ افزایش درصد نانوذره‌ها در مواد تغییرفازدهنده و افزایش رسانندگی گرمایی کل [۳۳]
(دارای مجوز از ناشر مربوط)

کوره‌ها

تنها در اروپا، این قابلیت بازیافت گرما بیش از ۳۰۰ تراوات ساعت در سال تخمین زده شده است [۳۷] که به معنای کاهش ۲۵۰ میلیون تنی انتشار CO₂ در سال است. باوجود بهبودی که بازیابی گرمای اتلاف برای صنایع فراهم می‌کند، این موضوع به دلیل مشکل‌های فنی و مالی محدود شده است. اجرای تجهیزات جدید به‌طورمعمول نیازمند سرمایه‌گذاری بالا و همچنین، فرایند بازسازی عمیق هستند. کارخانه‌های تولیدی طولانی‌مدت و فرصت‌های کمی را برای ارتقای بهره‌وری انرژی در فرایند اصلی ارائه می‌دهند. این محدودیت ممکن است با استفاده از راهبردهای مقاوم‌سازی برپایه نوسازی تجهیزات موجود برطرف شود. اقدامات مقاوم‌سازی به‌طور عمده باهدف بهینه‌سازی هزینه یک کارخانه موجود، سازگاری اجزای کارخانه برای فرآورده‌های جدید، دستیابی به فرایندهای کارآمدتر و پایدارتر و کاهش مصرف انرژی و منابع است. باین‌حال، این جایگزین‌ها همیشه امکان‌پذیر نیستند، زیرا ممکن است

یک‌سوم کل انرژی مصرف‌شده در جامعه را بخش صنعت تشکیل می‌دهد که بخش چشمگیری از آن درنهایت به‌دلیل ناکارآمدی تبدیل به گرمای تلف‌شده می‌شود. متوسط بازده گرمایی برای کوره‌های صنعتی نصب‌شده به‌طورتقریبی ۶۰ درصد است که فرصتی قابل‌توجه برای بهبود و کاهش عوامل اصلی تلفات گرمایی در کوره‌های صنعتی، یعنی نشت گازهای خروجی، عایق ضعیف و کارکرد ناکارآمد عامل‌های احتراق است. به‌کارگیری بهترین فناوری موجود در صنعت می‌تواند شامل کاهش ۲۵ درصدی در شدت انرژی باشد. در این زمینه، کارخانه‌های تولید صنعتی برای یکپارچه‌سازی فناوری‌های بازیابی گرمای اتلاف بسیار مناسب هستند. کوره‌هایی که با احتراق سوخت‌های هیدروکربنی، یعنی گاز طبیعی، گرم می‌شوند تلفات گرمایی مهمی را در گازهای دودکش نشان می‌دهند (با مقدار متوسط ۴۰ درصد)، اگرچه کارکرد ضعیف ممکن است تلفات گرمایی را تا ۷۰ درصد افزایش دهد [۳۵].

چالش برانگیز است. با ارزیابی نمودارهای گرمایی، زمان‌های ذخیره‌سازی/تخلیه، بخشی از PCM جامد/ذوب‌شده و دمای جریان گاز (هوای احتراق و گازهای خروجی) کارکرد گرمایی ذخیره‌سازی گرمایی نهان را برای ادغام صنعتی ارزیابی می‌شود. تجزیه و تحلیل این عامل‌ها در انتخاب مواد و اندازه تجهیزات برای ادغام بیشتر آن در مقیاس صنعتی بسیار مهم است. مدل‌سازی عددی سبب‌دی ارائه‌شده در این مطالعه می‌تواند به‌عنوان نخستین مرحله اجرای فناوری برای ارزیابی امکان‌سنجی PCM برای بازیابی گرما در سطوح بسیار بالا در EII عمل کند. بنابراین، عامل‌های اصلی برای کارکرد و طراحی سامانه PCM در خروجی‌های مدل توسعه‌یافته تعریف می‌شوند. یک مطالعه موردی در صنعت سرامیک باهدف بازیابی گرمای تلف‌شده در سطوح دمایی بسیار بالا (بیش از ۱۱۰۰ درجه سلسیوس) از گازهای خروجی کوره به‌تفصیل ارائه شده است [۳۵]. پیکربندی سامانه شامل یک پوسته خارجی حاوی لوله‌های هم‌مرکز دوتایی به‌طول ۲ متر و قطر ۶۰۰ میلی‌متر بود که با ۴۷۰۰ کیلوگرم PCM پرشده بود. در نتیجه، بازیابی گرمای تلف‌شده در گستره دمایی ۷۰۰ تا ۸۶۵ درجه سلسیوس، با استفاده از یک PCM با نقطه ذوب در حدود ۸۸۵ درجه سلسیوس و با درنظرگرفتن طرح پیشنهادی PCM-TES امکان‌پذیر بود. افزایش دما امکان پیش‌گرم کردن هوای احتراق ورودی به کوره را فراهم می‌کرد و به‌طور اندوخته مصرف گاز طبیعی را کاهش و بازده کلی سامانه را افزایش می‌داد. افزون‌براین، زمان ذخیره‌سازی و تخلیه PCM-TES به‌طور تقریبی ۲۵ ساعت (۱۶ ساعت برای ذخیره‌سازی و ۹ ساعت برای تخلیه) تنظیم‌شده بود که به‌طور چشمگیری تحت‌تأثیر رسانندگی گرمایی کم PCM بود. با تجزیه و تحلیل نمودارهای دما، مشخص شد که گرمایش هوای احتراق یک فرایند تدریجی در طول لوله، ولی نه یکنواخت و نه خطی، بود. تکامل انتقال فاز با جزئیات در هر دو فاز ذخیره‌سازی و تخلیه ارائه‌شده در این نوع سامانه، بیشتر سهم گرمایی ناشی از گرمای نهان به دلیل ادغام PCM بود که ظرفیت گرمایی سامانه را به

محدودیت‌های طول عمر، هزینه و فضا در کارخانه وجود داشته باشد. بنابراین، منافع و هزینه‌ها باید به‌طور کامل ارزیابی شده تا سودآورترین و کارآمدترین جایگزین شناسایی شود. گستره دمای کاری EII^۱ به سطوح بسیار بالایی دست می‌یابد [۳۸]. متداول‌ترین جریان‌های گرمای اتلاف‌شده ممکن است شامل گاز خروجی، گاز شعله‌ور، بخار و هوای گرم، مایع‌ها (مانند روغن داغ و آب سردخانه) و جامدها (برای مثال، زباله و فراورده‌ها) باشد. نمونه‌هایی از منابع گرمایی معمولی که در آن‌ها امکان یافتن این جریان‌ها وجود دارد، کوره‌های ذوب و گرمایش، بویلرها، زباله‌سوزها، عملیات گرمایی و توزیع بخار هستند. همه این‌ها نشان‌دهنده امکان بازیابی مقادیر چشمگیری از گرما است که در غیر این صورت تلف یا به‌سادگی به محیط منتقل می‌شود. باتوجه به موردهای یادشده، ذخیره انرژی گرمایی (TES) می‌تواند به‌عنوان یک عنصر جدید یکپارچه یا مقاوم‌سازی برای بازیابی گرمای اتلاف در EII استفاده شود.

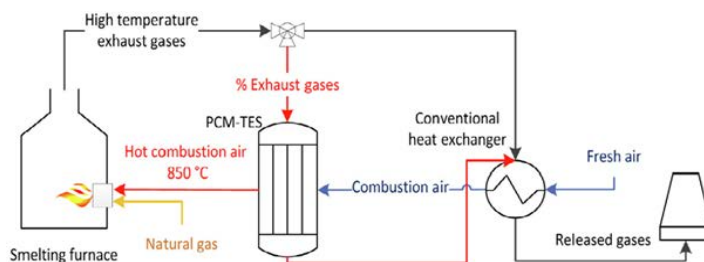
TES به‌عنوان یک رویکرد ضروری برای بهبود بهره‌وری انرژی سامانه‌های متفاوت ثابت شده است، و درنتیجه هم مصرف سوخت اولیه و هم اثرهای زیست‌محیطی را می‌توان کاهش دهد. فناوری‌های اصلی برای TES شامل گرمای محسوس، گرمای نهان و سامانه‌های ترموشیمیایی است. سامانه‌های گرمای نهان بر پایه مواد تغییرفازدهنده هستند که به‌دلیل ویژگی آزادسازی یا جذب انرژی در حین تغییر حالت فیزیکی، به‌طور معمول از جامد به مایع و برعکس هستند. ماده تغییرفازدهنده با جذب انرژی گرمایی به مایع تبدیل می‌شود، درحالی‌که انرژی گرمایی ذخیره شده در مرحله انجماد آزاد می‌شود. در مقایسه با سایر فناوری‌ها، PCM با چگالی ذخیره انرژی بالاتر، ذخیره انرژی گرمایی در دمای ثابت، افزایش انعطاف‌پذیری سامانه و نمایش قابلیت اطمینان طولانی مدت قابل قبول متمایز می‌شود.

در حال حاضر، کار با PCM به‌عنوان یک سامانه ذخیره‌سازی و بازیابی گرمایی در دماهای بالا امیدوارکننده و

1. Energy intensive industry (EII)

PCM فرصتی را برای انطباق طرح‌ها بسته به نیازهای خاص کارخانه فراهم می‌کند و در نتیجه قابلیت تکرار آن را نه تنها در فرایندهای متفاوت، بلکه در بخش‌های متفاوت EII دیگر نیز افزایش می‌دهد. کار آینده باید شامل یک تقریب دقیق‌تر برای همرفت طبیعی، به‌ویژه باتوجه به اهمیت آن در طول ذوب، باشد تا مدل عددی را بهبود بخشد. افزون‌براین، اجرای یک نمونه اولیه صنعتی نتیجه‌های شبیه‌سازی را تأیید می‌کند و کد شبیه‌سازی محاسباتی توسعه‌یافته را اصلاح می‌کند. ارزیابی چرخه‌های ذخیره‌سازی/تخلیه کامل، اجازه بررسی رفتار PCM-TES را در سطح صنعتی برای درک بهتر جریان‌های داخلی و تشخیص نقاط بحرانی از دیدگاه‌های طراحی و ترمومکانیکی، می‌دهد [۳۵]. شکل ۵ ادغام PCM-TES برای بازیابی گرما در یک کوره صنعتی را نشان می‌دهد.

مقدار چشمگیری افزایش می‌داد. این اثر به‌روشنی در چند ساعت اول تخلیه مشاهده شد، به‌ویژه در بخش اول لوله، جایی که ۵۰ تا ۸۰ درصد افزایش دما به‌دست آمد. به‌طورکلی، بخش لوله بین ۲ تا ۳ متر بالاترین گرادیان (بیشینه حدود ۲۰۰ درجه سلسیوس) را در طول کل فاز تخلیه تحمل می‌کرد. افزون بر این، در ابتدای ذخیره‌سازی و تخلیه باید توجه ویژه‌ای می‌شد، زیرا تغییرهای دما شدید و ممکن بود موجب ایجاد تنش گرمایی در طول لوله شود. برپایه کارهایی که در بالا توضیح داده شد، PCM-TES نه تنها به جستجوی راهبردهایی برای بازیابی گرمای هدررفته کمک می‌کند، بلکه مسیری را برای اطمینان از طراحی موفق برای ادغام در EII آغاز می‌کند. رفتار گرمایی پیش‌بینی‌شده سامانه، مبنایی برای طراحی PCM-TES، کارکرد عملیاتی و انتخاب مواد برای بازیابی گرما در گستره دمایی بالا فراهم می‌کند. افزون‌براین، انعطاف‌پذیری سامانه‌های



شکل ۵ ادغام PCM-TES برای بازیابی گرما در یک کوره صنعتی [۳۶۳۹] (دارای مجوز از ناشر مربوط)

PCM استفاده می‌کرد. این نتیجه مزایای یکپارچه‌سازی هیبریدی را نشان می‌دهد. ماژول‌های ماریچی PCM، اتلاف گرما را افزایش و وزن ماژول باتری را تا ۷۰ درصد کاهش دادند و درعین‌حال بازده خنک‌کننده را بهبود بخشیدند. از مزایای این کار می‌توان بهبود چشمگیر بازده استفاده از گرما با سامانه‌های PCM هیبریدی، کاهش خطر گرمای بیش‌ازحد، کاهش وزن واحدهای ذخیره انرژی و بهبود قابلیت کاربرد عملی را نام برد. همچنین، می‌توان به معایبی چون پیچیدگی بالاتر در طراحی سامانه، نیاز به یکپارچه‌سازی دقیق سازوکارهای خنک‌کننده،

جی^۱ و همکارانش [۴۰] در مطالعه به‌روزی که داشتند به بررسی روش‌های پوشینه‌دارسازی PCM و تأثیر آن‌ها بر بازده ذخیره‌سازی انرژی گرمایی پرداختند. در این پژوهش، سامانه‌های هیبریدی بررسی شد. آن‌ها PCM را با خنک‌کننده هوای اجباری ترکیب کردند تا انتقال گرما را به بیشینه برسانند. سامانه‌های هیبریدی با استفاده از PCM و فوم مس، ۷۷ تا ۱۰۰ درصد از ظرفیت گرمای نهان استفاده می‌کردند. سامانه غیرفعال به‌تنهایی تنها از ۱۳ درصد ظرفیت ذخیره‌سازی گرما

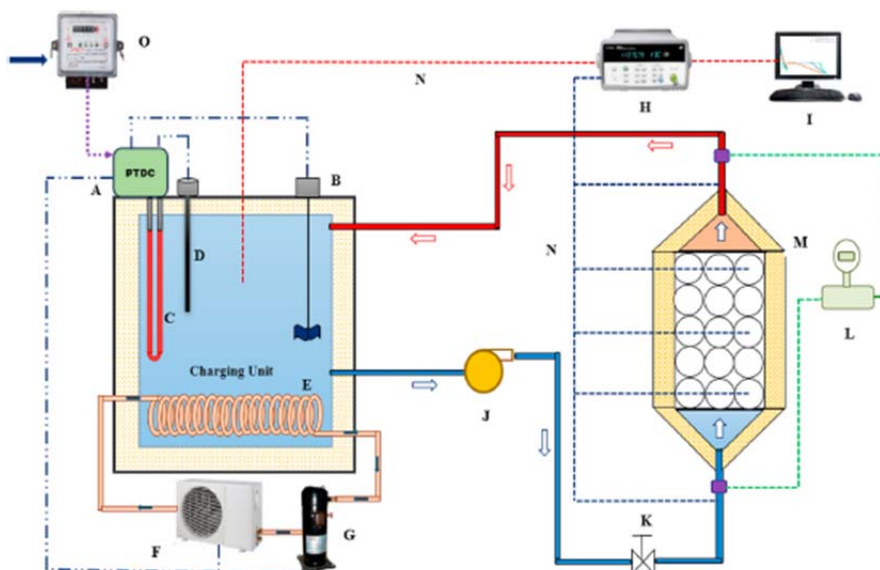
درصد نانوذره‌ها در مقایسه با غلظت‌های پایین‌تر افزایش یافت. دمای داخلی مخزن پایدارتر شد که منجر به کاهش نوسان‌های گرمایی شد. بازده جذب گرما و بهینه‌سازی صرفه‌جویی در انرژی در سامانه‌های ذخیره‌سازی بهبود یافت. بازده گرمایی بالاتر، تضمین پایداری انرژی طولانی‌مدت را قابل‌دستیابی می‌کند، ولی می‌تواند خطرهای احتمالی نشت، به‌ویژه با ترکیب‌های PCM ویژه وجود داشته باشد.

ساتیش‌کومار^۱ و همکارانش [۴۳] در پژوهشی که با نرم‌افزار فلوئنت انجام دادند، کارکرد یک مخزن ذخیره انرژی با ظرفیت کم و پر از پوشینه‌های کروی حاوی مواد تغییرفازدهنده پیشرفته نانو (شکل ۶) را تحلیل کردند. نانو PCM با پراکندگی نانوپلاکت‌های گرافن در آب یون‌زوده ایجاد شد. این پژوهش بر روی اثرهای دمای ورودی سیال انتقال‌دهنده گرما و نرخ جریان حجمی بر بازده ذخیره‌سازی و تخلیه متمرکز بود. آن‌ها یافتند که زمان ذخیره‌سازی در ۸- درجه سلسیوس، ۱۸/۲۶ درصد و در ۶- درجه سلسیوس، ۲۲/۸۱ درصد نسبت به آب یون‌زوده کاهش می‌یابد. انرژی گرمای نهان ذخیره‌شده به‌طور تقریبی ۵/۵ برابر بیشتر از ذخیره گرمای محسوس در دمای ۴- درجه سلسیوس، بود. بازیابی انرژی تجمعی ۲۶۳۷ کیلوژول، به‌طورتقریبی ۸۵/۸۹ درصد از کل انرژی ذخیره‌شده (۳۰۷۰ کیلوژول) بود. درنهایت این سامانه به‌طورمؤثر دمای نگهداری واکسن را بین ۳ تا ۵ درجه سلسیوس، به‌مدت ۲/۴۶ ساعت نگهداشت.

هزینه اولیه بالاتر به دلیل فناوری پوشینه‌دارسازی و ترکیب مواد، اشاره کرد [۴۰].

امیری و همکارانش [۴۱] شبیه‌سازی‌هایی با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام دادند که کارایی نانوالیاف پلی‌اتیلن گلیکول-پلی‌آمید ۶ را به‌عنوان ماده تغییرفازدهنده (PCM) در خطوط لوله نفت برای بهبود مدیریت گرمایی و ذخیره انرژی ارزیابی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن ۸ درصد وزنی نانوذره‌ها منجر به افزایش ۲۲/۵ درصدی در رسانندگی گرمایی شد. نوسان‌های دما کاهش یافت و پایداری گرما را بهبود یافت. حضور پلی‌آمید ۶ گران‌روی را افزایش داد و بر بازده انتقال گرما تأثیر منفی گذارد. پلی‌اتیلن گلیکول موجب جذب گرما بالایی بیشتر شد و ظرفیت ذخیره انرژی را بهینه کرد. به‌عنوان مزایا می‌توان به بهبود و تنظیم گرمایش و بهره‌وری انرژی اشاره کرد. همچنین، کاهش چشمگیر اتلاف گرما که منجر به پایداری عملیاتی بهتر شد و قابلیت ذخیره‌سازی انرژی به‌ویژه در کاربردهای با دمای بالا، افزایش یافت. درنهایت این کار موجب افزایش گران‌روی در غلظت‌های بالاتر پلی‌آمید شد و بر دینامیک سیال تأثیر منفی گذاشت.

امیری و همکارانش [۴۲] در ادامه برای بهبود پژوهش پیشین تلاش کردند تا نشان دهند نانوچندسازه‌های مواد تغییرفازدهنده چگونه می‌توانند ذخیره‌سازی انرژی در مخازن ذخیره‌سازی نفت را بهینه کنند. بنابراین، بررسی برای غلظت‌های ۲ تا ۸ درصد نانوذره‌ها، ارزیابی و تأثیر آن‌ها بر کارکرد گرما آزمایش شد. نتیجه‌ها نشان داد که نرخ ذوب با ۸



شکل ۶ مخزن ذخیره‌سازی با پوشینه‌های کروی بسیار [۴۳] (دارای مجوز از ناشر مربوط)

بیشتری نسبت به راه اندازی دایره‌ای ذخیره می‌کند و به ۲۹۴۲/۷۶ کیلوژول می‌رسد. زمان ذوب در مقایسه با مبدل لوله تریپلکس ۲۴/۲۷ درصد کاهش یافت. افزایش عدد استفان زمان ذوب را تا ۴۶ درصد برای PCM و ۴۷ درصد برای نانو PCM کاهش داد. درنهایت، نانو PCM با گرمایش دو طرفه، بازده گرمایی را با کارکرد بهینه در غلظت ۲ درصد نانوذره‌ها افزایش داد.

در مطالعه‌ای که توسط ساندریال^۲ و همکارانش [۴۴] انجام شد، کارکرد یک مبدل گرمایی پوسته و لوله نیم‌دایره‌ای را با نانو PCM با گرمایش دو طرفه تحلیل کردند. نانوذره‌های آلومینیم اکسید (Al_2O_3) در غلظت‌های ۲، ۴ و ۶ درصد در موم پارافین پراکنده شدند تا تأثیر آن‌ها بر زمان ذوب و بازده ذخیره‌سازی انرژی ارزیابی شود. آن‌ها دریافتند که نانوذره‌های ۲ درصد، زمان ذوب را تا ۲۱ درصد کاهش می‌دهد، در حالی که افزایش به ۴ و ۶ درصد منجر به کاهش بیشتر به ترتیب ۳/۵۱ و ۲/۸ درصد می‌شود. مبدل نیم‌دایره‌ای ۸/۵۳ درصد، انرژی

جدول ۱ یافته‌های کلیدی مطالعه‌های اخیر در مورد سامانه‌های مبتنی بر PCM

کاربرد	نویسنده	کارکرد	مزایا	معایب	مرجع
خطوط لوله نفت با نانوالیاف PCM	امیری و همکارانش	افزایش ۲۲/۵ درصدی رسانندگی گرمایی با ۸ درصد نانوذره‌ها، کاهش نوسان‌های دما و افزایش گرانروی با پلی‌آمید	بهبود مدیریت گرما، بهره‌وری انرژی و کاهش تلفات	افزایش گرانروی و هزینه بالاتر به دلیل نانوذره‌ها	[۴۱]
مخازن ذخیره روغن با PCM	امیری و همکارانش	نرخ ذوب بالاتر برای استفاده از ۸ درصد نانوذره‌ها نسبت به ۲	افزایش ذخیره انرژی، پایداری گرمایی بهتر و	خطرهای نشت و محدودیت رسانندگی	[۴۲]

^۱. Sathishkumar

^۲. Sundriyal

	گرمایی	بهبود بهره‌وری	درصد، ۲۲٫۵ درصد افزایش در رسانندگی گرمایی با ۸ درصد و دمای پایدارتر		
	ادغام پیچیده و هزینه‌های اولیه بالاتر [۴۰]	استفاده بیشتر از گرما، کاهش خطرهای گرمای بیش‌ازحد و طراحی سبک‌تر	سامانه‌های هیبریدی از ۷۷ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت گرمایی PCM استفاده و سامانه‌های غیرفعال تنها از ۱۳ درصد استفاده می‌کنند. کاهش وزن ۷۰ درصدی	جی و همکارانش	پوشینه‌داری سازی PCM و سامانه‌های هیبریدی
	نیاز به پراکندگی دقیق [۴۳]	بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش قدرت پمپ‌زنی و افزایش خنک‌کننده	۲۲٫۸۱ درصد کاهش زمان ذخیره‌سازی، بازده بازیافت انرژی برابر با ۸۵٫۸۹ درصد و ۴۸ درصد افت فشار کمتر	ساتیش کومار و همکارانش	ذخیره‌سازی انرژی گرمایی خنک مبتنی بر نانو PCM
	گران‌روی بالاتر در غلظت‌های ۴ تا ۶ درصد نانوذره‌ها [۴۴]	بازده گرمایی بهبودیافته، ذوب سریع‌تر و تلفات انرژی کمتر	زمان‌های ذوب PCM و نانو PCM، به‌ترتیب ۲۳٫۸۳ و ۲۴٫۲۷ درصد کاهش یافتند. نرخ ذخیره انرژی ۸٫۵۳ درصد بیشتر از راه‌اندازی دایره‌ای بود.	ساندریال و همکارانش	نانو PCM در مبدل گرمایی پوسته و لوله

نتیجه‌گیری

بیشتر مواد خالص در برخی دماها و فشارها بین مایع، جامد یا گاز تغییر فاز می‌دهند. ماده تغییر فاز دهنده ماده‌ای است که یک نقطه ذوب مشخص دارد و گرمای نهان ذوب آن به اندازه‌ای بزرگ است که می‌توان از آن برای ذخیره انرژی گرمایی استفاده کرد. یکی از روش‌های ذخیره انرژی گرمایی استفاده از نانوجندساز مواد تغییر فاز دهنده است که در اثر تغییر فاز، انرژی را جذب کرده و در چرخه بعدی با تغییر فاز معکوس انرژی را آزاد می‌کند. هنگامی که مواد تغییر فاز دهنده به دمای تغییر فاز خود می‌رسند نقطه ذوب، بدون این که دمای آن‌ها افزایش یابد میزان زیادی گرما جذب می‌کنند و هنگامی که دمای محیط در اطراف ماده تغییر فاز دهنده کاهش یابد با از دست‌دادن گرمای نهان ذخیره‌شده، منجمد می‌شوند. پدیده ذخیره گرمای نهان با مواد تغییر فاز دهنده، چگالی ذخیره‌سازی بالاتر و تغییر دمای کوچک‌تر و یا صفر را به ارمغان می‌آورد. مواد تغییر فاز دهنده در واحد حجم، ظرفیت گرمایی در

در حالی که پژوهش‌های اخیر، اثربخشی مواد تغییر فاز دهنده در مدیریت گرمایی، کارایی انرژی و ظرفیت ذخیره‌سازی را نشان داده است، هنوز چندین زمینه وجود دارد که نیاز به بررسی بیشتر دارند. مطالعه‌های آینده باید بر توسعه مواد PCM هیبریدی با کارایی بالا متمرکز شوند که متشکل از اجزای آلی و معدن برای بهینه‌سازی رسانندگی گرمایی، پایداری و طول عمر مفید است. افزون‌براین، به دلیل مقیاس بزرگ صنایع نفت و گاز این بررسی‌ها باید هرچه بیشتر در عرصه میدانی حاضر شوند. نقطه عطف استفاده از مواد تغییر فاز دهنده ترکیب آن با نانوذره‌ها است. مانند چندسازه‌های مبتنی بر گرافن که برای افزایش بیشتر بازده انتقال گرما و درعین حال به کمینه‌رساندن تخریب مواد و خطرهای نشست، است. همچنین، به دلیل اهمیت مدیریت انرژی در جهان اهمیت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در صنایع دیگر نیز باید بررسی شود.

شیشه، سیمان و ... مورد استفاده قرار گیرد. مطالعه‌های زیادی بر این پایه انجام شده است که یک ماده PCM متداول مانند پارافین داخل یک پوسته حاوی نانوموادى مانند گرافیت قرار می‌گیرد. افزون بر این گاهی نیز نانوموادى مانند نانولوله‌های کربنى، نانوسیم‌های و نانوذره‌های فلزى، اکسید و هیدروکسید فلزى نیز به PCM افزوده شده‌اند. نتیجه‌های پژوهش‌های کلی نشان داده است که استفاده از نانوجندسازه مواد تغییرافزنده که ویژگی گرمایی مانند ظرفیت گرمایی، رسانندگی و پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد، می‌تواند ظرفیت ذخیره‌سازی و بازده آزادسازی انرژی را افزایش دهند و موجب بهبود بازده‌های گرمایی در تجهیزات صنایع نفت و گاز شود.

حدود ۴ تا ۱۵ برابر مواد ذخیره‌ساز معمول را فراهم می‌آورند. از این رو، آن‌ها را برای استفاده به عنوان سامانه‌های کنترل گرما غیرفعال، مناسب می‌سازد. این مواد به‌طور مؤثری با کنترل گرما فعال ترکیب می‌شوند تا بتوانند چرخه کاریشان را کمینه و ظرفیتشان را نیز بهینه کنند. ذخیره‌سازی گرمای نهان یکی از مؤثرترین راه‌ها در انباشت انرژی گرمایی است. شمار زیادی از مواد تغییرافزنده در دسترس هستند که در یک بازه دمایی گسترده ذوب و منجمد می‌شوند. مهم‌ترین کاربرد فناوری نانو در بحث پوشینه‌داری PCM است که می‌تواند ویژگی گرمایی ماده موردنظر را افزایش دهد و برای کاربردهایی مانند خنک‌کردن و تهیه هوای داخل ساختمان‌ها، عایق‌بندی دیوارها و کف بناها، در صنایع متفاوت دربرگیرنده نفت و گاز، سرامیک،

مراجع

- [1] Motevali A, Hasandust Rostami M, Najafi G, Yan WM. Evaluation and improvement of PCM melting in double tube heat exchangers using different combinations of nanoparticles and PCM (the case of renewable energy systems). Sustainability. 2021;13(19):10675. doi: [org/10.3390/su131910675](https://doi.org/10.3390/su131910675)
- [2] Rostami S, Afrand M, Shahsavari A, Sheikholeslami M, Kalbasi R, Aghakhani S, Shadloo MS, Oztop HF. A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage. Energy. 2020;211:118698. doi: [org/10.1016/j.energy.2020.118698](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118698)
- [3] Telkes M, Raymond E. Storing solar heat in chemicals - A report on the Dover House. Heat Vent. 1949;46:80-86.
- [4] Borreguero AM, Rodríguez JF, Valverde JL, Arevalo R, Peijs T, Carmona M. Characterization of rigid polyurethane foams containing microencapsulated Rubitherm® RT27: Catalyst effect. Part II. Journal of Materials Science. 2011;46:347-56. doi: [org/10.1007/s10853-010-4824-6](https://doi.org/10.1007/s10853-010-4824-6)
- [5] Aly KA, El-Lathy AR, Fouad MA. Enhancement of solidification rate of latent heat thermal energy storage using corrugated fins. Journal of Energy Storage. 2019;24:100785. doi: [org/10.1016/j.est.2019.100785](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100785)
- [6] Pauken M, Emis N, Watkins B. Thermal energy storage technology developments. AIP Conference Proceedings. 2007;880(1):412-420. doi: [org/10.1063/1.2437481](https://doi.org/10.1063/1.2437481)
- [7] Golestaneh SI, Karimi G, Babapoor A, Torabi F. Thermal performance of co-electrospun fatty acid nanofiber composites in the presence of nanoparticles. Applied energy. 2018;212:552-64. doi: [org/10.1016/j.apenergy.2017.12.055](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.055)
- [8] Huang YX, Shu ZY, Liu ZQ, Cai Y, Wang WW, Zhao FY. Transient cooling performance and parametric characteristic of active-passive coupling cooling system integrated air-conditioner, PV-PCM envelope, and ice storage. Energy and Buildings. (2025);329:115296. doi: [org/10.1016/j.enbuild.2025.115296](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115296)
- [9] Koukou MK, Dogkas G, Vrachopoulos MG, Konstantaras J, Pagkalos C, Lymperis K, et al. Performance evaluation of a small-scale latent heat thermal energy storage unit for heating applications based on a nanocomposite organic PCM. ChemEngineering. 2019;3(4):88. doi: [org/10.3390/chemengineering3040088](https://doi.org/10.3390/chemengineering3040088)

- [10] Samimi F, Babapoor A, Azizi M, Karimi G. Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers. *Energy*. 2016;96:355-71. doi: **org/10.1016/j.energy.2015.12.064**
- [11] Kolosov AE, Kolosova EP, Vanin VV, Khan A. Classical thermoset epoxy composites for structural purposes: Designing, preparation, properties and applications. In: Khan A, Bhawani SA, Asiri AM, Khan I, editors. *Thermoset Composites: Preparation, Properties and Applications*. Materials Research Foundations. 2018;38:260-99. doi: **org/10.21741/9781945291876-9**
- [12] Jiang L, Zhao L, Zhang R, Zhang W, Ma X, Niu Z, Chen G, Li M. Research of the thermal storage properties of thermally conductive carbon fiber-reinforced paraffin/olefin block copolymer composite phase change materials with thermotropic flexibility. *Journal of Energy Storage*. 2024;76:109761. doi: **org/10.1016/j.est.2023.109761**
- [13] Shafagati M, Babapoor A, Bamdezh M. Enhancing car battery energy efficiency with phase change material nanocomposites: a concise review. *Journal of Renewable Energy and Environment*. 2024 Jan 1;11(1):74-88. doi: **org/10.30501/jree.2023.388891.1563**
- [14] Becker O, Cheng YB, Varley RJ, Simon GP. Layered silicate nanocomposites based on various high-functionality epoxy resins: the influence of cure temperature on morphology, mechanical properties, and free volume. *Macromolecules*. 2003;36(5):1616-25. doi: **org/10.1021/ma0213448**
- [15] Hilding J, Grulke EA, George Zhang Z, Lockwood F. Dispersion of carbon nanotubes in liquids. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2003 Jan 2;24(1):1-41. doi: **org/10.1081/DIS-120017941**
- [16] Pinnavaia TJ, Beall GW, editors. *Polymer-clay nanocomposites*. Chichester: John Wiley; c2000.
- [17] Babapoor A, Karimi G. Thermal properties measurement and heat storage analysis of paraffin nanoparticles composites phase change material: Comparison and optimization. *Applied Thermal Engineering*. 2015;90:945-51. doi: **org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.083**
- [18] Umate TB, Sawarkar PD. A review on thermal energy storage using phase change materials for refrigerated trucks: Active and passive approaches. *Journal of Energy Storage*. 2024;75:109704. doi: **org/10.1016/j.est.2023.109704**
- [19] Babapoor A, Karimi G, Sabbaghi S. Thermal characteristic of nanocomposite phase change materials during solidification process. *Journal of Energy Storage*. 2016;7:74-81. doi: **org/10.1016/j.est.2016.05.006**
- [20] Hussain M, Varley RJ, Mathys Z, Cheng YB, Simon GP. Effect of organo-phosphorus and nano-clay materials on the thermal and fire performance of epoxy resins. *Journal of Applied Polymer Science*. 2004;91(2):1233-53. doi: **org/10.1002/app.13267**
- [21] Ray SS, Okamoto M. Biodegradable polylactide and its nanocomposites: opening a new dimension for plastics and composites. *Macromolecular Rapid Communications*. 2003;24(14):815-40. doi: **org/10.1002/marc.200300008**
- [22] Barbosa RV, Baumhardt-Neto R, Mauler RS, Gorga CJ, Tedesco A. Use of pyrolyzed oil shale as filler in poly (ethylene-co-vinyl acetate) with different vinyl acetate contents. *Journal of Applied Polymer Science*. 2002;84(8):1544-55. doi: **org/10.1002/app.10494**
- [23] Varley R, Leong KH. Opportunities for nanocomposites in the oil & gas industry. In: L. Ye, Y.-W. Mai, Z. Su, editors. *Composite Technologies for 2020*. UK: Woodhead Publishing; 2004. P. 557-562. doi: **org/10.1016/B978-1-85573-831-7.50096-1**
- [24] Tay NH, Belusko M, Bruno F. Experimental investigation of tubes in a phase change thermal energy storage system. *Applied energy*. 2012;90(1):288-97. doi: **org/10.1016/j.apenergy.2011.05.026**

- [25] Gil A, Peiró G, Oró E, Cabeza LF. Experimental analysis of the effective thermal conductivity enhancement of PCM using finned tubes in high temperature bulk tanks. *Applied thermal engineering*. 2018;142:736-44. doi: **org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.029**
- [26] Ahmadi R, Hosseini MJ, Ranjbar AA, Bahrampoury R. Phase change in spiral coil heat storage systems. *Sustainable Cities and Society*. 2018;38:145-57. doi: **org/10.1016/j.scs.2017.12.026**
- [27] Kabbara M, Groulx D, Joseph A. A parametric experimental investigation of the heat transfer in a coil-in-tank latent heat energy storage system. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018;130:395-405. doi: **org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.05.006**
- [28] Kuta M, Matuszewska D, Wójcik TM. Designs of PCM based heat exchangers constructions for thermal energy storage tanks—examples and case study for selected design. In *E3S Web of Conferences 2018 (Vol. 70, p. 01010)*. EDP Sciences. doi: **org/10.1051/e3sconf/20187001010**
- [29] Kabbara MJ, Abdallah NB. Experimental investigation on phase change material based thermal energy storage unit. *Procedia Computer Science*. 2013;19:694-701. doi: **org/10.1016/j.procs.2013.06.092**
- [30] Prieto MM, González B, Granado E. Thermal performance of a heating system working with a PCM plate heat exchanger and comparison with a water tank. *Energy and Buildings*. 2016;122:89-97. doi: **org/10.1016/j.enbuild.2016.03.078**
- [31] Vajjha RS, Das DK. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009;52(21-22):4675-82. doi: **org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.027**
- [32] Vajjha RS, Das DK, Namburu PK. Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al_2O_3 and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *International Journal of Heat and fluid flow*. 2010;31(4):613-21. doi: **org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.02.016**
- [33] Rostami MH, Najafi G, Motevalli A, Sidik NA, Harun MA. Evaluation and improvement of thermal energy of heat exchangers with SWCNT, GQD nanoparticles and PCM (RT82). *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2021;79(1):153-68. doi: **org/10.37934/arfmts.79.1.153168**
- [34] Yao J, Zhu P, Guo L, Duan L, Zhang Z, Kurko S, Wu Z. A continuous hydrogen absorption/desorption model for metal hydride reactor coupled with PCM as heat management and its application in the fuel cell power system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(52):28087-99. doi: **org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.089**
- [35] Busqué R, Torres R, Grau J, Roda V, Husar A. Effect of metal hydride properties in hydrogen absorption through 2D-axisymmetric modeling and experimental testing in storage canisters. *International journal of hydrogen energy*. 2017;42(30):19114-25. doi: **org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.125**
- [36] Royo P, Acevedo L, Ferreira VJ, García-Armingol T, López-Sabirón AM, Ferreira G. High-temperature PCM-based thermal energy storage for industrial furnaces installed in energy-intensive industries. *Energy*. 2019;173:1030-40. doi: **org/10.1016/j.energy.2019.02.118**
- [37] Chaise A, Marty P, de Rango P, Fruchart D. A simple criterion for estimating the effect of pressure gradients during hydrogen absorption in a hydride reactor. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009;52(19-20):4564-72. doi: **org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.052**
- [38] Patankar SV. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Boca Raton: CRC Press; 1980. doi: **org/10.1201/9781482234213**

- [39] Rathod MK, Kanzaria HV. A methodological concept for phase change material selection based on multiple criteria decision analysis with and without fuzzy environment. *Materials & Design*. 2011;32(6):3578-85. doi: **org/10.1016/j.matdes.2011.02.040**
- [40] Jie L, Zhang J, Fan Y, Yu Z, Pan W. A review of composite phase change materials used in battery thermal management systems. *Journal of Energy Storage*. 2025;112:115579. doi: **org/10.1016/j.est.2025.115579**
- [41] Amiri H, Babapoor A, Fallahi-Samberan M, Azimi N, Hadidi A. Simulation and optimization of energy in oil storage tanks using nanocomposite of phase change materials by Computational Fluid Dynamics. *Iranian Journal of Chemical Engineering (IJChE)*. 2023;20(2):62-86. doi: **org/10.22034/ijche.2023.399371.1491**
- [42] Amiri H, Azimi N, Amin H. Optimization of energy in oil pipelines covered with nanofibers of phase change materials using CFD. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.(IJCCE) Research Article Vol*. 2024;43(2). doi: **org/10.30492/ijcce.2023.2001283.6000**
- [43] Sathishkumar A, Cheralathan M. Charging and discharging processes of low capacity nano-PCM based cool thermal energy storage system: An experimental study. *Energy*. 2023;263:125700. doi: **org/10.1016/j.energy.2022.125700**
- [44] Sundriyal A, Verma P, Varshney L. Numerical study of the melting rate enhancement of nano phase change material in a modified shell and tube heat exchanger. *Journal of Energy Storage*. 2024;84:110859. doi: **org/10.1016/j.est.2024.110859**

Intelligent energy management in the oil and gas industries using nanocomposite phase change materials: A review

A. Babapoor^{1,*}, M. Moqadam², M. Shafagati³, A. Shakouri², M. Mohammadniya², Z. Qorbani²

1. Professor of Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili (UMA), Ardabil, Iran.
2. MSc Student of Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili (UMA), Ardabil, Iran.
3. PhD Student of Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili (UMA), Ardabil, Iran.

Abstract: Today, due to the increasing demand for energy and the limitations of fossil fuels as energy sources, the need for renewable energy sources is more critical than ever. One-third of the total energy consumed in the society comes from the industrial sector, a significant portion of which is lost due to inefficiencies in waste heat management. Thermal energy is a major contributor to overall energy consumption. To conserve heat energy, various methods, such as phase change materials (PCMs), can be used to store and release thermal energy during phase transitions. To enhance the efficiency of phase change nanocomposites, which offer benefits such as increased heat capacity, improved heat transfer coefficient, and thermal and chemical stability; these materials can be applied in various industries, including the oil and gas sector. This paper investigated different types of thermal energy storage, with a focus on phase change materials in the oil and gas industry. Two types of nanoparticles were compared in the melting process of phase change materials under different conditions and the thermal efficiency of the nanoparticles was evaluated.

Keywords: Oil, Gas, Phase Change Material, Nanocomposites