DOR:20.1001.1.24234931.1401.9.2.5.8

سال نهم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۱، ص ص ۳۴- ۴۵

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۹/۲۵

مروری جامع بر ذخیره انرژی گرمایی به کمک مواد تغییر فاز (PCM)

پدرام ناصحی[۱]، احمد جامه‌خورشید[۲]*

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

* بوشهر، ۷۵۱۶۹، jamekhorshid@pgu.ac.ir

چکیده

مصرف روزافزون انرژی در دنیای امروز و مشکلات عمده زیست‌محیطی ناشی از آن موجب شده است تا تلاش برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش مصرف انرژی، به عنوان تلاشی برای بهبود مسائل زیست‌محیطی به دغدغه اصلی در تحقیقات نوین جهان تبدیل گردد. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، هر ساله ۱/۸ درصد به مصرف انرژی جهانی و در نتیجه آن به آسیب‌های زیست‌محیطی در جهان افزوده شود. علاوه بر این، با افزایش شدید نیازهای سرمایش و گرمایش در بخش‌های مختلف صنایع و بخصوص نیاز به انرژی گرمایی در سراسر جهان، نیاز به فناوری مناسب که باعث بهبود عملکرد حرارتی در سیستم‌های مختلف شود، بسیار مهم به نظر می‌رسد. نتیجه این نیازها حرکت به طرف انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش مصرف انرژی‌های متعارف بوده است. از طرفی تکنولوژی‌های جدید مانند باتری‌ها و مواد دارویی وابستگی شدیدی به تغییر دما از خود نشان می‌دهند. استفاده از مواد تغییر فاز (PCM) برای استراتژی‌های ذخیره انرژی حرارتی در سیستم‌های مختلف و شاخه‌های مختلف صنایع در صورتی‌که با انتخاب صحیح و آگاهانه همراه شود، می‌تواند الزامات بالقوه و نیازهای حرارتی را برآورده سازد. مقاله تحقیقاتی حاضر، مروری را بر روش‌های مدیریت انرژی با کمک PCMها و قابلیت‌های کلیدی این مواد، ارائه می‌دهد. همچنین به بررسی پیشینه PCMها در صنایع مختلف می‌پردازد. استفاده از PCMها در کاربردهای ساختمانی، باتری‌ها، سیستم‌های گرمایش آب خانگی و سایر کاربردها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین خلاصه‌ای از PCMهای مورداستفاده، خواص مربوط به آن‌ها، مشکلات و راه‌کارهای استفاده از این مواد، سازندگان و آزمایش‌های مورد نیاز برای بررسی آن‌ها، ارائه شده است.

کلمات کلیدی: مواد تغییر فاز، انرژی نهان، سیستم ذخیره انرژی، انرژی تجدید پذیر

Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials (PCMs): A Literature Review

Pedram Nasehi, Ahmad Jamekhorshid*

Faculty of Petroleum, Gas and Petrochemical Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

* P.O.B. 75169, Bushehr, Iran, jamekhorshid@pgu.ac.ir

Received: 18 January 2021 Accepted: 16 December 2021

Abstract

Increasing energy consumption in today's world and the resulting major environmental problems have made efforts to develop renewable energy and reduce energy consumption as an effort to improve environmental issues, especially global warming, become a major concern in modern world research. It is predicted that by 2050, energy consumption and environmental damage will increase by 1.8% annually . In addition, with the sharp increase in cooling and heating needs in various industries, and especially the need for thermal energy around the world, the need for appropriate technology that improves thermal performance in various systems, is very important. The result of these restrictions has been a move towards renewable energy and a reduction in fossil fuel consumption. On the other hand, new technologies such as batteries and drugs are highly dependent on temperature changes. The use of phase change materials (PCMs) to store thermal energy in various industries can solve energy shortage problems. This article provides an overview of energy management practices using PCMs. The background of PCMs in different industries was also examined. The application of PCMs in construction, batteries, home water heating systems and other applications was investigated. A summary of the PCMs used is also provided.

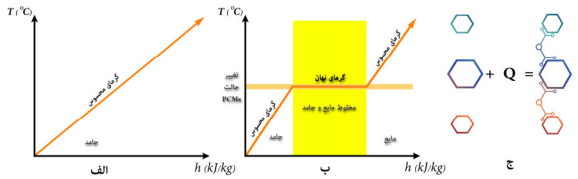
Keywords: Phase change materials (PCM), Latent heat energy, Energy storage system, renewable energy

مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص ۴ کریتیو کامنز محفوظ است

۱- مقدمه

رشد روز افزون جمعیت و اقتصاد جهان، بیش از پیش موجب گشته تا تقاضا و مصرف انرژی افزایش پیدا کند؛ همین افزایش موجب می‌گردد تأثیرات زیست‌محیطی شدیدتر و آسیب‌زاتر شود [۱]. انتشار گازهای گلخانه‌ای بخصوص گاز CO_2 بازیگر اصلی این پیامد است؛ این پیامدها در کنار آسیب‌های مشخص آن‌ها به لایه ازن، می‌تواند بوسیله‌ی پدیده اثر گلخانه‌ای موجب گرم‌تر شدن سیاره‌ی زمین شود [۲]. این عوامل به نوبه خود می‌تواند تقاضا برای انرژی را بیش از پیش تا سال ۲۰۵۰ میلادی افزایش دهد [۳]. در دنیای مدرن امروز تلاش‌هایی نیز برای تولید انرژی از منابع تجدید پذیر صورت پذیرفته است. از نظر تولید برق جهانی، فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر در مجموع ۲۴/۵ درصد از انرژی‌ها را تولید کرده‌اند [۴]؛ اما هم چنان این میزان از تولید کافی نیست و می‌بایست در مصرف انرژی مدیریتی ایجاد شود. ساختمان‌ها (اعم از تجاری یا مسکونی) نقش مهمی در افزایش تقاضا داشته‌اند تا جایی که مسئول مصرف نزدیک به ۴۰ درصد کل انرژی مصرفی جهان و انتشار CO_2 هستند [۵-۶]. علاوه بر این به خوبی مشخص شده است که نزدیک به ۵۰ تا ۶۰ درصد مصرف انرژی در ساختمان‌ها برای راه‌اندازی دستگاه‌های گرمایشی، تهویه و تهویه مطبوع (HVAC[1]) مصرف می‌شود [۷]. در نتیجه به خوبی می‌توان نتیجه گرفت که دستگاه‌های خنک‌کننده و گرمایشی ستون فقرات اصلی مصرف انرژی در دنیای مدرن امروزه هستند و باید برای کاهش بارکاری آن‌ها اقدامات جدی انجام گیرد [۸]. گرمای تولیدی و نیاز به مدیریت منابع حرارتی نه تنها در ساختمان‌سازی بلکه در بسیاری از شاخه‌های صنایع مختلف دیده می‌شود. در سال‌های گذشته ادغام فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES[2]) باعث کاهش اثرات و بار حرارتی دستگاه‌های مختلف شده است. این فناوری‌ها موجب افزایش بهره‌وری دستگاه‌های حرارتی نیز شده‌اند.

ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به سه صورت انجام می‌شود: ذخیره‌سازی انرژی به صورت گرمای محسوس، ذخیره‌سازی انرژی به صورت گرمای نهان و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به واسطه واکنش شیمیایی. تقسیم‌بندی این روش‌ها به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده‌شده است.



شکل ۱ شماتیک نمایش سه حالت، الف: ذخیره گرمای محسوس، ب: ذخیره گرمای نهان، ج: ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به واسطه واکنش شیمیایی [۹]

در ذخیره‌سازی انرژی به صورت گرمای محسوس هیچ تغییر فازی صورت نمی‌گیرد و ذخیره انرژی به صورت افزایش دما قابل مشاهده است. معادله ۱ مقدار ذخیره انرژی به صورت گرمای محسوس را نشان می‌دهد [۱۰].

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT \qquad (۱)$$

در روش ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به صورت گرمای نهان؛ انرژی حرارتی به صورت نهان و با تکیه بر تغییر فاز مواد ذخیره می‌شود. پتانسیل ذخیره انرژی نهان مابین ۵ تا ۱۴ برابر بیشتر از ذخیره انرژی به صورت محسوس است. سیستم ذخیره انرژی به واسطه واکنش شیمیایی بر این اصل استوار است که در طول انجام یک واکنش شیمیایی برای ایجاد یک پیوند یا جدا شدن ترکیباتی از هم به میزان مشخصی انرژی نیاز است. بسیار مهم است که واکنش‌های شیمیایی کاملاً برگشت‌پذیر باشند. جدول ۱ مقایسه‌ای بین ذخیره گرمای محسوس با استفاده از بستر سنگی، مخزن آب و ذخیره گرمای نهان با استفاده از ترکیبات غیر آلی را نشان می‌دهد. معادله ۲ مقدار انرژی ذخیره‌شده در یک سیستم ذخیره گرمای نهان را نشان می‌دهد. در این معادله Cp ظرفیت گرمایی در فشارثابت (J/kg.K)، آنتالپی تغییر فاز (آنتالپی ذوب) (kJ/kg) هستند [۱۰].

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_p dT + ma_m \Delta H + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT \qquad (۲)$$

جدول ۱ مقایسه مابین سیستم‌های TES در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی محسوس و نهان برای افزایش دمای k ۱۵ و kWh ۳۰۰ [۱۰]

مشخصه	سنگ	آب	ذخیره گرمای نهان (مواد غیرآلی)
چگالی (kg/m^3)	۲۲۴۰	۱۰۰۰	۱۶۰۰
گرمای ویژه (kJ/kg)	۱	۴/۲	۲
گرمای نهان (kJ/kg)	-	-	۲۳۰
جرم ذخیره J $۱۰^۶$ (kg)	۶۷۰۰۰	۱۶۰۰۰	۴۳۵۰
نسبت جرم ذخیره	۱۵	۴	۱

در سال‌های اخیر استفاده از مواد تغییر فاز (PCM[3]) به عنوان یکی از فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی انرژی به دلیل قابلیت ذخیره بالای انرژی در آن‌ها و توانایی ذخیره انرژی طی یک فرایند تغییر فاز در دمای تقریباً ثابت (ذخیره انرژی به صورت گرمای نهان) بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۱]. در پژوهش‌های فراوانی توانایی PCMها در صنایع مختلفی همانند نیروگاه‌های خورشیدی برای تنظیم حرارت صفحات، خشک‌کننده‌های خورشیدی در صنایع کشاورزی، دستگاه‌های الکتریکی همچون باتری‌ها، ساختمان‌سازی و آب‌گرم‌کن‌های خانگی بررسی و اثبات شده است [۱۲]. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد با استفاده از PCMها بتوان شکاف مابین عرضه و تقاضا انرژی را در جهان پوشش دارد. این PCMها می‌توانند مدیریت حرارت را بسته به ترکیبشان از دمای ۲۰- تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پوشش دهند [۱۳]؛ PCMها می‌توانند ۱۰ تا ۳۰ درصد از بار مصرفی دستگاه‌های HVAC را کاهش دهند، تأثیر این کاهش بار حرارتی می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های مصرفی برای تأمین انرژی تا ۳۰ درصد شود. همچنین مشخص شده است که دیوارهای ساخته شده با ۳۰ درصد مصالح PCM می‌توانند معادل با دیوارهای به ضخامت ۵ برابری خود حرارت نگهداری کنند [۱۴]. در مقاله برای توانایی بهتر در انتخاب و بکارگیری PCMها آزمایش‌های کنترل کیفت و انواع تولیدکننده‌های مهم در کنار مدل بکارگیری آن‌ها آورده شده است.

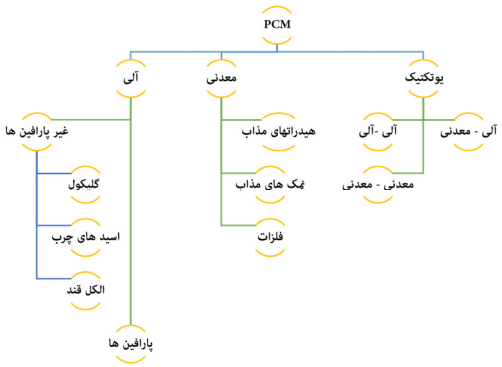
۲- مواد تغییر فاز (PCM)

PCMها را می‌توان بر اساس تغییر حالت در زمان دریافت انرژی و تغییر فاز به سه دسته مایع - جامد، مایع – گاز و جامد – جامد تقسیم‌بندی کرد؛ در میان سه فرم موجود آن‌ها مواد تغییر فاز جامد-مایع پرکاربردترین هستند؛

1. Heating, Ventilating and Air Conditioning
2. Thermal Energy Storage
3. Phase Change Material

که به سه دسته مواد آلی (پارافین و اسیدهای چرب)، مواد معدنی (نمک‌های هیدرات و فلزات) و یوتکتیک[1] تقسیم می‌شوند [۱۵]. یوتکتیک‌ها دسته‌ای از مواد هستند که از ترکیب دو یا چند PCM دیگر بدست آمده‌اند؛ بصورتی که دمای ذوب و انجماد هماهنگ، متقارن و بدون تفکیکی را دارا هستند [۱۶]. هرکدام از PCMها دارای ویژگی‌ها، نقاط قوت و ضعف خاصی هستند که در ادامه تلاش می‌شود ویژگی‌های هرکدام و موضوعات پیرامون آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۲ دسته‌بندی فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و جایگاه PCMها در این فناوری‌ها نشان داده‌شده است. برای بهبود شرایط استفاده از PCMها می‌بایست تقسیم‌بندی کلی آنها درک شود و ویژگی‌های آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۳ تقسیم‌بندی کلی PCMها نشان داده شده است.

شکل ۲ شماتیک دسته‌بندی فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی



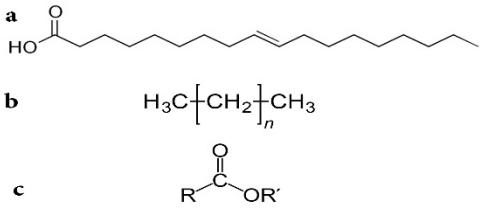
شکل ۳ تقسیم‌بندی انواع PCMها [۱۷]

۲-۱- طبقه‌بندی PCMها

مواد تغییر فازی که فرایند شارژ و تخلیه حرارتی خود را در فاز جامد-مایع انجام می‌دهند، در سه زیرگروه اصلی آلی، غیر آلی (معدنی) و یوتکتیک تقسیم‌بندی می‌شوند. PCMهای آلی به زیرگروه پارافین‌ها و غیر پارافین‌ها که شامل اسیدهای چرب، الکل قند و گلیکول‌ها هستند، تقسیم می‌شوند. PCMهای معدنی شامل نمک‌های هیدراته، نمک‌های ذوب شده و فلزات هستند و در نهایت PCMهای یوتکتیک که از ترکیب دو یا چند ماده مختلف تشکیل شده‌اند که در یک دما تغییر حالت می‌دهد و خود شامل PCMهای آلی – آلی، آلی – معدنی و معدنی – معدنی می‌شوند [۱۸]. طبقه‌بندی PCMها در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۱-۱- PCMهای آلی

PCMهای آلی دسته مواد طبیعی هستند که در طبیعت یافت می‌شوند و بیشتر آن‌ها را زنجیره‌های هیدروکربن‌ها تشکیل می‌دهند. در میان مواد آلی غیر پارافینی، اسیدهای چرب و استرها مشهورترین این مواد را تشکیل می‌دهند. در شکل ۴ شماتیک ساختاری این مواد نشان داده شده است [۱۹]. از طرفی پارافین‌ها از یک مخلوط الکان با ساختار $CH_3–[CH_2]_n–CH_3$ تشکیل شده‌اند. در پارافین‌ها با افزایش طول زنجیره CH_2 دمای تغییر فاز و گرمای نهان افزایش می‌یابد. به این ترتیب دمای تغییر فاز آن‌ها می‌تواند از ۱۲ تا ۷۱ درجه سانتی‌گراد تغییر کند و گرمای نهان آن‌ها نیز بر اساس طول زنجیره متفاوت است. در میان ویژگی‌های این نوع PCMها می‌توان به این مورد اشاره کرد که این مواد قادر به ذوب و انجماد مجدد مداوم بدون تخریب یا جدایش فازهایشان[2] هستند. این مواد پایداری شیمیایی بالایی دارند، مشکل فوق سرمایش[3] ندارند، خورنده نیستند، قابلیت بازیافت دارند؛ اما رسانایی حرارتی کمی را دارا هستند (معمولاً کمتر از ۰/۲ $W/m^2 K$)، قابلیت اشتعال و تغییر حجم زیاد نیز دارند [۲۰]. مشکلات جدایش فازی و فوق سرمایش به ترتیب در بخش‌های ۴-۲ و ۴-۳ توضیح داده شده‌اند. PCMهای آلی غیر پارافینی در مقابل پارافین‌ها گران‌قیمت‌تر هستند ولی به دلیل پایداری خوبشان در شرایط آب‌وهوای متفاوت برای کارهای صنعتی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۱].



شکل ۴ شماتیک ساختاری a: اسیدهای چرب، b: n – الکان‌ها، c: استرها

۲-۱-۲- PCMهای معدنی

PCMهای معدنی معمولاً ظرفیت ذخیره‌سازی حرارت بالاتر در جرم برابر، اشتعال‌پذیری کمتر و قیمت مناسب‌تری در مقابل PCMهای آلی دارند؛ اما این مواد دارای مشکل خورنده بودن، جدایش فازی و فوق سرمایش هستند که ویژگی این مواد را تحت‌الشعاع خود قرار داده است. از مشهورترین مواد این گروه می‌توان به نمک‌های هیدراته و محلول‌های نمک – فلز اشاره کرد که همچنان نمک‌های هیدراته مشهورتر و پرکاربردتر در فرایندهای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی هستند [۲۲]. دلیل این کاربرد را می‌توان تراکم قابل‌توجه انرژی حرارتی در آن‌ها در واحد حجم (حدود ۳۵۰ MJ/m^3)، هدایت حرارتی بالا (۰/۵ W/m K) و قیمت ارزان در مقابل PCMهای آلی دانست [۲۳].

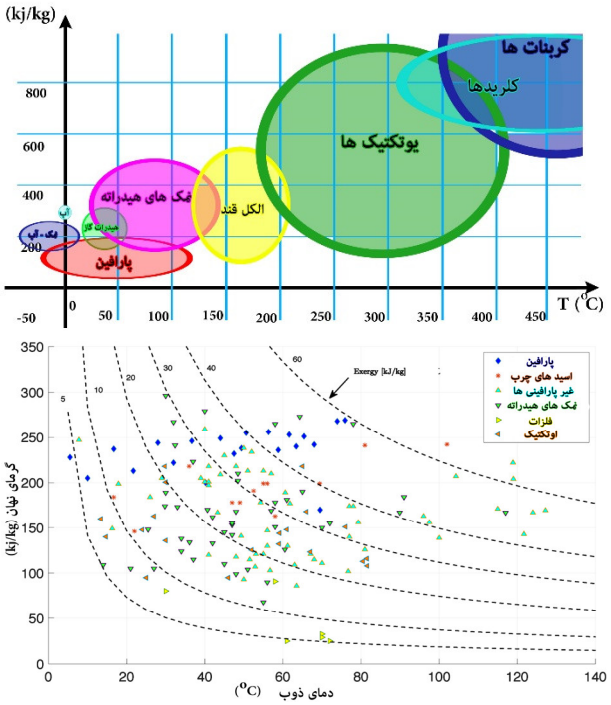
۲-۱-۳- PCMهای یوتکتیک

در این میان، PCMهای یوتکتیک به واسطه ترکیب شدن دو یا چند ماده و تشکیل یک ماده نهایی می‌توانند ویژگی‌های کلیدی را داشته باشند و دارای نقطه ذوب و انجماد متقارن و بدون تفکیک فازی و پایداری بالایی باشند [۲۴]. در طی فرایند انجماد، مواد تشکیل‌دهنده آن همگی باهم یک کریستال واحد را تشکیل می‌دهند. جدا شدن اجزای سازنده این مواد بسیار بعید است به این دلیل که در زمان فرایند انجماد کریستال یکپارچه تشکیل می‌دهند و همچنین بدون تفکیک فاز این فرایند را انجام می‌دهند. همچنین در طول فرایند ذوب شدن تمامی اجزا همزمان به مایع تبدیل می‌شوند [۲۵].

1. Eutectic

2. Phase Segregation
3. Supercooling

به دلیل تنوع بالای PCMها می‌توان آن‌ها را در بازه‌های بسیار بالای دمایی مورد استفاده قرار داد و عملاً بسته به شرایط کاری می‌توان از مواد مختلفی با دمای ذوب مختلفی استفاده کرد. در شکل ۵-الف و ۵-ب نمودار دماهای ذوب مواد مختلف نشان داده شده است. برای انتخاب PCM مناسب برای کار و فعالیت مورد نظر می‌بایست پارامترهای بیشتری را مدنظر قرار داد. پارامترهای فراتر از دمای ذوب شدن این مواد در شکل ۶ دسته‌بندی شده‌اند.



شکل ۵ الف- دماهای ذوب و آنتالپی‌های ذوب برای PCMها [۲۶]، ب- گرمای نهان و دمای ذوب PCMهای مختلف بصورت مجزا [۲۷]

شکل ۶ دسته‌بندی پارامترهای انتخاب PCMها [۲۸-۲۹]

۳- خواص تأثیرگذار در انتخاب PCMها

برای انتخاب یک PCM مناسب برای برنامه مورد نظر می‌بایست خواص حرارتی، فیزیکی، سینتیکی، شیمیایی و ترمودینامیکی و موضوع اقتصاد آن را در نظر گرفت.

۳-۱- خواص حرارتی

برای بررسی خواص حرارتی PCMها می‌توان به سه ویژگی دمای مناسب تغییر فاز، گرمای نهان زیاد و انتقال حرارت خوب اشاره کرد. در زمان انتخاب PCM مناسب می‌بایست به دمای ذوب آن توجه داشت تا در محدوده مدنظر باشد. به عنوان مثال در بسیاری از شرایط استفاده از این مواد، از حرارت روز و سرمای شب برای به تعادل رسیدن این مواد استفاده می‌شود؛ در نتیجه باید محدوده تغییر حالتشان در دمای مابین ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد باشد، بخصوص در موارد استفاده در ساختمان‌ها [۳۰]. معمولاً از PCMهایی که در دمای زیر ۱۵ درجه ذوب می‌شوند برای خنک‌سازی استفاده می‌شود و از موادی که در دمای بالای ۹۰ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند برای دستگاه‌های تبرید استفاده می‌شود. تمامی موادی که در مابین این دو دما ذوب می‌شوند می‌توانند در سازوکارهای عمومی و برای ذوب شدن با گرمای ایجاد شده از خورشید مورد استفاده قرار بگیرند.

۳-۲- خواص فیزیکی

برای بررسی خواص حرارتی PCMها می‌توان به چهار فاکتور پایداری فاز، تراکم بالا، تغییر حجم کم و فشار بخار کم اشاره کرد. پارامتر پایداری فاز کمک می‌کند تا در زمان تغییر فاز (ذوب شدن و انجماد) ذخیره حرارتی تنظیم‌شده‌ای داشته باشد. تراکم بالا (دانسیته بالا) موجب می‌شود که در حجم کمتری میزان بیشتری از ذخیره‌سازی رخ دهد. در نهایت تغییر حجم کم و فشار بخار کم موجب می‌شوند در زمان تغییر فاز مشکلات به وجود آمده در اثر تغییر حجم مواد سازنده یا تبخیر شدن وجود نداشته باشد.

۳-۳- خواص شیمیایی

در کنار ویژگی‌های فیزیکی، PCMها می‌بایست دارای ویژگی‌های شیمیایی مهمی همچون پایداری شیمیایی، سازگاری با مصالح ساختمانی، غیر سمی، غیر خورنده و غیر قابل اشتعال نیز باشند تا این اطمینان را ایجاد کنند که می‌توان از آن‌ها استفاده کرد [۳۱]. PCMها می‌بایست طول عمر بالا داشته باشند. این فاکتور را می‌توان به دو صورت تعریف کرد. اولاً نباید پس از زمانی خودبه‌خود تخریب شوند. دوماً در اثر چندین دوره تغییر حالت باید حالت و پایداری خود را حفظ کنند تا ازنظر اقتصادی مقرون به صرفه باشند.

۳-۴- خواص سینتیکی

از جمله مهم‌ترین خواص سینتیکی می‌توان به نداشتن مشکل فوق سرمایش، داشتن سرعت بالای هسته‌زایی و سرعت‌بالای تشکیل کریستال اشاره کرد. مشکل فوق سرمایش به خصوص در نمک‌های هیدراته مشاهده می‌شود. وجود این مشکل یکی از پارامترهای تأثیرگذار برای جلوگیری از گسترش مواد PCM به شمار می‌رود. این مشکل در مقدارهای کم قابل چشم‌پوشی است اما اگر این مشکل مابین ۵ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد و یا بیش از آن باشد عملاً باعث بلا استفاده شدن PCM می‌شود.

۳-۵- خواص ترمودینامیکی

از نظر ترمودینامیکی PCMها باید دارای ظرفیت گرمای نهان بالایی باشند تا در نتیجه آن بتوانند در حجم کمتر، انرژی حرارتی بیشتری را ذخیره کنند. این ویژگی باعث می‌شود تا آن‌ها بتوانند پوشش‌های سبک و کم حجمی را ایجاد کنند و همزمان راندمان قابل قبولی را نیز بدهند. علاوه بر این می‌بایست ظرفیت گرمایی ویژه‌ی (C_p) بالایی را نیز دارا باشند [۴۰].

۳-۶- شرایط اقتصادی

اما در نهایت فاکتور تعیین‌کننده برای PCMها و تمامی مواد و فرایندهای موجود در دنیا بحث قیمت و در دسترس بودن آن ماده است. به این ترتیب که این مواد باید به گونه‌ای انتخاب شوند که از نظر اقتصادی ارزش استفاده را دارا باشند [۳۲].

۴- مشکلات PCMها

۴-۱- هدایت حرارتی

همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد یکی از فاکتورهای محدودکننده استفاده از PCMها مشکل هدایت حرارتی کم آن‌ها است؛ که در شرایطی می‌تواند استفاده از آن‌ها را به عنوان دستگاه‌های خنک‌کننده محدود و غیر عملی کند. برای برطرف کردن این مهم، سه روش عمده پیشنهاد شده است: (۱) ساخت کامپوزیت‌های PCMها همراه با فلزات مختلف یا گرافیت‌های ویژه برای افزایش انتقال حرارت، (۲) استفاده از مواد فلزی به شکل کره، صفحه، پروانه و باله برای افزایش انتقال حرارت در داخل PCMها، (۳) استفاده از نانو مواد در ساختار PCMها. نانو موادی که می‌تواند در ساختار PCMها مورد استفاده قرار گیرند شامل انواع نانو کربن‌ها (انواع نانولوله‌های کربنی)، فلزات پایدار (طلا و مس)، CuO، Al_2O_3، اکسید فلزات (سیلیس، آلومینا، زیرکونیوم)، نیتریدهای فلزی (آلومینیوم نیترید) و ... هستند [۳۳]. در شکل ۷ روش‌های افزایش هدایت حرارتی PCMها از طریق افزودن مواد به ساختارشان نشان داده شده است.

شکل ۷ روش‌های افزایش هدایت حرارتی PCMها از طریق افزایش مواد به ساختار آنها

اگرچه مطالعات متعددی برای افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی PCMها صورت پذیرفته است، اما برخی از مطالعات نشان می‌دهند که افزایش بیش از اندازه میزان این ضریب، باعث کاهش عملکرد PCMها در ذخیره انرژی می‌شود. این مهم، بخصوص در کاربردهایی که نیاز به نرخ انتقال حرارت پایین دارند، نمود بیشتری دارد [۳۴-۳۵].

۴-۲- جدایش فازی PCMها

برای روشن شدن این موضوع می‌توان نمک‌های هیدراته را مثال زد. این نمک‌ها از کاهش چگالی ذخیره انرژی خود رنج می‌برند. به این صورت که تکرار چرخه‌ی گرمایش و سرمایش، منجر به کاهش مداوم کارایی ذخیره‌سازی انرژی گرمایی آن‌ها می‌شود. این مشکل یکی از عمده‌ترین مشکلات نمک‌های هیدراته است که به عنوان ناهمسانی در ذوب یا جدایش فازی بیان می‌شود. این مشکل باعث می‌شود که آب آزاد شده از ماده جامد در هنگام تغییر فاز، برای تغییر فاز (ذوب کردن) تمام مواد جامد کافی نباشد، و به سبب اختلاف دانسیته، نمک‌های با آب کمتر یا بدون آب در کف ظرف ته‌نشین شوند. این فرایند برگشت‌ناپذیر است و تکرار این روند منجر به تشکیل نمک هیدراته پایین‌تر از نمک اصلی در زمان ذوب می‌شود تا در نهایت توانایی حرارتی خود را از دست دهند. این مشکل را می‌توان در مواد یوتکتیک نیز مشاهده کرد؛ جایی که این مواد به مواد تشکیل‌دهنده خود تقسیم می‌شوند. در تحقیقات مختلفی مشخص شده است که وجود آب اضافه برای برطرف کردن نمک‌های بدون آب، موجب افزایش پایداری نمک‌ها می‌شود. اما در عمل ایجاد پوشش‌های قوی برای جلوگیری از تماس با بیرون یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌ها برای جلوگیری از کاهش چگالی ذخیره انرژی نمک‌های هیدراته است [۳۶].

۴-۳- فوق سرمایش در PCMها

فوق سرمایش یکی دیگر از مشکلاتی است که در PCMها و بخصوص در نمک‌های هیدراته وجود دارد و موجب کاهش راندمان این مواد می‌شود. این مشکل بدان معنا است که برای بازگشت ماده به فاز جامد نیاز به سرد کردن آن تا دماهای کمتر از دمای تغییر فازش است. مطالعات فراوانی برای رفع این مشکل صورت گرفته است. به طور کلی می‌توان بیان کرد که هم زدن این مواد در زمان ذوب شدن می‌تواند کاهش در این مشکل و مشکل تجزیه را به همراه داشته باشد [۳۷]. در آزمایش‌های زیادی مشخص‌شده با افزودن مواد مختلف با توانایی بهبود ساختار بلوری و پایداری ساختار هیدراته PCMها، می‌توان از مشکل فوق سرمایش در نمک‌های هیدراته جلوگیری کرد. مشکل فوق سرمایش در مواردی که خیلی حاد باشد موجب می‌شود عملاً ماده به حالت جامد خود باز نگردد و روند کاری را متوقف کند. با کمک موادی که می‌توانند به هسته‌زایی و حفظ کریستال این نمک‌ها کمک کنند، می‌توان این مشکل را تا میزان بسیار بالایی برطرف کرد [۳۶]. در شکل ۸ شماتیک تغییر دمای یک ماده PCM در زمان تغییر فاز که از مشکل فوق سرمایش رنج می‌برد، نشان داده شده است.

شکل ۸ شماتیک تغییر آنتالپی و دمای یک ماده PCM در زمان تغییر فاز که از مشکل فوق سرمایش رنج می‌برد

۵- تولیدکننده‌های PCMها

یکی از ویژگی‌های اصلی در مورد PCMها، در دسترس بودن و موجود بودن آن‌ها در بازار است؛ اما به دلیل محدود بودن استفاده از این مواد و تولید خاص آن‌ها، همچنان کمبود زیادی در زمینه تأمین این مواد در سطح جهان حس می‌شود. با بررسی منابع مشخص می‌شود در سطح جهان اندک شرکت‌هایی اقدام به تولید تجاری این مواد می‌کنند که اکثراً در اروپا هستند. همین دلیل به تنهایی کافی است که قیمت این مواد همچنان بالا باقی بماند. در جدول ۲ تولیدکنندگان شاخص PCMها در سرتاسر جهان نشان داده شده است.

۶- روش‌های کپسوله کردن PCMها

برای استفاده از PCMها روش‌های گوناگونی وجود دارد که ساده‌ترین آن مخلوط کردن آن‌ها در مواد اولیه ساختمانی یا هر سیستمی که قرار است در

آن مورد استفاده قرار گیرند. به این روش تزریق مستقیم یا اختلاط مستقیم[1] می‌گویند. با وجود ارزان و ساده بودن این روش، اما مشکل نشت کردن مایع در زمان ذوب شدن PCMها به شدت در این روش دیده می‌شود. به همین دلیل از نظر کاری، طول عمر و کارایی مواد را کاهش می‌دهند. در نتیجه برای برطرف کردن این مشکل روش‌های کپسول‌سازی[2] پیشنهاد شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۰]. روش‌های کپسول‌سازی در سه سطح ماکرو، میکرو و نانو تقسیم‌بندی می‌شوند که با توجه به شرایط و محیط مورد استفاده می‌توان از آن‌ها استفاده کرد [۴۱].

جدول ۲ شرکت‌های تولیدکننده‌ی PCM ها [۳۹]

ردیف	نام شرکت	کشور	نوع محصول	کد محصول
۱	Rubitherm GmbH	آلمان	نمک‌های هیدراته	SP RT
۲	Merck KGaA	آلمان	پارافین‌ها نمک‌های هیدراته	-
۳	Climator AB	سوئد	نمک‌های هیدراته	ClimSel C
۴	Cristopia Energy Systems	فرانسه	نمک‌های هیدراته	AC
۵	PCM Energy	هند	نمک‌های هیدراته	LatestTM
۶	Mitsubishi Chemical	ژاپن	نمک‌های هیدراته	STL
۷	EPS Ltd	انگلستان	پارافین	PlusICE
۸	Croda Europe Ltd	اروپا	نمک‌های هیدراته مبتنی بر زیست مواد	CrodaTherm

۶-۱- ماکرو کپسوله

ماکروکپسول‌ها به بسته‌بندی PCMها در محفظه‌های به ابعاد با قطر بیش از ۱ میلی‌متر، و معمولاً بیش از ۱ سانتی‌متر، به شکل‌های کروی، صفحه‌ای یا لوله‌ای اطلاق می‌شود. در صنعت و مخصوصاً در ساختمان‌سازی، کپسول‌های ماکرو کاربرد بیشتری دارند به دلیل اینکه می‌توانند به سادگی با مواد ساختمانی ترکیب شده و در ساختمان استفاده شوند. [۴۱].

۶-۲- میکرو کپسوله

میکروکپسول‌ها به بسته‌بندی PCMها اطلاق می‌شود که ابعاد کپسول آن‌ها مابین ۱ تا ۳۰۰ میکرومتر باشد. کپسوله‌سازی میکرو را می‌توان یکی از بهترین راه حل‌ها برای افزایش سرعت انتقال حرارت در PCMها دانست. محصول نهایی را که پوششی از پلیمرهای آلی یا سلیس دارد را MEPCM[3] می‌نامند [۴۰]. از نظر عملی و کاری ساخت این نوع کپسول‌ها در این سایزها می‌تواند بهتری راندمان را از نظر اقتصادی به همراه داشته باشد. نظر به اهمیت آشنایی با روش‌های ساخت میکروکپسول‌ها، در بخش ۶-۴ به طور جداگانه به آنها پرداخته شده است.

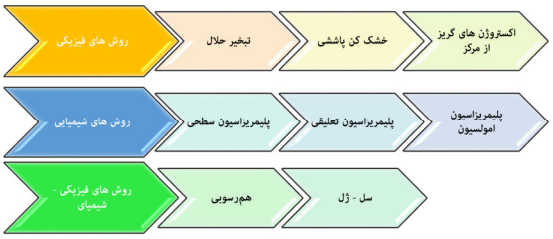
1. Direct Impregnation or Mixing
2. Encapsulation
3. Microencapsulated Phase Change Material

۶-۳- نانو کپسوله

کپسول‌های تولید شده کوچک‌تر از ۱ میکرومتر را نانو کپسول می‌خوانند. نانوکپسول‌ها از نظر اقتصادی هنوز جای کار بسیاری دارند.

۶-۴- روش‌های ساخت میکروکپسول‌های PCM

فرایند میکروکپسولاسیون[4] عملیاتی است که در طی آن ذرات کوچک PCMهای تشکیل‌شده در ابعاد میکرومتر تا میلی‌متر را با پوشش‌های غیر آلی یا پلیمری پوشش می‌دهند [۴۲]. اشکال تولیدی برای میکروکپسول‌ها وابسته به مواد مورد استفاده و ویژگی‌های مورد نیاز فرایند است [۴۳]. روش‌های مورد استفاده برای ساخت میکروکپسول‌ها در شکل ۹ نشان داده‌شده است.



شکل ۹ روش‌های پرکاربرد برای ساخت میکرو کپسول‌ها [۴۴]

۶-۴-۱- روش‌های فیزیکی

روش‌های فیزیکی ازجمله فرایندهایی هستند که پوشش دور میکروکپسول‌ها را بواسطه فرایندهای مکانیکی ایجاد می‌کنند.

- تبخیر حلال[5]: در این روش PCM را در یک حلال حل می‌کنند و با سرعت بالا هم می‌زنند. سپس ماده پوشش‌دهنده (پلیمر) مورد نظر را به آرامی به حلال اضافه می‌کنند. پس از هم زدن در مدت‌زمان مورد نظر و کافی، به آرامی اقدام به تبخیر کردن حلال می‌کنند. در شکل ۱۰ شماتیک این فرایند نشان داده شده است.

شکل ۱۰ شماتیک فرایند تبخیر حلال

- خشک‌کن‌های پاششی[6]: خشک‌کن‌های پاششی دستگاه‌هایی هستند که با پاشیدن مخلوط مایع به صورت اسپری شده در یک مخزن با دمای هوای بالا و یا گاز داغ موجب خشک شدن سریع ترکیب می‌شوند. از این دستگاه‌ها در فرایندهای متعددی استفاده می‌شود. [۴۵].
- اکستروژن گریز از مرکز[7]: در این فرایند مواد اصلی در فاز مایع از درون یک لوله جریان دارند و مواد پوشش‌دهنده در اطراف آن‌ها در لوله‌ای دیگر به صورت چرخشی جریان دارند و سپس مواد اصلی به داخل پوشش‌دهنده‌ها تزریق می‌شوند. [۴۶].

4. Microencapsulation
5. Solvent evaporation
6. Spray drying
7. Centrifugal extrusion

۶-۴-۲- روش‌های فیزیکی – شیمیایی

- هم‌رسوبی[1]: یکی از ساده‌ترین روش‌های ساخت ذرات، رسوب‌دهی مواد کم محلول آبی آن‌ها است. واکنش هم‌رسوبی شامل مراحل هسته‌زایی، رشد، انعقاد و یا فرآیند لخته‌سازی است. در این واکنش ابتدا مواد اولیه در یک حلال معمولی حل می‌شوند و سپس عامل رسوب‌دهنده اضافه می‌شود. [۴۵].
- سل–ژل[2]: از فرایند سل-ژل به طور گسترده برای سنتز انواع نانو ساختارها استفاده می‌شود. روش سل-ژل روش ارزانی است که به دلیل دمای پایین واکنش می‌توان با این روش نانو ذراتی با کیفیت بالا (تولید ذرات با اندازه یکسان) و با خلوص بالا تهیه کرد.

۶-۴-۳- روش‌های شیمیایی

- پلیمریزاسیون سطحی: تشکیل شدن یک دیواره در اطراف PCMها در این روش نتیجه ایجاد یک پلیمریزاسیون سریع از مونومرهای آب دوست و چربی دوست است که به کمک یک امولسیون روغن در آب به وجود می‌آید.
- پلیمریزاسیون تعلیقی: در این روش برای ایجاد پوسته‌های محافظ در اطراف PCMها مونومرها در محلول خود به صورت معلق در می‌آیند. در این روش همزدن مکانیکی و وجود یک عامل به عنوان معلق کننده مونومر ضروری است.
- پلیمریزاسیون امولسیونی: در این روش مونومرها به صورت بسیار ریز و محلول شده به صورت فاز ناپیوسته در فاز پیوسته سیال پخش می‌شود. این مونومرها با کمک عوامل پایدار کننده با یک واکنش رادیکال آزاد پلیمریزاسیون می‌شود.

۷- آنالیزهای رایج برای PCMها

برای بررسی مواد PCM دو دسته آنالیز مورد نیاز است:

- آنالیزهای تشخیص ساختار و مواد تشکیل دهنده؛
- آنالیزهای خواص ذخیره‌سازی حرارتی.

دسته اول آنالیزها برای مشخص کردن ساختار مواد و مواد تشکیل‌دهنده و مورفولوژی سطح PCMها است که در میان آن‌ها می‌توان به آزمایش‌های متعارف XRD، SEM، FESEM، TEM و FTIR اشاره کرد. این دسته از آنالیزها برای تعیین دقیق ساختار مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند.

دسته دوم آنالیزهای خواص ذخیره‌سازی حرارتی هستند. سه آنالیز وزنی حرارتی (TGA[3])، روبش کالریمتری تفاضلی (DSC[4]) و آنالیز T-history جزو این دسته از آنالیزها هستند. هر سه روش، در اصل با گرم کردن ماده مورد نظر و مقایسه آن با ماده مرجع کار می‌کنند. وزن سنجی گرمایی که به اختصار TGA نامیده می‌شود. TGA روشی برای بررسی رفتار یک ماده در مقابل حرارت است. در این روش مقدار مشخصی از یک ماده را حرارت می‌دهند و تغییرات وزنی آن را در دماهای مختلف ثبت می‌کنند تا درصد تغییر وزن آن ماده مشخص شود. با توجه به نمودار تغییر وزن آن می‌توان دریافت که رفتار ماده در برابر دماهای مختلف چگونه بوده است. در این آزمایش می‌توان تشخیص پایداری حرارتی، میزان رطوبت، درصد ترکیبات آلی و معدنی، تعیین میزان افزایش وزن ناشی از اکسیداسیون فلزات و ... را مشخص کرد. دستگاه DSC دستگاهی است که برای مشخص شدن توانایی حرارتی یک ماده از آن استفاده می‌کنیم. در این دستگاه گرم‌کن‌های الکتریکی جداگانه برای گرمایش نمونه مجهول و شاهد وجود دارد و دو ترموکوپل دمای نمونه‌ها را مشخص می‌کنند. مدار کنترل‌کننده پس از دریافت نشانه‌های دمایی مربوط به نمونه‌ها، مقدار انرژی لازم را برای یکسان نمودن دما تعیین و اعمال می‌کند. بنابراین تفاوت انرژی داده شده به نمونه‌ها برحسب دما توسط ثبات رسم می‌گردد. روش DSC به عنوان یک روش تفاضلی تعریف شده و لذا در آن رفتار نمونه با ماده مرجع مقایسه می‌شود. آنالیز T-history اولین بار توسط یین پینگ و همکاران در سال ۱۹۹۹ توسعه یافت. این روش امکان دستیابی به نقطه ذوب، دمای فوق سرمایش، هدایت حرارتی و گرمای نهان تغییر فاز چندین نمونه PCM را به طور همزمان فراهم می‌کند.

۸- کاربردهای PCMها

کاربرد ذخیره انرژی حرارتی با PCMها محدود به گرمایش و خنک‌سازی انرژی خورشیدی یا دستگاه‌های خاصی نیست بلکه در سایر صنایع نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه تلاش می‌کنیم تقسیم‌بندی عمده و کاربردهای آن مواد را بررسی کنیم.

۸-۱- کاربردهای ساختمانی

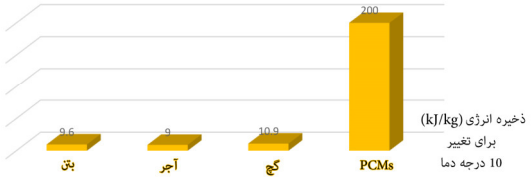
مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از PCM در ساختمان می‌تواند دما را در طول روز تا حدود ۴ درجه سانتیگراد کاهش دهد. البته این کاهش دما بستگی به دمای محیط دارد [۴۷]. مطالعات صورت گرفته، بر روی استفاده از PCMها در اجزای مختلف یک ساختمان تمرکز داشته‌اند. در مطالعه‌ای مشخص شد که پر کردن دیوارهای ساختمانی از PCMها موجب کاهش ورود گرمای محیط به درون ساختمان می‌شود. در این تحقیق دیوارهای توخالی ساخته شده را با PCM پر کردند و پس از بررسی مشخص شد که نزدیک به ۶۰ درصد کاهش ورود گرمای محیط به درون خانه بدست آمده است [۴۸]. استفاده از PCMها در ساختار نمای ساختمان و در دودکش‌های خورشیدی بر این پایه استوار است که در طول روز گرمای تابیده شده به این سطوح، انرژی را ذخیره کرده و در طول شب انرژی را آزاد کنند. این سیستم‌ها علاوه بر اینکه می‌توانند در طول روز موجب کاهش حرارت درون ساختمان شوند (وجود PCMها در نماهای ساختمان موجب جلوگیری از نفوذ حرارت به اجزای داخلی خانه می‌شود)، در طول شب و سرد شدن ساختمان، انتشار حرارت موجود در این مواد، باعث گرم شدن ساختمان می‌شود. این رفتار عملاً نیاز به مصرف انرژی برای بهینه کردن دمای ساختمان را کاهش می‌دهد. مشخص‌شده است که با استفاده از دودکش‌های خورشیدی می‌توان تا W/m^2 ۷۰۰ انرژی ذخیره کرد [۴۹].

ویک و همکاران در تحقیق آزمایشگاهی سقف اتاق اداری به مساحت m^2 ۱۵ را در اسلو نروژ با استفاده از Bio-PCM Q۲۳ پوشش دادند. این آزمایش با سقف‌های پوشش داده‌شده با PCM و بدون آن انجام گرفت. نتیجه آزمایش نشان داد که با استفاده از PCM می‌توان دمای اتاق را ۳/۳ درجه سانتی‌گراد کاهش داده و زیر ۲۶ درجه سانتی‌گراد نگه داشت [۵۰]. وانگ و همکاران پوشش دیواری آمده شده‌ای که درون آن با مواد MEPCM پر شده بود را درون یک خانه قرار دادند. سپس با استفاده از انتقال اجباری و طبیعی هوا گرمای محیط را به طرف آن‌ها هدایت کردند. با بررسی پروفایل دمایی مشخص شد که مواد درون پوشش دیوار، ۴ ساعت در طول روز با گرفتن گرما

1. Coacervation
2. Sol-gel
3. Thermo-Gravimetric Analysis
4. Differential Scanning Calorimeter

شارژ شده‌اند و این حرارت را در طول ۳ ساعت به محیط برگشت داده‌اند. نتیجه این آزمایش نشان داد که این پوشش‌ها می‌تواند در بهبود حرارت محیط تأثیرگذار باشد. علوادی و همکاران با استفاده از PCM به کار رفته در سقف بتونی ساختمان و با کمک آزمایش عددی و تجربی به تحلیل این موضوع پرداختند که قطر PCMها با ثابت نگه‌داشتن حجم، چه تأثیری روی کارایی آن‌ها خواهد داشت. در عمل نشان داده شده که تأثیر دمای ذوب مناسب در PCMها می‌تواند راندمان حرارتی را بسته به نوع چینش و سبک قرار دادن مواد روی هم، ۱۲ تا ۱۷ درصد بهبود ببخشد و در عمل نیاز به انرژی برای گرم کردن محیط را در ساعت‌های ۱۲ تا ۵ صبح کاهش دهد. همچنین این تحقیق نشان داد که تأثیر تابش خورشید و برخورد نور با سطح برای شارژ کردن مواد بسیار زیاد است. همچنین سیلوا و همکارانش در یک تحقیق مطالعاتی و با اعتبار بخشی به آن با کمک شبیه‌سازی CFD[1]، به بررسی تأثیر وجود پرده‌های اتاق حاوی مواد PCM پرداختند. در آزمایش انجام‌گرفته در ابعاد واقعی، دو پرده یکی حاوی PCM و دیگری بدون آن موجود بود که نتایج با استفاده از بررسی عملکرد حرارتی این دو پرده بررسی شد. نتایج نشان داد که وجود PCM در پرده باعث کاهش دما در زمان اوج گرما به میزان ۸/۷ درصد و افزایش دما در زمان اوج سرما به میزان ۱۶/۷ درصد می‌شود. همچنین مشخص شد که این کارایی به مدت ۱ ساعت و ۳۰ دقیقه برقرار بوده است [۵۱]. زو و همکاران با بررسی و ساخت پوشش‌های محافظ برای دو طرف بیرونی و داخلی دیوارهای بتنی توسط PCM موفق شدند کارایی این مواد را به عنوان لایه رویی دیوار ثابت کنند. ضخامت نهایی مورد تأیید برای لایه‌های خارجی و داخلی به ترتیب ۶۰ و ۳۰ میلی‌متر به دست آمد و مشخص شد این لایه‌ها می‌توانند در فصل گرما و سرما به ترتیب باعث کاهش ۳/۹ و ۱۸/۸ درصد انرژی شوند [۵۲].

به طور کلی می‌توان گفت که از PCMها می‌توان به عنوان بافر حرارتی به گونه‌ای استفاده کرد که بتوان اوج حرارتی در زمان‌های گرم را کاهش داد و متقابلاً کمترین دمای شب را نیز افزایش داد. محدوده دمایی ذوب مناسب PCMها برای دستگاه‌های خنک‌سازی در حدود ۲۰ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد است؛ اما برای زمانی که هدف ذخیره انرژی باشد یا شرایط محیط خاص باشد می‌توان این مواد را در محدوده ذوب ۳۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب کرد [۵۳]. در شکل ۱۱ میزان انرژی مورد نیاز برحسب kJ/kg برای افزایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد در مواد مختلف ساختمانی و یک PCM نمونه نشان داده شده است.

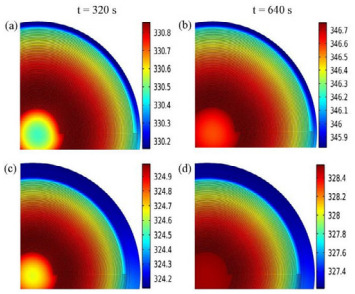


شکل ۱۱ انرژی موردنیاز برحسب (kJ/kg) برای افزایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد در مواد مختلف ساختمانی و یک PCM نمونه

۸-۲- باتری‌ها

امروزه استفاده از سیستم‌های هیبریدی مبتنی بر باتری‌های لیتیوم یونی به صورت چشم‌گیری در حال افزایش است. استفاده از باتری‌ها از دیرباز در زندگی انسان‌ها نقش‌های کلیدی داشته است. با به روی کارآمدن سیستم‌های تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و با توجه به اینکه این سیستم‌ها تولید یکنواخت و همیشگی را در طول روز ندارند، می‌بایست بتوان این انرژی را ذخیره کرد [۵۴]. انرژی تولیدی از منابع باد، خورشید و ... هرچند خوب هستند ولیکن همیشگی و قابل پیش‌بینی در طول سال نیستند. همچنین همواره نیاز به مصرف تمام انرژی تولیدی نیست. به همین سبب صرف‌نظر از ابعاد آن‌ها لزوم ذخیره‌سازی انرژی تولیدی در دنیا بسیار مهم است [۵۵].

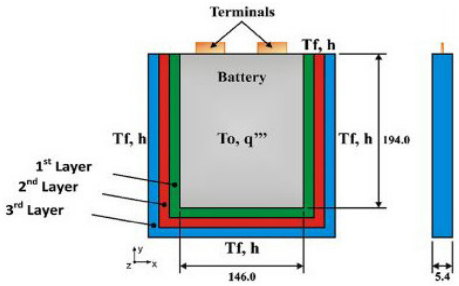
باتری‌ها از جمله وسایلی هستند که به شدت به دما حساس هستند و تغییر دما بر عملکرد آن‌ها تأثیر می‌گذارد [۵۶]. همری و همکاران مشخص کردند که وجود PCMها می‌تواند در کنار باتری‌ها موجب گردد تا دمای باتری‌های افزایش‌یافته به باتری‌های کناری انتقال پیدا نکند و عملاً بتوانند دمای باتری را در بدترین شرایط، زیر ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهدارند. این در حالی بود که در صورت استفاده نکردن از این مواد، دمای باتری‌های مجاور به سرعت بالا رفته و باعث به وجود آمدن مجموعه‌ای از واکنش‌های زنجیره‌ای بود [۵۷]. سوماسوندارام و همکاران در یک مطالعه عددی شبیه‌سازی‌شده موفق شدند تأثیر وجود PCMها را در کنترل دمای باتری‌ها لیتیوم یونی استوانه‌ای در زمان تخلیه به حالت گالوانواستاتیک (به حالتی گفته می‌شود که باتری با حداکثر ظرفیت خود در حال خالی شدن باشد) مشخص کنند. برای این آزمایش از PCM ساخته‌شده از پارافین به همراه ماتریکس گرافیت استفاده شد. نتایج نشان داد که وجود PCM می‌تواند دمای باتری‌ها را حداکثر ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد. در شکل ۱۲ می‌توانید شماتیک آزمایش انجام‌گرفته را ببینید.



شکل ۱۲ نتیجه آزمایش عددی سوماسوندارام و همکاران [۵۸] (a,b) بدون استفاده از PCM و (c,d) با استفاده از PCM

در تحقیقی دیگر موراگا و همکاران به کار بردن چند PCM به صورت لایه‌ای روی هم را پیشنهاد دادند که با استفاده از مدل‌های ریاضی، پیشنهاد را بررسی کرده و نتایج قابل قبولی به دست آمد. آن‌ها حرارت ایجادشده در زمان تخلیه باتری‌های مدل خود را بررسی کردند. در این کار از سه لایه PCM در کنار یک لایه پوسته خود باتری استفاده شد که در عمل ۴ لایه را تشکیل داد. شماتیک این طراحی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از این آزمایش به این ترتیب بود که ترکیب این مواد موجب بهبود کنترل حرارت باتری‌ها خواهد شد. برای بهبود انتقال حرارت می‌بایست مواد با هدایت حرارتی بالاتر را در نزدیک باتری قرار داد و کمترین هدایت حرارتی را در دورترین لایه قرار داد. بهترین نوع چینش باعث کاهش ۲۳ درجه سانتی‌گرادی دمای درون باتری شد. بهترین راندمان با نمک‌های هیدراته به دست آمد [۵۹].

1. Computational Fluid Dynamics



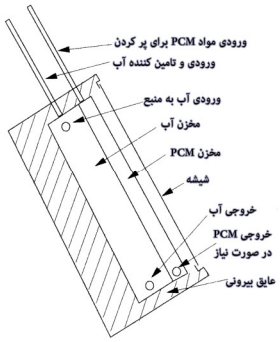
شکل ۱۳ شماتیک طراحی لایه‌های PCMها در آزمایش موراگا و همکاران [۵۹]

۸-۳- سیستم‌های گرمایش آب خانگی

یکی از بخش‌های مصرفی انرژی در دنیای امروز، گرم کردن آب مصرفی خانگی مخصوصاً در ماه‌های سرد سال است. تا جایی که در فصل‌های سرد سال تا ۷۰ درصد انرژی مصرفی خانه‌ها می‌تواند برای گرم کردن فضا و آب مصرفی استفاده می‌شود [۶۰]. از طرف دیگر می‌توان گفت که یکی از موفق‌ترین کاربردهای استفاده از انرژی خورشیدی، در سیستم‌های گرمایش آب خانگی (DWHS[1]) است. یکی از نکات منفی در زمان استفاده از این سیستم، عدم توانایی آن‌ها در نگهداری و ذخیره انرژی حرارتی در خودشان است. همچنین مانند دیگر سیستم‌های تجدید پذیر، غیر قابل پیش‌بینی بوده و ناهماهنگی در عرضه و تقاضا وجود دارد [۶۱]. به این دلیل یافتن راه‌هایی برای افزایش این توانایی بسیار مهم است. سیستم‌های DWHS بر این اساس کار می‌کنند که با استفاده از صفحه‌های قرار گرفته در برابر نور خورشید در طول روز انرژی حرارتی را جذب مایع درون خود می‌کنند و در زمان مورد نیاز، این انرژی را آزاد می‌کنند. میزان راندمان سیستم به نوع مایع و میزان توانایی نگهداری انرژی حرارتی در آن وابسته است. PCMها با توجه به این‌که توانایی نگهداری انرژی حرارتی را در خود دارند، می‌توانند بهبود قابل توجه‌ای را برای گرم کردن آب در طول روز و خصوصاً شب ایجاد کنند. تحقیق‌های فراوانی برای نشان دادن این خواص انجام‌گرفته است.

احمد کوئرکلو و همکاران در مطالعه‌ای در کشور ترکیه با استفاده از یک کلکتور خورشیدی توسعه‌یافته به مساحت ۱/۴۴ m^2 که با PCM بهبود کاری یافته بود توانستند مدیریت انرژی را به خوبی انجام دهند. در این تحقیق با استفاده از پارافین قرارگرفته در کلکتور خورشیدی در محفظه‌ای در مجاورت آب جریانی، موفق شدند که تا دمای آب را برای شب نیز مدیریت کنند؛ به این ترتیب که دمای آب در طول روز تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد بالا رفت و این دما در طول شب در مرز ۳۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. در این طراحی، صفحه از فولاد گالوانیزه ساخته شد و پارافین در قسمت بالا و آب در قسمت پایین نگهداری شد. پس از آزمایش‌های نهایی مشخص شد که سیستم پیشنهادی نسبت به سیستم سنتی ۴۱/۶ درصد در مدیریت انرژی بهتر عمل کرده است [۶۲]. در شکل ۱۴ شماتیک سیستم طراحی شده در این تحقیق نشان داده شده است.

در تحقیق دیگر ویکرام و همکاران پارافین محبوس شده در لوله‌های از جنس آلومینیوم را که درون مخزن ذخیره آب بود به عنوان راه‌کاری در افزایش بهره‌وری این سیستم‌ها ارائه دادند. برای این کار یک کلکتور خورشیدی به مساحت ۲ m^2 را در کشور هلند در زیر نور خورشید قرار دادند. در طول این کار هدف ذخیره انرژی خورشیدی در طول روز و استفاده از این انرژی در طول شب برای گرم کردن آب و دیگر وسایل لازم بوده است. به همین دلیل از دو سیستم به صورت همزمان استفاده شد. به این صورت که هم‌زمان آب و PCM در طول روز گرم می‌شوند و انرژی را ذخیره می‌کنند. آب‌گرم‌کن خورشیدی در طول روز برای تأمین آب گرم استفاده می‌شود و از PCM برای تأمین انرژی گرمایی و گرم کردن آب در طول شب استفاده می‌شود. در طول روز با چرخش آب بر روی کلکتور خورشیدی و هدایت آن بر روی PCM، باعث شارژ شدن آن‌ها می‌شوند و در طول شب با جایگزین کردن آب موجود در مخزن و اضافه کردن آب تازه، آب گرم شده در مخزن را مصرف می‌کنند. در طول این فرایند انرژی موجود در PCM به آب تازه داده می‌شود و موجب گرم شدن آن می‌شود. نتایج نشان داد که این سیستم توانایی گرم کردن تقریباً ۴۷ لیتر آب را در طول شب دارد و کارایی لازم را نشان می‌دهد. برای گرم کردن این آب به حدود ۱۰۰ دقیقه زمان نیاز بود. همچنین مشخص شد که با جریان چرخشی ۲ لیتر در ساعت می‌توان در طول روز مواد را کاملاً شارژ کرد [۶۳].



شکل ۱۴ سیستم طراحی‌شده توسط احمد کوئرکلو به همراه PCM ها [۶۲]

۸-۴- گرمایش گلخانه‌ها

استراتژی‌های صرفه‌جویی در انرژی برای همه بخش‌ها از حمل‌ونقل تا ساختمان‌ها اهمیت حیاتی دارد. این موضوع در بخش‌های گلخانه‌ای نیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. زیرا گلخانه‌ها در حال حاضر نقش بسزایی در مصرف انرژی دارند. از طرفی نمی‌توان نیاز فزاینده به انرژی در بخش گلخانه‌ها را کاهش داد، چون گلخانه‌ها اطمینان در برداشت پایدار را ایجاد می‌کنند. گلخانه‌ها به دلیل داشتن عایق‌های ضعیف، به صورت معمول بین ۲۰ تا ۴۰ درصد انرژی را از دست می‌دهند. بهینه‌سازی‌های انجام گرفته در گلخانه‌ها می‌تواند دربرگیرنده‌ی ترکیب پارامترهای مختلفی باشد. این پارامترها می‌تواند به عنوان ترکیب با سایر عملگرهای موجود در گلخانه‌ها مانند سیستم تولید برق انرژی خورشیدی برای افزایش راندمان آن باشد یا می‌تواند به صورت مستقیم برای مدیریت حرارتی آن‌ها باشد [۶۴].

در تحقیقی عطار و همکاران نشان دادند که استفاده از یک صفحه خورشیدی به مساحت ۲/۱۸ مترمربع و استفاده از ۲۰۰ لیتر آب درون منبع با کمک مواد PCM درون منبع به عنوان نگهدارنده حرارت، می‌توان حرارت محیطی را در ۲۰ درجه سانتی‌گراد برای یک گلخانه ای به مساحت ۱۰ مترمربع ثابت نگهداشت [۶۵].

۸-۵- سیستم‌های سرمایشی نوین

در سال‌های اخیر، نقش سیستم‌های گرمایشی و تهویه مطبوع در ساختمان‌ها از نظر تأمین آسایش حرارتی و الزامات قابل قبول تهویه برای ساکنین، بدون از دست دادن بهره‌وری انرژی، بسیار مهم است. به منظور کاهش مصرف کل

1. Domestic Water Heating Systems

انرژی ساختمان، فناوری حفاظت از انرژی بویژه قابل استفاده در سیستم‌های تهویه مطبوع، در حال توسعه است؛ که در میان آن‌ها استفاده از PCMها تحقیقات بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند. عملکرد PCMها در این سیستم‌ها نیز می‌تواند در مجموعه متغیرهای متفاوتی نمود پیدا کند. کامسوارا رائو و همکاران دریافتند با بهینه‌سازی مصرف انرژی با کمک صفحه‌های خورشیدی برای خنک‌سازی ساختمان‌ها می‌توان تا ۱۲ درصد مصرف انرژی را کاهش داد [۳۰]. در این کار از مواد PCM برای مدیریت دمای مولدهای تولید انرژی کمک گرفتند. در تحقیق دیگری اردم و همکاران دریافتند که با بهینه‌سازی چیلرهای مورد استفاده درون ساختمان‌های بزرگ می‌توان تا ۴۷ درصد کاهش مصرف را ایجاد نمود. این فرایند در صورتی است که از اکونومایزر و قابلیت ذخیره حرارتی PCMها برای مدیریت حرارتی در چیلرها استفاده کرد.

۸-۶- PCMها در ایران

با توجه مباحث بیان شده می‌توان نتیجه گرفت که PCMها در ایران به دلیل داشتن آب‌وهوای چهار فصل می‌توانند در مباحث کنترل دمای ساختمان‌ها کاربرد زیادی داشته باشند. همچنین با توجه به وجود صنایع سنگین در ایران می‌توان از قابلیت‌های این مواد در صنایع نیز کمک گرفت. این موضوع از این نظر حساسیت بیشتری پیدا می‌کند که در نظر بگیریم ایران با داشتن اقلیم خشک، نیاز به مدیریت حرارتی در تمامی بخش‌های صنعتی را دارد.

۸-۷- سایر کاربردها

لیست موارد استفاده از PCMها بسیار طولانی و بلند است و عملاً می‌توان در هر صنعتی نشانه‌هایی از این مواد را یافت. همین موضوع باعث می‌شود بیش از پیش به قابلیت‌های این مواد پی ببریم. کاربرد این مواد را در صنایع نساجی برای مدیریت حرارت بدن انسان می‌توان به روشنی دید. جایی که برای جلوگیری از عرق کردن بدن با گرفتن حرارت ایجاد شده یا برای ایجاد گرما در اسکی روی برف و یا در پتوها برای نگه‌داشتن گرمای بدن، استفاده می‌شوند. همچنین در صنایع پزشکی و بهداشتی برای ثابت نگه‌داشتن دمای داروها و واکسن‌ها در زمان انتقال می‌توان از PCMها استفاده کرد. این مواد می‌توانند در زمان انتقال اعضای بدن نیز مفید باشند. فرم سنتی انتقال در ظروف حاوی یخ به شدت می‌تواند خطر یخ‌زدگی را ایجاد کنند. از این مواد می‌توان در ثابت نگه‌داشتن دمای اعضای حساس به خوبی استفاده کرد. همچنین سال‌هاست که از PCMها برای درمان‌های حرارتی استفاده می‌شود. زمانی که در فیزیوتراپی‌ها نیاز به حرارت دادن بدن باشد، از کیسه‌های حاوی PCM برای گرم نگه‌داشتن قسمت خاصی از بدن استفاده می‌شود. کاربرد PCMها را نمی‌توان در هیچ صنعتی محدود کرد. از آنها می‌توان در واکنش‌های شیمیایی یا آزمایش‌های علمی برای ثابت نگه‌داشتن دقیق دمایی محیط آزمایش استفاده کرد. حتی در سلول‌های خورشیدی برای ثابت نگه‌داشتن دمای آن‌ها استفاده می‌شود. لیست موارد استفاده از این مواد را همچنان می‌توان ادامه داد و مواردی از هر صنعتی را مثال زد. همین مثال‌ها کافی است تا بدانیم دنیای PCMها دنیایی رو به رشد، توانمند، مفید و امیدبخش است.

۹- جمع‌بندی

در این نوشتار به بررسی ویژگی‌های PCMها به عنوان بخشی از سیستم‌های مدیریت مصرف انرژی گرمایی و سیستم‌های کنترل دما پرداخته شد. در نتیجه‌ی گزارش‌های بررسی شده از مقالات مختلف مشخص شد که PCMها برای مدیریت انرژی حرارتی و کنترل دما بسیار کارآمد و مفید هستند. در این مقاله PCMها به سه دسته اصلی آلی، غیر آلی و یوتکتیک تقسیم‌بندی شدند و ویژگی‌های هر کدام به صورت کامل بررسی و نقایص موجود در این مواد و راه‌حل‌های برطرف کردن این مشکلات نیز مشخص شد. در ادامه مشکلات استفاده از PCMها بدون پوشش خاص که شامل واکنش با محیط اطراف، نشت مواد در زمان ذوب شدن و کمبود سطح تماس آن‌ها بود، ذکر شد و برای حل آن روش‌های کپسوله کردن در سه اندازه ماکرو، میکرو و نانو عنوان شد. در نهایت کاربردهای صنعتی PCMها در بخش‌های ساختمانی، باتری‌ها، سیستم‌های گرم‌کننده آب با نور خورشید و سایر کاربردهای این مواد بررسی شد و نشان داده شد که این مواد توانایی استفاده در صنایع مختلف را به خوبی دارند. نتیجه‌های دریافتی از مقاله می‌تواند به شرح زیر باشد.

- از PCMها می‌توان به عنوان بافر حرارتی برای کنترل دمای ساختمان‌ها استفاده کرد. تحقیقات نشان داده است PCMها می‌توانند دمای اوج گرما و اوج سرما را مدیریت کنند و تأثیرات آن را کاهش دهند.
- PCMها را می‌توان بسته به نیاز کاری و سیستم مورد نظر، در دامنه دماهای بسیار زیادی انتخاب کرد.
- PCMها می‌توانند مدیریت دمایی را در باتری‌ها ایجاد کنند تا تغییرات دمایی در آن‌ها به حداقل برسد.
- PCMها می‌توانند راندمان سیستم‌های گرماساز خورشیدی را افزایش دهند.
- مشکلات موجود در مواد PCM می‌تواند با راه‌کارهای ارائه شده در منابع مختلف برطرف شود و بهبود پیدا کند.

۱۰- مراجع

[1] M. F. Zia, E. Elbouchikhi, and M. Benbouzid, Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects, *Applied Energy,* Vol. 222, pp. 1033–1055, 2018.

[2] P. Nasehi, B. Mahmoudi, S. F. Abbaspour, and M. S. Moghaddam, Cadmium adsorption using novel MnFe 2 O 4-TiO 2-UIO-66 magnetic nanoparticles and condition optimization using a response surface methodology, *RSC Advances*, Vol. 9, No. 35, pp. 20087–20099, 2019.

[3] L. Tripathi, A. K. Mishra, A. K. Dubey, C. B. Tripathi, and P. Baredar, Renewable energy: An overview on its contribution in current energy scenario of India, Renew. Sustain. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, pp. 226–233, 2016.

[4] S. Teske, A. Fattal, C. Lins, M. Hullin, and L. E. Williamson, *Renewables global futures report: Great debates towards 100% renewable energy,* France 978-3-9818107-4-5, 2017.

[5] B. R. Hughes, H. N. Chaudhry, and S. A. Ghani, A review of sustainable cooling technologies in buildings, *Renewable & Sustainable Energy Reviews.* Vol. 15, No. 6, pp. 3112–3120, 2011.

[6] J. K. Calautit, H. N. Chaudhry, B. R. Hughes, and S. A. Ghani, Comparison between evaporative cooling and a heat pipe assisted thermal loop for a commercial wind tower in hot and dry climatic conditions, *Applied Energy*, Vol. 101, pp. 740–755, 2013.

[7] B. A. Young, G. Falzone, Z. Wei, G. Sant, and L. Pilon, Reduced-scale experiments to evaluate performance of composite building envelopes containing phase change materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 162, pp. 584–595, 2018.

[8] P. Nasehi, M. S. Moghaddam, S. F. Abbaspour, and N. Karachi, Preparation and characterization of a novel Mn-Fe2O4 nanoparticle loaded on activated carbon adsorbent for kinetic, thermodynamic and isotherm surveys of aluminum ion adsorption, *Separation Science and Technology*, Vol. 55, No. 6, pp. 1078–1088, 2020.

[9] A. de Gracia and L. F. Cabeza, Phase change materials and thermal energy storage for buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 103, pp. 414–419, 2015.

[10] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, and S. Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 9–10, pp.

[31] C. Barreneche, H. Navarro, S. Serrano, L. F. Cabeza, and A. I. Fernández, New database on phase change materials for thermal energy storage in buildings to help PCM selection, *Energy procedia*, Vol. 57, pp. 2408–2415, 2014.
[32] A. M. Khudhair and M. M. Farid, A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 2, pp. 263–275, 2004.
[33] X. Q. Zhai, X. L. Wang, T. Wang, and R. Z. Wang, A review on phase change cold storage in air-conditioning system: Materials and applications, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, pp. 108–120, 2013.
[34] W. Sun, R. Huang, Z. Ling, X. Fang, and Z. Zhang, Numerical simulation on the thermal performance of a PCM-containing ventilation system with a continuous change in inlet air temperature, *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 1608–1619, 2020.
[35] Z. Ma, W. Lin, and M. I. Sohel, Nano-enhanced phase change materials for improved building performance, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 1256–1268, 2016.
[36] G. A. Lane, Phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 27, No. 2, pp. 135–160, 1992.
[37] M. M. Farid and A. N. Khalaf, Performance of direct contact latent heat storage units with two hydrated salts, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 52, No. 2, pp. 179–189, 1994.
[38] B. Zalba, J. M. Marın, L. F. Cabeza, and H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 251–283, 2003.
[39] A. Waqas and Z. U. Din, Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 18, pp. 607–625, 2013.
[40] B. P. Jelle and S. E. Kalnæs, Phase change materials for application in energy-efficient buildings, *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting*, pp. 57–118, Elsevier, 2017.
[41] G. A. Lane, Low temperature heat storage with phase change materials, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 1, No. 3, pp. 155–168, 1980.
[42] V. V Tyagi, S. C. Kaushik, S. K. Tyagi, and T. Akiyama, Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: a review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 2, pp. 1373–1391, 2011.
[43] C.-Y. Zhao and G. H. Zhang, Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): fabrication, characterization and applications, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 8, pp. 3813–3832, 2011.
[44] A. Jamekhorshid, S. M. Sadrameli, and M. Farid, A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 31, pp. 531–542, 2014.
[45] S. K. Ghosh, Functional coatings and microencapsulation: a general perspective, *Functional Coatings*, pp. 1–28, 2006.
[46] P. Venkatesan, R. Manavalan, and K. Valliappan, Microencapsulation: a vital technique in novel drug delivery system, *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, Vol. 1, No. 4, pp. 26–35, 2009.
[47] J. Heier, C. Bales, and V. Martin, Combining thermal energy storage with buildings–a review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 1305–1325, 2015.
[48] P. Thantong and P. Chantawong, Experimental study of a solar wall collector with PCM towards the natural ventilation of model house, *Energy Procedia*, Vol. 138, pp. 32–37, 2017.
[49] Y. Li and S. Liu, Experimental study on thermal performance of a solar chimney combined with PCM, *Applied Energy*, Vol. 114, pp. 172–178, 2014.
[50] T. A. Vik, H. B. Madessa, P. Aslaksrud, E. Folkedal, and O. S. Øvrevik, Thermal performance of an office cubicle integrated with a bio-based PCM: experimental analyses, *Energy Procedia*, Vol. 111, pp. 609–618, 2017.
[51] T. Silva, R. Vicente, C. Amaral, and A. Figueiredo, Thermal performance of a window shutter containing PCM: Numerical validation and experimental analysis, *Applied Energy*, Vol. 179, pp. 64–84, 2016.
[52] N. Zhu, P. Liu, P. Hu, F. Liu, and Z. Jiang, Modeling and simulation on the performance of a novel double shape-stabilized 1597–1615, 2004.
[11] A. Maccarini, G. Hultmark, N. C. Bergsøe, and A. Afshari, Free cooling potential of a PCM-based heat exchanger coupled with a novel HVAC system for simultaneous heating and cooling of buildings, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 42, pp. 384–395, 2018.
[12] N. S. Dhaidan and J. M. Khodadadi, Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, pp. 449–477, 2015.
[13] K. Du, J. Calautit, Z. Wang, Y. Wu, and H. Liu, A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges, *Applied Energy*, Vol. 220, pp. 242–273, 2018.
[14] K. Muruganantham, P. Phelan, P. Horwath, D. Ludlam, and T. McDonald, Experimental Investigation of a Bio-Based Phase Change Material to Improve Building Energy Performance, *in ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability,* pp. 979-984, 2010.
[15] A. Fallahi, G. Guldentops, M. Tao, S. Granados-Focil, and S. Van Dessel, Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 127, pp. 1427–1441, 2017.
[16] S. Keleş, K. Kaygusuz, and A. Sarı, Lauric and myristic acids eutectic mixture as phase change material for low-temperature heating applications, *International Journal of Energy Research*, Vol. 29, No. 9, pp. 857–870, 2005.
[17] D. Zhou, C.-Y. Zhao, and Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy*, Vol. 92, pp. 593–605, 2012.
[18] R. Zeinelabdein, S. Omer, and G. Gan, Critical review of latent heat storage systems for free cooling in buildings, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 2843–2868, 2018.
[19] M. M. Kenisarin, Thermophysical properties of some organic phase change materials for latent heat storage. A review, *Solar Energy*, Vol. 107, pp. 553–575, 2014.
[20] A. K. Pandey et al., Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 281–323, 2018.
[21] A. Sarı, Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid–liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 13–14, pp. 2033–2042, 2004.
[22] G. Ferrer, A. Solé, C. Barreneche, I. Martorell, and L. F. Cabeza, Review on the methodology used in thermal stability characterization of phase change materials, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, pp. 665–685, 2015.
[23] M. Iten and S. Liu, A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air-TES systems, *Energy Conversion and Management*, Vol. 77, pp. 608–627, 2014.
[24] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierrès, and L. Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 18, pp. 327–349, 2013.
[25] E. Osterman, V. V Tyagi, V. Butala, N. A. Rahim, and U. Stritih, Review of PCM based cooling technologies for buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 49, pp. 37–49, 2012.
[26] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen, Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 9, pp. 1361–1368, 2010.
[27] S. Landini, J. Leworthy, and T. S. O'Donovan, A review of phase change materials for the thermal management and isothermalisation of lithium-ion cells, *Journal of Energy Storage*, Vol. 25, p. 100887, 2019.
[28] C. Zeng, S. Liu, and A. Shukla, Adaptability research on phase change materials based technologies in China, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 73, pp. 145–158, 2017.
[29] A. Solé, L. Miró, C. Barreneche, I. Martorell, and L. F. Cabeza, Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM), *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 26, pp. 425–436, 2013.
[30] V. A. A. Raj and R. Velraj, Review on free cooling of buildings using phase change materials, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 9, pp. 2819–2829, 2010.

phase change materials wallboard, *Energy and Buildings*, Vol. 107, pp. 181–190, 2015.
[53] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, and C. Castelain, Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 119, pp. 109579, 2020.
[54] Z. Rao and S. Wang, A review of power battery thermal energy management, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 9, pp. 4554–4571, 2011.
[55] M. C. Lott, S.-I. Kim, C. Tam, D. Houssin, and J. F. Gagné, *Technology roadmap: energy storage,* International Energy Agency, Paris, France, 2014.
[56] B. Shabani and M. Biju, Theoretical modelling methods for thermal management of batteries, *Energies*, Vol. 8, No. 9, pp. 10153–10177, 2015.
[57] C.-V. Hémery, F. Pra, J.-F. Robin, and P. Marty, Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material, *Journal of Power Sources*, Vol. 270, pp. 349–358, 2014.
[58] K. Somasundaram, E. Birgersson, and A. S. Mujumdar, Thermal–electrochemical model for passive thermal management of a spiral-wound lithium-ion battery, *Journal of Power Sources*, Vol. 203, pp. 84–96, 2012.
[59] N. O. Moraga, J. P. Xamán, and R. H. Araya, Cooling Li-ion batteries of racing solar car by using multiple phase change materials, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 108, pp. 1041–1054, 2016.
[60] R. Adib et al., *Renewables 2015 global status report,* REN21 Secr. Paris, France, 2015.
[61] R. Velraj, R. V Seeniraj, B. Hafner, C. Faber, and K. Schwarzer, Heat transfer enhancement in a latent heat storage system, *Solar Energy*, Vol. 65, No. 3, pp. 171–180, 1999.
[62] A. Kürklü, A. Özmerzi, and S. Bilgin, Thermal performance of a water-phase change material solar collector, *Renewable Energy*, Vol. 26, No. 3, pp. 391–399, 2002.
[63] D. Vikram, S. Kaushik, V. Prashanth, and N. Nallusamy, An improvement in the solar water heating systems by thermal storage using phase change materials, *in ASME 2006 International Solar Energy Conference,* pp. 409–416, 2006.
[64] D. R. Vieira, J. L. Calmon, and F. Z. Coelho, Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review, *Construction and Building Materials*, Vol. 124, pp. 656–666, 2016.
[65] I. Attar, N. Naili, N. Khalifa, M. Hazami, M. Lazaar, and A. Farhat, Experimental study of an air conditioning system to control a greenhouse microclimate, *Energy Conversion and Management*, Vol. 79, pp. 543–553, 2014.