کاربرد بستر روان چرخشی[1] به منظور بازیافت انرژی
«بررسی تجربی»

مجید صفاراول

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مسعود احسن

عضو هیئت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده:

بازیافت گرما از گازهای گرم خروجی منجر به بهبود بازده کلی یك واحد حرارتی می گردد. از گرمای بازیابی شده می توان به منظور پیش گرمایش هوا، تولید بخار، تهیه آب گرم و ... استفاده نمود. این مقاله در برگیرنده یك بررسی تجربی بر روی نوعی مبدل حرارتی جدید که مجهز به دو بستر روان در مجاورت یکدیگر می باشد، بوده که عمل تبادل گرما به وسیله جابجایی ذرات از طریق تزریق هوای فشرده در دو شیپوره بین دو بستر انجام می پذیرد. یکی از این بسترها در مسیر شاره گرم[2] و دیگری در مسیر شاره سرد قرار دارد. در انجام این آزمایشها برای اولین بار از مواد پلیمری، پلی استایرن به عنوان واسطه انتقال حرارت بین دو بستر استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که با استفاده از این روش و این نوع ماده در دمای ورودی شاره گرم در حدود (C)°۷۵، می توان بازدهی تا ۷۰٪ بازده بیشینه یك مبدل حرارتی دو لوله ای با جریان همسو تحت شرایط کاری مشابه به دست آورد. همچنین از آزمایشها چنین مشهود است که بازده واحد تحت تأثیر آهنگ چرخش ذرات بین دو بستر می باشد، که این نیز به نوبه خود تابعی از سرعت روانی[3] در بسترها و نرخ تزریق هوای فشرده در شیپوره ها است.

Experimental Investigation of Circulating Fluidized Bed Heat Exchanger For Waste Heat Recovery

M. Saffar-Avval, Ph.D.

Assistant Professor
Department of Mechanical Engineering
Amirkabir University of Technology

Masoud Ahsan, M.Sc.

Lecturer Faculty of Engineering
Sistan Balochestan University

Abstract:

Heat recovery from hot exhaust gases of a thermal unit provides to improve the overal efficiency. Heat which is recoverd could be used to air preheating, steam and hot water generation. This paper presents an experimental study of a new type of heat exchanger; It consists of two gas solid fluidized bed units which are placed adjacent and parallel to each other, through which hot and cold fluids flow. Heat transfer takes place by the circulation of solid particles by means of the injection of compressed air through the nozzles which are placed between the beds. Polymeric materials such as polystyrene have been used as the heat transfer media.

The results show, when the inlet hot gas temperature is about 75°C, thermal efficiency of heat exchanger could be reached to 70% of maximum efficiency of an ideal parallel double pipe heat exchanger at the same operating conditions.

Furthermore, the efficiency depends on the rate of solid particles circulation between the beds, while the rate of circulation also depends on fluidization velocity and compressed air injection as well.

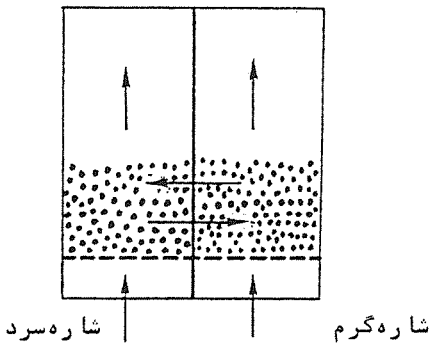
۱) مقدمه

با توجه به بحران انرژی در دهه های گذشته و نیاز به شناخت منابع جدید انرژی و همچنین استفاده بهینه از منابع موجود و نیز کنترل آلودگی تجهیزات حرارتی مطابق با استانداردهای زیست محیطی، پدیده بستر روان به عنوان یکی از راه حلهای مناسب در این زمینه مورد توجه کشورهای صنعتی جهان قرار گرفته و تحقیقات گسترده ای در زمینه استفاده صنعتی از این روش در حال انجام می باشد. اولین واحد در مقیاس صنعتی که در آن از این تکنیک استفاده شده است، در زمینه تولید گاز[۴] از پودر زغال سنگ در سال ۱۹۲۲ بوده و کاربرد وسیع آن درزمینه های احتراق زغال سنگ و همچنین خشک کردن، راکتورهای شیمیایی، کراکینگ حرارتی، تولید مواد شیمیایی، صنایع سیمان، متالورژی و ... از حدود دهه ۱۹۶۰ توسعه یافته است. [۱]

در زمینه انتقال حرارت در بسترهای روان نیز مطالعات گسترده انجام گرفته است. این مطالعات عمدتاً در دو زمینه انتقال حرارت ذره و گاز و انتقال حرارت بین بستر روان و سطحهای شناور در آن صورت گرفته و یا در حال انجام است. با توجه به پیچیدگی موضوع، امکان بررسی نظری به صورتی که بتوان با اطمینان نتایج به دست آمده را بر روی تمامی شرایط بسط داد، وجود نداشته و به همین دلیل بررسیهای تجربی نقش مهمی را در این زمینه دارا می باشند. در مورد انتقال حرارت بین گاز و ذره، پژوهشگران مختلف نتایج بسیار گسترده ای را ارائه نموده اند. بوتریل[۵] اظهار داشته است که ضریب انتقال حرارت بین گاز و ذره در حدود ۶ تا ۲۳ (W/m^2k) می باشد [۲]. ولی به علت بالا بودن میزان سطح تماس بر واحد حجم ذرات و قابلیت کنترل این سطح با تغییر مقدار خوراک بستر، کمی ضریب انتقال حرارت به ندرت مسأله محدود کننده ای در این روش می باشد. در مورد استفاده از بستر روان به عنوان مبدل حرارتی که این مقاله در ارتباط مستقیم با آن می باشد نیز تحقیقات گسترده ای صورت گرفته است و با توجه به تواناییهای این سیستم از نقطه نظر کاهش میزان رسوب گذاری و خوردگی، حذف قطعات متحرک، کوچکی ابعاد سیستم و در صورت نیاز کنترل آلودگی، افق روشنی در زمینه استفاده از این روش به منظور بازیافت گرما در واحدهای حرارتی به وجود آورده است. در سال ۱۹۸۳ گزارشی از ساخت نوعی مبدل حرارتی گاز با گاز بستر روان توسط نیویی[۶] و هاوارد[۸][۳] ارائه شده است که در آن با استفاده از توزیع کننده گاز ویژه ای، ذرات بین دو بستر مجاور چرخش نموده و از این طریق انتقال حرارت از طریق چرخش ذرات واسطه بین دو شاره گرم و سرد صورت گرفته است. در سال ۱۹۸۵ هاتوری[۷] و هاوارد[۸][۴] در گزارش دیگر خلاصه مطالعاتی به صورت نظری و تجربی در زمینه بازیافت گرما با استفاده از بستر روان ارائه نموده اند. ایشان اظهار داشته اند که با استفاده از روابط تجربی شناخته شده و فرض جریان پلاگ[۹] در مورد ذرات می توان بازده مبدل را با دقتی خوب پیش بینی نمود. در این مقاله گزارشی از بررسی تجربی نوع جدیدی از مبدلهای بستر روان چرخشی می باشد که در آن اثر پارامترهای مهم بر عملکرد واحد بررسی و همچنین استفاده از پلی استایرن به عنوان سیال واسطه انتقال حرارت ارزیابی شده است.

۲) اصول عملکرد مبدلهای بستر روان چرخشی

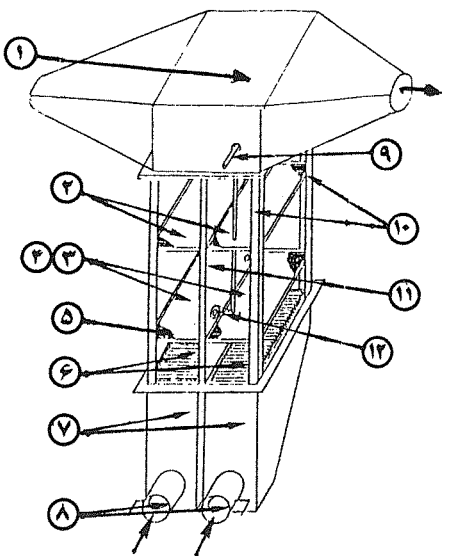
شکل طرحواره‌ای یک بستر روان چرخشی در شکل ۱ مشاهده می‌گردد. نحوه عمل این مبدل، به این صورت است که ابتدا با دمیدن شاره گرم و سرد ذرات واسطه به صورت روان در می‌آیند سپس با استفاده از روشهای مناسب ذرات واسطه بین دو بستر جابجا می‌شوند و این عمل باعث انتقال حرارت بین شاره سرد و گرم می‌شود.



شکل (۱) ـ شکل طرحواره‌ای بستر روان چرخشی

ـ دستگاه آزمایش

بخشهای مهم دستگاه ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲) ـ تصویر طرحواره‌ای دستگاه آزمایش

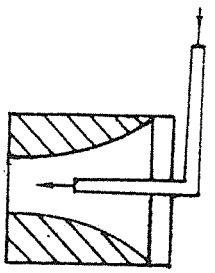
۱ ـ کانال بالای دستگاه
۲ ـ توری جلوگیری از فرار ذرات
۳ و ۴ ـ بسترهای سرد و گرم
۵ ـ توزیع کننده هوا
۶ ـ پره‌های تنظیم جریان هوا
۷ ـ محفظه‌های ورود هوا
۸ ـ دریچه‌های تنظیم نرخ جریان هوا
۹ ـ لوله هوای فشرده ورودی به شیپوره
۱۰ ـ ستونها و بدنه اصلی دستگاه
۱۱ ـ صفحه جدا کننده بسترها
۱۲ ـ شیپورهٔ هوای فشرده

دستگاه ساخته شده شامل دو بستر مجاور بوده که هر یک دارای مقطعی به ابعاد ۱۷×۳٫۴ سانتیمتر می‌باشند. از یک سیستم گرمایش الکتریکی برای گرم نمودن شاره ورودی به بستر گرم استفاده شده است. هوای مورد نیاز واحد توسط یک دمنده گریز از مرکز در ورود به مبدل تأمین می‌گردد.

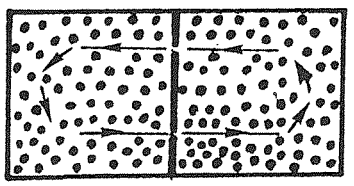
۳) اصول عملکرد دستگاه

نحوه عملکرد دستگاه به قرار ذیل می‌باشد. شاره گرم پس از عبور از توزیع کننده هوا که از جنس توری فلزی با اندازه مش ۴۰ می‌باشد، بستر شماره ۱ را به حالت روان در آورده و در نتیجه ذرات موجود در این بستر گرم می‌گردند و بخشی از انرژی ورودی توسط شاره گرم به ذرات منتقل و در آنها ذخیره می‌شود. هوای سرد عبوری از بستر شماره ۲ نیز بعد از عبور از توزیع کننده مشابه بستر ۱، ذرات موجود در این بستر را به حالت روان درخواهد آورد. لازم به توضیح است که با استفاده از دو دریچه تنظیم نرخ جریان هوا، سرعتهای متفاوت در دو بستر به طور مستقل قابل دستیابی می‌باشد. پس از رسیدن به حالت پایدار در دو بستر، شیپوره‌های هوای فشرده که در شکل ۳ نحوه عملکرد آن نشان داده شده با آهنگ تزریق هوای فشرده یکسان شروع به کار نموده و ذرات بین دو بستر به چرخش در می‌آیند. به این ترتیب ذرات گرم وارد بستر سرد شده و انرژی خود را به هوای سرد عبوری منتقل نموده و به بستر گرم باز می‌گردند (شکل ۴).

هوای فشرده



شکل (۳) ـ شیپوره هوای فشرده



شکل (۴) ـ مسیر چرخشی ذرات

۴) وسایل اندازه گیری

کمیتهایی که در انجام آزمایشها اندازه گیری می گردند عبارتند از:

نرخ حجمی جریان هوای سرد و گرم قبل از ورود به مبدل که توسط روزنه[۱۰] ساخته شده طبق استاندارد ۱۹۵۲ DIN که با استفاده از روتامتر استاندارد مدرج شده اندازه گیری می شوند و دمای شاره های گرم و سرد به وسیله ترموکوپل مس کنستانتان توسط دستگاه ثبات دما با دقت ۰/۱ درجه سانتی گراد اندازه گیری شده است. آهنگ تزریق هوای فشرده به هر یک از شیپوره ها به طور مستقل قابل کنترل بوده و نرخ جریان حجمی هوای فشرده توسط روتامتر استاندارد اندازه گیری می گردد. با تغییر آهنگ تزریق هوای فشرده می توان میزان انتقال ذرات از یک بستر به بستر دیگر را کنترل نمود.

۵) الگوی تجربی

با اندازه گیری دمای هوا، در ورود و خروج از بسترها درحالت پایدار و محاسبه نرخ جرمی شاره های سرد و گرم می توان بازده مبدل[۱۱] را محاسبه نمود. بدین منظور ابتدا با توجه به مقادیر $\dot{m}c$ در مورد شاره گرم و سرد، شاره ای که دارای مقدار $\dot{m}c$ کمینه می باشد به عنوان شاره حداقل مشخص شده و با استفاده از روابط ۱ و ۲ بازده محاسبه می گردد.

اگر شاره گرم شاره کمینه باشد:

$$\varepsilon_h = \frac{(\dot{m}c)_h\,(T_{hi} - T_{ho})}{(\dot{m}c)_h\,(T_{hi} - T_{ci})} \qquad (۱)$$

اگر شاره سرد شاره کمینه باشد:

$$\varepsilon_c = \frac{(\dot{m}c)_c\,(T_{co} - T_{ci})}{(\dot{m}c)_c\,(T_{hi} - T_{ci})} \qquad (۲)$$

علاوه براین با توجه به نسبت $\frac{(\dot{m}c)_{min}}{(\dot{m}c)_{max}}$ بازده بیشینه یک مبدل حرارتی دو لوله ای تا جریان همسو در شرایط مشابه آزمایشها را طبق رابطه ۳ می توان بدست آورد:

$$\varepsilon_{max} = \frac{1}{1+(\dot{m}c)_{min}/(\dot{m}c)_{max}} \qquad (۳)$$

با مشخص بودن بازده دستگاه به عنوان یک مبدل حرارتی یا جریان همسو (ε) بازده کلی دستگاه در مقایسه با بازده بیشینه ممکن مطابق رابطه ۴ تعریف می گردد.

$$\text{بازده کلی} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}} \qquad (۴)$$

ذرات مورد استفاده، ذرات استوانه ای پلی استایرن می باشد که مشخصات مربوط به این ذرات در جدول ۱ درج گردیده است. شایان ذکر است که قطر معادل ذرات با در نظر گرفتن قطر کره هم حجم با ذره تعریف می گردد و در مورد ذرات به کار رفته با توجه به اندازه و شکل تقریباً یکسان ذرات از روش اندازه گیری مستقیم برای به دست آوردن قطر معادل و ضریب کروی بودن استفاده شده است. روشهای دیگری در مورد ذرات با توزیع اندازه وجود دارد که در مرجع [۱] به آن اشاره شده است.

تخلخل در حداقل روانی[۱۲] نیز به صورت مستقیم قابل اندازه گیری بوده و همچنین می توان با دانستن ضریب کروی بودن ذره و قطر معادل از منحنی های موجود در مرجع [۱] استفاده نمود. سرعت حداقل روانی با توجه به مشخصات ذره از رابطه نیمه تجربی ارگان[۱۳] مطابق زیر محاسبه می گردد.

$$\frac{1.75}{\phi_s\varepsilon_{mf}^3}\left(\frac{d_p U_{mf}\rho_g}{\mu}\right)^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\phi_s^2\varepsilon_{mf}^3}\left(\frac{d_p U_{mf}\rho_g}{\mu}\right) = \frac{d_p^3\rho_g(\rho_s-\rho_g)\,g}{\mu^2} \qquad (۵)$$

جدول (۱) مشخصات ذرات مورد آزمایش

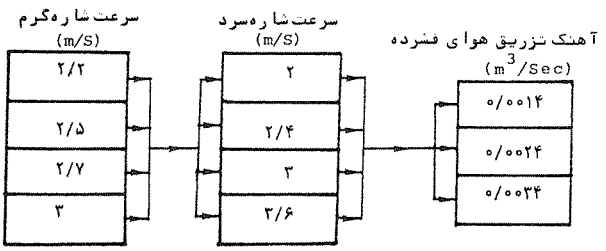
سطح بر واحد وزن	تخلخل در حداقل روانی	ضریب کروی بودن	سرعت حداقل روانی	ظرفیت گرمائی ویژه	ضریب هدایت حرارتی	جرم حجمی	قطر معادل
A_P (m²/gr)	ε_{mf}	ϕ_s	U_{mf} (m/s)	C_P (J/kgK)	K_P (W/mK)	ρ (kg/m³)	d_p (mm)
۰/۰۸۹	۰/۴۵	۰/۸۱۵۱	۱/۰۴	۱۱۹۰	۰/۱۴	۱۰۹۰	۳/۲۱

۶) بحث و نتایج

به منظور بررسی عملکرد مبدل حرارتی بستر روان چرخشی آزمایشهایی به شرح زیر انجام شده است. در هر آزمایش سعی بر آن گردیده که اثر یک پارامتر مهم در عملکرد مبدل مورد بررسی قرار گیرد.

- سرعت روانی در بستر سرد و گرم
- آهنگ تزریق هوای فشرده به شیپوره ها
- نوع ذرات

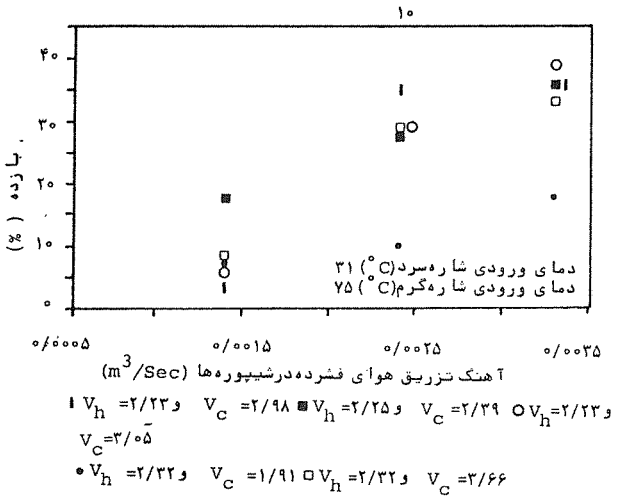
در اینجا لازم است به میزان سطح ذرات موجود در بسترها اشاره شود تا بتوان تصوری از فضای مورد نیاز در این سیستم ایجاد کرد. در مورد ذرات پلی استایرن میزان ذرات موجود در هر بستر ۱۸۲۵ گرم بوده است که دارای سطحی معادل ۳/۴۵۱ مترمربع می باشند. این سطح با استفاده ازنمونه برداری وزنی و اندازه گیری مستقیم به دست آمده است. روند انجام آزمایشها در شکل ۵ نشان داده شده است.



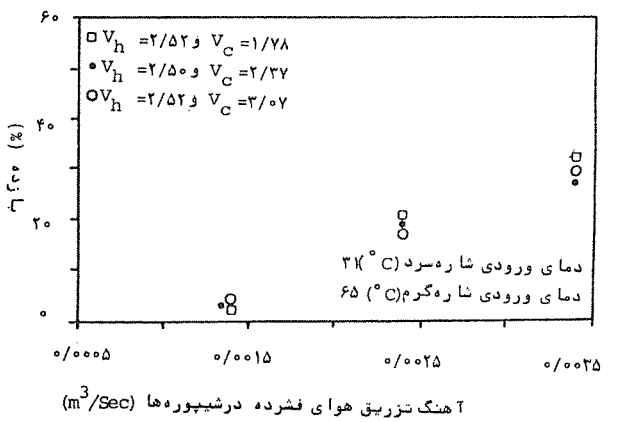
شکل (۵) - روند انجام آزمایشها

همان گونه که ملاحظه می گردد در هر سرعت شاره گرم در بستر سرعتهای گوناگونی برای شاره سرد تنظیم و این آزمایش در سه نرخ تزریق هوای فشرده با ذره پلی استایرن تکرار می گردد. واضح است آزمایشها در سرعتهای دیگر شاره گرم ادامه می یابد و نتایج در شکلهای شماره ۶ تا ۹ به صورت منحنی تغییرات بازده بر حسب تغییر آهنگ تزریق هوای فشرده در سرعتهای مختلف بستر سرد ارائه گردیده است و همچنین در شکلهای شماره ۱۰ تا ۱۳ به صورت منحنی تغییرات بازده کلی بر حسب تغییر آهنگ تزریق هوای فشرده در سرعتهای مختلف بستر سرد مشاهده می گردد. علاوه بر این تغییرات دمای خروجی از بسترها بلافاصله بعد از شروع تزریق هوای فشرده به بسترها با زمان ثبت شده اند که در شکل ۱۴ به صورت تغییرات دمای دو بستر با زمان در ۳ آهنگ مشخص تزریق هوای فشرده نشان داده شده اند. اولین نکته در بررسی شکلهای ۶ و ۷ افزایش بازده واحد با افزایش آهنگ تزریق هوای فشرده توسط شیپوره ها می باشد که می توان علت این افزایش را با افزایش آهنگ چرخش ذرات توجیه کرد و اظهار داشت که آهنگ چرخش ذرات بین دو بستر یکی از عوامل مؤثر بر روی بازده است. بررسی شکلهای ۸ و ۹ نیاز به دقت بیشتری دارد، زیرا در این شکلها این نکته مشخص است که افزایش آهنگ تزریق هوای فشرده از ۰/۰۰۲۴ به ۰/۰۰۳۴ مترمکعب در ثانیه در بعضی از حالتها منجر به افزایش بازده نشده و بازده ثابت باقی مانده است.

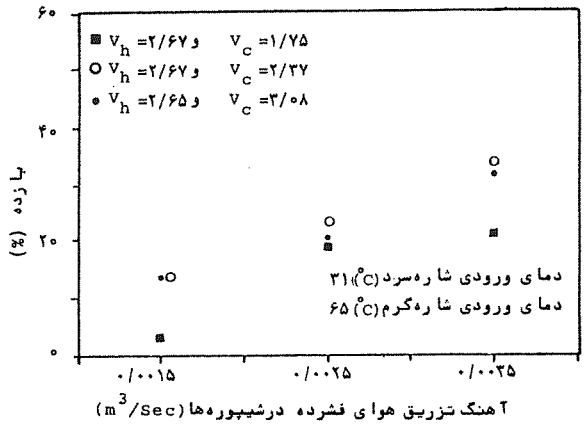
این مسأله نشانگر این نکته است که افزایش بازده در اثر افزایش آهنگ چرخش ذرات دارای سقفی می باشد. این



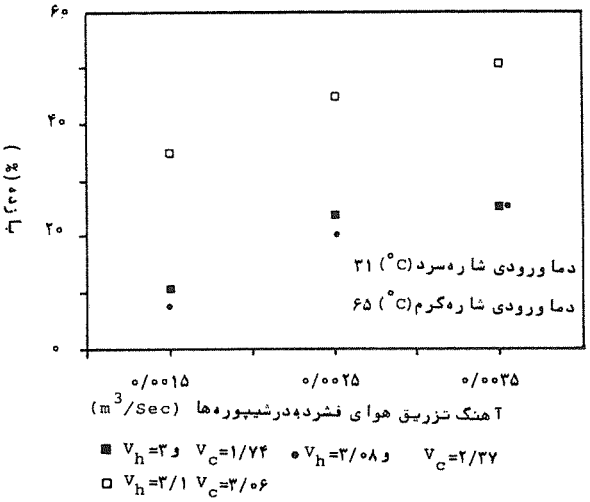
شکل (۶) - منحنی تغییرات بازده مبدل نسبت به تغییرات آهنگ تزریق هوای فشرده در شیپوره ها



شکل (۷) - منحنی تغییرات بازده مبدل نسبت به تغییرات آهنگ تزریق هوای فشرده در شیپوره ها

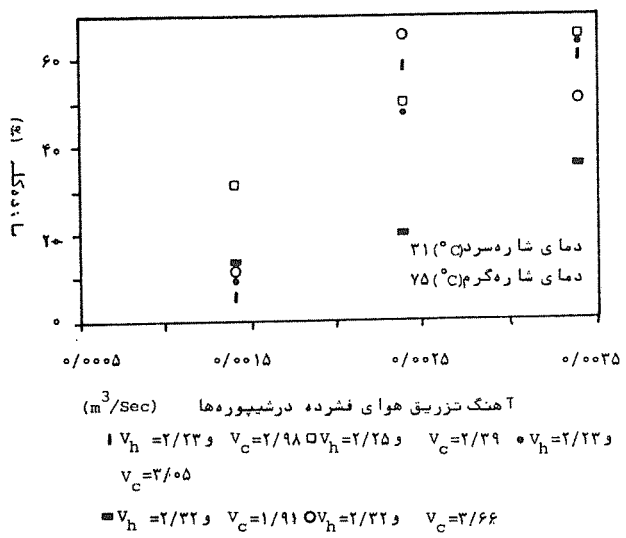


شکل (۸) ـ منحنی تغییرات بازده مبدل نسبت به تغییرات آهنگ تزریق هوای فشرده در شیپوره‌ها



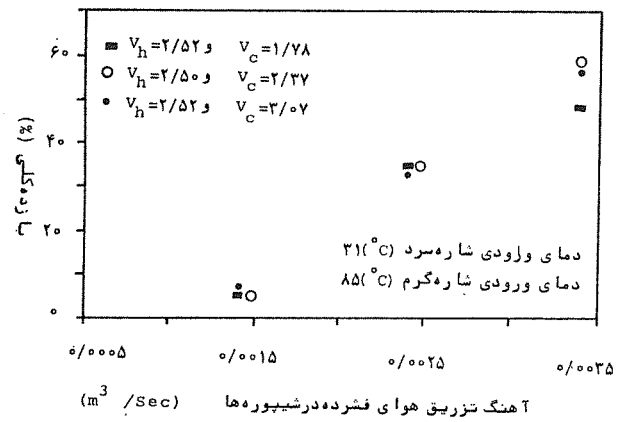
شکل (۹) ـ منحنی تغییرات بازده مبدل نسبت به تغییرات آهنگ تزریق هوای فشرده در شیپوره‌ها

سقف زمان اقامت کافی ذره در بسترها جهت تبادل حرارت می‌باشد و این پارامتر وابسته به اندازه بستر است که در این سیستم در آهنگ بالای چرخش ذرات به علت کوچکی طول بسترها بازده سیستم افزایش نیافته و احتمالاً با افزایش بیشتر نرخ تزریق هوای فشرده بازده سیستم کاهش خواهد یافت. بنابراین جهت عملکرد با نرخ چرخشی بالای ذرات نیاز به افزایش طول بسترها و یا استفاده از موانع به منظور افزایش زمان اقامت ذرات در بسترها می‌باشد. همچنین در شکل ۶ می‌توان اثر افزایش سرعت شاره سرد را بر روی بازده مورد بررسی قرار داد. همانگونه که در آنجا مشاهده می‌شود با افزایش سرعت روانی در بستر سرد بازده تا حدی افزایش یافته، ولی این بار نیز با افزایش بیش از حد سرعت بازده کاهش می‌یابد. چنانچه بازده به‌دست آمده با سرعت روانی ۳/۰۵ متر بر ثانیه در بستر سرد مطلوبتر از نتایج به‌دست آمده در سرعت ۳/۶۶ متر بر ثانیه است. علت این مسأله را می‌توان با استفاده از پدیده تولید حباب در بستر توجیه نمود. زیرا با افزایش سرعت شدت ایجاد حبابها و همچنین اندازه آنها افزایش یافته و در نتیجه موجب اختلاط مناسب ذرات می‌گردد که این به نوبه خود موجب افزایش ضریب انتقال حرارت بین ذره و گاز می‌گردد. از سوی دیگر این حبابها در سرعتهای بالاتر اثرمعکوس روی ضریب انتقال حرارت دارد. زیرا با کاهش میزان تماس بین ذرات و گازسطح مؤثر انتقال حرارت بین گاز و ذره را کاهش می‌دهد. اثر شکل ذرات نیز از نظر هندسی و درشتی و ریزی آنها در هیدرودینامیک بسترها قابل ذکر است. اثر این عامل با آزمایش بر روی مواد دیگر که از نظر شکل و اندازه متفاوت هستند در حال بررسی است. در شکلهای ۱۰ تا ۱۳ کلیه نکات فوق را می‌توان در رابطه با مقایسه بین عملکرد دستگاه و حالت ایده‌آل آن مد نظر قرار داد تا بتوان نزدیکترین حالت به ایده‌آل را مشخص نمود که در بهترین حالت تا حدود ۷۰ درصد می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشخص است در آهنگ تزریق هوای فشرده ۰/۰۰۱۴ مترمکعب در ثانیه میزان اختلاف دمای خروجی دو بستر در مقایسه با حالت ۰/۰۰۲۴ و ۰/۰۰۳۴ مترمکعب در

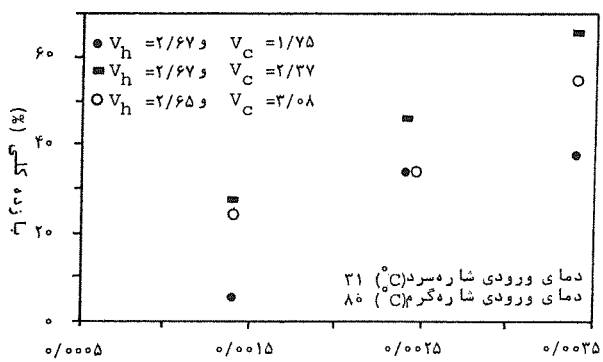


شکل (۱۰) ـ منحنی تغییرات بازده کلی مبدل نسبت به تغییرات آهنگ تزریق هوای فشرده در شیپوره‌ها

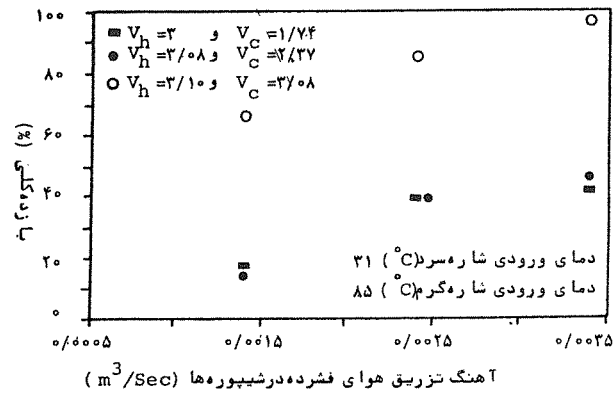
ثانیه بیشتر است. که این نکته در حقیقت همان اثر افزایش آهنگ چرخش ذرات می باشد که قبلاً ذکر شد. نکته قابل ذکر در مورد این شکلها آهنگ تغییر دمای اولیه در حالتهای مختلف می باشد. توجه به شکل ۱۴ مؤید این نکته است که با افزایش آهنگ تزریق هوای فشرده شدت تغییرات دمای خروجی در شروع آزمایش افزایش یافته و در نتیجه در زمان کمتری به حالت پایدار خواهد رسید، که علت آن اختلاط بیشتر ذرات با شاره گرم و سرد به خاطر افزایش شدت چرخش ذرات بین دو بستر می باشد.



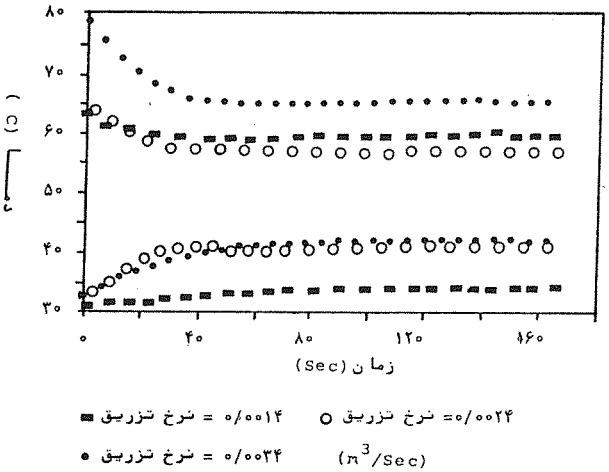
شکل (۱۱) ـ منحنی تغییرات بازده کلی مبدل نسبت به تغییرات آهنگ تزریق هوای فشرده در شیپوره ها



شکل (۱۲) ـ منحنی تغییرات بازده کلی مبدل نسبت به تغییرات آهنگ تزریق هوای فشرده در شیپوره ها



شکل (۱۳) ـ منحنی تغییرات بازده کلی مبدل نسبت به تغییرات آهنگ تزریق هوای فشرده در شیپوره ها



شکل (۱۴) ـ منحنی تغییرات دمای خروجی بسترها با زمان

۷) نتیجه گیری

بررسی تجربی بر روی مبدل حرارتی بستر روان چرخشی نمایانگر عملکرد حرارتی مناسب این مبدل می باشد. زیرا با توجه به نتایج ملاحظه می گردد که در بهترین حالت بازده این مبدل می توان به حدود ۷۰٪ بازده بیشینه یک مبدل دولوله ای همسو در شرایط کاری مشابه برسد. شایان ذکر است در این شرایط مبدل بستر روان چرخشی دارای حجمی معادل ۰/۰۱۲ مترمکعب برای هر بستر با مقدار خوراک حدود ۲ کیلو ذره پلی استایرن می باشد. در حالیکه در همین شرایط کاری مبدل حرارتی سنتی دو لوله ای همسو نیاز به سطح حرارتی معادل ۸/۴ مترمربع (قطر خارجی پوسته معادل ۰/۲۵ متر و طول

۱۴/۷متر) که دارای حجم تقریبی ۰/۸ مترمکعب است، دارد. قابل ذکر است با توجه به اینکه در صنعت معمولاً انرژی در دمای کم به صورت هنگفت در دسترس است ولی به علت مسائل اقتصادی (گران بودن فرآیند بازیابی) تلف می گردد.

می توان از این روش با توجه به بازده مناسب و همچنین مخارج پایین استفاده نمود. به عنوان مثال این مبدل را می توان جهت بازیابی گرما در گازهای خروجی دیگ بخار به عنوان گرمکن هوا پیشنهاد نمود.

فهرست علائم و اختصارات

ضریب کروی بودن	ϕ	حداقل سرعت روانی (m/s)	U_{mf}
سطح بر واحد وزن (m^2/gr)	A	سرعت شاره (m/s)	V
تخلخل، بازده	ε	شاره سرد	c
ظرفیت گرمائی ویژه (J/kg.K)	C	گاز	g
ویسکوزیته دینامیکی (kg/m.s)	μ	شاره گرم	h
قطر کره هم حجم (mm)	d	حداقل روانی	m_f
جرم حجمی (kg/m^3)	ρ	خروجی	o
ضریب هدایت گرمائی (W/m.K)	k	ذره	p
دما (k)	T	ذره	s
سرعت ظاهری گاز (m/s)	U_o	ورودی	i

زیرنویس ها

1-Circulating Fluidized Bed
2- Hot Fluid
3-Fluidizing Velocity
4- Gasification
5- Botteril
6-Newey
7- Hattori
8- Howard
9- Plug flow
10- Orifice Flowmeter
11- Effectiveness
12- Minimum fluidization Voidage
13-Ergun

منابع:

1) kunii, D., Levenspiel,o.,"Fluidization Engineering",John wiley & sons. Inc., 1969.
2) Geldart, D., "Gas fluidization Technology", John Wiley & sons. Ltd., 1986.
3) Newey, D.C., Howard, J.R., "The Development of a Novel fluidized Bed Gas to Gas Heat Exchanger", Heat Recovery systems. Vol. 3, No. 1, 1983.
4) Hattori, H., Howard, J.R., "Gas to Gas Heat Recovery Using Fluidized Bed Technology", Heat Recovery System. Vol. 5, No. 6, 1985.