



بررسی نحوه انتقال جرم مواد تغییر فاز دهنده در طول فرآیندهای ذوب و انجماد باهدف بهینه سازی انرژی

حمید حسنی فر¹، علی خوشبین¹، زهرا بلنداختر¹، شقایق رضائی¹، عزیز باباپور^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

2- استاد، مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

* اردبیل، 179، babapoor@uma.ac.ir

چکیده:

مواد تغییر فاز دهنده (PCM) توانایی ذخیره انرژی به عنوان انرژی نهفته با تغییر فاز را دارند و انرژی ذخیره شده را در زمان مورد نظر که به فاز اولیه خود بازمی گردند، تأمین می کنند. استفاده از سیستم پایش مادون قرمز نشان داد که افزایش غلظت مس/پارافین سرعت ذوب را افزایش و زمان ذوب را کاهش می دهد که به دلیل هدایت حرارتی بالاتر و گرمای نهان کمتر مس/پارافین است که باعث ذخیره حرارتی بالاتر می شود. در فرآیند انجماد، ماده مایع ابتدا به نیمه مایع، خمیر و سپس به جامد تبدیل می شود. بررسی ها نشان داد که افزایش غلظت مس/پارافین سرعت انجماد را افزایش می دهد و افزودن نانوذرات مس به سیال پایه، هدایت حرارتی و سرعت انجماد را بهبود می بخشد. نمایه های دمایی اسید میریستیک و مواد تغییر فاز مرکب نشان داد که با پیشرفت فرآیند انجماد، دمای این مواد نسبت به اسید میریستیک بیشتر کاهش می یابد. همچنین، مواد تغییر فاز دهنده می توانند از فاز جامد به مایع، جامد به جامد و جامد به گاز تبدیل شوند، که انتقال جامد به مایع برای ذخیره انرژی حرارتی ترجیح داده می شود. افزایش چگالی ذخیره انرژی باعث کاهش حجم می شود و ذخیره سازی گرمای نهان به دلیل چگالی بالای ذخیره سازی انرژی و ماهیت هم دما بودن آن، روشی مناسب برای ذخیره سازی انرژی حرارتی است.

کلیدواژه ها: انرژی های تجدید پذیر، مواد تغییر فاز دهنده، انتقال جرم، ذوب، انجماد

Investigating the mass transfer of phase change materials during melting and freezing processes with the aim of energy optimization

Hamid Hasanifar¹, Ali Khoshbin¹, Zahra Bolandakhtar¹, Shaghayegh Rezaei¹ Aziz Babapoor^{2*}

1-Master of Science, Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2-Professor, Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

* P.O.B. 179, Ardabil, Iran, babapoor@uma.ac.ir

Received: 17 July 2024 Accepted: 21 September 2024

Abstract:

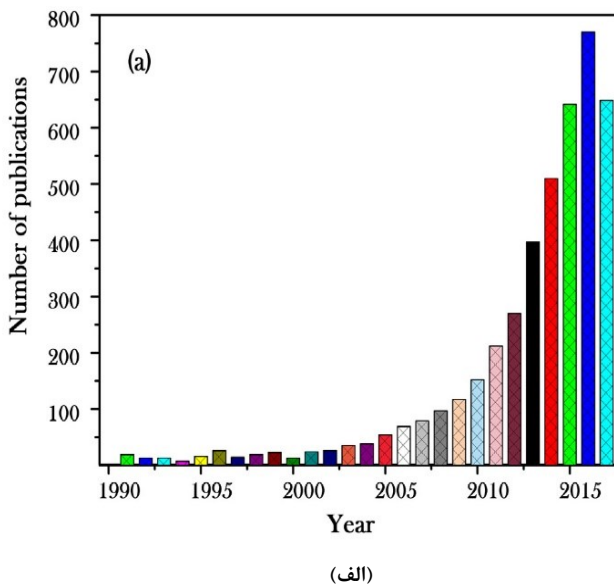
Phase change materials (PCM) have the ability to store energy as latent energy by changing phase and provide the stored energy at the desired time when they return to their original phase. The use of infrared monitoring system showed that increasing the concentration of copper/paraffin increases the melting speed and reduces the melting time, which is due to the higher thermal conductivity and lower latent heat of copper/paraffin, which causes higher thermal storage. In the freezing process, the liquid material turns into a semi-liquid, paste and then into a solid. Investigations showed that increasing the concentration of copper/paraffin increases the freezing speed and adding copper nanoparticles to the base fluid improves thermal conductivity and freezing speed. The temperature profiles of myristic acid and composite phase change materials showed that as the freezing process progresses, the temperature of these materials decreases more than

myristic acid. Also, phase change materials can change from solid to liquid, solid to solid, and solid to gas. , where solid-to-liquid transition is preferred for thermal energy storage. Increasing the energy storage density reduces the volume, and latent heat storage is an effective way to store thermal energy due to the high density of energy storage and its isothermal nature.

Keywords: Renewable energies, Phase change materials, Mass transfer, Melting, Solidification

1- مقدمه

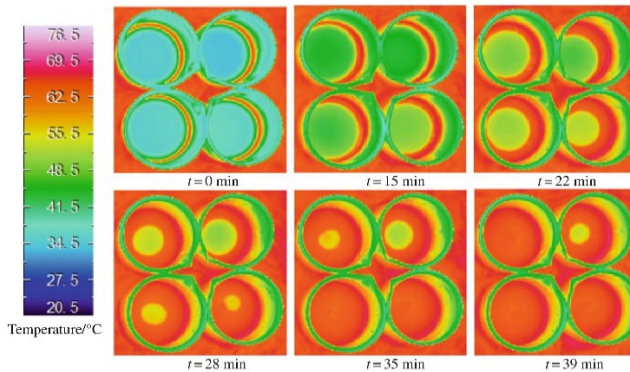
در حالی که سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیب انرژی تا سال 2040 از 40 درصد تجاوز نمی‌کند. این مقیاس بندی تحت سناریوی 100٪ سیستم انرژی تجدیدپذیر توسط سایر دانشگاهیان با استناد به فرضیات بیش از حد ساده شده مورد تردید قرار گرفته است. یک ادعای کلیدی این است که سناریوهای 100٪ انرژی‌های تجدیدپذیر پیشرفت تکنولوژیکی بسیار سریع و افزایش زیرساخت-های انرژی تجدیدپذیر را بدون ارزیابی کامل از محدودیت‌های مهندسی و فیزیکی اساسی فرض می‌کنند [7]. اهداف اصلی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده عبارت هستند از: استفاده از گرمای طبیعی خورشید برای سرمایش و گرمایش و استفاده از گرمای ذخیره شده توسط سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی. سه روش کلی برای استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برای تحقیق در مورد این اهداف وجود دارد: استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بر روی دیوار ساختمان‌ها با قرار دادن در سقف و کف، استفاده از آن‌ها در مخازن ذخیره سرد و گرم، کاهش نوسانات دمای داخل ساختمان، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های خورشیدی و کاربرد آن‌ها در سازه‌ها [8،9]. در شکل 1 (الف)، تحقیقات مواد ذخیره انرژی حرارتی در 10 سال گذشته بسیار فعال شده است. علاوه بر این، مواد ذخیره انرژی حرارتی نیز با چندین سازمان که از فناوری و طراحی سیستم از طریق ثبت اختراعات محافظت می‌کنند، مورد توجه تجاری قرار می‌گیرند شکل 1 (ب) نشان دهنده پیشرفت‌های فناوری در گذشته است [10].



امروزه اهمیت انرژی به حدی است که از آن به بحران انرژی تعبیر می‌شود. بحران انرژی یعنی تعطیلی تدریجی کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها، کاهش سوخت‌های فسیلی و وسایل نقلیه، پرواز نکردن هواپیماها و غیره. در صدسال اخیر، وابستگی به انرژی به شدت افزایش یافته است. ما به شدت به سوخت‌های فسیلی که در حال اتمام هستند وابسته هستیم. امروزه در جهان زغال سنگ، گاز و نفت حدود 80 درصد از انرژی مصرفی جهان را تأمین می‌کنند. اطلاعات انرژی ایالات متحده پیش‌بینی می‌کند که مصرف انرژی در جهان تا سال 2030 تا 57 درصد رشد خواهد کرد [1]. یکی از گزینه‌ها پیش‌رو توسعه دستگاه‌های ذخیره انرژی است که به اندازه توسعه منابع جدید انرژی اهمیت دارد. ذخیره انرژی در اشکال مناسب که به‌طور معمول می‌تواند به شکل مورد نیاز تبدیل شود، یک چالش امروزی برای فناوران است. ذخیره انرژی نه تنها عدم تطابق بین عرضه و تقاضا را کاهش می‌دهد، بلکه عملکرد و قابلیت اطمینان سیستم‌های انرژی را بهبود می‌بخشد و نقش مهمی در حفظ انرژی ایفا می‌کند [2].

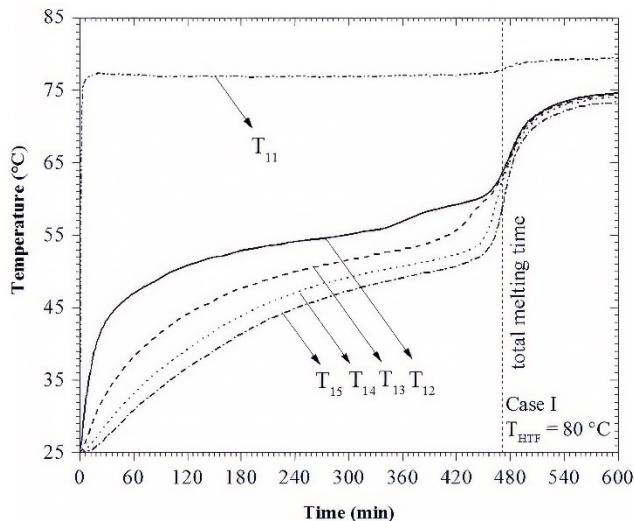
با توجه به دانش ما، هیچ بررسی علمی در مورد استفاده از (PCM) مواد تغییر فاز دهنده در کاربردهای دمای پایین وجود ندارد. ذخیره سازی مواد تغییر فاز دهنده برای متعادل کردن تغییرات موقت دما و ذخیره انرژی در چندین حوزه کاربردی عملی دارد، از الکترونیک گرفته تا صنعت خودرو و همچنین در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [3]. در بحث تحقیق در مورد سوخت‌ها، در حال حاضر تلاش‌های زیادی برای استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت برای استفاده در حمل و نقل، به ویژه در ارتباط با پیل‌های سوختی وجود دارد. هیدروژن مایع برای سال‌ها به عنوان سوخت موشک با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است، اما برای استفاده در وسایل نقلیه مناسب نیست، به خصوص به دلیل هزینه انرژی برای تولید آن و همچنین مشکلات جدی انتقال و ذخیره سازی [4]. در حال حاضر بیش از 18 درصد انرژی مصرفی جهان از انرژی‌های تجدید پذیر تأمین می‌شود. منابع انرژی تجدیدپذیر به دلیل در دسترس بودن طولانی مدت و کمک به محیط زیست به‌طور غیرقابل انکاری بر بهره‌برداری از منابع تجدیدناپذیر ترجیح داده می‌شوند. با این حال، متناوب بودن منابع انرژی تجدیدپذیر، به ویژه انرژی‌های خورشیدی و بادی، محدودیت اصلی در تأمین انرژی شبانه‌روزی آن‌ها است و باید تمهیدات ویژه‌ای برای سازگاری آن‌ها اندیشیده شود [5]. انرژی خورشیدی نوعی انرژی با پتانسیل بزرگ در آینده است، هر چند در حال حاضر تنها بخش کوچکی از نیازهای جهانی انرژی را پوشش می‌دهد (0/05٪ از کل عرضه انرژی اولیه). در حال حاضر تولید برق خورشیدی کمتر از 1٪ از کل برق در جهان می‌باشد. این به دلیل آن است که انرژی خورشیدی هنوز به عنوان گران‌ترین نوع انرژی‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شود. با این حال، در مناطق دورافتاده زمین ممکن است بهترین راه حل امروزی برای تأمین انرژی غیرمتمرکز باشد [6]. در حال حاضر، طبق سناریوهای معمول استفاده از انرژی، انتظار می‌رود تقاضای انرژی اولیه جهان امروز تا سال 2040 تا 30 درصد رشد کند،

و همچنین طبق مطالعات وو و همکارانش برای مشاهده واضح و بصری فرآیند تغییر فاز، یک سیستم آزمایشی پایش مادون قرمز ساخته شد. مطابق تصاویری که در شکل 2 نشان داده شده است هرچقدر غلظت مس/پارافین بیشتر باشد سرعت ذوب سریع تر هست. زمان ذوب با افزایش غلظت مس کاهش می یابد. سرعت ذخیره حرارتی بالاتر مس/پارافین نشان دهنده پتانسیل زیاد آن برای ذخیره انرژی حرارتی است [13]. و در ادامه مطالعات وو و شویینگ کاهش زمان ذوب را می توان با هدایت حرارتی بالاتر و مقدار کمتر گرمای نهان توضیح داد. مس/پارافین انرژی کمتری در واحد جرم مس/پارافین برای ذوب مورد نیاز است زیرا گرمای نهان همجوشی کمتر است [14].

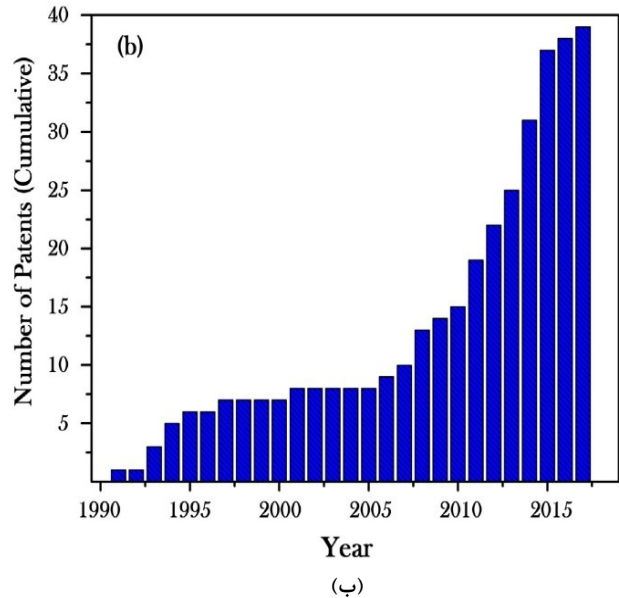


شکل 2 پروفیل های دما در فرآیند ذوب [15]

در مطالعات یاگسی و همکارانش به بررسی تأثیر شکل باله بر عملکرد ذخیره انرژی حرارتی پارافین در یک مخزن استوانه ای، آزمایش هایی با باله های تخت با نسبت های لبه ای مختلف انجام شد. آزمایش های شارژ برای سه مقدار دمای ورودی سیال انتقال حرارت (75، 80، 85 درجه سانتی گراد) انجام شدند. ذوب شدن تدریجی مواد تغییر فاز دهنده در یک مخزن استوانه ایی شکل با لوله داخلی بدون باله (در دمای 80 درجه سانتی گراد) بررسی شد (شکل 3) [15].



(الف)



شکل 1 الف) تجزیه و تحلیل کتابشناختی انتشارات مجلات، ب) ثبت اختراعات مربوط به مواد تغییر فاز دهنده برای کاربردهای ذخیره انرژی حرارتی [10]

2- فرآیندهای ذوب و انجماد مواد تغییر فاز دهنده

1-1- معادلات ذوب و انجماد مواد تغییر فاز دهنده

ذوب و انجماد مواد تغییر فاز دهنده توسط معادلات زیر در مختصات استوانه ای کنترل می شود که شامل پیوستگی، مومنتم و انرژی است:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_r}{r^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

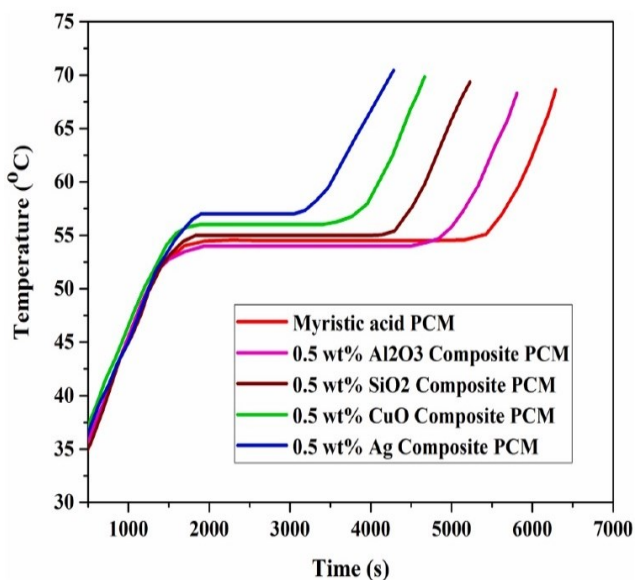
$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (kT) + Q \quad (4)$$

که در آن ρ : چگالی، t : زمان، r : فاصله شعاعی از محور تقارن، P : فشار و μ : ویسکوزیته، T : دمای مواد تغییر فاز دهنده، C_p : ظرفیت گرمایی ویژه، k : هدایت حرارتی و Q : نشان دهنده تولید یا جذب حرارت داخلی می باشد. v_r و v_z به ترتیب مولفه های شعاعی و محوری سرعت است [11].

2-2- فرآیند ذوب

در مطالعاتی که توسط پژوهشگران انجام شد، مشخص گردید در طی فرآیند ذوب، ماده جامد به صورت زمانی فاز خود را به نیمه جامد، خمیر و سپس به مایع تغییر می دهد. شش مرحله برای تکمیل فرآیند حرارتی مورد نیاز است. در هر مرحله خاص، انتقال حرارت به صورت همرفت و رسانایی رخ می دهد [12].

شکل 4 ایزوترم ماده‌های تغییر فاز دهنده در چندین مرحله زمانی در طول ذوب [15] و در تحقیقاتی که توسط پژوهشگران انجام گردید، مشخص شد که در طول فرآیند ذوب نرخ انتقال حرارت بهبود یافته کامپوزیت‌های اسید میرستیک و ماده‌های تغییر فاز دهنده مرکب مورد بررسی قرار گرفت. منحنی‌های هر دو فرآیند در شکل 5 نشان داده است. در ابتدای فرآیند ذوب هر دو ماده 35 درجه سانتی‌گراد بود. با افزایش مداوم دما، ماده‌های تغییر فاز دهنده مرکب در زمان کمتری نسبت به اسید میرستیک به نقطه ذوب می‌رسند [16، 17].

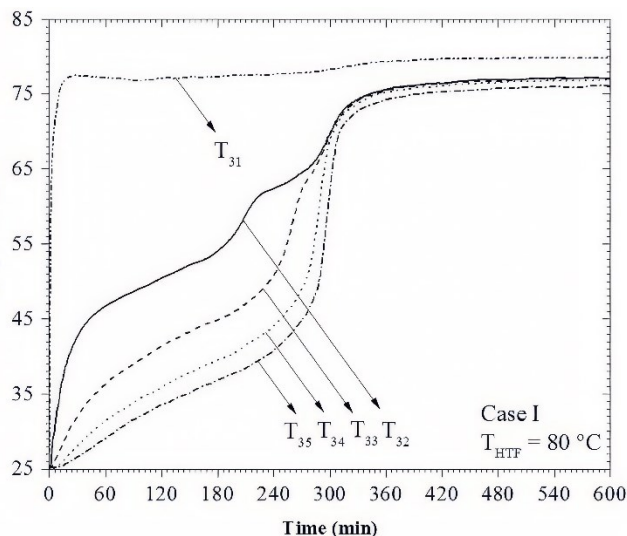


شکل 5 ذوب پروفیل‌های ماده‌های تغییر فاز دهنده [18]

در بررسی‌هایی که توسط دنگ و شنگکسیانگ انجام شد، نقش انتقال حرارت همرفتی طبیعی در ذوب ماده‌های تغییر فاز دهنده با تعریف مدل‌های مختلف آرایش باله‌های غوطه‌ور در اسید لوریک بر اساس داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی، به این نتیجه دست یافتن که ناحیه با کمترین کسر حجمی مذاب را می‌توان جابجا کرد و زمان ذوب مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان بسته به موقعیت باله‌ها در محفظه تغییر داد. با این حال، با مقایسه مدل‌های پرده‌دار و بدون پرده، این نتیجه حاصل می‌شود که نرخ شارژ در مدل بدون پرده به دلیل حداکثر زمان ذوب مواد تغییر فاز دهنده و در نتیجه به دام انداختن انرژی گرمایی بیشتر به دلیل انتقال حرارت همرفتی طبیعی، بیشتر از مدل‌های پرده‌دار است [19].

2-3- فرآیند انجماد

در طی فرآیند انجماد، ماده مایع به صورت زمانی فاز خود را به نیمه مایع، خمیر و سپس به جامد تغییر می‌دهد. در مطالعاتی که توسط وو و همکارانش انجام گردید، عکس‌های تغییرات دما-زمان فرآیند انجماد ماده‌های تغییر فاز دهنده در شکل 6 نشان دهنده این است که اگر غلظت مس/پارافین بیشتر باشد سرعت انجماد سریع‌تر است. رابط تغییر فاز به صورت حلقه‌هایی حرکت می‌کند. زمان انجماد موقعی کوتاه می‌شود

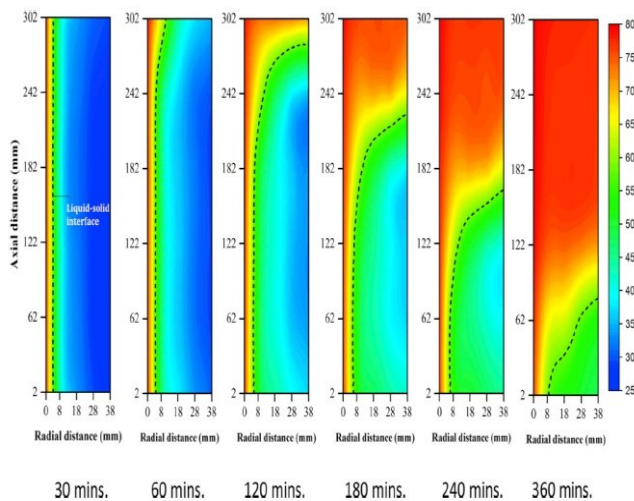


(ب)

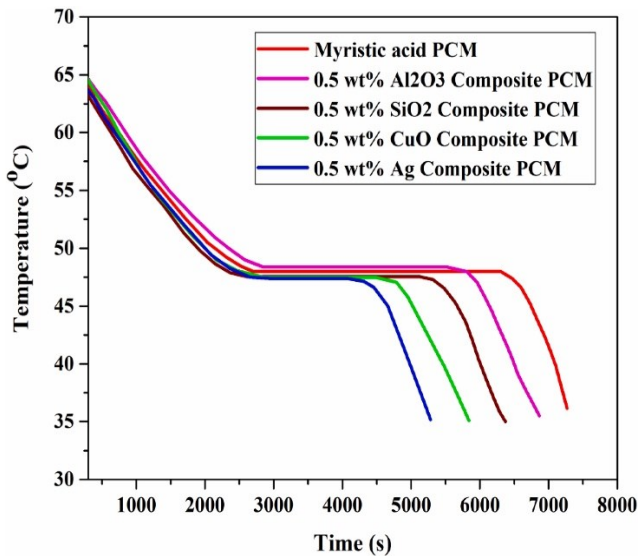
شکل 3 الف) که کاهش نسبت طول لبه باله منجر به دماهای بالاتر در مناطق پایین‌تر (T13 و T15) و (ب) مناطق میانی (T33 و T35) [15]

هنگامی که مواد تغییر فاز دهنده بسته به لوله انتقال حرارت به نقطه ذوب می‌رسد، تغییر فاز آغاز می‌شود و یک لایه نازک یکنواخت از مواد تغییر فاز دهنده مذاب در اطراف لوله انتقال حرارت تشکیل می‌شود.

همرفت طبیعی باعث بالا رفتن مذاب به نیمه بالایی مخزن و عدم یکنواختی دما در طول مخزن می‌شود. شکل 4 تغییر شکل مذاب و پیشرفت ذوب را در طول زمان نشان می‌دهد. برای بهبود عملکرد حرارتی، از لوله‌های داخلی (از 11 تا 17 مورد) استفاده شد که وجود باله باعث افزایش سطح انتقال حرارت و در نتیجه افزایش سرعت ذوب می‌شود. برای حالت پرده دار، در یک زمان معین، مقایسه نتایج بین پروفیل‌های باله نشان می‌دهد که کاهش نسبت طول لبه باله منجر به دماهای بالاتر در مناطق میانی (T33 و T35) و مناطق پایین‌تر (T13 و T15) می‌شود [15].



پیشرفت بیشتر در فرآیند انجماد، دمای موادهای تغییرفازدهنده با توجه به زمان نسبت به اسید میریستیک بیشتر کاهش یافت [18].



شکل 8 پروفیل‌های انجماد موادهای تغییرفازدهنده [18]

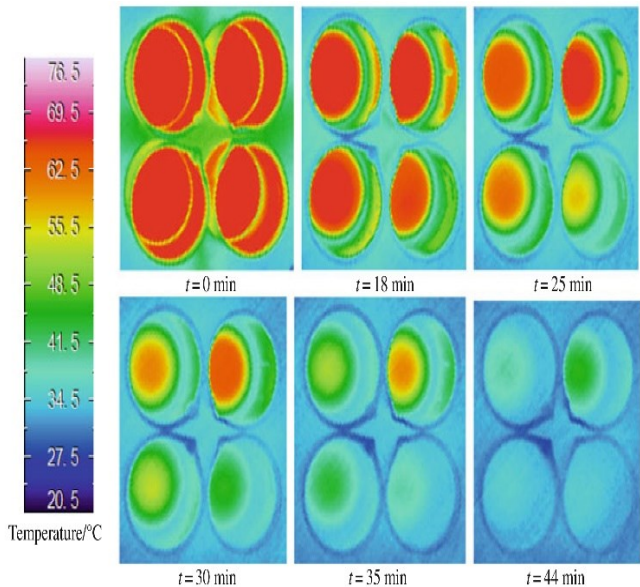
در پژوهش‌های وانگ گنگ سریع‌ترین و کندترین زمان انجماد با آرایش الماس و پیکربندی لوله دوگانه اختصاص داده می‌شود. تزریق فوم مس به مواد-های تغییرفازدهنده به عنوان یک کاتالیزور عمل می‌کند. علاوه بر این، تزریق فوم‌های فلزی سرعت ذوب و انجماد را تقریباً دو برابر می‌کند. از یک حفره مکعب مربعی و فوم‌های فلزی مختلف ترکیب شده با پارافین و مواد دیگر را برای ساخت مواد کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفت تا انتقال حرارت مؤثر و خواص ترموفیزیکی را تعیین کند. مشاهده شد که خواص ترموفیزیکی فوم فلزی و مواد تغییر فاز دهنده تأثیر عمیقی بر انتقال حرارت کامپوزیت‌های مواد تغییر فاز دهنده دارند زمانی که اندازه تخلخل تأثیر قابل توجهی ندارد. انتقال حرارت مؤثر کامپوزیت مواد تغییرفازدهنده با افزایش انتقال حرارت فوم فلزی افزایش می‌یابد که در تخلخل کمتر آن بیشتر و بیشتر می‌شود [21].

3- بهینه‌سازی انرژی

در مطالعاتی که توسط پژوهشگران انجام شد مشخص گردید که مواد تغییرفاز ممکن است با تبخیر از فاز جامد به فاز مایع، از فاز جامد به فاز جامد و از فاز جامد به گاز تبدیل شوند [22]. انتقال جامد به مایع برای ذخیره انرژی حرارتی ترجیح داده می‌شود، زیرا آن‌ها تغییر حجم قابل توجهی را در طول انتقال فاز نشان نمی‌دهند [22، 23، 24]. در نهایت، انتقال جامد به جامد دارای ویژگی‌های بسیار شبیه به انتقال جامد به مایع است، اما با ظرفیت ذخیره انرژی به طور قابل توجهی کمتر [24].

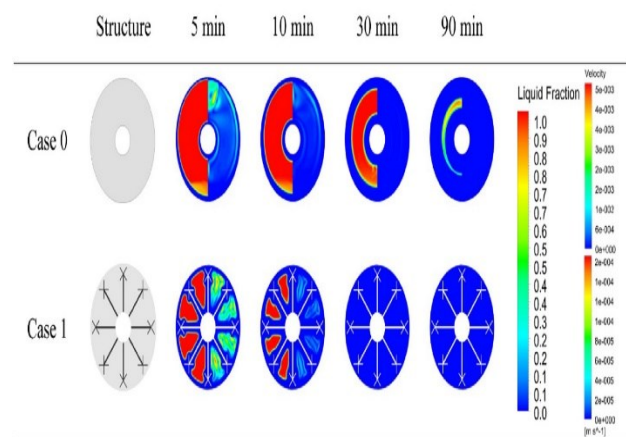
در پژوهش‌های قلمباز و همکارانش مشخص شد که در ذخیره‌سازی گرمای نهان، افزایش چگالی ذخیره انرژی باعث کاهش حجم می‌شود. گرما عمدتاً در فرآیند تغییر فاز (در دمای ثابت) ذخیره می‌شود و مستقیماً به گرمای نهان ماده متصل می‌شود [25]. بنابراین، ذخیره‌سازی گرمای نهان با توجه به چگالی بالای ذخیره‌سازی انرژی و ماهیت هم‌دمای بودن فرآیند ذخیره‌سازی آن، روشی مؤثر برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی ارائه می‌دهد [26].

که غلظت بیشتر باشد. کاهش زمان انجماد بهبود هدایت حرارتی پارافین خالص را با افزودن نانوذرات مس تأیید می‌کند. پس از افزودن نانوذرات به سیال پایه، سیال رسانایی حرارتی بالاتری نسبت به قبل دارد؛ بنابراین، سرعت انجماد مواد-های تغییرفازدهنده تسریع می‌شود [13].



شکل 6 پروفیل‌های دما در فرآیند انجماد [13]

در پژوهش‌هایی که توسط لیو و همکارانش انجام شد نمودار کسر مایع و سرعت را در طول انجماد سیستم ذخیره گرمای نهان سه لوله‌ای را که در شکل 7 نشان داده شده نشان‌دهنده این است که سرعت همرفت طبیعی در فرآیند انجماد در مرحله اولیه حداکثر بوده و با شروع انجماد به سرعت کاهش می‌یابد. بنابراین، هدایت حرارتی مکانیسم انتقال حرارت اولیه در کل فرآیند تبدیل فاز است [20].



شکل 7 کسر مایع و مشخصات سرعت موادهای تغییرفازدهنده در طول انجماد [20]

در ادامه تحقیقات دنگ و شنگکسیانگ، شکل 12 نمایه‌های دمایی اسید میریستیک و موادهای تغییرفازدهنده مرکب را برای فرآیند انجماد نشان می‌دهد. دمای ابتدایی موادهای تغییرفازدهنده 65 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با

4- فهرست علائم

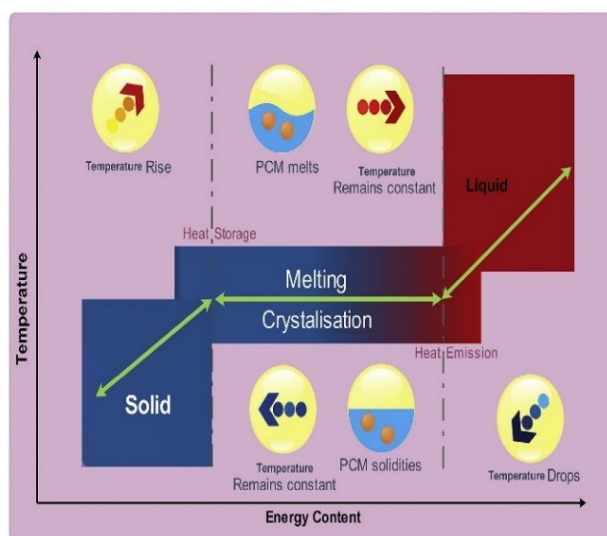
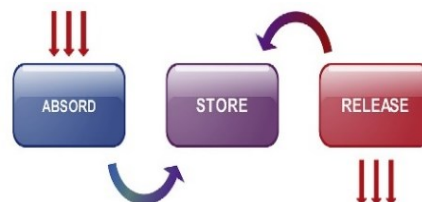
t	زمان (S)
u	سرعت (ms^{-1})
k	هدایت حرارتی ($W m^{-1}k^{-1}$)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($Kg^{-1}k^{-1}$)
T	دما (K)
v_r	مؤلفه شعاعی سرعت (ms^{-1})
v_z	مؤلفه محوری سرعت (ms^{-1})

علائم یونانی

ρ	چگالی (Kgm^{-3})
μ	ویسکوزیته ($Kgm^{-1}s^{-1}$)

با توجه به عملکرد موادهای تغییر فاز دهنده، که در شکل 10 نشان داده شده است، سیستم‌های ذخیره انرژی باید دارای ویژگی‌های زیر باشند [27,28,29,30]:

- نقطه ذوب مناسب در محدوده دمایی بهینه،
- سطح کافی انتقال حرارت،
- محفظه مناسب سازگار با موادهای تغییر فاز دهنده.



شکل 9 عملکرد مواد تغییر فاز دهنده [31]

نتیجه گیری

اگر غلظت مس/پارافین بیشتر باشد سرعت انجماد و ذوب سریع‌تر است. در مخزن‌های استوانه‌ای وجود باله باعث افزایش سطح انتقال حرارت و تسریع ذوب می‌گردد. در باله‌های غوطه‌ور در اسیدلوریک نتیجه‌گیری شد که ناحیه با کمترین کسر حجمی مذاب را می‌توان جایجا کرد و زمان ذوب مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان بسته به موقعیت باله‌ها در محفظه تغییر داد. در طول انجماد سیستم ذخیره گرمای نهان سه لوله‌ای سرعت همرفت طبیعی در فرآیند انجماد در مرحله اولیه حداکثر بوده و با شروع انجماد به سرعت کاهش می‌یابد. به دلیل اینکه مواد جامد تغییر حجم قابل توجهی را در طول انتقال فاز نشان نمی‌دهند انتقال جامد به مایع برای ذخیره انرژی حرارتی ترجیح داده می‌شود. ذخیره‌سازی گرمای نهان با توجه به چگالی بالای ذخیره‌سازی انرژی و ماهیت هم‌دما بودن فرآیند ذخیره‌سازی آن، روشی مؤثر برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی ارائه می‌دهد.

- #### منابع
- [1] S. Rostami, M. Afrand, A. Shahsavari, M. Sheikholeslami, R. Kalbasi, S. Aghakhani, M. S. Shadloo, H. F. Oztop, A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage, *Energy*, vol. 211, article 118698, 2020.
 - [2] J. Singh, S. Gu, Biomass conversion to energy in India—A critique, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, No. 5, pp. 1367-1378, 2010.
 - [3] K. Hoffmann, K. Menzel, A guideline for the implementation of an energy management system in facility management organisations, *Applied mechanics and materials*, vol. 887, pp. 247-254, 2019.
 - [4] C. Yilmaz, Life cycle cost assessment of a geothermal power assisted hydrogen energy system, *Geothermics*, vol. 83, article 101737, 2020.
 - [5] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, M. S. Ismail, M. Moghavvemi, Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 821-835, 2016.
 - [6] K. Solangi, M. Islam, R. Saidur, N. Rahim, H. Fayaz, A review on global solar energy policy, *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, No. 4, pp. 2149-2163, 2011.
 - [7] E. Dupont, R. Koppelaar, H. Jeanmart, Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints, *Applied Energy*, vol. 257, article 113968, 2020.
 - [8] V. A. A. Raj, R. Velraj, Review on free cooling of buildings using phase change materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, No. 9, pp. 2819-2829, 2010.
 - [9] Y. Zhou, S. Zheng, G. Zhang, A review on cooling performance enhancement for phase change materials integrated systems—flexible design and smart control with machine learning applications, *Building and Environment*, vol. 174, article 106786, 2020.
 - [10] H. Nazir, M. Batool, F. J. B. Osorio, M. Isaza-Ruiz, X. Xu, K. Vignarooban, P. Phelan, A. M. Kannan, Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 129, pp. 491-523, 2019.
 - [11] A. Basem, Numerical Analysis of the Effect of Nanofluids on the Melting Process of Phase Change Materials in a Semi-Cylindrical Container, *Applications in Engineering Science*, vol. 19, article 100185, 2024.
 - [12] M. Costa, D. Buddhi, A. Oliva, Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction, *Energy conversion and management*, vol. 39, No. 3-4, pp. 319-330, 1998.
 - [13] S. Wu, H. Wang, S. Xiao, D. Zhu, An investigation of melting/freezing characteristics of nanoparticle-enhanced phase change materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 110, No. 3, pp. 1127-1131, 2012.

- [14] S. Wu, D. Zhu, X. Zhang, J. Huang, Preparation and melting/freezing characteristics of Cu/paraffin nanofluid as phase-change material (PCM), *Energy & fuels*, vol. 24, No. 3, pp. 1894-1898, 2010.
- [15] O. K. Yagci, M. Avci, O. Aydin, Melting and solidification of PCM in a tube-in-shell unit: Effect of fin edge lengths' ratio, *Journal of Energy Storage*, vol. 24, article 100802, 2019.
- [16] S. Harikrishnan, S. Kalaiselvam, Preparation and thermal characteristics of CuO-oleic acid nanofluids as a phase change material, *Thermochimica Acta*, vol. 533, pp. 46-55, 2012.
- [17] N. Pradeep, K. Paramasivam, T. Rajesh, V. S. Purusothaman, S. Iyahrja, Silver nanoparticles for enhanced thermal energy storage of phase change materials, *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 607-611, 2021.
- [18] S. Harikrishnan, A. Dhass, H. F. Oztop, N. Abu-Hamdeh, Measurement of thermophysical properties with nanomaterials on the Melting/Freezing characteristics of phase change material, *Measurement*, vol. 199, article 111477, 2022.
- [19] S. Deng, C. Nie, H. Jiang, W.-B. Ye, Evaluation and optimization of thermal performance for a finned double tube latent heat thermal energy storage, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 130, pp. 532-544, 2019.
- [20] F. Liu, G. Zhang, Study on melting and solidification performances improvement of phase change material using novel branch fin structure, *Journal of Energy Storage*, vol. 63, article 107097, 2023.
- [21] G. Wang, G. Wei, C. Xu, X. Ju, Y. Yang, X. Du, Numerical simulation of effective thermal conductivity and pore-scale melting process of PCMs in foam metals, *Applied Thermal Engineering*, vol. 147, pp. 464-472, 2019.
- [22] S. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques, *Energy conversion and management*, vol. 39, No. 11, pp. 1127-1138, 1998.
- [23] E. Halawa, F. Bruno, W. Saman, Numerical analysis of a PCM thermal storage system with varying wall temperature, *Energy Conversion and Management*, vol. 46, No. 15-16, pp. 2592-2604, 2005.
- [24] Z. Liu, C. Ma, Numerical analysis of melting with constant heat flux heating in a thermal energy storage system, *Energy Conversion and Management*, vol. 43, No. 18, pp. 2521-2538, 2002.
- [25] M. Ghalebaz, A. Doostani, A. J. Chamkha, M. A. Ismael, Melting of nanoparticles-enhanced phase-change materials in an enclosure: effect of hybrid nanoparticles, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 134, pp. 85-97, 2017.
- [26] A. A. Omara, A. A. Abuelnuor, H. A. Mohammed, M. Khiadani, Phase change materials (PCMs) for improving solar still productivity: a review, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 139, pp. 1585-1617, 2020.
- [27] M. Kenisarin, K. Mahkamov, Solar energy storage using phase change materials, *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 11, No. 9, pp. 1913-1965, 2007.
- [28] D. Lencer, M. Salinga, M. Wuttig, Design rules for phase-change materials in data storage applications, *Advanced Materials*, vol. 23, No. 18, pp. 2030-2058, 2011.
- [29] D. Li, J. Wang, Y. Ding, H. Yao, Y. Huang, Dynamic thermal management for industrial waste heat recovery based on phase change material thermal storage, *Applied energy*, vol. 236, pp. 1168-1182, 2019.
- [30] M. H. Zahir, S. A. Mohamed, R. Saidur, F. A. Al-Sulaiman, Supercooling of phase-change materials and the techniques used to mitigate the phenomenon, *Applied energy*, vol. 240, pp. 793-817, 2019.
- [31] A. Mishra, A. Shukla, A. Sharma, Latent heat storage through phase change materials, *Resonance*, vol. 20, pp. 532-541, 2015.