

بررسی اثر مواد افزودنی به بستر جاذب سیستم‌های جذب سطحی

میلاد آذر فر^۱، حمید نیازمند^۲، هدی طالبیان^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، milad.azarfar@gmail.com

^۲استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، niazmand@um.ac.ir

^۳کارشناس ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، ho_ta708@um.ac.ir

چکیده

در دهه‌های اخیر توجه به سیستم‌های جذب سطحی به علت سازگاری با محیط زیست و استفاده از منابع حرارتی با کیفیت پایین افزایش یافته است. اما به دلیل پایین بودن ضریب عملکرد، این سیستم‌ها نتوانسته‌اند جایگاه خود را در صنعت به خوبی بیابند. یکی از روش‌های افزایش کارایی سیستم‌های جذب سطحی به کارگیری ذرات فلزی در بستر جاذب می‌باشد. در این مطالعه سعی شده است تا تاثیر افزایش ذرات فلزی در بستر جاذب به صورت عددی مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب با بهبود ضریب هدایت حرارتی موثر بستر، موجب کاهش زمان سیکل، بهبود ضریب عملکرد سیکل و نیز توان سرمایش مخصوص می‌شود.

واژه‌های کلیدی

ذرات فلزی، بستر جاذب، ضریب هدایت حرارتی، مدل‌سازی عددی

مقدمه

تقاضای روزافزون انرژی، افزایش آلودگی محیط زیست و تخریب لایه اوزون از جمله عواملی هستند تا محققین در پی توسعه سیستم‌هایی با کارایی بالا و سازگار با محیط زیست باشند. در این میان، سیستم‌های جذب سطحی به علت استفاده از انرژی‌های هدر رفته، عدم استفاده از مواد سمی و داشتن عمر طولانی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. هرچند اصلی‌ترین مشکل این سیستم‌ها پایین بودن ضریب عملکرد آن‌ها است، تلاش‌ها و مطالعات بسیاری برای بهبود آن صورت گرفته است. رزک و همکارانش با به‌کارگیری جاذب‌های جدید با تخلخل بالاتر، توانستند میزان جذب آب را تا ۹۲٪ در مقایسه با سیلیکاژل RD2060 افزایش دهند [۲]. نیازمند و داب زاده تاثیر افزایش سطوح گسترش یافته را بر روی ضریب عملکرد و توان سرمایش مخصوص^۳ سیستم‌های جذب سطحی مورد بررسی قرار داده‌اند [۳]. چانگ و همکارانش نیز تاثیر ضخامت و فاصله فین‌های حلقوی را در یک چیلر جذب سطحی مورد بررسی قرار دادند [۴].

گروهی دیگر به این نتیجه رسیده‌اند که با به‌کارگیری سیکل بازیابی حرارتی می‌توان ضریب عملکرد سیستم را تا ۲۵٪ افزایش داد [۵]. سیکل‌های ترمودینامیکی دیگری نیز وجود دارند که می‌توان برای منابع حرارتی دما پایین (کم‌تر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد) استفاده کرد و ضریب عملکرد سیستم‌ها را افزایش داد [۶]. دمیر نیز تاثیر امواج مایکروویو را بر روی سیستم جذب سطحی بررسی کرده است [۷].

پایین بودن ضریب عملکرد سیستم‌های جذب سطحی را می‌توان در انتقال حرارت اندک بستر جاذب و به بیانی دیگر در پایین بودن ضریب هدایت حرارتی بستر جاذب علت یابی کرد. علاوه بر استفاده از فین‌ها و یا مواد جاذب با ضریب هدایت حرارتی بالاتر، به کارگیری مواد افزودنی نظیر ذرات فلزی، می‌تواند به عنوان روشی در بهبود انتقال حرارت بستر جاذب مطرح شود.

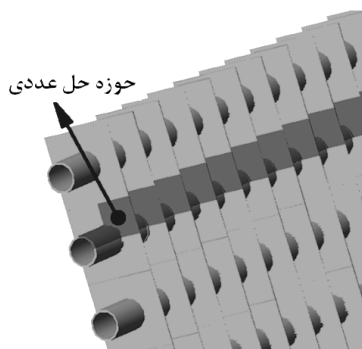
تحقیقات مرتبط با به کارگیری ذرات فلزی در بستر جاذب محدود است. پنک و همکارانش سیکلی شامل جاذب ژئولیت را با سیکلی که جاذب آن کامپوزیتی متشکل از ژئولیت و آلومینیوم می‌باشد مقایسه کرده‌اند [۸]. نتایج نشان داد که با استفاده از جاذب کامپوزیتی ضریب هدایت حرارتی بهبود می‌یابد. بنابراین با بهبود ضریب هدایت حرارتی بستر جاذب، زمان سیکل کاهش یافته و به تبع آن توان سرمایش مخصوص بهبود می‌یابد. التون و همکارانش نیز تاثیر افزودن مس و پودر گرافیت را بر ضریب هدایت حرارتی بستر جاذب بررسی کردند [۹]. دمیر و همکارانش تاثیر افزایش ذرات فلزی را بر ضریب هدایت حرارتی در یک بستر جاذب بررسی کردند [۱۰]. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزودن ذرات فلزی آلومینیوم با ابعادی بین ۱ mm تا ۲/۸ mm ضریب هدایت حرارتی و نفوذ حرارتی بستر جاذب به ترتیب ۲۴۲٪ و ۱۵۷٪ بهبود می‌یابد. رزک و همکارانش تاثیر به کارگیری چهار نوع ذره فلزی مختلف را بر بستر جاذب در یک سیستم جذب سطحی مورد مطالعه قرار دارند [۱۱]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش ذرات فلزی می‌توان ضریب عملکرد سیستم را بهبود بخشید. با این وجود آن‌ها تنها مقاومت درون ذره‌ای را در نظر گرفته‌اند. اما از آنجایی که این مدل، قابلیت کاربرد در شرایط کلی را ندارد [۱۲] لذا نمی‌تواند در بررسی تاثیر بسیاری از پارامترهای بستر بر کارایی سیستم، مورد استفاده قرار گیرد.

هدف این مطالعه به کارگیری ذرات فلزی در بستر جاذب یک سیستم جذب سطحی به منظور بهبود انتقال حرارت می‌باشد. بدین

^۱ COP (Coefficient of performance)

^۲ SCP (Specific cooling power)

محاسبات و تعداد زیاد شبکه مورد نیاز امکان پذیر نمی باشد. بنابراین بایستی هندسه را به نحوی در نظر گرفت تا علاوه بر به دست آوردن نتایج صحیح و مناسب از تعداد شبکه و حجم محاسبات کاسته شود. بنابراین همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود، به دلیل وجود تقارن و تشابه، تنها یک چهارم فضای اطراف یکی از لوله ها در مدل سازی لحاظ می شود.



شکل ۲: نمایی از مبدل حرارتی و حوزه مربوط به مدل سازی عددی

جدول (۱) مقادیر متناظر با پارامترهای به کار رفته در مدل سازی عددی را نشان می دهد. لوله فلزی از جنس مس و فین ها از جنس آلومینیوم در نظر گرفته شده اند. از جفت جاذب و جذب شونده سیلیکاژل نوع SWS-1L و آب در مدل سازی استفاده شده و سیال داخل لوله های بستر، کندانسور و اوپراتور آب است. همچنین دمای آب خنک کننده ورودی به کندانسور برابر با دمای آب خنک کننده ورودی به بستر ماده جاذب است.

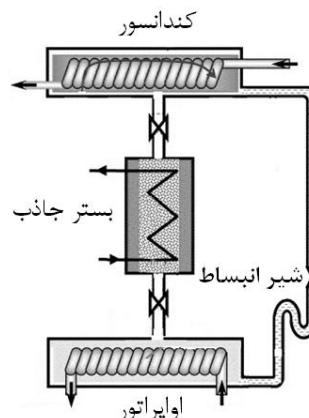
جدول ۱: مقادیر استفاده شده برای پارامترها در شرایط اصلی

پارامتر	علامت	مقدار
قطر داخلی لوله فلزی	D_i (mm)	۱۰
قطر خارجی لوله فلزی	D_o (mm)	۱۲
ضخامت فین	FT (mm)	۰/۲
ارتفاع فین	FH (mm)	۸
فاصله بین فین ها	FS (mm)	۶
ظرفیت گرمایی ویژه سیلیکاژل	C_p (kJ / kg.K)	۹۲۴
دبی جرمی سیال ناقل حرارت	\dot{m}_f (kg / sec)	۰/۰۳
تخلخل بستر	ϵ_b (-)	۰/۳۶
تخلخل ذرات	ϵ_p (-)	۰/۴۶
گرمای جذب	ΔH (kJ / kg)	۲۷۶۰
دمای اوپراتور	T_{evap} (K)	۲۸۳/۱۵
دمای گرمایش	$T_{heating}$ (K)	۳۶۳/۱۵
دمای خنک کاری	$T_{cooling}$ (K)	۳۰۳/۱۵

منظور بستر جاذب یک سیستم جذب سطحی به صورت سه بعدی مدل سازی شده است. در این مدلسازی علاوه بر مقاومت درون ذره ای تاثیر مقاومت برون ذره ای در نظر گرفته شده است؛ بنابراین توزیع فشار در بستر جاذب به صورت غیر یکنواخت در نظر گرفته می شود و معادلات مومنوم به همراه سایر معادلات به صورت همزمان حل می گردد. به کمک برنامه فرترن ایجاد شده توسط نویسندگان تاثیر افزایش ذرات فلزی در بستر جاذب بر روی پارامترهایی نظیر فشار مورد بررسی قرار می گیرد. در نهایت تاثیر ذرات فلزی بر عملکرد کلی سیستم جذبی به کمک پارامترهای ظرفیت سرمایش مخصوص و زمان سیکل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

شرح سیستم

شکل (۱) شمایی از یک سیستم جذب سطحی را نشان می دهد. این سیستم ها دارای چهار قسمت اصلی شامل کندانسور، اوپراتور، شیر اختناقی و بستر جاذب می باشند. اصلی ترین بخش سیستم های جذب سطحی بستر جاذب است. این بستر در واقع نوعی مبدل حرارتی است که سطح آن توسط مواد جاذب متخلخل پوشانده شده است. این مواد می توانند در اثر گرم شدن، سیال عامل را احیا و در اثر سرد شدن آن را جذب نمایند. بنابراین بستر جاذب نقش کمپرسور را در سیستم ایفا می کند.



شکل ۱: شمایی از یک سیستم جذب سطحی با یک بستر جاذب

سیکل جذب سطحی شامل چهار فرایند کلی است که عبارتند از: فرایند گرمایش جرم ثابت^۳، فرایند احیای فشار ثابت، فرایند سرمایش جرم ثابت و فرایند سرمایش فشار ثابت. شرح کامل این مراحل را می توان در مراجع [۱۳، ۱۴] یافت.

مدل سازی عددی

در این مطالعه از یک مبدل حرارتی با فین های صفحه ای پیوسته در داخل محفظه چیلر جذب سطحی استفاده شده است. حوزه مورد بررسی شامل سیال ناقل حرارت، لوله فلزی، فین ها و بستر ماده جاذب می باشد. مدل سازی کامل بستر جاذب به دلیل حجم بالای

^۳ Isotheric heating

معادلات حاکم

برای مدل سازی عددی باید معادلات حاکم بر چهار حوزه سیال ناقل حرارت، لوله فلزی، فین ها و بستر جاذب به صورت همزمان حل شوند. معادلات حاکم عبارتند از:

سیال ناقل حرارت

در معادله حاکم بر سیال ناقل حرارت درون لوله می توان با توجه به سرعت سیال از جمله هدایت نسبت به جابجایی در امتداد محور لوله صرف نظر کرد. بنابراین معادله به صورت یک بعدی و در امتداد محور لوله به صورت زیر می باشد.

$$\int_{cv} \rho_f c_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} dV + \int_{cv} \nabla \cdot (\rho_f c_{pf} \bar{U}_f T_f) dV = -Q_{fluid-tube} \quad (1)$$

لوله فلزی

برای لوله فلزی معادله انتقال حرارت به صورت سه بعدی گذرا و در مختصات استوانه ای حل شده است.

$$\int_{cv} \rho_{tube} c_{tube} \frac{\partial T_{tube}}{\partial t} dV = \int_{cv} \nabla \cdot (\lambda_{tube} \nabla T_{tube}) dV + Q_{tube-fin} \quad (2)$$

فین

با توجه به ناچیز بودن ضخامت فین ها نسبت به سایر ابعاد، می توان معادله انتقال حرارت را به صورت دو بعدی و در صفحه عمود بر محور لوله در نظر گرفت. این معادله با توجه به هندسه فین ها در دستگاه عمومی حل می شود.

$$\int_{cv} \rho_{fin} c_{fin} \frac{\partial T_{fin}}{\partial t} dV = \int_{cv} \nabla \cdot (\lambda_{fin} \nabla T_{fin}) dV + Q_{fin-bed} \quad (3)$$

بستر جاذب

مدل سازی بستر جاذب شامل مواد جاذب متخلخل و حرکت بخار در این محیط است. با در نظر گرفتن هر دو مقاومت انتقال جرم برون ذره ای و درون ذره ای، چهار معادله اصلی پیوستگی، مومنتوم، انتقال حرارت و گاز کامل در بستر جاذب به صورت همزمان حل می شوند. موازنه انرژی برای بستر جاذب عبارت است از:

$$\int_{cv} (\rho_{sg,w} c_{sg,w} + x \rho_m c_{pm}) \frac{\partial T_b}{\partial t} dV + \int_{cv} \nabla \cdot (\rho_g c_{pg} \bar{U}_g T_b) dV = \int_{cv} \nabla \cdot (\lambda_{bed} \nabla T_{bed}) dV + \int_{cv} (1-x) \rho_b \Delta H \frac{\partial \omega}{\partial t} dV \quad (4)$$

در معادله انرژی w معرف مقدار جذب لحظه ای می باشد که توسط رابطه نیرو محرکه خطی^۴ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{dw}{dt} = 15 D_{so} \text{Exp} \left(-\frac{E_a}{R_u T_b} \right) / R_p^2 (w^* - w) \quad (5)$$

که در آن w* جذب تعادلی در دما و فشار بستر می باشد [۱۵]. موازنه جرم برای سیال عامل به صورت زیر می باشد.

$$\int_{cv} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV + \int_{cv} \nabla \cdot (\rho_g \bar{U}_g) dV + \int_{cv} (1-x) \rho_b \frac{\partial \omega}{\partial t} dV = 0 \quad (6)$$

سرعت سیال جذب شونده در بستر جاذب توسط رابطه داری به صورت زیر می باشد [۱۶].

$$\bar{U}_g = -\frac{k_{app}}{\mu} \bar{\nabla} P \quad (7)$$

هم چنین از رابطه گاز کامل برای محاسبه مقدار چگالی بخار سیال عامل در فاز احیا شده استفاده می شود.

$$P = \rho_g R_g T_b \quad (8)$$

مدل سازی تاثیر افزایش ذرات فلزی به بستر جاذب

همان طور که پیش تر بیان شد یکی از اساسی ترین معایب سیستم های جذب سطحی، اندک بودن ضریب هدایت حرارتی بستر جاذب می باشد. با افزودن ذرات فلزی می توان ضریب هدایت حرارتی موثر بستر را بهبود بخشید. دمیر و همکارانش به کمک روشی تجربی توانستند تاثیر افزایش ذرات فلزی را بر ضریب هدایت حرارتی یک بستر جاذب بررسی کنند [۱۰]. از طرفی رزک و همکارانش نیز با به کارگیری رابطه ای توانستند تاثیر ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب را محاسبه نمایند [۱۱]. از آن جا که $(k_m / k_{sg}) > 100$ می باشد بنابراین می توان از رابطه ارائه شده توسط همیلتون برای مخلوط های دو فازی جهت محاسبه ضریب هدایت حرارتی موثر استفاده نمود [۱۷، ۱۸].

$$k_{eff} = \frac{k_{sg} [k_m + (n-1)k_{sg} - (n-1)x(k_{sg} - k_m)]}{k_m + (n-1)k_{sg} + x(k_{sg} - k_m)} \quad (9)$$

که در آن ضریب n تابع هندسه ذرات فلزی مورد استفاده می باشد. در این مطالعه n برای ذرات آلومینیومی، مس، برنج و فولاد به ترتیب عبارتند از ۱/۰۳۱، ۱/۰۴۱، ۱/۱۱ و ۲/۳۳۱ [۱۱].

ضرایب عملکرد

ضریب عملکرد و توان سرمایه مشخص عبارتند از:

$$SCP = \frac{Q_{evap}}{m_b \times t_{cycle}} \quad (10)$$

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{heating}} \quad (11)$$

شرایط مرزی

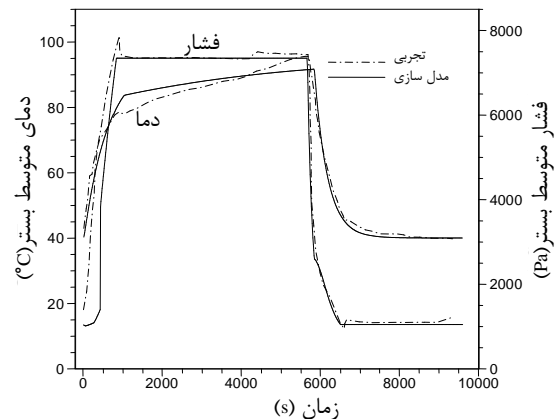
شرط مرزی دمایی برای سطوح مشترک بین بستر با لوله فلزی و فین ها و هم چنین فین ها و لوله فلزی به صورت تعادل حرارتی و مابقی مرزها آدیباتیک فرض شده اند. هم چنین به جز فصل مشترک بستر با محفظه که مقدار فشار برابر فشار محفظه در نظر گرفته شده است، در سایر مرزها تغییرات فشار در جهت عمود بر صفحه صفر فرض شده است.

اعتبارسنجی

برای بررسی صحت و دقت مدل سازی عددی نیاز است تا نتایج عددی با داده های یک نمونه تجربی مقایسه شود لذا اعتبارسنجی این

^۴ LDF (Linear driving force)

مطالعه با تطبیق شرایط هندسی و عملکردی بستر مدل شده با نمونه آزمایشگاهی رستوکیا و همکاری انجام شده است [۱۹].



شکل ۳: تغییرات دمای متوسط بستر در طول یک سیکل کاری در مدل عددی و مقایسه با نتایج تجربی

در شکل (۳) تغییرات دما و فشار میانگین بستر (مواد جاذب و سیال عامل) در مدت زمان یک سیکل کاری در نمونه آزمایشگاهی به همراه نتایج مدل‌سازی حاضر نشان داده شده است. با توجه به فرضیات و ساده‌سازی‌های اعمال شده در مدل‌سازی عددی و همچنین تعداد زیاد پارامترهای دخیل، مشاهده می‌شود نتایج حل عددی دقت قابل قبولی دارد به طوری که حداکثر خطا در پیش‌بینی دما حدود ۶٪ می‌باشد.

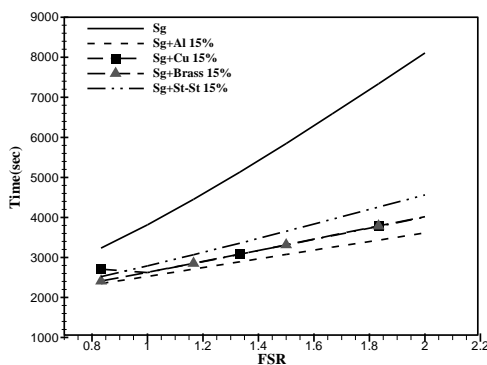
نتایج

ضریب هدایت حرارتی موثر بستر برای درصدهای مختلف وزنی (نسبت جرم ذرات فلزی به مجموع جرم ذرات فلزی با ماده جاذب) با کمک رابطه (۹) محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲: ضریب هدایت حرارتی مخلوط سیلیکاژل با ذرات فلزی به ازای درصدهای وزنی مختلف

Type of mixtures	$k_{met}(W/m^2K^{-1})$	$k_{eff}(W/m^2K^{-1})$
Sg	-	۰/۱
Sg+15% Al	۲۳۷	۰/۶۰۸
Sg+10% Al	۲۳۷	۰/۴۲۰
Sg+5% Al	۲۳۷	۰/۲۵۱
Sg+15% Cu	۴۰۱	۰/۴۳۸
Sg+10% Cu	۴۰۱	۰/۳۱۳
Sg+5% Cu	۴۰۱	۰/۲۰۱
Sg+15% Brass	۱۵۰	۰/۴۳۴
Sg+10% Brass	۱۵۰	۰/۳۱۰
Sg+5% Brass	۱۵۰	۰/۱۹۹
Sg+15% St-St	۱۴/۹	۰/۳۰۲
Sg+10% St-St	۱۴/۹	۰/۲۲۷
Sg+5% St-St	۱۴/۹	۰/۱۵۰

مشاهده می‌شود که با افزودن ذرات فلزی ضریب هدایت حرارتی موثر بستر برای آلومینیوم، مس، برنج و فولاد با درصد وزنی ۵٪ به ترتیب ۱۵۱٪، ۱۰۱٪، ۹۹٪ و ۵۰٪ بهبود می‌یابد. همچنین با توجه به جدول (۲) واضح است که با افزایش میزان ذرات فلزی نیز ضریب هدایت حرارتی موثر بستر افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که بیش‌ترین تاثیر را آلومینیوم با درصد وزنی برابر با ۱۵٪ دارا می‌باشد. بنابراین با افزودن ذرات فلزی و بالا بردن درصد وزنی آن ضریب هدایت حرارتی موثر بستر افزایش می‌یابد. هر چند در سوی دیگر با افزایش میزان ذرات فلزی، ماده جاذب و به دنبال آن ظرفیت جذب در بستر کاهش می‌یابد [۱۰]. بنابراین برای به کارگیری ذرات فلزی در بستر باید همزمان میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی و کاهش ظرفیت جذب را در نظر گرفت.



شکل ۴: تغییرات زمان سیکل بر حسب نسبت فاصله فین به ازای ذرات فلزی مختلف

در شکل (۴) تغییرات زمان سیکل بر حسب نسبت فاصله فین (فاصله فین نسبت به یک فاصله مرجع) به ازای ذرات فلزی مختلف رسم شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ذرات فلزی به بستر جاذب زمان سیکل کاهش می‌یابد. به عنوان مثال به کارگیری آلومینیوم در FSR^5 برابر با یک، منجر به کاهش زمان سیکل به میزان $31/2\%$ ، $31/1\%$ و $26/8\%$ کاهش داده اند. البته میزان کاهش زمان سیکل به ضریب نفوذ پذیری ذرات فلزی به کار رفته در بستر وابسته است. ضریب نفوذ پذیری فولاد در قیاس با سایر فلزات کم‌تر می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود که میزان کاهش زمان سیکل برای فولاد نسبت به سایر فلزات کم‌تر باشد. شایان توجه است نتایج تجربی دمیر و همکاریانش نیز با روند حاضر مطابقت دارد [۱۰]. هر چند با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود با این‌که ضریب نفوذ و هدایت حرارتی آلومینیوم کم‌تر از مس است، اما زمان سیکل را بیش‌تر کاهش می‌دهد. این رفتار را می‌توان به تفاوت هندسه فلزات مذکور مرتبط دانست. همچنین با توجه به شکل (۴) با افزایش نسبت فاصله فین‌ها، آهنگ انتقال حرارت در بستر کاهش یافته و زمان سیکل افزایش می‌یابد [۱، ۲۰].

⁵ Fin spacing ratio
ISME2014، ۱۳۹۳ اردیبهشت ۴-۲

مشاهده می شود اما به علت پایین بودن فشار بستر، تفاوت فشار بسترها کمتر است.

در شکل (۷) تغییرات SCP نسبت به فاصله بین‌ها به ازای ذرات فلزی مختلف رسم شده است. با افزایش فاصله بین‌ها زمان سیکل، افزایش یافته (شکل (۴)) و SCP کاهش می‌یابد. در حالیکه با افزایش ذرات فلزی زمان سیکل کاهش (شکل (۵)) و SCP افزایش می‌یابد. این بدان معنا است که با افزودن ذرات فلزی می‌توان سرمایه‌های مخصوص را بهبود بخشید و هزینه اقتصادی اولیه سیستم را کاهش داد.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

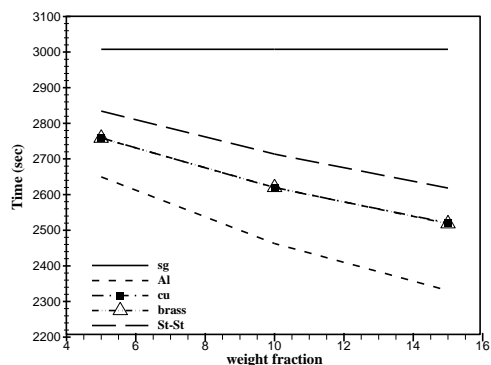
نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهند که افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب یک سیستم جذب سطحی، ضریب هدایت حرارتی بستر جاذب و در نتیجه آهنگ انتقال حرارت بستر را افزایش می‌دهد.

میزان بهبود انتقال حرارت به میزان ذرات فلزی اضافه شده و هم‌چنین جنس و شکل ذرات فلزی بستگی دارد. در این میان آلومینیوم بیش‌ترین تاثیر را در بهبود ضریب هدایت حرارتی بستر جاذب دارد.

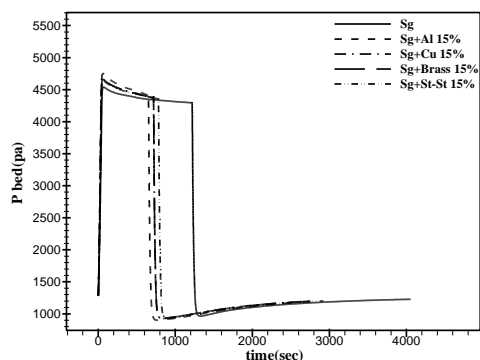
هم‌چنین نتایج نشان می‌دهند زمان سیکل در سیستم جذب سطحی با افزایش ذرات فلزی کاهش می‌یابد که این کاهش برای آلومینیوم در قیاس با سایر فلزات بیشتر می‌باشد. با بهبود زمان سیکل، توان سرمایه‌های مخصوص سیستم جذب سطحی نیز افزایش می‌یابد.

فهرست علائم

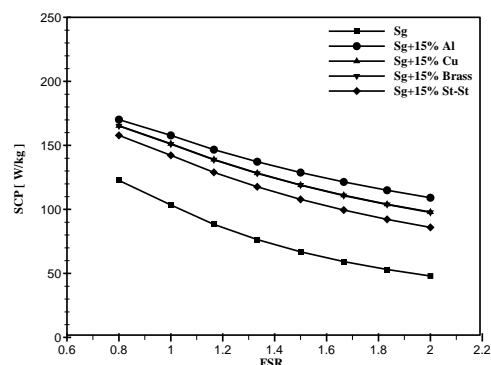
C_p	گرمای مخصوص در فشار ثابت، ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
D_{so}	ثابت پخشندگی سطح، (m^2s)
E_a	انرژی فعال‌سازی، (Jkg^{-1})
K_{eff}	رسانندگی گرمایی موثر، ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
K_{app}	نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب، (m^2)
P	فشار، (Pa)
Q	انرژی حرارتی، (J)
R_p	شعاع ذرات جاذب، (m)
R_g	ثابت جهانی گازها، ($\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)
t	زمان، (sec)
T	دما، ($^{\circ}\text{C}$)
U	بردار سرعت، (ms^{-1})
V	حجم، (m^3)
x	درصد حجمی، (-)
علائم یونانی	
ΔH	گرمای جذب، (Jkg^{-1})
ϵ_i	تخلخل کلی، (-)
λ	رسانندگی گرمایی، ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)



شکل ۵: تغییرات زمان سیکل بر حسب درصد وزنی ذرات فلزی مختلف



شکل ۶: تغییرات فشار بر حسب زمان سیکل به ازای ذرات فلزی مختلف



شکل ۷: تغییرات توان مخصوص سرمایه‌های بر حسب نسبت فاصله بین‌ها به ازای ذرات فلزی مختلف

شکل (۵) تغییرات زمان سیکل را بر حسب درصد وزنی ذرات فلزی نشان می‌دهد. با افزایش درصد وزنی فلزات مختلف در بستر جاذب، آهنگ انتقال حرارت افزایش یافته و زمان سیکل کاهش می‌یابد.

شکل (۶) تغییرات فشار نسبت به زمان را به ازای ذرات فلزی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل، فشار متوسط در مرحله گرمایش فشار ثابت در بستری با ذرات فلزی در قیاس با حالتی که ذرات فلزی حضور ندارند بیشتر می‌باشد. علت آن را می‌توان در بیش‌تر بودن مقاومت بستر جاذب به عبور سیال عامل در بسترهای حاوی ذرات فلزی دانست. این روند در مرحله سرمایه‌های فشار ثابت نیز

[9] Eltom, O. M. M., and Sayigh, A. A. M., 1994, "A simple method to enhance thermal conductivity of charcoal using some additives," *Renewable Energy*, 4(1), pp. 113-118.

[10] Demir, H., Mobedi, M., and Ülkü, S., 2010, "The use of metal piece additives to enhance heat transfer rate through an unconsolidated adsorbent bed," *International Journal of Refrigeration*, 33(4), pp. 714-720.

[11] Rezk, A., Al-Dadah, R. K., Mahmoud, S., and Elsayed, A., 2013, "Effects of contact resistance and metal additives in finned-tube adsorbent beds on the performance of silica gel/water adsorption chiller," *Applied Thermal Engineering*, 53(2), pp. 278-284.

[12] Yong, L., and Sumathy, K., 2004, "Comparison between heat transfer and heat mass transfer models for transportation process in an adsorbent bed," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(8-9), pp. 1587-1598.

[13] Demir, H., Mobedi, M., and Ülkü, S., 2008, "A review on adsorption heat pump: Problems and solutions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), pp. 2381-2403.

[14] Wang, D. C., Li, Y. H., Li, D., Xia, Y. Z., and Zhang, J. P., 2010, "A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), pp. 344-353.

[15] Saha, B. B., Chakraborty, A., Koyama, S., and Aristov, Y. I., 2009, "A new generation cooling device employing CaCl₂-in-silica gel-water system," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(1-2), pp. 516-524.

[16] Leong, K. C., and Liu, Y., 2004, "Numerical modeling of combined heat and mass transfer in the adsorbent bed of a zeolite/water cooling system," *Applied Thermal Engineering*, 24(16), pp. 2359-2374.

[17] Cheng, S. C., and Vachon, R. I., 1969, "The prediction of the thermal conductivity of two and three phase solid heterogeneous mixtures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 12(3), pp. 249-264.

[18] Hamilton, R. L., and Crosser, O. K., 1962, "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3), pp. 187-191.

[19] Restuccia, G., Freni, A., Vasta, S., and Aristov, Y., 2004, "Selective water sorbent for solid sorption chiller: experimental results and modelling," *International Journal of Refrigeration*, 27(3), pp. 284-293.

[20] Mahdavihah, M., and Niazmand, H., 2013, "Effects of plate finned heat exchanger parameters on the adsorption chiller performance," *Applied Thermal Engineering*, 50(1), pp. 939-949.

مقدار متوسط سیال عامل جذب شده	ω
چگالی، kg/m ³	ρ
زیرنویس	
بستر جاذب	b
سیال	f
بخار سیال عامل	g
ذرات فلزی	m
ماده جاذب	sg
سیال عامل	w

مراجع

[1] Niazmand, H., Talebian, H., and Mahdavihah, M., 2012, "Bed geometrical specifications effects on the performance of silica/water adsorption chillers," *International Journal of Refrigeration*, 35(8), pp. 2261-2274.

[2] Rezk, A., Al-Dadah, R., Mahmoud, S., and Elsayed, A., 2012, "Characterisation of metal organic frameworks for adsorption cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(25-26), pp. 7366-7374.

[3] Niazmand, H., and Dabzadeh, I., 2012, "Numerical simulation of heat and mass transfer in adsorbent beds with annular fins," *International Journal of Refrigeration*, 35(3), pp. 581-593.

[4] Chua, H. T., Ng, K. C., Wang, W., Yap, C., and Wang, X. L., 2004, "Transient modeling of a two-bed silica gel-water adsorption chiller," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(4), pp. 659-669.

[5] Akahira, A., Alam, K. C. A., Hamamoto, Y., Akisawa, A., and Kashiwagi, T., 2004, "Mass recovery adsorption refrigeration cycle—improving cooling capacity," *International Journal of Refrigeration*, 27(3), pp. 225-234.

[6] Saha, B. B., Koyama, S., Lee, J. B., Kuwahara, K., Alam, K. C. A., Hamamoto, Y., Akisawa, A., and Kashiwagi, T., 2003, "Performance evaluation of a low-temperature waste heat driven multi-bed adsorption chiller," *International Journal of Multiphase Flow*, 29(8), pp. 1249-1263.

[7] Demir, H., 2013, "The effect of microwave regenerated adsorbent bed on the performance of an adsorption heat pump," *Applied Thermal Engineering*, 50(1), pp. 134-142.

[8] Hu, P., Yao, J.-J., and Chen, Z.-S., 2009, "Analysis for composite zeolite/foam aluminum-water mass recovery adsorption refrigeration system driven by engine exhaust heat," *Energy Conversion and Management*, 50(2), pp. 255-261.