

بررسی تأثیر فرکانس پالسی در بستر سیلان جامد-گاز به‌عنوان مخزن ذخیره‌سازی انرژی

محمود کشاورز^۱، محمدرضا عساری*^۲ و حسن بصیرت تبریزی^۳

۱- گروه مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

۲- دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

۳- دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۲۶

چکیده

در این پژوهش، اندازه‌گیری‌های دما در یک بستر سیال حبابی پالسی جامد-گاز با ذرات ماسه سیلیسی ۱۸۴ میکرومتری و هوای ورودی 60°C به‌صورت تجربی انجام پذیرفت تا اثرات پالس جریان بر انتقال انرژی و راندمان ذخیره‌سازی آن در بستر، بررسی گردد. یک شیر برقی برای تغذیه هوای پالسی به بستر برای تغییر فرکانس نصب گردید و تأثیر فرکانس متناوب نیز بر هوای ورودی با اعمال وضعیت روشن خاموش شیر برقی بررسی شد. نتایج برای محدوده فرکانس ۱ Hz تا ۱۰ Hz، نشان داد که سطح بستر با اعمال فرکانس نوسانی شده و دامنه نوسان با افزایش فرکانس، کاهش می‌یابد. افزایش فرکانس، ضریب انتقال حرارت را در مقایسه با جریان پیوسته توسعه می‌دهد و این توسعه متناسب با سرعت ظاهری گاز، باعث افزایش راندمان ذخیره‌سازی انرژی می‌شود. در سه نسبت سرعت ۱/۵، ۲ و ۲/۵ به‌سرعت می‌نیمم سیالیت (U_{mf})، اثر پالس بر انتقال انرژی و ذخیره‌سازی بررسی شد و ماکزیمم کارایی در فرکانس ۷ Hz و نسبت سرعت ۲/۵ با افزایش ۲۸٪ نسبت به حالت بدون پالس، مشاهده شد.

کلمات کلیدی: بستر سیال پالسی، جریان گاز-ذره، ذخیره انرژی، کارایی

مقدمه

پاسخ‌گویی به تقاضای انرژی در زمان‌های پرمصرف و یا نبود آن، انجام می‌گیرد. معمولاً پیک مصرف انرژی با زمان تولید آن منطبق نبوده و لزوماً این دو وضعیت هم‌زمان نیستند. در واقع وظیفه سیستم‌های ذخیره انرژی، برداشت انرژی از منابع مختلف در هنگام فراوانی و تبدیل آن به فرم‌های انرژی مورد نیاز برای کاربردها در بخش‌های مختلف، از قبیل تأسیسات، صنعت، ساختمان و

ذخیره‌سازی انرژی، در جامعه امروز امری ضروری و مورد نیاز است که اهمیت آن بر کسی پوشیده نیست. فرآیند ذخیره انرژی معمولاً در بسیاری از زمان‌ها و به شرط در دسترس بودن آن، برای

آن‌ها هنوز برای ساخت اقتصادی و مقرون به صرفه بودن به کاوش بیشتری نیاز دارند [۸ و ۷]؛ بنابراین انرژی حرارتی خورشیدی را می‌توان به صورت انرژی گرمایی محسوس [۹]، انرژی حرارتی نهان [۱۰] و انرژی ترموشیمیایی [۱۱] با استفاده از مواد ذخیره‌سازی مختلف انرژی ذخیره کرد؛ که هر روش ذخیره‌سازی، مزایا و معایب خاص خود را برای کاربرد های مورد نظر دارد [۱۲]. براساس دسته‌بندی‌های مطرح‌شده در مراجع که برای سیستم‌های ذخیره انرژی انجام شده است، این سیستم‌ها که به صورت ذخیره گرما عمل می‌کنند، به روش‌های منفعل و فعال دسته‌بندی می‌شوند [۱۳ و ۱۴]. در هنگام وجود منبع انرژی خارجی نیازمند پمپاژ مایع انتقال حرارت در هنگام شارژ و همچنین فرآیند تخلیه، روش غیرفعال، روی پدیده‌های انتقال مانند همرفت طبیعی و اینرسی حرارتی کار می‌کند [۱۵]. کاربردهای صنعتی ذخیره انرژی در ساختمان‌ها با استفاده از کامپوزیت‌های ساختمانی جدید [۱۶ و ۱۷]، مواد تغییر فاز (PCM) در اتومبیل [۱۸]، منسوجات حرارتی و پارچه‌های خاص حرارتی و کفی‌های گرماگیر در تجهیزات الکترونیکی [۱۹]، نمونه‌هایی از روش غیرفعال هستند. از طرف دیگر، سیستم‌های فعال، به یک سیستم پمپاژ نیاز دارند تا گردش سیال انتقال‌دهنده حرارت را در طی فرآیند شارژ و تخلیه امکان‌پذیر کند [۲۰]. مخزن ذخیره‌سازی [۲۱]، سیستم ذخیره‌سازی بستر متراکم [۲۲]، سیستم‌های بستر سیال، سیستم‌های بستر متحرک [۲۳] و بلوک‌های بتونی [۲۴]، نمونه‌هایی از روش‌های فعال ذخیره انرژی هستند. ذخیره گرما در بسترهای سیال، به‌عنوان یکی از روش‌های فعال ذخیره انرژی، هدف بررسی ما در تحقیق حاضر است. امروزه تحقیقات درخصوص مواد پیشرفته و سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی با استفاده از مواد تغییر‌فاز دهنده در بخش‌های گوناگونی در حال انجام است [۲۵ و ۲۶].

حمل و نقل در زمان نیاز است. برخی از منابع انرژی مانند سوخت‌های فسیلی، می‌تواند برای تأمین انرژی با توجه به تقاضای مشتری استفاده گردد؛ یعنی در صورت عدم نیاز، به راحتی ذخیره می‌شود؛ اما منابع دیگر مانند انرژی خورشیدی و بادی و یا استفاده از انرژی‌های بازیافتی، باید در صورت موجود بودن جمع‌آوری و تا زمان نیاز ذخیره شوند. استفاده از ذخیره انرژی، چندین مزیت از قبیل افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر در جامعه و عملکرد اقتصادی بهتر و نیز حفظ محیط زیست را به دنبال خواهد داشت [۱]. بیش از ۵۰٪ کل انرژی جهانی مصرف‌شده در سال، مربوط به فرآیندهای گرمایش است و در سال‌های اخیر، ۲۵٪ این انرژی، با هدف مبارزه با تهدیدات ناخواسته بر روی زمین مانند گرم شدن کره زمین، توسط منابع انرژی تجدیدپذیر تولید می‌شود [۲]. منبع انرژی خورشیدی، از بین منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر، به‌عنوان یک گزینه قوی در جهت تأمین تقاضای جهانی انرژی در حال ظهور، مطرح است. همچنین، استفاده معقول از سیستم‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی، به فن‌آوری رضایت‌بخشی برای ذخیره انرژی پس از جمع‌آوری آن به شکل مناسب و تبدیل آن به حالت مورد نیاز برای مصرف نیاز دارد [۳]. انرژی خورشیدی را می‌توان با روش‌های ترکیبی ذخیره‌سازی به صورت انرژی گرمایی درجه پایین برای سیستم‌های حرارتی خورشیدی ذخیره کرد. درخصوص سیستم‌های خورشیدی سلول خورشیدی نیز واحد ذخیره انرژی، به تدریج به یک بخش ضروری از نظر مقررات قانونی تبدیل می‌شود؛ زیرا نیاز به برق سلول خورشیدی جهت اتصال به شبکه انرژی، با سرعت بسیار زیادی در حال افزایش است [۴ و ۵]. امروزه بسیاری از تکنیک‌های ذخیره انرژی برای سیستم‌های سلول خورشیدی متصل به شبکه‌های انرژی‌رسانی، به صورت مداوم در دست بررسی هستند [۶] که بعضی از این سیستم‌ها مقرون به صرفه بوده، ولی بسیاری از

در حوزه سیال‌سازی به کمک پالس و هیدرودینامیک جریان و ضرایب انتقال حرارت بین ذرات بستر و سطح است. خسروی بیژام و بصیرت تبریزی [۳۳]، در بخش هیدرودینامیک بسترهای جریان پالسی، تأثیر اعمال فرکانس بر کاهش سرعت سیلان بستر و تولید منظم حباب در آن را مورد بررسی قرار دادند و در موضوع انتقال حرارت، زانگ و کوکسال [۳۴]، میزان تأثیر افزایش ضریب انتقال حرارت را در بستر پالسی بر روی ذرات جامد نظیر سیلکا و شیشه داخل یک بستر عمودی استوانه‌ای بررسی کردند. همچنین تأثیر افزایشی اعمال فرکانس بر جریان گاز ورودی بر روی ضریب انتقال حرارت بسترهای سیال برای بسترهای مستطیلی و مخروطی شکل نیز توسط دنینگ ژیا و همکاران برای ذرات زیست‌توده گزارش شده است [۳۵]. مولر و ویر [۳۶] نیز با بررسی مقالات و تحقیقات انجام شده متعددی معادلات انتقال حرارت را در انواع بسترهای سیال و رژیم‌های جریانی متنوع ارائه کردند. این معادلات عموماً بسترهای سیالی شده حباب‌زا را پوشش می‌دهد، ولی بسترهای سیالی شده گردشی و سیستم‌های چند فازي همگن را نیز شامل می‌شود. تحقیقات آنها نگاهی به اشکال معمول سیستم‌های جامد-گاز با عددهای رینولدز بالاتر نیز دارد. مطالعات آنها انتقال حرارت ذرات به گاز در بسترهای فشرده را نیز توضیح داده است و یک پایه استوار فیزیکی برای مدل‌سازی انتقال حرارت بسترهای سیالی شده حباب‌زا فراهم می‌آورد. همچنین به‌صورت ویژه دو ساز و کار اصلی انتقال حرارت در دماهای پایین یعنی جریان همرفت ذرات و جریان همرفت گاز را مورد بحث قرار می‌دهد. در تحقیق حاضر، عملکرد یک بستر سیلان با حضور شن و ماسه در ذخیره‌سازی انرژی با جریان گاز ورودی به‌صورت پالسی، ارزیابی می‌شود تا تأثیرات تغییر فرکانس گاز ورودی بر راندمان ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بررسی گردد؛ نکته‌ای که در مطالعات قبلی مورد بررسی قرار نگرفته و هدف اصلی مطالعه کنونی است.

این تحقیقات به‌خصوص در صنعت ساختمان اخیراً افزایش یافته است [۲۷]؛ ولی هنگام استفاده از هوا به‌عنوان سیال انتقال‌دهنده گرما، بستر سیال با مواد جامد مانند شن و ماسه به‌دلیل ارزانی و در دسترس بودن، هنوز گزینه مناسبی است. در بیشتر موارد در خصوص ذخیره‌سازی انرژی در بسترهای سیال، مطالعات عددی انجام شده است و به‌طور تجربی نیز نتایج آزمایش برای بسترهای ثابت تأیید شده است [۲۸]. یک کار تجربی توسط بارینتوس و همکاران [۲۹] در خصوص ذخیره انرژی در بسترهای سیال و ثابت انجام پذیرفت که ضریب انتقال حرارت را برای ماسه و ذرات PCM در سه قطر متفاوت و نسبت سرعت‌های متغیر با جریان پیوسته به‌دست آورد. نتایج آنها نشان داد که در سرعت بالاتر سیال ورودی ضریب انتقال حرارت بیشتری به‌دست می‌آید و ضریب انتقال حرارت بستر سیال نسبت به بستر ثابت بالاتر است. بسترهای سیال، به‌دلیل داشتن برخی از ویژگی‌ها، از جمله وجود درجه حرارت یکنواخت در بستر یا سرعت انتقال حرارت بالا به یک جسم جامد درون بستر، می‌تواند در بسیاری از کاربردها مفید باشد. مطالعات هانسن و بروگنر در بسترهای سنگی شامل آنالیز انتقال حرارت همراه با نتایج تجربی تأییدشده برای اندازه‌های ذرات کوچک‌تر، کارایی ذخیره‌سازی بالاتری را نشان می‌دهد [۳۰]. کاربرد بسترهای سیال برای ذخیره گرمای محسوس که در گذشته مورد مطالعه قرار گرفته، نشان داده است که یک بستر مانند یک مخزن کاملاً مخلوط با تغییرات ناچیز دما در امتداد بستر رفتار می‌کند [۳۱]. واگیالا و همکارانش [۳۲]، رفتار یک بستر سیال را مدل‌سازی کرده و نشان دادند که عملکرد بهینه بستر سیال، وقتی از آن به‌عنوان یک مخزن ذخیره انرژی استفاده می‌شود، در حداقل سرعت سیلان بستر (Umf) به دست می‌آید؛ اما در خصوص اثرات ورودی جریان پالسی در بسترهای ذخیره انرژی، مطالعاتی مشاهده نشد و بیشتر تحقیقات این بخش،

بررسی تئوری ساز و کار انتقال حرارت

جریان همرفت ذرات و جریان همرفت گاز، دو ساز و کار اصلی انتقال حرارت در بستریهای سیال است و تغییرات دمای ذرات بستر متأثر از این دو فرآیند است. سیالی شدن بستر در سرعت ظاهری گاز u که بیشتر از می نیمم سرعت سیالی شدن است، انجام پذیرفت. پیش بینی قابل اعتماد برای انتقال حرارت، نیازمند آگاهی از خواص فیزیکی عامل سیالی شدن و ذرات به همراه تعیین دقیق شرایط عملیاتی در بستر است. نظر به دمای پایین بستر سیال در این تحقیق، ظرفیت گرمایی ذرات ماسه به دما وابسته نبوده و در محاسبات ثابت در نظر گرفته می شود. با توجه به موارد گفته شده، یک مبنای منطقی برای بررسی تئوری بستر، رابطه ای است که ضریب انتقال حرارت را به صورت تابعی از سرعت ظاهری گاز و خواص ذرات موجود در بستر تعریف می کند. این رابطه، برای هرگونه تغییر در خواص فیزیکی ذرات و عامل سیالی شدن تا رسیدن به اعداد ارشمیدس، $Ar < 10^8$ ، معتبر است و ضرایب آن نیز در این تحقیق مجدداً مورد تأیید قرار گرفته است و انتقال حرارت همرفتی در بستر را پیش بینی می کند. عدد ارشمیدس براساس خواص فیزیکی مواد بستر شامل چگالی و قطر ذرات ρ_p و d_p چگالی و ویسکوزیته گاز حامل ρ_g و μ به صورت زیر تعریف می شود:

$$Ar = \frac{d_p^3 g (\rho_p - \rho_g) \rho_g}{\mu^2} \quad (1)$$

دو رابطه برای محاسبه ضریب انتقال حرارت همرفتی ذرات و گاز حامل با ضرایب $P_1=25$ و $P_2=0.19$ در $G_1=0.05$ و $G_2=0.165$ توسط مولر و ویر [۳۶] به صورت جداگانه برای استفاده در بستریهای سیال مورد تجزیه تحلیل دقیق قرار گرفته است. ضریب انتقال حرارت کل، برابر مجموع این دو مقدار خواهد بود.

$$\frac{h_{pc} I_t}{k_g} = \frac{P_2 (1 - \varepsilon_{mf})}{1 + \frac{k_g}{2c_p \mu}} \times \frac{1}{1 + P_1 \left(\sqrt{\frac{u - u_{mf}}{u_{mf}}} \sqrt{\frac{\rho_p c_p}{k_p g}} (u - u_{mf}) \right)^{-1}} \quad (2)$$

$$\frac{h_{gc} I_t}{k_g} = G_2 Pr^{1/3} \times \frac{1}{1 + G_1 \left(\frac{u - u_{mf}}{u_{mf}} \right)^{-1}} \quad (3)$$

برای تعیین ضریب تخلخل با استفاده از سرعت سیلان کمینه، از رابطه آسف استفاده می شود [۳۷]:

$$\frac{150}{18} \left[\frac{18\mu}{(\rho_p - \rho_g) g D_p^2} \right] u_{mf} \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} - 1 = 0 \quad (4)$$

در اینجا ρ_s چگالی ذرات است و ε_{mf} و u_{mf} به ترتیب کسر تخلخل حجمی بستر و حداقل سرعت گاز حامل در حداقل شرایط سیال سازی هستند. مقدار قابل قبول برای ε_{mf} برابر ۰/۴۱۵ است [۳۶]. برای تعیین حداقل سرعت سیال به طور کلی، باید تقاطع خط بستر شیب دار با داده های فشار اندازه گیری شده در بستر با خط افقی داده های فشار تقریباً ثابت در نمودار (P-U) مشخص شود؛ ولی به لحاظ نظری، حداقل سرعت سیال سازی را می توان با رابطه ۵ برآورد کرد [۳۷]:

$$u_{mf} = \frac{146(\rho_s - \rho_f) g D_p^2}{18000\mu} \quad (5)$$

در طی فرآیند انتقال حرارت از گاز حامل به ذرات، فاکتور ذخیره انرژی بستر BSF^۱ که میزان انرژی ذخیره شده در بستر را نسبت به حداکثر میزان انرژی قابل ذخیره در سیستم نشان می دهد در رابطه ۶ تعریف شده است. ساده سازی این فرمول به عدد بدون بعد θ_b منجر می شود [۳۱]:

$$BSF = \frac{m_s c_s (\bar{T}_b - T_i)}{m_s c_s (\bar{T}_{max} - T_i)} = \frac{(\bar{T}_b - T_i)}{(\bar{T}_{max} - T_i)} = \theta_b \quad (6)$$

T_{max} در اینجا دمای هوای ورودی به میزان $60^\circ C$ است. به عنوان متغیرهای بعدی، دمای ذرات جامد در لحظه محاسبه انرژی ذخیره شده و T_i دمای اولیه ذرات جامد است.

و روش های انتقال انرژی در بستر، به همان اندازه که ممکن است پیچیده باشند، یک ویژگی مشترک دارند. همه خواص حرارتی در بستر، مرتبط با واحد اختلاف دما به شکل هدایت حرارتی K ($Wm^{-1}K^{-1}$) و ظرفیت حرارتی حجمی C_p ($Wm^{-3}K^{-1}$) هستند.

تفسیر شهودی این ویژگی، کاملاً واضح است: انتقال حرارت هدایتی بین یک ناحیه و یک سطح که دارای اختلاف دمای ΔT هستند، باعث انتقال انرژی متناسب با $K\Delta T$ می‌شود. انتقال ماده بین منطقه گرم و سطح سرد نیز انرژی متناسب با $C_p\Delta T$ را تولید می‌کند. سرانجام این همگن شدن کلی، این است که نتیجه نهایی هر فرآیند انتقال حرارت کم و بیش پیچیده نیز که تنها در راستای اصول مبتنی بر خواص حرارتی عمل می‌کند، متناسب با اختلاف دمای ΔT است. این موضوع، برای سطح معینی از میانگین دمای منطقه گرم و سطح سرد مورد نظر که انتقال انرژی بین آن‌ها رخ می‌دهد و در اختلاف دمای متوسط، برقرار است؛ بنابراین، خواص حرارتی محیط درگیر می‌تواند ثابت فرض شود.

دستگاه آزمایش، وسایل اندازه‌گیری و مقایسه با کار تجربی دیگران

به‌منظور انجام آزمایش‌های گرمایش شن و ماسه در بستر سیال پالسی به‌عنوان یک مخزن ذخیره‌سازی انرژی، تجهیزات زیر در قالب یک دستگاه نصب و راه‌اندازی شده است که نمودار شماتیک و عکسی از مجموعه تجربی در شکل ۱ نشان داده شده است. بستر، شامل یک لوله استوانه‌ای از پلکسی گلس با ضخامت دیواره ۳ mm است که با ذرات شن به ارتفاع ۲۰ cm پر شده است. این لوله، در حین انجام آزمایش با عایق فومی شکل به ضخامت ۲۰ mm پوشیده شده است. هوا از یک سیستم هوای فشرده مرکزی در دبی حجمی کنترل شده و پس از عبور از یک گرم‌کن، با دمای $60^\circ C$ به بستر وارد می‌شود.

در بستر سیال، راندمان ذخیره انرژی برحسب متغیرهای چگالی، ضریب تخلخل، حجم هوای ورودی، ظرفیت گرمای ویژه هوای ورودی و اختلاف دماهای بین هوا و دمای اولیه محاسبه می‌شود که با رابطه ۷ نشان داده شده است. علی‌رغم حذف C_s در رابطه محاسبه فاکتور ذخیره انرژی رابطه ۶، ولی به‌دلیل ذخیره انرژی در ذرات از طریق ضریب انتقال حرارت ذرات h_{pc} ، ضریب گرمای ویژه C_s در تعیین کارایی ذخیره انرژی بستر مؤثر است [۳۸]:

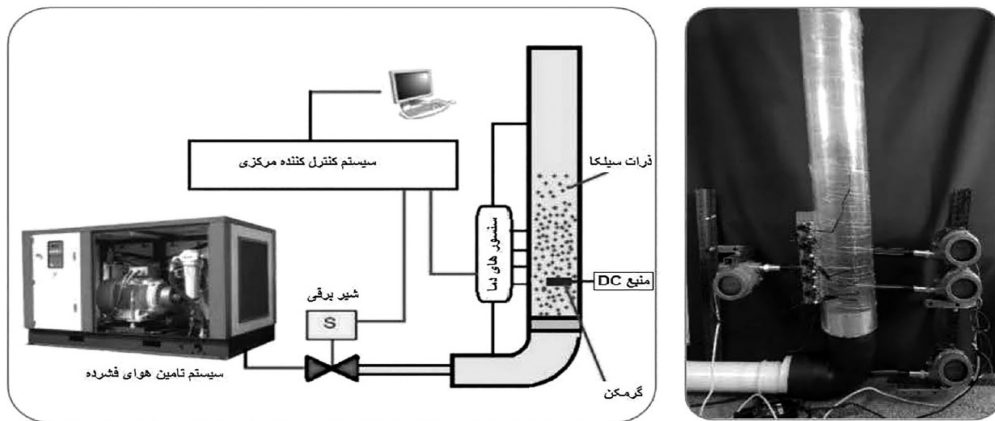
$$\eta_c = \frac{E_s}{E_{in}} = \frac{\rho_s (1-\varepsilon) A_t \int_{x=0}^{x=H} (i_{bx} - i_o) dx}{\int_{t=0}^t m_{air} c_{p,air} (T_{air} - T_o) dt} \quad (7)$$

که در آن ρ_s چگالی فاز جامد (ذرات شن و ماسه)، ε ضریب تخلخل بستر، $A_t = (\pi/4)D^2$ سطح مقطع بستر، a_{lim} میزان جریان عبوری هوا از بستر، $C_{p,air}$ گرمای ویژه هوا به‌عنوان تابعی از T_{air} (دمای هوای ورودی)، T_o دمای اولیه بستر و $i_{bx} - i_o$ انرژی ویژه ذخیره‌شده در ذرات بستر بوده که در رابطه ۸ تعریف شده است [۳۸]:

$$i_{bx} - i_o = \int_{T_o}^{T_{bx}} c_s dT \quad (8)$$

که در آن c_s ، گرمای ویژه مواد در بستر به‌عنوان تابعی از T_{bx} (دمای بستر در ارتفاع x و زمان t) است. طبق رابطه ۷، η_c انرژی ذخیره‌شده، E_s ، در بستر در زمان t و کل انرژی حرارتی تأمین‌شده توسط هوا در ورودی بستر، E_{in} (نسبت به دمای اولیه بستر T_o) تا زمان مشابه t مربوط است. مقدار انرژی ذخیره‌شده در بستر را در یک زمان مشخص با تقسیم‌بندی بستر به قسمت‌های مختلف و اندازه‌گیری دما در هر قسمت، می‌توان محاسبه کرد. در زمان غالب بودن انتقال حرارت جابه‌جایی گاز، خواص حرارتی گاز، به‌تنهایی به شکل هدایت حرارتی گاز و ظرفیت حرارتی گاز اهمیت پیدا می‌کند.

در رژیم میانی که دو نوع انتقال حرارت جابه‌جایی گاز و ذرات هر دو تأثیرگذار هستند، علاوه‌بر هدایت حرارتی ماده جامد دیگر خواص حرارتی جامد و عامل سیالی شدن نیز دخیل هستند. عوامل مؤثر

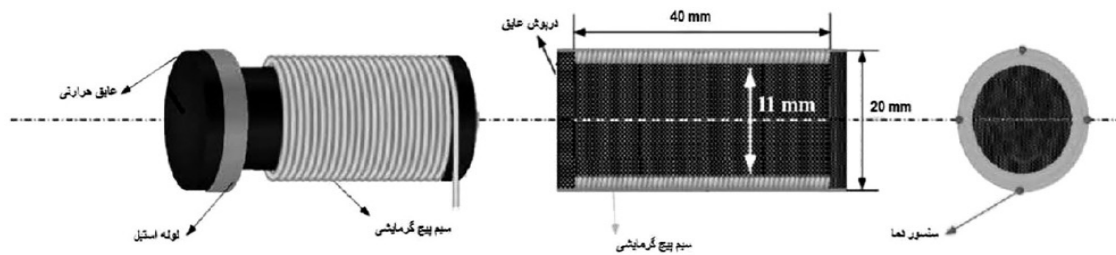


شکل ۳۱ دستگاه تست بستر نوسانی بادیاگرام سنسور های نصب شده

شدن ذرات و حباب‌ها بر روی سطح گرم‌کن رخ دهد، جلوگیری کند. موقعیت عمودی گرم‌کن نسبت به صفحه توزیع‌کننده، ۷۰ mm بالاتر است. برای ساخت آن، سیم‌پیچ گرمایشی بیست وات Ni-Cr به‌طور یکنواخت در داخل سیلندر استیل توخالی گرم‌کن به‌صورت حلقه‌های فنری‌شکل نصب گردید و در دو انتهای آن دو عدد عایق سرامیکی مستقر گردید. پس از استقرار دو عدد ترموکوپل روی گرم‌کن، بقیه فضا با سیمان مخصوص عایق‌کاری پر شد. یک منبع تغذیه 20w-12V DC، وظیفه تأمین انرژی گرم‌کن داخل پوسته را بر عهده دارد. دو ترموکوپل نوع T در سطح گرم‌کن نصب شده‌اند. پوسته استیل که سطح خارجی گرمایشی A_s را تشکیل می‌دهد، دارای طول کلی ۴۰ mm است. با ترموکوپل‌های اضافی نصب‌شده در داخل بستر سیال، دمای بستر T_b اندازه‌گیری می‌شود، سپس ضریب انتقال حرارت بستر به سطح از طریق رابطه ۹ محاسبه می‌شود. پنج آزمایش مطابق جدول ۱ در این مطالعه انجام پذیرفته است. نمودار پراکندگی و مشخصات ذرات ماسه مورد استفاده در این آزمایش‌ها، در شکل ۳ و در جدول ۲ نشان داده شده است.

$$h = \frac{VI}{A_s(T_s - T_b)} \quad (9)$$

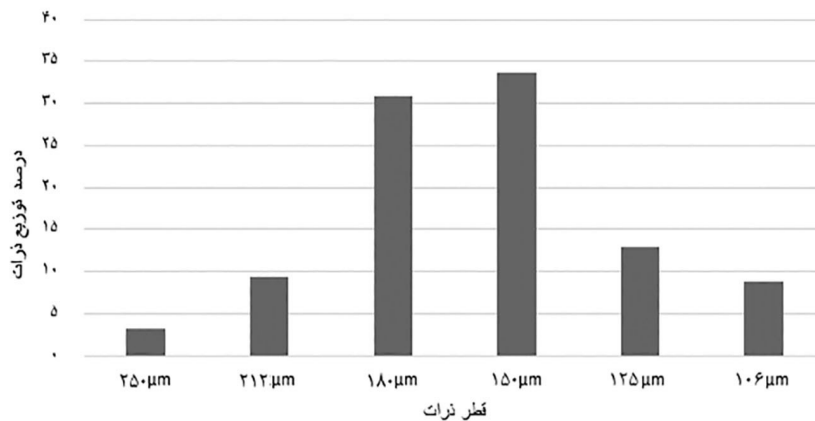
یک شیر برقی آسکو مدل Bak1-220 با حالت پیش‌فرض بسته، جهت اعمال فرکانس بر هوای ورودی نصب شده است. قبل از ورود هوا به بوبین، توسط یک کنتور آلتراسونیک مدل ایکس اکباتان دبی آن ثبت می‌شود. یک برد الکترونیک قابل برنامه‌ریزی مدل XY-J02، فرکانس دلخواه را به بوبین شیر برقی اعمال می‌کند. هوا از طریق یک صفحه متشکل از دولایه پارچه مخصوص کیسه‌های فیلتراسیون که با یک صفحه مشبک پلاستیکی در وسط جهت افزایش مقاومت آن تقویت شده است، وارد ستون مواد می‌شود. جهت اندازه‌گیری دما، از دماسنج‌های رزمونت مدل p 3144 استفاده شد که داده‌های دمایی را از طریق یک سیستم جمع‌آوری داده در طول آزمایش ثبت می‌کند. از سنسورهای کنترلر دما NTC-10K 0.5% متصل به ماژول XH-W1209 نیز جهت دریافت دمای سطح گرم‌کن و عایق بدنه و دمای خروجی بستر و همچنین به‌عنوان سنسورهای پشتیبان استفاده می‌شود. گرم‌کن انتقال حرارت به‌صورت افقی، برای انتقال حرارت سیال در یک بستر سیال پالسی با قطر ۲۰ mm و طول ۴۰ mm، طراحی و ساخته شده که در شکل ۲ نشان داده شده است. این گرم‌کن، از طریق دو پایه سفت و محکم، در داخل ستون بستر سیال نصب شده است تا از هرگونه لرزشی که ممکن است هنگام سیال‌سازی در نتیجه ساییده



شکل ۲ ساختار گرم‌کن

جدول ۱ شرایط آزمایشات انجام‌شده

تست	نوع جریان	فرکانس	U/U _{mf}					
			۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۵	۱/۶	
۱	پیوسته	-	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۵	۱/۶	-
۵-۲	پیوسته و پالسی	۱ و ۷ و ۱۰ Hz	-	-	-	۱/۵	۲	۲/۵



شکل ۳ درصد توزیع قطر ذرات

جدول ۲ ویژگی‌های مواد استفاده‌شده در آزمایشات

Pr	ε	C _p (kJ/kgK)	μ(Ns/m ²)	K(W/mK)	ρ _p (kg/m ³)	
۰/۷۰۹	-	۱	۰/۰۰۰۰۱۸۹	۰/۰۲۸۵	۱/۰۶۷	هوا
-	۰/۴۱۵	۰/۷۵	-	۰/۲۷	۲۶۰۰	سیلیکا

برای محاسبات خطای آزمایشات و محاسبه عدم اطمینان در داده‌های تجربی این کار، تجزیه و تحلیل خطا طبق اصول پیشنهادی تیلور و با استفاده از رابطه ۹ انجام شده است [۳۹]. در صورتی که مقادیر w ، \dots ، x با عدم قطعیت dw ، \dots ، dx اندازه‌گیری شود و اگر نتایج اندازه‌گیری شده برای محاسبه f استفاده شود، خطای f به صورت زیر خواهد بود:

$$f = \frac{x \times \dots \times z}{u \times \dots \times w}$$

$$\left| \frac{\delta f}{f} \right| = \sqrt{\left(\frac{\delta x}{x} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta z}{z} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta u}{u} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta w}{w} \right)^2}$$

(۱۰)

و سرعت جریان بر عملکرد بستر سیال با ذرات شن و ماسه، سه حالت مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. در تمام این آزمایشات، جرم ستون ذرات شن و ماسه، $7/5 \text{ kg}$ بود و جریان هوای ورودی به محفظه تست تا 60°C گرم می‌شد. نرخ جریان در سه فرکانس ۱ و ۷ و 10 Hz انتخاب‌شده برابر 1250 ، 1000 و 700 L/min بود که با سرعت مازاد هوا در حداقل شرایط سیال‌سازی، U/U_{mf} ، به ترتیب $2/5$ ، 2 و $1/5$ مطابقت دارد. در شکل ۵، توزیع دما در امتداد بستر برای سه آزمایش ارائه شده است. دمای رسم‌شده در این شکل، متوسط دمای ترموکوپل‌ها است. دمای اندازه‌گیری‌شده توسط اولین ترموکوپل، در $2/5 \text{ cm}$ توزیع‌کننده قرار داشت. میانگین دما در بستر، از داده‌های به‌دست‌آمده توسط سه ترموکوپل دیگر در $7/5$ ، $12/5$ و $17/5 \text{ cm}$ و دمای هوا در قسمت خروجی محاسبه شده است. وضعیت دمای قرائت‌شده در ارتفاع‌های مختلف در طول بستر، داده‌های محققین قبلی مبنی بر یکنواختی دما در سطح بستر را کاملاً تأیید می‌کند و همان‌طور که در مطالعه منبع [۳۹] اشاره شده است، اولین ترموکوپل که بعد از صفحه توزیع دما قرار دارد.

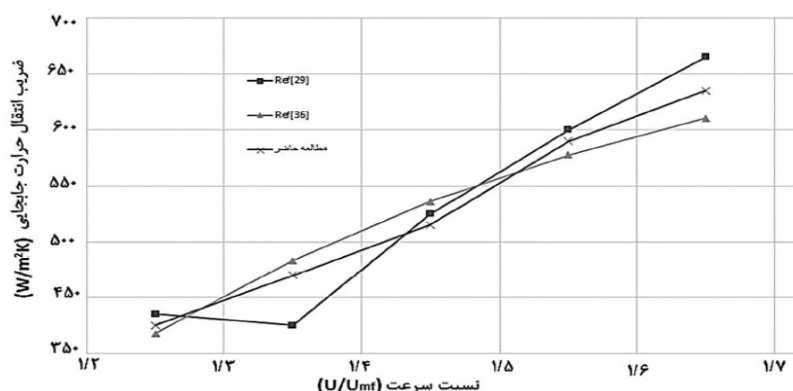
در جدول ۳، خطای تجهیزات و مقادیر محاسبه‌شده، ارائه شده است. برای اعتبارسنجی نتایج خروجی، بین این مطالعه و تحقیقات تجربی صورت‌گرفته، مقایسه‌ای انجام پذیرفت. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، ضریب انتقال حرارت اندازه‌گیری‌شده بر روی هیتر داخلی بستر، با نتایج داده‌شده بارینتوس و همکاران [۲۹] که ضریب انتقال حرارت را برای ماسه و ذرات PCM در بسترهای سیال با جریان پیوسته به‌دست آورد و و رابطه مولر [۳۶] مقایسه شده و به‌طور کلی، می‌توان توافق خوبی بین این مطالعه و داده‌های تجربی آن‌ها مشاهده کرد. اختلاف ضریب انتقال حرارت در این مطالعه با نتایج مذکور، می‌تواند به‌دلیل تفاوت سیستم اندازه‌گیری یا برخی خطاهای ناشناخته در نتایج باشد. با این حال، این روند نشان می‌دهد که در مقایسه با رابطه مولر، خطا 5% است. متوسط خطا در مقایسه با نتایج بارینتوس، 7% است که در صورت لحاظ نشدن نسبت سرعت $1/3$ نیز این خطا در حد 5% خواهد بود.

بررسی نتایج و بحث

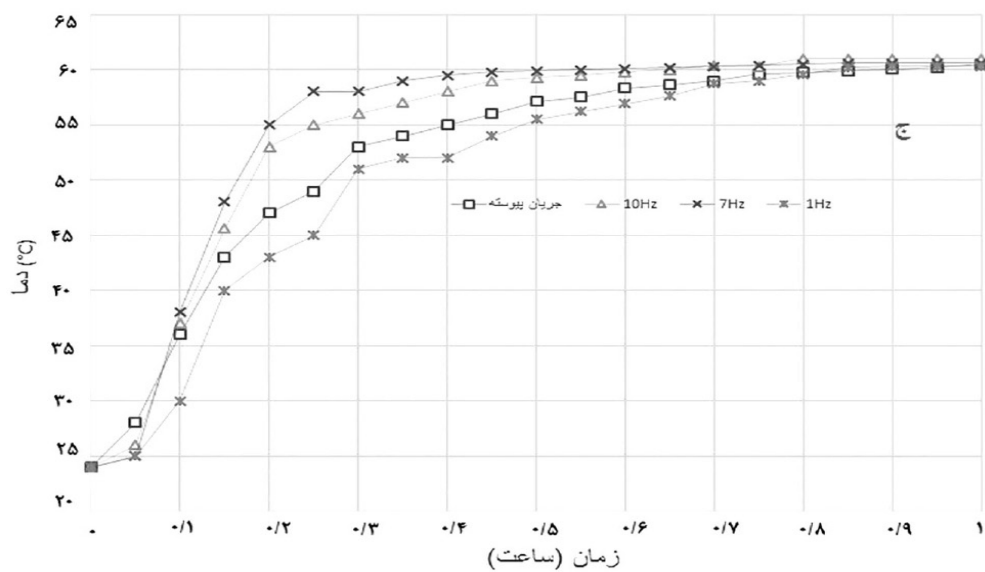
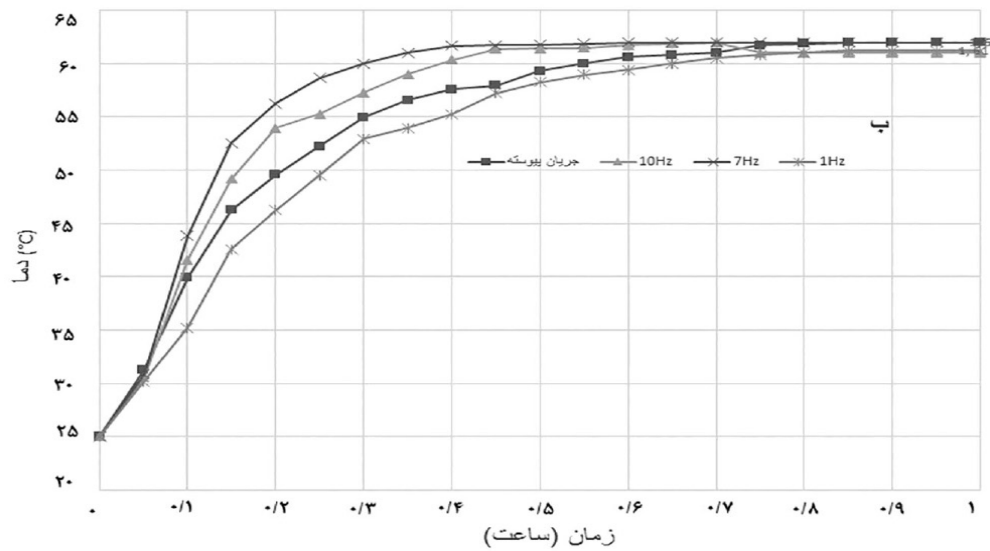
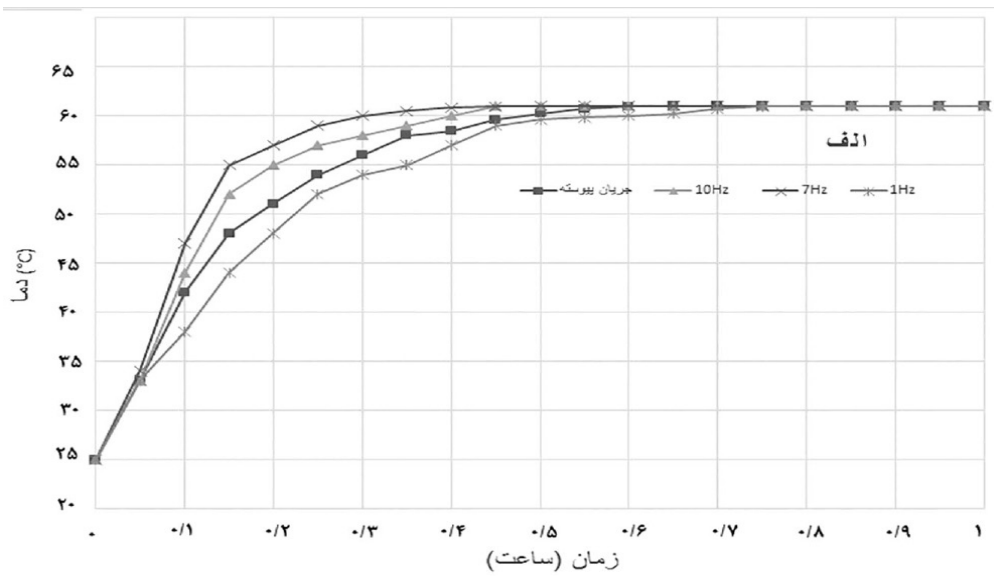
برای بررسی تأثیر اعمال پالس بر هوای ورودی

جدول ۳ خطای تجهیزات و آزمایشات

ضریب انتقال حرارت	ابعاد	دبی سنج آلتراسونیک	آمپرسنج	ولت سنج	سنسور NTC-K10	سنسور رزمونت P3144
$1.0/5\%$	0.001 mm	$0.06 \text{ m}^3/\text{h}$	$\pm 0.5 \text{ A}$	0.06 V	$\pm 0.2^\circ \text{C}$	$\pm 0.5^\circ \text{C}$



شکل ۴ مقایسه ضریب انتقال حرارت در بستر حاوی ذرات ماسه با سایر منابع



شکل ۵ تغییرات دمای بستر در فرکانس‌های ۱ و ۷ و ۱۰ Hz در سه نسبت سرعت الف) ۲/۵، ب) ۲ و ج) ۱/۵

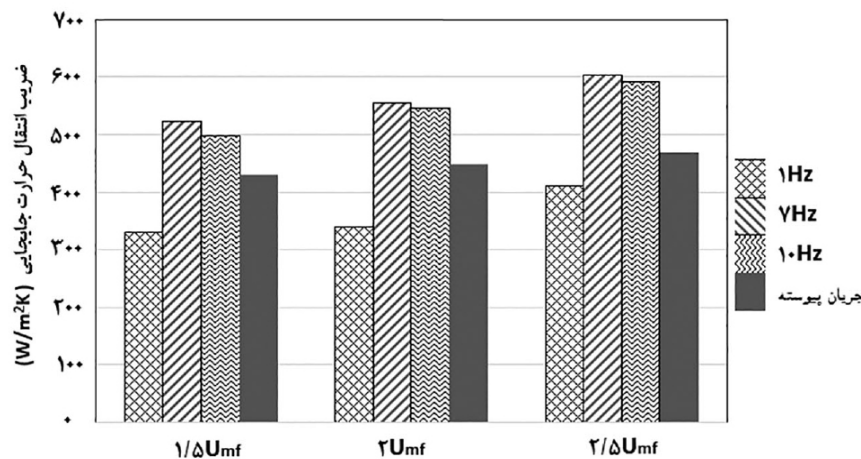
لحظه کوتاه، وزن بستر غلبه می‌کند و به‌طور کلی به‌سمت بالا رانده می‌شود. به‌محض اینکه سرعت گاز سطحی تا زیر حداقل سرعت سیال‌سازی پایین می‌رود، بستر به‌سرعت تحرک خود را از دست می‌دهد و دوباره به پایین سقوط می‌کند و به یک حرکت پیستون‌مانند رفت و برگشتی تبدیل می‌شود. دامنه این حرکات پیستونی با دامنه فرکانس اعمالی مطابقت داشته و در فرکانس ۱ Hz که دامنه نوسان ذرات در مقایسه با فرکانس‌های ۷ و ۱۰ Hz بالاتر است این نوسان بیشتر است. سطح بستر در حداقل سرعت سیال شدن در فرکانس ۱ Hz انبساط بیشتری نسبت به دو فرکانس ۷ و ۱۰ Hz دارد. با افزایش سرعت جریان گاز، پالس، نیروی جنبش آبی پیدا می‌کند که منجر به نوسانات فشار بیشتری می‌شود. پالس‌ها تحت این شرایط می‌توانند حباب‌هایی را تشکیل دهند و به یک بخش کوچکی از ذرات جامد در مرکز به‌جای تمام بستر نفوذ کنند. از نظر عینی، بستر سیال پالسی از دور شبیه یک بستر جوشان است که در آن یک جت در مرکز بستر تشکیل می‌شود و ذرات به‌سمت بالا حمل می‌شوند، سپس به قسمت بیرونی افتاده و مجدداً به آرامی به پایین بازمی‌گردند. افزایش بیشتر سرعت جریان گاز، منجر به فوران حباب‌های شدید و جداسازی جانبی شد. ایده‌آل‌ترین الگوی جریان، حالتی شبیه الگوی بستر سیال معمولی با حباب‌هایی با اندازه منظم است. برای حفظ چنین الگوی جریانی، شدت پالس و فرکانس بالایی لازم است. در چنین وضعیتی، با شروع هر دوره روشن "ON" که فاز گاز را به بستر سیال آزاد می‌کند، فرکانس حباب‌زایی با فرکانس پالس هماهنگ است. اندازه حباب، به‌سرعت گاز حامل در آن نقطه‌ای که حباب تشکیل می‌شود، بستگی دارد. تغییرات هیدرودینامیکی بستر، بر کلیه پارامترها مؤثر بوده و روش‌های مختلفی برای شناسایی و پیش‌بینی رفتار بسترهای دوفازی به‌کار گرفته می‌شود [۴۰].

تنها اندکی اختلاف نسبت به سایر دماسنج‌ها را نشان می‌دهد که به‌دلیل برخورد اولیه هوای گرم ورودی با ذرات قابل انتظار است. جهت رسیدن به دمای واقعی، بایستی به سیستم در لحظات اولیه فرصت داد تا خطای محاسباتی کمتری جهت محاسبه راندمان واقع شود. برهم‌کنش گاز-جامد در بستر سیال، اغلب توسط جریان گاز تعیین می‌شود. زمان هم‌دم شدن ذرات با گاز حامل ورودی همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است با افزایش سرعت هوای ورودی کاهش می‌یابد. در هر سه تست انجام شده زمان هم‌دم شدن ذرات در فرکانس ۷ Hz کمتر است و در فرکانس ۱ Hz نیز زمان بیشتری برای هم‌دم شدن صرف می‌شود. ولی در سرعت در $U = 1/5 U_{mf}$ ، اختلاف زمان هم‌دم شدن در فرکانس‌ها نسبت به $U = 2/5 U_{mf}$ مشهودتر است. این موضوع با توجه به ورودی انرژی بیشتر ناشی از دبی جرمی سیال در $U = 2/5 U_{mf}$ قابل انتظار است. با توجه به ماهیت نوسانی پالس‌های گاز، در سرعت‌های مختلف جریان گاز الگوهای جریان متفاوتی در در محفظه تست که یک بستر سیال استوانه‌ای شکل است ظاهر می‌شود. همان‌طور که سرعت جریان گاز به‌تدریج افزایش می‌یابد، رفتار جریان بستر ثابت به‌تدریج به یک بستر سیال نرمال تبدیل می‌شود. الگوها تحت تأثیر شدت پالس گاز هستند که با فرکانس و سرعت جریان در ارتباط است. هنگامی که جریان هوا در دبی کمتری تأمین شود، نیروهای رانشی و کششی بخش‌هایی از بستر نمی‌توانند بر وزن خود غلبه کنند؛ بستر دقیقاً در آن قسمت مانند یک راکتور بستر ثابت که در آن ذرات ثابت می‌مانند، رفتار می‌کند. سرعت گاز سطحی در یک بستر سیال پالسی، به‌طور تناوبی با زمان در یک مدل سینوسی تغییر می‌کند. با افزایش جریان گاز، میانگین حداقل و حداکثر سرعت گاز سطحی نیز در یک چرخه پالسی افزایش می‌یابد. در نهایت، حداکثر سرعت گاز سطحی بیش از حداقل سرعت سیال‌سازی است و در آن

به قطره‌های بزرگ‌تر حباب و سرعت‌های بالاتر صعود حباب کمک می‌کند؛ در نتیجه، زمان حضور خوشه‌های ذرات روی سطح را کاهش و با جایگزینی ذرات جدید همرفت ذرات را افزایش می‌دهد. با افزایش سرعت گاز سطحی از $U_{mf}/5$ به $2U_{mf}$ که در $h=556/1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ است، افزایش ۷٪ در انتقال برای فرکانس ۷ Hz مشاهده شد. ضرایب انتقال حرارت برای ۱ و ۱۰ Hz به ترتیب $340/1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ و $545/2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ بود.

با یک سرعت جریان متوسط $U_{mf}/5$ ، نفوذ بیشتری در ستون مواد داخل محفظه تست توسط جت‌های هوا مشاهده شد. جدا از مرکز، ذرات به تدریج از کناره‌ها نیز به پایین بستر سیال منتقل شدند و در آنجا با حباب‌های در حال صعود، تماس یافتند. در این نسبت سرعت، مقداری تلاطم اتفاق می‌افتد. حباب‌های کوچک متعددی که در طول دوره "روشن" در بالای صفحه توزیع‌کننده تشکیل شده‌اند، هنگام صعود با توده‌های بزرگ‌تر ادغام می‌شوند. این رژیم تلاطمی، جداسازی جانبی را به‌طور کامل اصلاح نکرد؛ زیرا ذرات گه‌گاه در حضور تلاطم به بخش‌های پایین هل داده می‌شدند. ماکزیمم ضریب انتقال حرارت مربوطه در فرکانس ۷ Hz برابر $602/7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ بود.

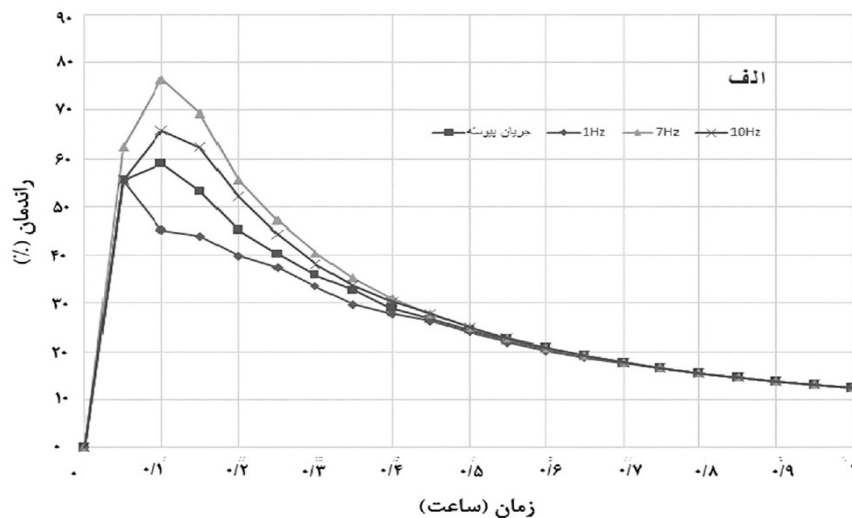
تأثیر سرعت جریان گاز بر انتقال حرارت بستر به سطح، در شکل ۶ نشان داده شده است. در $U_{mf}/5$ ، راه‌گزینی و سیال‌زدایی جزئی به‌طور مداوم در حالت جریان پیوسته صورت گرفت. جت‌های قوی در طول دوره‌های "روشن" به کمک تماس جامد-گاز تشکیل شدند؛ اما با اعمال فرکانس ۱ Hz، راه‌گزینی و سیال‌زدایی جزئی افزایش یافت. هر دو انتقال حرارت همرفتی گاز و همرفتی ذرات به دلیل کمبود تماس جریان گاز و اختلاط، کاهش یافت. ضرایب انتقال حرارت بستر به سطح متوسط اندازه‌گیری‌شده، برابر $330/3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ بود. با افزایش فرکانس پالس به ۷ Hz، گاهی راه‌گزینی انجام می‌شد؛ اما بستر قادر به بازبانی بود و اختلاط ذرات و سیال‌سازی مجدد به‌خوبی از سر گرفته می‌شد. در این فرکانس، ضریب انتقال حرارت برابر $522/4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ بود. برای فرکانس ۱۰ Hz، وضعیت مشابه ۷ Hz است؛ ولی ضریب انتقال حرارت، کمی کاهش می‌یابد که در آن ضریب انتقال حرارت (W/m^2K) اندازه‌گیری شد. با افزایش سرعت گاز حامل به $2U_{mf}$ ، انتقال حرارت برای ۱، ۷ و ۱۰ به‌طور محسوسی بهبود یافت. در طول آزمایش، علاوه‌بر دامنه بیشتر در انبساط بستر، تماس گاز-جامد بهتری مشاهده شد. جریان گاز، بیش از حد مورد نیاز برای حفظ حداقل سیال‌سازی،

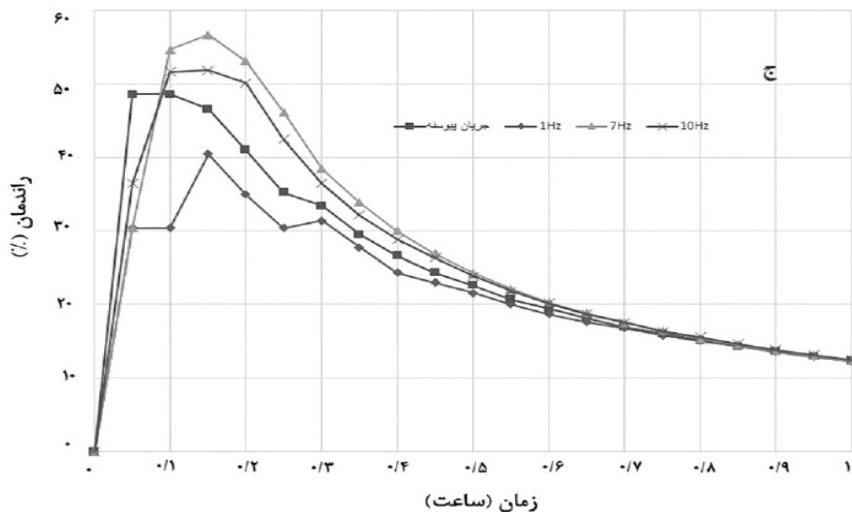
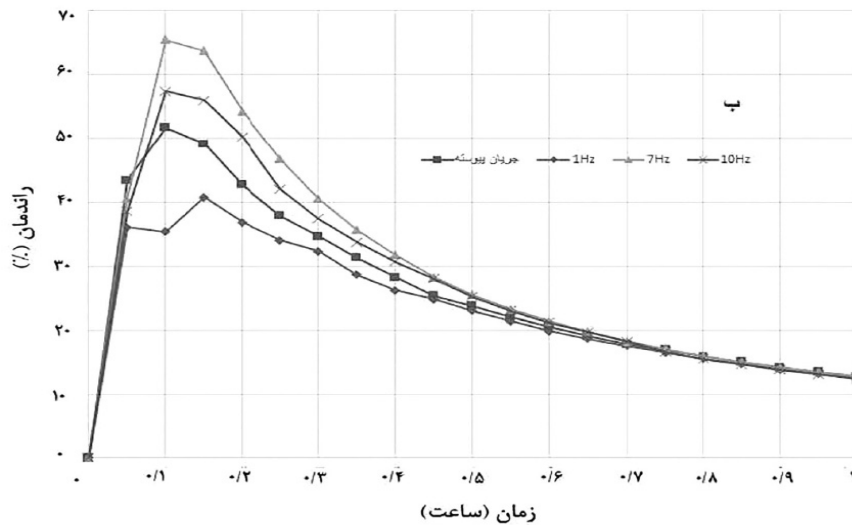


شکل ۶ ضریب انتقال حرارت در فرکانس‌های اعمال‌شده ۱ و ۷ و ۱۰ Hz و جریان پیوسته بستر در سه نسبت سرعت $1/5$ و $2/5$ و ۲

به دلیل اینکه در ابتدای آزمایش، سیستم به حالت پایا نرسیده است، از داده‌های چند دقیقه اول آزمایش باید چشم‌پوشی شود تا از ایجاد خطا در محاسبات اجتناب گردد. پس از این دوره تثبیت، کارآیی با درجه حرارت بستر افزایش می‌یابد؛ زیرا هوای ورودی نیز در طی فرآیند شارژ گرم می‌شود. وقتی دمای هوای ورودی به حداکثر مقدار قابل دستیابی خود رسید، کارآیی ذخیره انرژی شروع به کاهش می‌کند. این موضوع، به دلیل افزایش تدریجی دمای ذرات بستر قابل انتظار است. بالاترین کارآیی برای مورد بستر در هر سه سرعت ورودی هوای گرم، ورودی در فرکانس ۷ Hz اتفاق می‌افتد که در سرعت $U_{mf} / 5$ برابر $0.56/7$ ، در سرعت $2 U_{mf}$ برابر $0.65/4$ و در سرعت $U_{mf} / 5$ برابر $0.76/3$ است. این مقدار، با راندمان گزارش شده در بستر سیال فورانی [۴۲] که ماکزیمم کارآیی 0.756 اعلام گردیده است، 0.1 اختلاف دارد. در مقایسه با بستر سیال با ذرات SiC که ماکزیمم راندمان ذخیره انرژی آن 0.70 گزارش شده [۴۳]، میزان اختلاف 0.8 است. این داده‌ها نیز تأییدکننده نتایج ارائه شده جهت محاسبه راندمان ذخیره‌سازی انرژی است.

احتمالاً این افزایش به دلیل بهبود تماس گاز-جامد و نیز ناشی از افزایش مؤلفه انتقال حرارت همرفتی گاز است. ضرایب انتقال حرارت برای ۱ و ۱۰ Hz، به ترتیب $410/5$ W/(m²K) و $592/6$ W/(m²K) بود. دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت در فرکانس ۷ Hz، یکنواختی تشکیل حباب‌ها و ثبات الگوی جریان در بستر سیال است که به علت افزایش سهم همرفت گاز در انتقال انرژی، این امر حاصل می‌شود. در فرکانس ۱ Hz به دلیل پدیده کانال‌زنی و خروج جریان هوای گرم بدون برخورد مناسب با ذرات، ضریب انتقال حرارت در پایین‌ترین مقدار بوده و در فرکانس ۱۰ Hz، جریان پالسی به حالت جریان یکنواخت نزدیک می‌گردد؛ لذا در مقایسه با فرکانس ۷ Hz نیز ضریب انتقال حرارت فرکانس ۱۰ Hz کمتر است. تغییرات راندمان شارژ مخزن 10°C با زمان برای ذرات شن و ماسه در بستر سیال، در شکل ۷ در سه سرعت مختلف ارائه شده است. کارآیی بالاتر در نسبت سرعت $2/5$ ، هم در حالت پیوسته و هم وضعیت پالسی مشاهده می‌شود. افزایش راندمان در سرعت ظاهری بالاتر، به علت افزایش انتقال حرارت در بسترهای سیال قابل انتظار است [۴۲].





شکل ۷ تغییرات کارایی با گذشت زمان برای ذرات سیلیکا در بستر سیال در سه نسبت سرعت الف) ۲/۵، ب) ۲ و ج) ۱/۵

نتیجه گیری

استفاده از فرکانس ۷ Hz و ۱۰ Hz، بازه شارژ مخزن با راندمان بالاتر را نیز افزایش می‌دهد و در زمان کمتری مخزن به دمای تثبیت شده می‌رسد؛ ولی در فرکانس ۱ Hz، این موضوع مشاهده نمی‌شود. دستیابی به دمای مشخص در فرکانس ۱ Hz، زمان بیشتری می‌برد. تجزیه و تحلیل تأثیر میزان جریان، نشان داد که هرچه میزان جریان بالاتر باشد، اجازه می‌دهد دمای تنظیم شده با سرعت بیشتری حاصل شود؛ بنابراین، در سرعت بالاتر هوای ورودی فرآیند شارژ، کارایی بالاتری حاصل می‌شود.

در مقاله حاضر، عملکرد یک بستر سیال پالسی با ذرات شن و ماسه و گاز حامل هوا به عنوان یک سیستم ذخیره حرارتی، مورد مطالعه قرار گرفت. سپس عملکرد آن با عملکرد ذخیره سازی بدون اعمال پالس به هوای ورودی مقایسه شد. مشاهده شد که اعمال پالس می‌تواند برای افزایش کارایی ذخیره انرژی گرمایی به صورت مطمئن در سیستم‌های بستر سیال استفاده شود. تحت شرایط آزمایشی در این کار، کارایی شارژ بیشتر در فرکانس ۷ Hz برای شن و ماسه در بسترهای سیال مشاهده می‌شود. به علاوه،

مراجع

- [1]. Arent D J, Wise A, Gelman R (2011) The status and prospects of renewable energy for combating global warming, *Energy Economics*, 33, 4: 584-593.
- [2]. Sawin J L (2017) *Renewables, Global Status Report*, 72, 1-302.
- [3]. Goswami D.Y(2015).*Principle of Solar Engineering*. 3rd edition, CRC Press, 1-153.
- [4]. Denholm P, King J C, Kutcher C F, Wilson P P H (2012) Decarbonizing the electric sector: combining renewable and nuclear energy using thermal storage, *Energy Policy*, 44: 301–311.
- [5]. Zhang Y, Campana P E, Lundblad A, Yan J, (2017) Comparative study of hydrogen storage and battery storage in grid connected photovoltaic system: Storage sizing and rule-based operation, *Applied Energy*, 201:397–411.
- [6]. Klingler A L, Schuhmacher F (2018) Residential photovoltaic self-consumption: identifying representative household groups based on a cluster analysis of hourly smartmeter data, *Energy Effic*:1–13.
- [7]. Akbari Y H, Browne M C, Ortega A, Huang M J, Hewitt N J, B Norton, McCormack S J (2018) Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems, *Solar Energy*, 1–25.
- [8]. Rascon O C, Resch M, Bühler J, Sumper A (2016) Techno-economic comparison of a schedule-based and a forecast-based control strategy for residential photovoltaic storage systems in Germany, *Electrical Engineering*.
- [9]. Li G (2016) Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53 :897–923.
- [10]. Tao Y B, He Y L (2018) A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93:245–259.
- [11]. Yadav D, Banerjee R (2016) A review of solar thermochemical processes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54 :497–532.
- [12]. G Alva, L. Liu, X. Huang, G. Fang, (2017) Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications, *Renew. Sustain. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68:693–706.
- [13]. Gautam A, Saini R P (2020) A review on technical, applications and economic aspect of packed bed solarthermal energy storage system, *Journal of Energy Storage* 27.
- [14]. Alva G, Lin Y, Fang G (2018) An overview of thermal energy storage systems, *Energy*, 144: 341-378.
- [15]. Heier J, Bales C, Martin V (2015) Combining thermal energy storage with buildings – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1305-1325.
- [16]. Biçer A, Sarı A (2013) New kinds of energy-storing building composite PCMs for thermal energy storage, *Energy conversion and management*, 69: 148-156.
- [17]. Sarı A (2016) Thermal energy storage characteristics of bentonite-based composite PCMs with enhanced thermal conductivity as novel thermal storage building materials, *Energy Conversion and Management*, 117: 132-141..
- [18]. Gumus M (2009) Reducing cold-start emission from internal combustion engines by means of thermal energy storage system, *Applied Thermal Engineering*, 29: 652–660.
- [19]. Mondal S (2008) Phase change materials for smart textiles–An overview, *Applied Thermal Engineering*, 28, 11-12, 1536-1550..
- [20]. Aguilar-Jiménez J A, Velázquez N, Acuña A, López-Zavala R, González-Urbe L A (2018) Effect of orientation of a CPC with concentric tube on efficiency, *Applied Thermal Engineering*, 130: 221-229.
- [21]. Brosseau D, Kelton J W, Ray D, Edgar M, Chisman K, Emms B (2005) Testing of thermocline filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy storage systems in parabolic trough power plants, *Journal of Solar and Energy Engineering*, 127, 1: 109-116..
- [22]. Singh H, Saini R P, Saini J S (2010) A review on packed bed solar energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 3: 1059-1069.
- [23]. Wyttenbach J, Bougard J, Descy G, Skrylnyk O, Courbon E, Frère M, Bruyat Fabien M (2018) Performances and modelling of a circular moving bed thermochemical reactor for seasonal storage, *Applied Energy* 230: 803–815.
- [24]. Kemp K, Griffiths J, Campbell S, Lovell K (2013) An exploration of the follow-up needs of patients with inflammatory bowel disease, *Journal of Crohn's and Colitis*, 7, 9: 386-395.
- [25]. Zalba B, Marin B, Cabeza J, Mehling H (2003) Review on Phase changing materials to store energy, *Applied Thermal Engineering*, 23: 251-283.
- [26]. Regin A F, Solanki S C, Saini J S (2008) Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review, *Renewable and Sustainable Energy*, 12 :2438–2458.
- [27]. Cabeza L F, Castell A, Barreneche C, de Gracia A, A I Fernández (2011) Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 :1675–1695.
- [28]. Beasley D, Clark J (1984) Transient response of a packed bed for thermal energy storage, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27.
- [29]. Izquierdo-Barrientos M A, Sobrino C, Almendros-Ibáñez J A (2015). Experimental heat transfer coefficients between a surface and fixed and fluidized beds with PCM. *Applied Thermal Engineering*, 78: 373-379.

- [30]. Hnchen M, Brückner S, Steinfeld A (2011) High temperature thermal storage using a packed bed of rocks, heat transfer analysis and experimental validation, *Applied Thermal Engineering*, 31: 1798-1806.
- [31]. Elsayed M, Megahed I, El-Refae (1988) Experimental testing of fluidized bed thermal storage, *Solar and Wind Technology*, 5: 15-25.
- [32]. Wagiialla K, Fakeeha A, Elnashaire S, Almaktry A (1991) Modeling and simulation of energy storage in fluidized beds using the two-phase model, *Energy Sour*, 13 :189-201.
- [33]. Khosravi Bizhaem H, and Basirat Tabrizi H (2017). Investigating effect of pulsed flow on hydrodynamics of gas-solid fluidized bed using two-fluid model simulation and experiment, *Powder Technology*, 311: 328-340.
- [34]. Zhang D, and Koksall M (2006). Heat transfer in a pulsed bubbling fluidized bed. *Powder Technology*, 168, 1: 21-31.
- [35]. Jia D, Bi X, Lim C J, Sokhansanj S, Tsutsumi A (2019) Heat transfer in a tapered fluidized bed of biomass particles with pulsed gas flow, *Particuology*, 42: 2-14.
- [36]. Molerus O, Wirth K E (1997) Prediction of heat transfer in bubbling fluidized beds at $Ar \leq 108$. In O. Molerus and K. E. Wirth (Eds.), *Heat Transfer in Fluidized Beds*, Dordrecht: Springer Netherlands, 55-68.
- [37]. Asif M (2008). Bed Void Fraction at Minimum Fluidization Conditions for Limiting Cases, *Joyrnal of Chemical Engeneering of Japan*, 41, 3: 161-164.
- [38]. Izquierdo-Barrientos M A, Sobrino C, Almendros-Ibáñez J A (2013). Thermal energy storage in a fluidized bed of PCM. *Chemical Engineering Journal*, 230: 573-583.
- [39]. Taylor J R (1997) *An introduction to error analysis: The study of uncertainties in physical measurements*, 2nd edition, Applied Energy, US, University Science Books, 1-780.
- [۴۰]. محمدی ف.، ستوده قره‌باغ ر.، عزیزپور، ه.، زرغامی ر.، مستوفی ن.، ۱۳۹۵. بررسی تغییرات هیدرودینامیک بسترسیال با مقایسه جاذب سیگنال‌های ارتعاشی بستر به روش آماری دیکس، پژوهش نفت، ۱۴-۱۳.
- [۴۱]. گنجی باباخانی ا.، فاضلی ع.، خاکدامن ح.، مسعودی م.، ۱۳۸۸. بررسی اثر سرعت ظاهری گاز و غلظت جامد بر ضریب انتقال حرارت در ستون‌های حبابی - دوغابی. پژوهش نفت، ۴۶-۵۲.
- [42]. Wang Y, Ji L, Li B, Wang L, Bai Y, Chen H, Ding Y (2020) Investigation on the thermal energy storage characteristics in a spouted bed based on different nozzle numbers, *Journal of Energy Reports*, 6, 7: 127-136
- [43]. Almendros-Ibáñez J A, Fernández-Torrijos M, Díaz-Heras M, Belmonte J F, Sobrino C (2020) A review of solar thermal energy storage in beds of particles: Packed and fluidized beds, *Journal of Solar Energy*, 192: 193-237.



Investigation of the Effect of Pulse Frequency in Solid-Gas Fluidized Bed as an Energy Storage Tank

Mahmood Keshavarz¹, Mohammad Reza Assari^{2,1*}, Hassan Basirat Tabrizi^{3,1}

1. Mechanical Engineering Department, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

2. Mechanical Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

3. Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

assari@jsu.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2021.4494.3030

Received: May/25/2021

Accepted: July/10/2021

Introduction

In today's society, energy storage is a necessity with a clear importance for everyone. The energy storage process is usually done at many times and in case of its availability in order to meet the demand for energy at high consumption times or its absence. The peak energy consumption does not usually coincide with its production time and these two do not necessarily occur simultaneously. The task of energy storage systems is indeed the extraction of energy from various sources when abundant besides converting it into forms of energy needed by applications in different sectors, including facilities, industry, buildings, and transportation when needed. Some energy sources like fossil fuels may be employed to supply energy based on customer demand; i.e., energy is easily stored if not required; however, other sources like solar and wind energy or the recycled energy should be collected and stored until needed. Using energy storage has several privileges, such as enhancing the influence of renewable energy in society, followed by better economic performance and environmental protection [1]. Nowadays, researches on advanced materials and thermal storage systems by phase change materials are conducted in various fields [2,3]. Nevertheless, no studies have been found on the impacts of pulsed flow input on energy storage beds, and most research in this field is in the field of pulsation-assisted fluidization and flow hydrodynamics as well as heat transfer coefficients between bed and surface particles. In the hydrodynamics of pulsed flow beds, Khosravi

Bizhaem and Basirat Tabrizi [4] examined the effect of frequency application on reducing the bed flow velocity and regular bubble production in it. In the case of heat transfer, Zhang and Koksai [5] examined the effect of increased heat transfer coefficient in a pulsed bed on solid particles like silica and glass in a vertical cylindrical bed. Moreover, the increasing effect of applying frequency on the inlet gas flow on the heat transfer coefficient of fluidized beds for rectangular and conical beds for biomass particles has been reported by Jia D. et al. [6]. Furthermore, Molerus and Wirth [7] presented heat transfer equations in various fluidized beds and flow regimes through reviewing numerous papers and researches. In general, these equations cover bubbly fluidized beds, besides circulating fluidized beds and homogeneous multiphase systems. Moreover, their research considers common forms of solid-gas systems with higher Reynolds numbers in addition to explaining the heat transfer of particles to gas in compacted beds and providing a solid physical basis for modeling the heat transfer of bubbly fluidized beds. Furthermore, it specifically discusses the two main mechanisms of heat transfer at low temperatures, i.e. particle convection flow and gas convection flow. The current study assesses the performance of a fluidized bed at the presence of sand in storing energy with the input gas flow in a pulsed manner in order to examine the effects of input gas frequency change on the thermal energy storage efficiency; a point not explored in previous studies and is the main objective of the present study.

Materials and Methods

Theory of Energy Storage in Fluidized Beds

Particle convection flow and gas convection flow refer to the two fundamental mechanisms of heat transfer in fluidized beds and they affect the changes in bed particle temperature. The fluidization of the bed was performed at the apparent velocity of gas u that is greater than the minimum fluidization velocity. Equation 1 defines the energy bed storage factor (BSF), showing the amount of energy stored in the bed relative to the maximum energy that can be stored in the system over the process of heat transfer from the carrier gas to the particles. Simplification of this equation leads to a dimensionless number θ_b [8]:

$$BSF = \frac{m_s c_s (\bar{T}_b - T_i)}{m_s c_s (\bar{T}_{max} - T_i)} = \frac{(\bar{T}_b - T_i)}{(\bar{T}_{max} - T_i)} = \theta_b \quad (1)$$

Here, T_{max} stands for the inlet air temperature of 60 °C. As the next variables, T_b shows the temperature of the solid particles at the moment of calculating the stored energy and T_i represents the initial temperature of the solid particles. In the fluidized bed, the energy storage efficiency is calculated based on the variables

density, porosity coefficient, inlet air volume, specific heat capacity of the inlet air, a well as the temperature difference between the air and the initial temperature, as illustrated in Equation 2.

$$\eta_c = \frac{E_s}{E_{in}} = \frac{\rho_s (1 - \varepsilon) A_t \int_{x=0}^{x=H} (i_{bx} - i_o) dx}{\int_{t=0}^t \dot{m}_{air} C_{p,air} (T_{air} - T_o) dt} \quad (2)$$

Where ρ_s is solid phase density (sand particles), ε shows the bed porosity coefficient, $A_t = (\pi/4) D^2$ stands for bed cross section, \dot{m}_{air} illustrates the bed air flow rate, $C_{p,air}$ refers to specific air heat as a function of T_{air} (inlet air temperature), T_o shows the initial bed temperature and $i_{bx} - i_o$ represents the specific energy stored in the bed .

Testing Apparatus

To perform sand heating experiments in the pulsed fluidized bed as an energy storage tank, the following equipment are installed and operated in the form of an apparatus, a schematic diagram and an image of which (the experimental set) are shown in Figure 1.

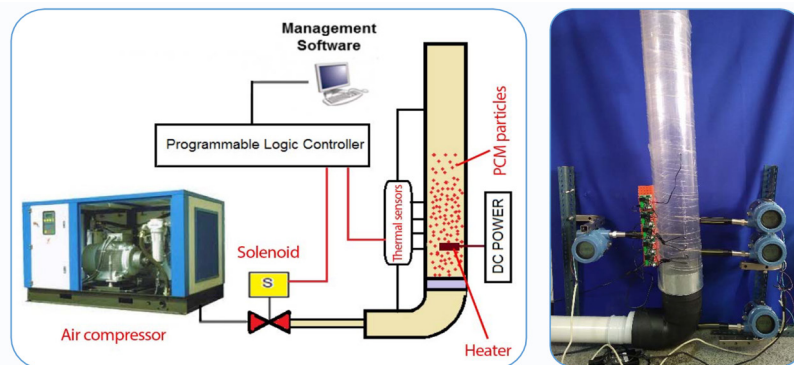


Fig. 1 Oscillating bed testing device with diagrams of installed sensors.

The bed includes a cylindrical Plexiglass tube with a wall thickness of 3 mm filled with sand particles of 20 cm high. During the test, the tube is covered with 20-mm-thick foam insulation. The air is controlled from a central compressed air system at a volumetric flow rate, entering the bed at a temperature of 60 °C after passing through a heater.

Results and Discussion

To examine the impact of pulse application on inlet air and flow velocity on the sand-particle-containing fluidized bed’s performance, three various modes were studied. In all of these tests, the sand particle column’s mass was 7.5 kg and the inlet airflow into the test chamber was heated to 60 °C. The flow rates at the three chosen frequencies 1, 7, and 10 Hz respectively were 1250, 1000, and 700 L/min, in line with the excess air velocity under the minimum fluidization conditions, i.e. 2.5, 2, and 1.5 U_{mf}

Figure 2 depicts the temperature distribution along the bed for the three tests. The temperature depicted in this

figure is the thermocouples’ mean temperature. The temperature measured by the first thermometer was 2.5 cm distant from the distributor. The bed’s mean temperature was calculated from the data obtained by the other three thermometers at 7.5, 12.5, and 17.5 cm as well as the air temperature at the outlet. The state of the temperature read at various altitudes along the bed well confirms the previous researchers’ data on the temperature uniformity at the bed surface and, as the reference study [9] mentions, the first thermometer after the temperature distribution plate shows only a slight difference from other thermometers, expected because of the initial contact of the hot inlet air with the particles. To reach the real temperature, at the first moment, the system must be provided with the opportunity to make less computational error in calculating the efficiency. The gas-solid interaction in the fluidized bed is usually specified by the gas flow. As shown in Figure 2, as the inlet air velocity increases, the isothermal time of the particles with the inlet carrier gas decreases.

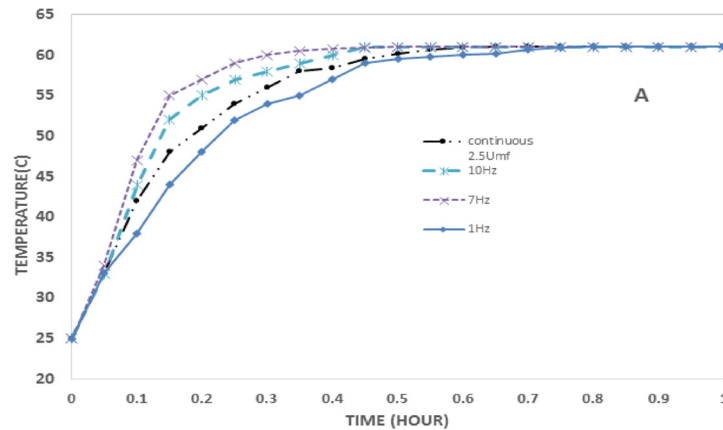


Fig. 2 Bed temperature changes at three frequencies at velocity of $U_g = 2.5U_{mf}$

In all tests done, the particle's isothermal time is lower at 7 Hz and more time is taken for isothermalization at 1 Hz. Nevertheless, at velocities at $U_g = 1.5 U_{mf}$, the isothermal time in frequencies is more pronounced than at $U_g = 2.5 U_{mf}$. This can be expected given the greater energy input caused by the fluid mass flow at $U_g = 2.5 U_{mf}$. Given the oscillating nature of gas pulses, various flow patterns appear at various gas flow speeds in the test chamber, i.e. a cylindrical fluidized bed. As the gas flow velocity gradually rises, the fixed bed flow behavior gradually turns into a normal fluidized bed.

The patterns are under the effect of the intensity of gas pulse, related to the flow frequency and velocity.

Figure 3 shows the alterations in the charge efficiency of the η_c tank with time for sand particles in the fluidized bed at three various chosen frequencies. Higher efficiency is observed at a speed ratio of 2.5, both in continuous and pulse mode. Higher efficiency is seen at the velocity ratio of 2.5, both in continuous mode and in pulsed mode. The increased efficiency at higher apparent velocities is expected owing to the enhanced heat transfer in fluidized substrates.

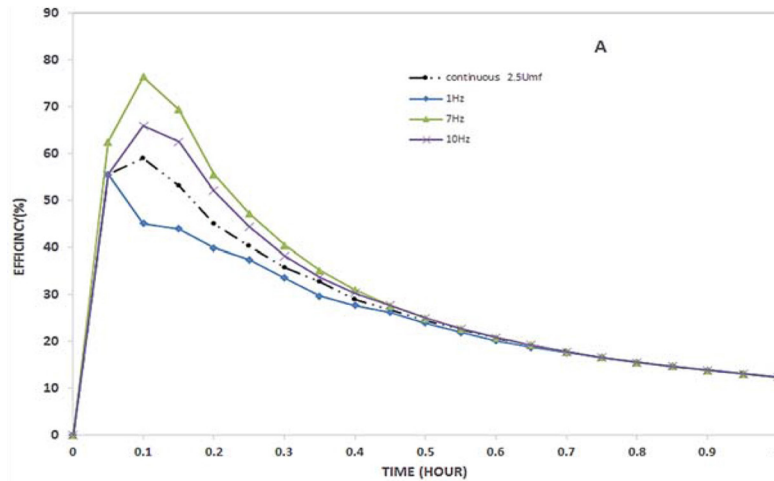


Fig. 3 Efficiency changes for silica particles at three frequencies at velocity of $2.5U_{mf}$

Since the system is not stable at the onset of the test, the data from the test's first few minutes should be ignored in order to avoid computational errors. Following this stabilization period, the efficiency enhances with the bed temperature; since the inlet air gets heated during the charging process, too. The energy storage efficiency starts decreasing when the inlet air temperature reaches its maximum achievable value. This is expected because of the gradual increase in bed particles' temperature. The highest efficiency for the bed is achieved at all three hot air inlet velocities at 7 Hz that is equal to 56.7% at $1.5 U_{mf}$, 65.4% at $2 U_{mf}$ and 76.3% at $2.5 U_{mf}$. This value is 1% different from

the efficiency reported in the spouted fluid bed [10], with a maximum efficiency of 75.6%. The difference is 8% compared to a fluidized bed with SiC particles with a reported maximum energy storage efficiency of 70% [11]. This data also approves the results presented for calculating the energy storage efficiency.

Conclusions

The current paper studied the performance of a pulsed fluidized bed with sand particles and air carrier gas, as a heat storage system. Subsequently, its performance was compared with that of storage without applying

pulse to the inlet air. Pulse application was observed to be able to be safely used to enhance the thermal energy storage efficiency of in fluidized bed systems. Higher charging efficiency is observed for sand in fluidized beds at 7 Hz frequency and under experimental conditions in this study. Furthermore, applying 7 Hz and 10 Hz frequencies enhances the higher-efficiency tank's charging interval while reaching the stabilized temperature in less time; however, this is not observed at 1 Hz. Reaching a specific temperature at 1 Hz takes longer. Analysis of the flow rate effect revealed that the higher the flow rate is, the faster the set temperature will be achieved; hence, the higher efficiency is reached at the higher velocity of the charging process inlet air.

References

1. Arent D J, Wise A, Gelman R (2011) The status and prospects of renewable energy for combating global warming. *Energy Economics*, 33, 4: 584-593.
2. Zalba B, Maryn J M, Cabeza L F, Mehling H, (2003) Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, 23 :251–283.
3. Regin A F, Solanki S C, Saini J S (2008) Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12: 2438–2458.
4. Khosravi Bizhaem H, Basirat Tabrizi H (2017) Investigating effect of pulsed flow on hydrodynamics of gas-solid fluidized bed using two-fluid model simulation and experiment, *Powder Technology*, 311: 328-340.
5. Zhang D, Koks M (2006) Heat transfer in a pulsed bubbling fluidized bed. *Powder Technology*, 168, 1: 21-31.
6. Jia D, Bi X, Lim C J, Sokhansanj S, Tsutsumi A (2019) Heat transfer in a tapered fluidized bed of biomass particles with pulsed gas flow. *Particuology*, 42: 2-14.
7. Molerus O, Wirth K E (1997) Prediction of heat transfer in bubbling fluidized beds at $Ar \leq 108$. In O. Molerus and K. E. Wirth (Eds.), *Heat Transfer in Fluidized Beds* (pp. 55-68). Dordrecht: Springer Netherlands.
8. Elsayed M, Megahed I, Refaie El (1988) Experimental testing of fluidized bed thermal storage, *Solar and wind technology*, 5 :15–25.
9. Barrientos I M A, Sobrino C, Almendros-Ibáñez J A (2013) Thermal energy storage in a fluidized bed of PCM. *Chemical Engineering Journal*, 230: 573-583.
10. Wang Y, Ji L, Li B, Wang L, Bai Y, Chen H, Ding Y (2020) Investigation on the thermal energy storage characteristics in a spouted bed based on different nozzle numbers, *Journal of Energy Reports*, 6: 127-136.
11. Almendros-Ibáñez J A, Fernández-Torrijos M, Díaz-Heras M, Belmonte J F, Sobrino C (2020) A review of solar thermal energy storage in beds of particles: Packed and fluidized beds, *Journal: Solar Energy*, 192: 193-237.