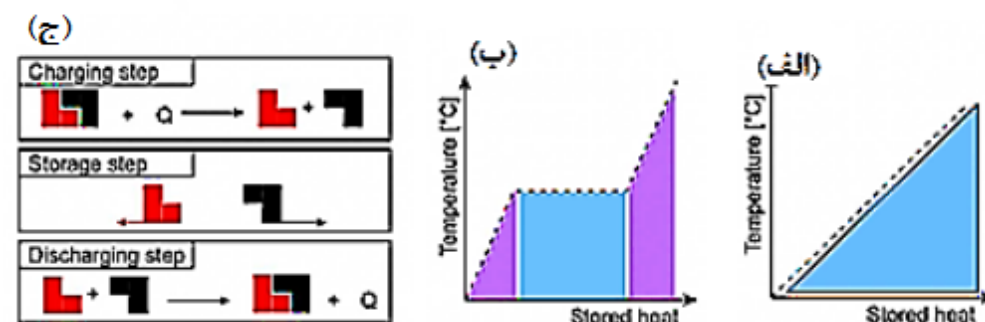


۷ نظری

۱-۷ خنک کننده‌های دما کنترل^۱

ذخیره انرژی حرارتی در مواد تغییرفازی بر اساس استفاده از گرمای نهان به طور ذاتی به فرآیندهای تغییر فاز جامد - مایع مرتبط است که طی آن گرما به طور متناوب در سامانه ذخیره و از آن تخلیه می‌شود. مواد تغییر فازدهنده، انرژی را به صورت گرمای نهان ذوب ذخیره می‌کنند. این ویژگی در مواد تغییر فازدهنده وجود دارد که در دمای ثابت با جذب گرما از فاز جامد به مایع تبدیل می‌شوند. انواع مختلف ذخیره انرژی حرارتی در دماهای بین ۴۰ تا بیش از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان ذخیره گرمای محسوس^۲، ذخیره گرمای نهان^۳ و ذخیره‌سازی حرارتی شیمیایی^۴ طبقه بندی می‌شوند (شکل ۲).



شکل ۲ روش‌های ذخیره انرژی حرارتی (الف) ذخیره گرمای محسوس (ب) ذخیره گرمای نهان (ج) ذخیره سازی حرارتی شیمیایی [۴۸]

۱-۷-۱ ذخیره گرمای نهان (LHS)

در مورد LHS، انرژی ذخیره شده به عنوان گرمای نهان همجوشی یا انجماد که آنتالپی تغییر ماده است، در طی فرآیند تغییر فاز جذب یا آزاد می‌شود. گرما در دمای کاملاً ثابت (یا تغییر کم دما) در طول تغییر فاز از جامد به مایع یا مایع به گاز و یا برعکس جذب یا آزاد می‌شود. انرژی گرمای نهان در مقایسه با گرمای محسوس معمولاً بسیار زیاد است.

تبدیل فاز مایع به گاز و یا جامد به گاز، با تغییر حجم زیادی همراه است که ویژگی غیرقابل قبول است و از این رو برای کاربرد در سامانه‌های LHS نامناسب است. یک سامانه LHS با استفاده از PCMها که تحت انتقال فاز

¹ Passive Cooling

² Sensible Heat Storage (SHS)

³ Latent Heat Storage (LHS)

⁴ Thermochemical Heat Storage (TCS)

جامد به مایع و مایع به جامد قرار می‌گیرد، می‌تواند به طور موثری انرژی حرارتی را به شکل گرما (در طول ذوب) و یا سرما (در طول انجماد) همراه با تغییر جزئی در (حجم معمولاً زیر ۱۰ درصد) ذخیره کند. ظرفیت ذخیره‌سازی سامانه $LHS(Q_s)$ با استفاده از PCM توسط روابط (۸) و (۹) ارائه شده است.

$$Q_s = \int_{t_i}^{t_m} mc_p dt + mf\Delta q + \int_{t_m}^{t_f} mc_p dt \quad (۸)$$

$$Q_s = m[c_{ps}(t_m - t_i) + f\Delta q + c_{p1}(t_f - t_m)] \quad (۹)$$

۷-۱-۲ ماده تغییر فاز دهنده

PCMها موادی هستند که از اصل LHS پیروی می‌کنند و یکی از کارآمدترین مواد ذخیره‌ی انرژی هستند، زیرا مقدار زیادی انرژی در واحد جرم، در خلال ذوب ذخیره می‌کنند. زمانی که گرما توسط یک ماده جذب می‌شود، پیوندهای اتمی با افزایش ارتعاش شبکه شل شده و در نتیجه زمانی که ماده حالت خود را از جامد به مایع تغییر می‌دهد ذوب صورت می‌گیرد. در حالی که، در طول انجماد، مولکول‌ها انرژی جذب شده را به محیط اطراف خود آزاد می‌کنند و در نتیجه حالت منظم‌تری به وسیله مواد یعنی حالت جامد حاصل می‌شود. PCMها در هر محدوده دمایی دلخواه از ۲۰- تا ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در دسترس هستند. بنابراین، ظرفیت کل ذخیره حرارت (Q) مبتنی بر PCM، مجموع گرمای نهان یا آنتالپی انتقال فاز و گرمای محسوس است که به صورت معادله (۱۰) بیان می‌شود.

$$Q = m \left[(c_p \Delta T)_{sensible} + (c_p \Delta T)_{latent} \right] \quad (۱۰)$$

انواع مختلفی از مواد تغییر فاز در دسترس هستند که با توجه به ترکیب شیمیایی PCMها را می‌توان به سه دسته اصلی، آلی (پارافین و غیرپارافین)، معدنی (هیدرات نمک و آلیاژهای فلزی)، و یوتکتیک (مخلوط دو یا چند جزء PCM آلی و معدنی) تقسیم‌بندی کرد [۴۸].

۷-۲ معادلات اساسی

اصلی‌ترین مسئله، مربوط به رسانش گرما است و بنابراین فقط معادله انرژی را شامل می‌شود:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (11)$$

که در آن ρ چگالی، c_p گرمای ویژه، k هدایت حرارتی و T دما است. برای موردی که تغییر فاز در مختصات کارتیزین و یک بعدی است و هدایت حرارتی ثابت است، معادله (۱۱) به صورت معادله (۱۲) بازنویسی می‌شود:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (12)$$

معادله (۱۱) باید به طور جداگانه برای فاز جامد (S) و مایع (L) نوشته شود، که شامل خواص حرارتی مربوطه است. در حالی که چگالی ممکن است بین فازها ثابت و یا متفاوت باشد. بر خلاف سایر کاربردهای معادله گرما، به منظور اطمینان از بقای انرژی، تعادل حرارتی در فصل مشترک متحرک جامد-مایع که در آن گرما در دمای تغییر فاز جذب یا آزاد می‌شود، T_m ، به ترتیب در ذوب و انجماد به دست می‌آید.

$$k_s \nabla T_s \cdot n - k_l \nabla T_l \cdot n = \rho L v \cdot n \quad (13)$$

در این رابطه، n واحد نرمال در فصل مشترک فاز، v بردار سرعت فصل مشترک و L گرمای نهان در واحد جرم است. در واقع، این شرایط به این معنی است که گرما از طریق خودِ فازها هدایت می‌شود. برای مورد خاص ارائه شده توسط معادله (۱۲)، شرط معادله (۱۳) نیز یک بعدی می‌شود:

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} = \rho L v \quad (14)$$

که در آن v سرعت جبهه^۱ نرمال به صفحه، یعنی در جهت x است. مسئله تعریف شده توسط معادلات (۱۲) و (۱۴) به عنوان مسئله استفان^۲ شناخته می‌شود.

¹ Front

² Stefan

توجه به این نکته ضروری است که در معادلات (۱۳) و (۱۴)، فرض بر این است که، چگالی ρ برای فاز جامد و مایع یکسان است. بنابراین، مشکلی که شامل اختلاف چگالی جامد/ مایع می‌شود، به یک عبارت اضافی برای فرارفت نیاز دارد.

یادآور می‌شود که ساده‌ترین راه برای پرداختن به تغییر فاز، با استفاده از معادله (۱۱)، رویکرد ظرفیت گرمای مؤثر است که در آن گرمای نهان با استفاده از ظرفیت حرارتی محسوس معادل که شامل ظرفیت نهان نیز می‌شود، جایگزین می‌شود. برای مثال می‌توان این کار را با استفاده از رابطه (۱۵) انجام داد.

$$c_p^{eff}(T) = \begin{cases} c_p & @ T < T_m - \Delta T \\ \frac{L}{2\Delta T} + c_p & @ T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ c_p & @ T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (15)$$

بدیهی است این روش به هیچ شرایط اضافی نیاز ندارد، اما فقط برای محاسبات تقریبی مناسب است [۴۹].

در ادامه خلاصه‌ایی از مطالعات پیش‌رو مطرح می‌شود.

تعریف ساختار هسته-پوسته با هدف افزایش هدایت گرما از بدن / بستر، نسبت به حالت بسترهای معمولی

به دست آوردن زمان و میزان گرمای منتقل شده از طریق سامانه‌ی تعریف شده

تایید صحت و کارایی سامانه‌ی دما کنترل

تایید انطباق پاسخ نمودار دما-زمان بخش نظری و نتایج تجربی