

ذخیره انرژی گرمایی با استفاده از هیدرید فلزی و ماده تغییر فاز دهنده

بابک رضاپور دولق

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران،
babak_rezapour@mecheng.iust.ac.ir

سمانه قندهاریون*
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، samane_ghandehariun@iust.ac.ir

چکیده

هیدروژن در سال‌های اخیر به عنوان یک سوخت پاک برای سیستم‌های انرژی آینده به رسمیت شناخته شده است. ذخیره‌سازی و استفاده از هیدروژن به عنوان یک جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی حائز اهمیت می‌باشد. در بین روش‌های ذخیره‌سازی هیدروژن، هیدریدهای فلزی با داشتن ظرفیت ذخیره‌سازی هیدروژن مناسب ایمنی بالا، گزینه‌ی مناسبی می‌باشند. در این مطالعه، یک مخزن در مقیاس بزرگ Mg_2Ni یکپارچه شده با ماده تغییر فاز دهنده برای افزایش دمای خروجی سیال انتقال گرما، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی، از روش المان محدود برای حل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی استفاده شده است. فرآیند تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده، با استفاده از روش ظرفیت گرمایی ظاهری مورد بررسی قرار گرفته است. دمای ورودی سیال انتقال گرما ۳۰۰ کلوین و ضخامت ماده تغییر فاز دهنده ۲۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که زمان جذب در حضور ماده تغییر فاز دهنده ۳۵ درصد نسبت به حالت بدون ماده تغییر فاز دهنده افزایش می‌یابد. همچنین سیال انتقال گرما با آفت دمای ۲۰ کلوین در مدت زمان ۷۰۰۰ ثانیه همراه می‌باشد. **واژه‌های کلیدی:** جذب هیدروژن، ذخیره هیدروژن، هیدرید فلزی، ماده تغییر فاز دهنده، انرژی گرمایی، سیال انتقال گرما.

Thermal energy storage using metal hydride and phase change material

B. Rezapour Dolagh
S. Ghandehariun

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

Hydrogen has been recognized as a clean fuel for future energy systems in recent years. Storage and utilization of hydrogen as a suitable alternative to fossil fuels is of great importance. Among the hydrogen storage methods, metal hydrides are a suitable option due to their high safety and suitable hydrogen storage capacity. In this study, a large-scale Mg_2Ni tank integrated with a phase change material to increase the outlet temperature of the heat transfer fluid is analyzed. For simulation, the finite element method was used to solve the continuity, momentum, and energy equations. The phase change process of the phase change material was investigated using the apparent heat capacity method. The inlet temperature of the heat transfer fluid is 300 K and the thickness of the phase change material is 20 mm. The results showed that the absorption time increases by 35% in the presence of a phase change material compared to the absence of a phase change material. Additionally, the heat transfer fluid also experiences a temperature drop of 20 K in 7000 seconds.

Keywords: Hydrogen absorption; Hydrogen storage; Metal hydride; Phase change material; Thermal energy; Heat transfer fluid.

۱- مقدمه

ذخیره‌سازی انرژی گرمایی یک فناوری حیاتی است که به افزایش بهره‌وری سیستم‌های انرژی و کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند. این راهبرد شامل ذخیره و استفاده از انرژی گرمایی در زمان‌های کاهش تقاضای انرژی و آزادسازی آن در دوره‌های اوج تقاضا می‌باشد. ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به سه دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شود: گرمای محسوس، گرمای نهان، و گرمای شیمیایی [۱]. هیدریدهای فلزی یکی از روش‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی می‌باشند که از طریق واکنش شیمیایی هیدروژن با هیدرید فلزی، این انرژی گرمایی آزاد می‌شود. هیدروژن به دلیل چگالی انرژی بالا و سازگار با محیط زیست، به عنوان گزینه‌ای مناسب برای انرژی پایدار تبدیل شده است. افزون بر این، با توجه به کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، استفاده از هیدروژن به عنوان جایگزین، گزینه‌ی مناسبی می‌باشد. یکی از چالش‌های اساسی در زمینه‌ی استفاده از هیدروژن، ذخیره‌سازی آن می‌باشد. در بین روش‌های ذخیره‌سازی هیدروژن،

ذخیره‌سازی هیدروژن در هیدریدهای فلزی به عنوان روشی ایمن شناخته شده است.

ذخیره‌سازی انرژی گرمایی با استفاده از هیدریدهای فلزی به دلیل واکنش گرماگیر در فرایند دفع هیدروژن هیدریدها، به یکی از موضوعات مهم در حوزه‌ی انرژی خورشیدی متمرکز تبدیل شده است [۲،۳]. این گرمای ذخیره‌شده می‌تواند از طریق چرخه‌ی آلی رانکین برای تولید برق مورد استفاده قرار گیرد. مواد تغییر فاز، که نوعی فناوری ذخیره‌سازی انرژی گرمایی محسوب می‌شوند، ممکن است در مخازن هیدرید فلزی به کار گرفته شوند تا فرایند جذب و دفع هیدروژن را بهبود بخشند [۴].

در میان هیدریدهای فلزی، آلایز منیزیم-نیکل به دلیل ویژگی‌های مطلوب در جذب و دفع هیدروژن به عنوان گزینه‌ای بسیار امیدوارکننده برای ذخیره‌سازی هیدروژن می‌باشد. در فرایند شارژ سیستم ذخیره انرژی گرمایی، ترکیب هیدرید فلزی تجزیه شده و گاز هیدروژن و آلایز تولید می‌کند. در فرایند تخلیه سیستم ذخیره انرژی گرمایی، یک واکنش شیمیایی بین آلایز و هیدروژن رخ داده و گرمای

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: samane_ghandehariun@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۰/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۴

ذخیره شده آزاد می شود.

جمنی و همکاران [۵] یک مخزن هیدرید فلزی که در داخل حوض آب قرار دارد را مورد آزمایش قرار دادند. آن ها جذب و دفع هیدروژن را در دماهای مختلف حوض آب و فشارهای مختلف هیدروژن آزمایش و با مدل نظری خود اعتبار سنجی کردند. نتایج آن ها نشان داد که خطای بین مدل ریاضی و آزمایشگاهی، تقریباً ۲ درصد می باشد. مواد تغییر فاز دهنده یکی از مؤثرترین تکنیک ها برای بهبود فرآیند جذب و دفع هیدروژن در هیدریدهای فلزی هستند. شریواستوا و همکاران [۶] یک مخزن هیدرید فلزی پر شده با منیزیم و یکپارچه شده با ماده تغییر فاز را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها دریافتند که اثر شناوری، جریان های همرفتی را تولید می کند، در نتیجه انتقال گرما و سرعت ذوب ماده تغییر فاز دهنده را بهبود می بخشد و در نتیجه زمان لازم برای دستیابی به ۹۰ درصد جذب هیدروژن را تا ۴ درصد کاهش می دهد.

لوله های انتقال گرما با اشکال و قطرهای مختلف در داخل مخزن به دلیل واکنش گرمای مکانیسم جذب مورد نیاز است. پرشار و همکاران [۷] یک مطالعه تجربی در مورد طراحی و آزمایش عملکرد یک راکتور هیدرید فلزی چند لوله ای ارائه کردند. نتایج آن ها نشان داد که افزایش فشار هیدروژن از ۲۰ بار به ۳۰ بار باعث افزایش میزان جذب به ترتیب ۱۹/۹ و ۲۲/۵ درصد شد.

هدف از استفاده از مخازن هیدرید فلزی دما بالا، ذخیره سازی انرژی گرمایی در مواقعی است که انرژی های تجدیدپذیر در دسترس هستند و آزادسازی این انرژی گرمایی در زمان های نیاز به انرژی می باشد. از آن جایی که فرآیند دفع هیدروژن زمانی رخ می دهد که انرژی های تجدیدپذیر در دسترس هستند (به ویژه در طول روز)، منطقی است که دمای سیال انتقال گرما از منبع گرمایی در دمای بالا باشد. از سوی دیگر، فرآیند جذب هیدروژن در مخزن هیدرید فلزی دما بالا، زمانی اتفاق می افتد که انرژی های تجدیدپذیر در دسترس نیستند (به ویژه در طول شب). بنابراین، دمای ورودی سیال انتقال گرما به مخزن هیدرید فلزی در زمان جذب هیدروژن مهم است، زیرا دمای سیال انتقال گرما در دمای محیط قرار دارد و در نظر گرفتن دمای ورودی سیال انتقال گرما در دماهای بالا غیرمنطقی است. علاوه بر این، نوسان دمای خروجی سیال انتقال گرما یک عامل حیاتی برای سیستم های تولید توان محسوب می شود. همان طور که در جدول ۱ قابل مشاهده است، مطالعات انجام شده در این زمینه، دمای ورودی ۵۷۳ کلوین برای سیال انتقال گرما در نظر گرفته اند. در این مطالعه مخزنی در مقیاس بزرگ و یکپارچه با ماده تغییر فاز دهنده جهت مدیریت گرمایی فرآیند جذب هیدروژن شبیه سازی شده است، که دمای سیال انتقال گرما را ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته و نوسان دمای خروجی سیال انتقال گرما را کاهش داده تا برای کاربردهای تولید برق و یا کاربردهای گرمایی در طولانی مدت، مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۱- برخی مطالعات انجام شده در زمینه ی جذب هیدروژن در هیدریدهای فلزی.

نویسنده	سال	نوع آلیاژ	دمای ورودی سیال انتقال گرما (کلوین)	مرجع
لارپروئوردی و همکاران	۲۰۲۴	Mg ₂ Ni	۵۷۳	[۴]
لارپروئوردی و همکاران	۲۰۲۳	Mg ₂ Ni	۵۷۳	[۸]
لیو و همکاران	۲۰۲۲	Mg	۵۷۳	[۹]
اردهائی و همکاران	۲۰۲۱	Mg ₂ Ni	۵۷۳	[۱۰]

۲- توصیف سیستم

شکل ۱ مدل دوبعدی مخزن هیدرید فلزی پیشنهادی را نشان می دهد. مخزن مورد بررسی با آلیاژ Mg₂Ni به منظور جذب هیدروژن، پر شده است. در داخل مخزن هیدرید فلزی، آلیاژ به صورت پودر قرار گرفته است. در این مدل، حضور یک پوشش خنک کننده که مخزن استوانه ای را احاطه کرده است، مشاهده می شود. مطابق شکل، اگر قسمت بالا یا پایین مخزن با پیچ بندی به مخزن متصل شود، پیکربندی مورد استفاده در این مطالعه، قابل طراحی و ساخت خواهد بود. هیدروژن به واسطه ی یک لوله به قطر ۱۰ میلی متر که جداره آن متخلخل است، وارد بستر شده و از حفره های موجود بین ذرات پودر عبور کرده، و با آلیاژ واکنش شیمیایی داده و گرما تولید می شود. گرمای تولید شده به واسطه ی جذب هیدروژن، در ماده تغییر فاز دهنده ذخیره شده و باعث ذوب ماده تغییر فاز دهنده می شود. این گرمای ذخیره شده، به تدریج به سیال انتقال گرما، انتقال می یابد.

انرژی گرمایی تولید شده توسط واکنش جذب در مخزن، با استفاده از Therminol VP-1 به عنوان سیال انتقال گرما [۱۱]، از مخزن خارج می شود. Therminol VP-1 یک سیال انتقال گرما است که ثبات گرمایی عالی و لزجت پایین را ارائه می دهد و عملکرد کارآمد و قابل اعتمادی را در دمایی در محدوده ۲۸۵ کلوین تا ۶۷۳ کلوین تضمین می کند. از طرفی ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده NaNO₃ است که دمای ذوب آن ۵۸۰ کلوین می باشد.

پس از اتمام فرآیند جذب هیدروژن، و انتقال تمامی گرمای موجود در مخزن به وسیله ی سیال انتقال گرما، واکنش معکوس رخ می دهد که تحت عنوان فرآیند دفع شناخته می شود. در این فرآیند سیال انتقال گرما، گرما را از انرژی خورشیدی دریافت کرده و به مخزن انتقال می دهد. دمای سیال انتقال گرما برای فرآیند دفع، ۵۷۹ کلوین در نظر گرفته شده است. بستر هیدرید فلزی این گرما را از طریق ماده ی تغییر فاز دهنده دریافت کرده و هیدروژن خود را دفع می کند. پس از اتمام واکنش دفع، با فرض عایق بودن مخزن، تمامی مخزن در دمای ۵۷۹ کلوین فرض می شود.

۳- معادلات

در این مطالعه فرضیاتی همچون ایده آل بودن گاز هیدروژن، در تعادل گرمایی بودن هیدروژن و بستر هیدرید فلزی و عایق گرمایی بودن مخزن، در نظر گرفته شده است. همچنین برای شبیه سازی ماده

شایان ذکر است که شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار COMSOL Multiphysics 6.2 انجام شده است.

۳-۱- شرایط مرزی و اولیه

شرایط مرزی و اولیه مخزن مورد مطالعه به صورت زیر می‌باشند:

بستر هیدرید فلزی:

$$T_0=579 \text{ K}, P_0=P_{eq,abs}(T_0), \rho_0=3200 \text{ kg/m}^3 \quad (13)$$

هیدروژن:

$$T_0=579 \text{ K}, P_0=P_{eq,abs}(T_0) \quad (14)$$

سیال انتقال گرما:

$$T_0=579 \text{ K}, u_0=0 \text{ m/s} \quad (15)$$

سرعت سیال انتقال گرما در طول شبیه‌سازی ۱ cm/s و فشار گاز هیدروژن ۱/۲ MPa در نظر گرفته شده است.

ماده تغییر فاز دهنده با بستر هیدرید فلزی:

$$\sigma_{MH} \cdot \nabla T_{MH} \cdot \vec{n} = \sigma_{PCM} \cdot \nabla T_{PCM} \cdot \vec{n} \quad (16)$$

که $\vec{n}$ نشان دهنده‌ی بردار عمود بر سطح می‌باشد.

ماده‌ی تغییر فاز دهنده در دمای اولیه‌ی ۵۷۹ کلوین قرار دارد.

۴- نتایج

۴-۱- اعتبارسنجی و استقلال از شبکه

یک مدل آزمایشگاهی برای هیدرید فلزی با آلیاژ لانتانیم توسط جمینی و همکاران [۵] انجام شده است. مخزن مورد اعتبارسنجی، دارای ۲۰ میلی متر حجم انبساط و ۱۰ میلی متر مجرای ورودی هیدروژن می‌باشد.

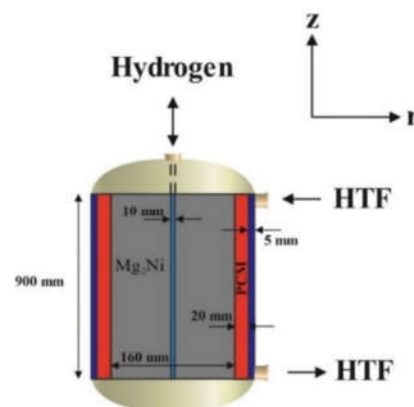
نتایج مقایسه اعتبارسنجی برای دمای بستر هیدرید فلزی در نقطه $R=15$ و $Z=35$ میلی متر در شکل ۲ آورده شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از طریق شبیه‌سازی با مدل آزمایشگاهی، مقدار خطای نسبی متوسط ۲/۰۵ درصد را نشان داد که قابل قبول می‌باشد.

استقلال از شبکه برای دمای بستر هیدرید فلزی در نقطه $R=30$ و $Z=600$ میلی متر در شکل ۳ برای ۱۰۳۸۳، ۶۴۷۷ و ۲۷۴۰۵ المان شبکه، آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، تعداد ۲۷۴۰۵ المان، نتیجه‌ی دقیق‌تری را نشان می‌دهد. بنابراین، در این تحقیق از تعداد ۲۷۴۰۵ المان استفاده شده است.

۴-۲- مخزن هیدرید فلزی

ابتدا برای حالتی که ماده تغییر فاز در داخل مخزن وجود ندارد را بررسی کرده تا در آخر با یکدیگر مقایسه شوند. شکل ۴ دمای خروجی سیال انتقال گرما و میانگین دمای بستر متخلخل هیدرید فلزی را نشان می‌دهد. در زمان ۳۰۰۰۰ ثانیه، دمای سیال انتقال گرما و بستر هیدرید فلزی به سمت تعادل با دمای ورودی سیال انتقال گرما، یعنی ۳۰۰ کلوین، گرایش پیدا می‌کند. در مورد سیال انتقال گرما مشاهده می‌شود که پس از ۷۰۰۰ ثانیه، شیب نسبتاً ملایمی وجود دارد که در صورت کاهش زمان به کمتر از ۷۰۰۰ ثانیه می‌تواند برای سیستم‌های تولید برق و ذخیره‌سازی گرمایی مناسب باشد. تغییر چگالی بستر هیدرید فلزی در شکل ۵ نشان داده شده است

تغییر فاز دهنده، از روش ظرفیت گرمایی ظاهری استفاده شده است. معادله‌ی بقای جرم بستر متخلخل هیدرید فلزی به شرح زیر می‌باشد [۱۲]:



شکل ۱- طرحواره مخزن هیدرید فلزی مورد مطالعه.

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_h) = -S_m \quad (1)$$

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial \rho_s}{\partial t} = S_m \quad (2)$$

$$S_m = C_a \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \ln\left(\frac{p}{p_{eq}}\right) (p_{s,sat} - p_s), (p > p_{eq}) \quad (3)$$

که در آن S_m میزان جذب جرم هیدروژن در حجم واحد را نشان می‌دهد. p_{eq} نشان دهنده فشار تعادل هیدرید فلزی است که از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\ln\left(\frac{p_{eq}}{p_0}\right) = \frac{\Delta s}{R} - \frac{\Delta h}{RT} \quad (4)$$

که p_0 نشان دهنده فشار مرجع می‌باشد که برابر با ۱ بار در نظر گرفته شده است.

معادله‌ی بقای جرم ماده تغییر فاز دهنده به شرح زیر می‌باشد [۱۰]:

$$\rho_{PCM} \frac{\partial u_{PCM}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_{PCM}) = 0 \quad (5)$$

معادله‌ی بقای انرژی بستر متخلخل هیدرید فلزی به صورت زیر می‌باشد [۱۲]:

$$(\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_{p,h} (u_h \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (\sigma_{eff} \nabla T) + S_T \quad (6)$$

$$(\rho c_p)_{eff} = \varepsilon (\rho c_p)_h + (1 - \varepsilon) (\rho c_p)_s \quad (7)$$

$$\sigma_{eff} = \varepsilon \sigma_h + (1 - \varepsilon) \sigma_s \quad (8)$$

$$S_T = S_m (\Delta h) \quad (9)$$

معادله‌ی بقای انرژی ماده‌ی تغییر فاز دهنده به شکل زیر می‌باشد [۱۰]:

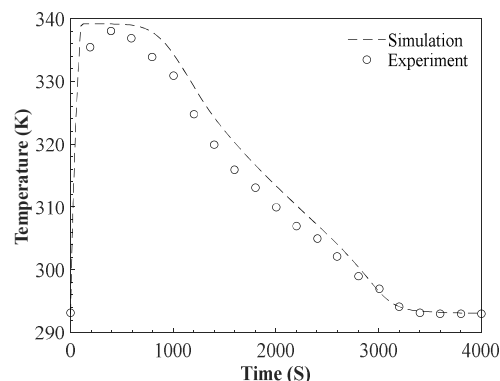
$$(\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_{eff,PCM} u_{PCM} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\nabla \sigma_{eff,PCM} T) \quad (10)$$

$$(\rho c_p)_{eff,PCM} = \frac{(1-f)(\rho c_p)_s + f(\rho c_p)_l}{\rho_{eff,PCM}} + L \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (11)$$

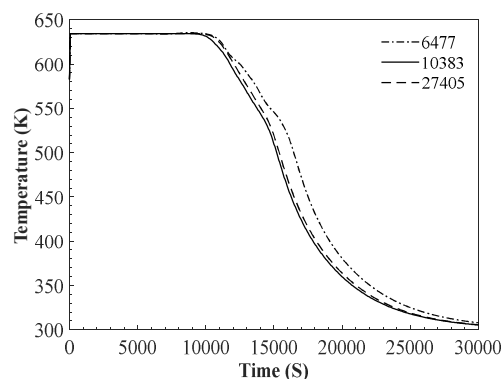
$$\rho_{eff,PCM} = (1-f)\rho_s + f\rho_l \quad (12)$$

که α و f به ترتیب تابع انتقال فاز و کسر مایع می‌باشند. دمای انتقال از فاز جامد به مایع ۱ کلوین در نظر گرفته شده است.

که نشان می‌دهد این تغییر پس از ۲۰۰۰۰ ثانیه به حالت اشباع می‌رسد. در واقع، واکنش پس از گذشت ۲۰۰۰۰ ثانیه کامل می‌شود.



شکل ۲- نتایج شبیه‌سازی و مدل آزمایشگاهی.

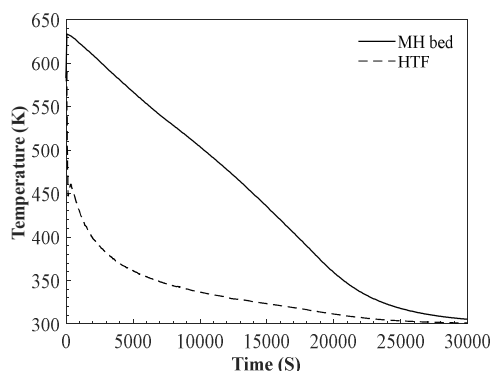


شکل ۳- استقلال از شبکه برای مخزن مورد مطالعه.

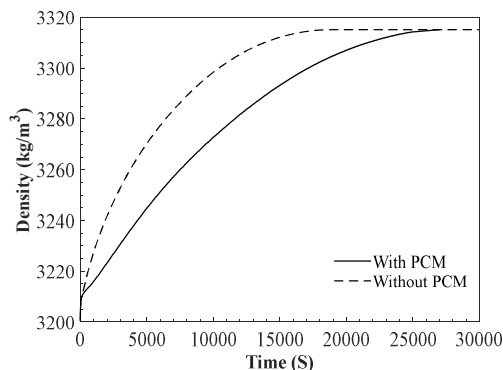
برای حالتی که ماده تغییر فاز دهنده وجود دارد (شکل ۵)، زمان انجام واکنش به ۲۷۰۰۰ ثانیه افزایش می‌یابد. همان طور که مشاهده می‌شود، در چند ثانیه اول واکنش، شیب تند و وجود دارد. این امر را می‌توان به وجود ماده تغییر فاز دهنده در فاز مایع در رابط میان هیدرید فلزی و ماده تغییر فاز دهنده نسبت داد. در آغاز واکنش گرمازا در بستر متخلخل، ماده تغییر فاز دهنده در حالت جامد در مجاورت رابط ماده تغییر فاز دهنده-بستر هیدرید فلزی درون مخزن قرار دارد. تا زمان ۲۵ ثانیه، ماده تغییر فاز دهنده گرمای تولیدشده توسط واکنش را با رسانایی گرمایی ۰/۶ وات بر متر کلون جذب کرده و ذوب می‌شود.

افزودن ماده تغییر فاز دهنده به سیستم، دمای خروجی سیال انتقال گرما را نیز تغییر می‌دهد. نوسانات دمای خروجی سیال انتقال گرما تأثیر قابل‌توجهی بر بازدهی سیستم‌های تولید برق دارد. مطابق شکل ۶، افزودن ۲۰ میلی‌متر ماده تغییر فاز دهنده در اطراف بستر متخلخل هیدرید فلزی به طور قابل‌توجهی شیب منحنی‌ها را تغییر می‌دهد. دمای حالت بدون ماده تغییر فاز دهنده بالاتر از حالت با ماده تغییر فاز دهنده است. این امر به دلیل انتقال گرما از طریق بستر هیدرید فلزی با رسانایی گرمایی بالا به سیال انتقال گرما در طی فرآیند جذب اتفاق می‌افتد.

شیب کم منحنی در حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده را می‌توان به تعامل بین ماده تغییر فاز دهنده و بستر متخلخل هیدرید فلزی نسبت داد. هنگامی که ماده تغییر فاز دهنده در سیستم قرار می‌گیرد، با بستر متخلخل هیدرید فلزی تماس پیدا کرده و گرمای تولیدشده در طی فرآیند را جذب می‌کند. در نتیجه، ماده تغییر فاز دهنده به فاز مایع انتقال می‌یابد و این گرما را تقریباً با نرخ ثابتی به سیال انتقال گرما منتقل می‌کند. شیب کم منحنی در حالت ماده تغییر فاز دهنده ارتباط قابل‌توجهی با افزایش مساحت سطح ندارد.



شکل ۴- تغییر دمای بستر هیدرید فلزی و سیال انتقال گرمای خروجی.



شکل ۵- تغییر چگالی بستر هیدرید فلزی برای حالت بدون ماده تغییر فاز دهنده و همراه با ماده تغییر فاز دهنده.

همان طور که مشاهده می‌شود، ضخامت ۲۰ میلی‌متر پتانسیل بالایی برای کاربرد در سیستم‌های تولید برق یا ذخیره‌سازی گرمایی در بازه زمانی ۳۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ ثانیه دارد و با افت دمایی در حدود ۲۰ کلون همراه است.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی یک مخزن Mg_2Ni در مقیاس بزرگ، یکپارچه با مواد تغییر فاز و سیال انتقال گرما می‌پردازد تا انتقال گرما به سیال انتقال گرما را تحلیل کند. این مطالعه شامل یک بستر هیدرید فلزی است که توسط یک پوشش ماده تغییر فاز دهنده احاطه شده است، در حالی که خود ماده تغییر فاز دهنده درون یک پوشش سیال

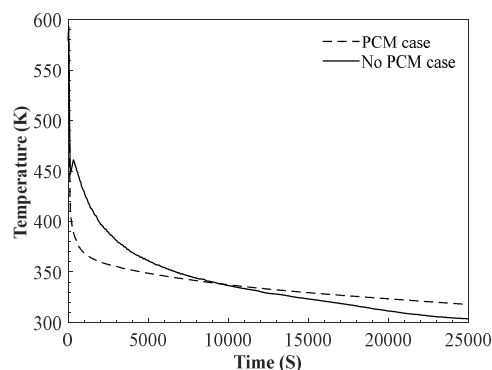
Δs	آنتروپی واکنش (J/mol K)
Δh	آنتالپی واکنش (J/mol)
σ	رسانایی گرمایی (W/mK)
ρ	چگالی (kg/m^3)

۷- مراجع

- [1] IRENA. Thermal energy storage: technology brief. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2013.
- [2] Gambini M, Stilo T, Vellini M. Selection of metal hydrides for a thermal energy storage device to support low-temperature concentrating solar power plants. *Int J Hydrog Energy*. 2020 Oct 30;45(53):28404–25.
- [3] Mellouli S, Alqahtani T, Algarni S, Askri F, Naimi S. Numerical simulation of a combined thermochemical-latent energy storage system based on paired metal hydrides and phase change material. *J Energy Storage*. 2024 May 1;86:111216.
- [4] Larpruenrudee P, Bennett NS, Fitch R, Sauret E, Gu Y, Islam MS. Investigation of metal hydride hydrogen storage performance using phase change materials. *Int J Hydrog Energy*. 2024 Mar 22;60:996–1019.
- [5] Jemni A, Nasrallah SB, Lamloumi J. Experimental and theoretical study of a metal-hydrogen reactor. *Int J Hydrog Energy*. 1999 Jul 1;24(7):631–44.
- [6] Shrivastav AP, Kanti PK, Mohan G, Maiya MP. Design and optimization of metal hydride reactor with phase change material using fin factor for hydrogen storage. *J Energy Storage*. 2024 Jan 30;77:109975.
- [7] Parashar S, Muthukumar P, Kumar EA, Soti AK. Experimental study on multi tube metal hydride reactor for medium temperature hydrogen and thermochemical energy storage applications. *Renew Energy*. 2025 Apr 1;242:122350.
- [8] Larpruenrudee P, Bennett NS, Luo Z, Fitch R, Sauret E, Islam MS. A novel design for faster hydrogen storage: A combined semi-cylindrical and central return tube heat exchanger. *J Energy Storage*. 2023 Nov 1;71:108018.
- [9] Liu Y, Ayub I, Khan MR, Yang F, Wu Z, Zhang Z. Numerical investigation of metal hydride heat storage reactor with two types multiple heat transfer tubes structures. *Energy*. 2022 Aug 15;253:124142.
- [10] Ardahaie SS, Hosseini MJ, Eisapour M, Eisapour AH, Ranjbar AA. A novel porous metal hydride tank for hydrogen energy storage and consumption assisted by PCM jackets and spiral tubes. *J Clean Prod*. 2021 Aug 15;311:127674.
- [11] Therminol. THERMINOL VP-1 heat transfer fluid. Available from: <https://www.therminol.com>.
- [12] Dubey S, Kandasamy R. Charging and discharging analysis of thermal energy using magnesium nickel hydride based thermochemical energy storage system. *Sustain Energy Technol Assess*. 2022 Aug 1;52:101994.

انتقال گرما قرار دارد. با در نظر گرفتن ۳۰۰ کلوین به عنوان دمای ورودی سیال انتقال گرما، نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- ماده تغییر فاز دهنده با ضخامت ۲۰ میلی متر، کاربرد مخزن هیدرید فلزی برای تولید توان یا کاربردهای گرمایی سیال انتقال گرما را در مقایسه با بدون ضخامت ماده تغییر فاز دهنده، در محدوده عملیاتی ۳۶۰ کلوین تا ۳۴۵ کلوین در یک دوره ۷۰۰۰ ثانیه نشان می‌دهد.
- زمان اشباع کامل بستر هیدرید فلزی برای حالت همراه با ماده تغییر فاز دهنده و بدون بدون ماده تغییر فاز دهنده به ترتیب ۲۷۰۰۰ ثانیه و ۲۰۰۰۰ ثانیه تعیین شد.
- نتایج نشان داد که شیب منحنی دمای خروجی سیال انتقال گرما به میزان مایع شدن ماده تغییر فاز دهنده درون مخزن بستگی دارد.



شکل ۶- دمای سیال انتقال گرمای خروجی از مخزن برای حالت با ماده تغییر فاز دهنده و بدون ماده تغییر فاز دهنده.

۶- نمادها

a	جذب
C	ثابت جذب (1/s)
C_p	گرمای ویژه (J/kg K)
E	انرژی فعال سازی (J/mol H_2)
eq	تبادل
eff	مؤثر
h	هیدروژن
L	گرمای نهان (J/kg)
l	مایع
MH	هیدرید فلزی
s	فلز
sat	اشباع
0	اولیه
ε	تخلخل