

آزمایش بستر سیالی شده^۱

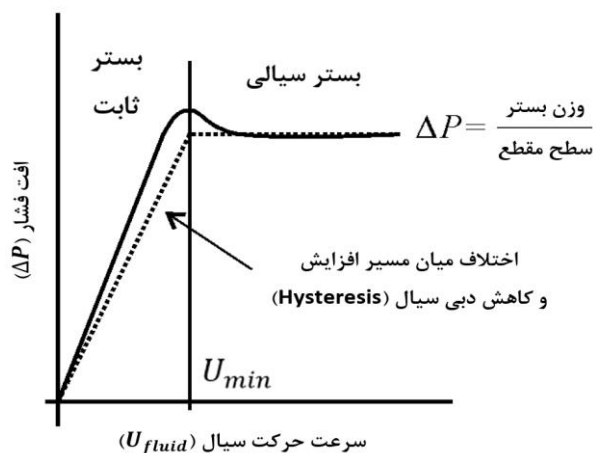
تهیه و تنظیم: محمد حسین افشاری پور

هدف آزمایش

مشاهده و محاسبه سرعت شروع پدیده سیالی شدن از طریق اندازه‌گیری اختلاف فشار در فازهای مایع و گاز

مقدمه

منظور از فرآیند سیال سازی^۲، تماس بین بستری از ذرات جامد گرانوله^۳ و جریانی از یک سیال است. نتیجه این فرآیند این است که ذرات جامد رفتاری سیال-گونه از خود نشان داده و سیستم به صورت سوسپانسیون درمی‌آید. در این حالت، کمیات ترمودینامیکی و مکانیکی سیستم تغییر می‌کنند. بسترهای سیالی می‌توانند برای مقاصد مختلفی به کار برده شوند. از جمله کاربردهای این پدیده می‌توان به استفاده از آن در راکتورهای واکنش بین گازها و جامدات اشاره کرد. [۱]، [۲] استفاده از این تکنولوژی جهت کاهش تولید گازهای سمی در صنعت نیز از دیگر فایده‌های آن عنوان شده است. در کوره‌های ذغال‌سنگ، سیالی کردن ذرات داغ خاکستر و ماسه توسط هوا می‌تواند به سوختن بهتر ذغال‌سنگ در دماهای پایین‌تر کمک کرده و تولید اکسیدهای نیتروژن را کاهش دهد. اگر به این بستر سیالی ذرات ماسه‌سنگ نیز افزوده شود، تولید گاز سمی SO_2 هم به طور قابل توجهی کاهش خواهد یافت. [۳]



شکل ۱: در این شکل می‌توانید رفتار افت فشار دو سمت بستر سیالی را برحسب سرعت حرکت سیال مشاهده کنید. هنگام افزایش سرعت، ذرات جامد در نقطه سیالی شدن روی هم می‌لغزند. کم‌ترین سرعتی که این پدیده در آن مشاهده می‌شود با U_{min} مشخص شده است. اگر به همان ترتیبی که دبی را افزایش می‌دهید آن را کاهش دهید، میان مسیر رفت و برگشت نمودار اختلاف اندکی می‌بینید. به نظر شما این اختلاف از چه چیزی ناشی می‌شود؟ [۴]

¹ Fluidized Bed

² Fluidization

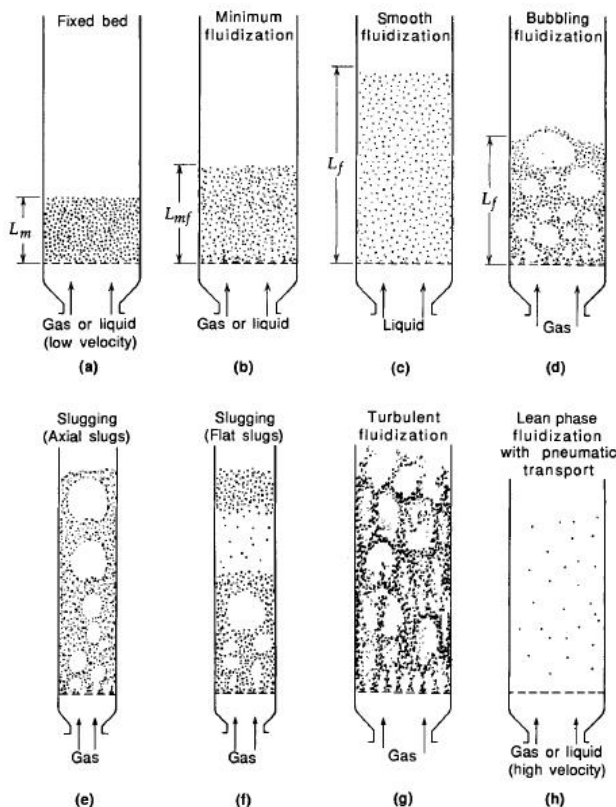
³ Granular Material

تئوری آزمایش

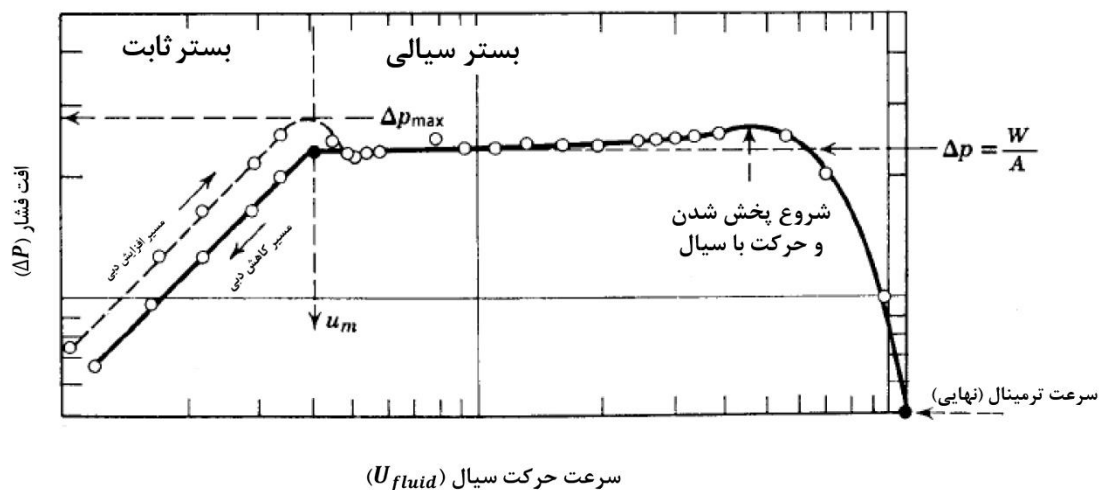
جریان یک سیال به سمت بالا از بین ذرات جامد، به علت وجود نیروی Drag، باعث پدید آمدن افت فشار در آن سیال می‌شود. هنگامی که این نیرو برابر با نیروی وزن بستر جامد گردد، ذرات جامد شروع به حرکت و شارش می‌کنند. این نقطه، نقطه شروع سیالی شدن است. بعد از شروع سیالی شدن، اختلاف فشار با افزایش سرعت حرکت سیال تغییر زیادی نمی‌کند. رابطه زیر، نشانگر میزان تغییر فشار به ازای تغییر دانسیته ظاهری سیستم است [۲]:

$$\Delta P = gL \left(1 - \frac{\rho_{fluid}}{\rho_{particle}} \right) \rho_{apparent} \quad \text{معادله (۱)}$$

در این معادله g شتاب گرانش زمین (m/s^2)، L ارتفاع ستون بستر (m)، ρ_{fluid} و $\rho_{particle}$ به ترتیب دانسیته سیال عبوری و ذرات جامد، $\rho_{apparent}$ مقدار دانسیته ظاهری بستر سیالی (kg/m^3) و ΔP میزان افت فشار سیال (Pa) می‌باشد. همان‌گونه که از رابطه پیداست، در یک ویسکوزیته ظاهری معین، مقدار افت فشار در طول ستون بستر سیالی خطی است و منحنی فشار به صورت خطی از پایین تا سطح بستر به صفر می‌رسد.



شکل ۲: با شروع پدیده سیالی شدن، اختلاف فشار در طول بستر تغییر کمتری خواهد کرد. با افزایش سرعت سیال، بستر سیالی از حالت یکنواخت خارج شده و سیال به صورت‌های حباب و Slug در طول بستر جابه‌جا می‌شود. در پایان، در سرعت‌های بسیار بالای سیال، بستر شکل سیالی خود را از دست داده و در سیال پخش خواهد شد (شکل ۳ را ببینید). [۵]



شکل ۳: همان‌طور که می‌بینید، رفتار بستر سیالی برای همیشه با افزایش سرعت سیال ادامه نخواهد داشت. از سرعت مشخصی به بعد، سیال بستر جامد را وادار به حرکت با خود خواهد کرد و توده جامد به‌صورت شکل ۲ بخش h دیده خواهد شد. با افزایش بیشتر سرعت، نهایتاً به نقطه‌ای می‌رسیم که تقریباً اختلاف فشاری میان ابتدا و انتهای بستر وجود ندارد (Terminal Velocity). [۶]

هنگام آزمایش، آن سرعتی از عبور سیال که باعث لغزش ماده جامد و شارش آن می‌شود را به‌عنوان سرعت شروع سیالی شدن در نظر بگیرید. برای محاسبه سرعت شروع پدیده سیالی شدن به‌صورت تئوری ابتدا باید با عدد بدون بُعدی به‌نام «عدد ارشمیدس» آشنا شوید: [۲]

$$Ar = g \frac{d_{particle}^3}{\mu_{fluid}^2} \rho_{fluid} (\rho_{particle} - \rho_{fluid}) \quad \text{معادله (۲)}$$

در این معادله g شتاب گرانش زمین (m/s^2)، $d_{particle}$ قطر ذرات جامد (m)، μ_{fluid} ویسکوزیته سیال ($kg/m.s$)، $\rho_{particle}$ و ρ_{fluid} به‌ترتیب دانسیته سیال و ذرات جامد (kg/m^3) و Ar نیز عدد بدون بُعد ارشمیدس است. از عدد ارشمیدس در محاسبه عدد رینولدز در موقعیت شروع رفتار بستر سیالی استفاده می‌شود: [۲]

$$Re = 42.86 \times \left(\sqrt{1 + 3.11 \times 10^{-4} \times Ar \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon^2)}} - 1 \right) \quad \text{معادله (۳)}$$

در این معادله، ε ضریب تخلخل نام دارد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود: [۲]

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{apparent}}{\rho_{particle}} \quad \text{معادله (۴)}$$

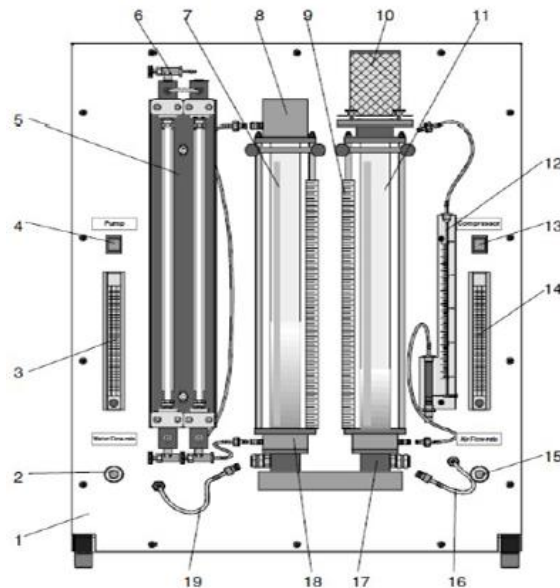
در نهایت برای محاسبه سرعت شروع سیالی شدن از رابطه زیر استفاده کنید: [۲]، [۷]

$$U_{min} = \frac{\mu_{fluid} \times Re}{\rho_{fluid} \times d_{particle}} \times (1 - \varepsilon) \varphi \quad \text{معادله (۵)}$$

در این رابطه φ فاکتور شکل است؛ که برای ذرات کروی برابر ۱ فرض می‌شود. اگر ذرات بستر جامد بسیار ریز باشند ($d_{particle} \leq 0.1mm$) می‌توان از رابطه زیر برای محاسبه سرعت شروع سیالی شدن استفاده کرد: [۷]

$$U_{min} = \frac{g(\rho_{particle} - \rho_{fluid})d_{particle}^2}{150\mu} \times \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} \quad \text{معادله (۶)}$$

شکل دستگاه [۲]

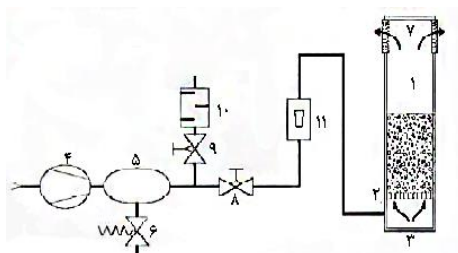


شکل ۴: اجزای دستگاه

- | | | |
|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| ۱- تابلوی نصب شدن روی میز | ۸- سرریز آب | ۱۵- شیر بای پس هوا |
| ۲- شیر بای پس آب | ۹- مقیاس اندازه گیری | ۱۶- تغذیه هوا به ستون آزمایش |
| ۳- جریان سنج حجمی آب | ۱۰- فیلتر هوا | ۱۷- محفظه توزیع |
| ۴- کلید پمپ | ۱۱- ستون آزمایش هوا | ۱۸- صفحه ته نشین |
| ۵- مانومتر | ۱۲- مانومتر اختلاف فشار هوا | ۱۹- تغذیه آب به ستون آزمایش |
| ۶- شیر ونت | ۱۳- کلید کمپرسور | |
| ۷- ستون آزمایش آب | ۱۴- جریان سنج حجمی هوا | |
- شرح دستگاه [۲]

الف-شرح دستگاه برای ستون هوا

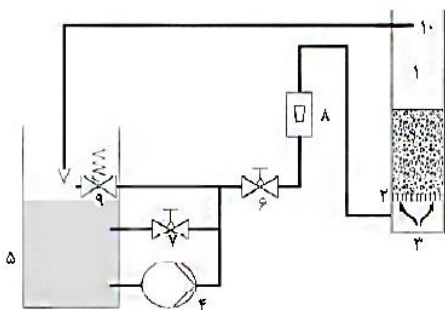
بستر سیالی از یک سیلندر شفاف با سطح مقطع $A=15.21\text{cm}^2$ تشکیل شده است (۱). برای به وجود آوردن بستر سیالی، هوای فشرده از پایین در یک توده مواد جامد کروی دمیده می‌شود. به منظور توزیع بهتر هوا، در زیر استوانه یک صفحه متخلخل فلزی وجود دارد (۲). این صفحه متخلخل در بالای محفظه توزیع (۳) قرار گرفته است. فشار هوای مورد نیاز توسط یک کمپرسور دو دیافراگمی (۴) تأمین می‌شود. جهت یکنواخت سازی جریان، در خط هوای فشرده یک مخزن (۵) قرار گرفته و شیر ایمنی (۶) باعث می‌شود تا فشار مخزن هیچ‌گاه از ۳ بار تجاوز نکند. هوای دمیده شده در استوانه بعد از عبور از یک فیلتر کاغذی (۷) سیلندر را ترک می‌کند تا مواد جامد همراه هوا خارج نشوند. جریان هوا با دو شیر تنظیم می‌شود؛ یک شیر سوزنی (۸) روی جریان سنج حجمی تا میزان جریان هوا را تنظیم کند و یک شیر بای‌پس (۹). شدت جریان با کاربرد مستقیم یک جریان سنج با سطح مقطع متغیر (۱۱) اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری اختلاف فشار در توده، دو عدد کولپینگ در بالا و پایین سیلندر کار گذاشته شده است. افت فشار با به کار بردن یک مانومتر تک‌لوله‌ای اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۵: شماتیک اجزای سیستم بستر سیالی - ستون هوا

ب-شرح دستگاه برای ستون آب

بستر سیالی در یک استوانه شفاف (۱) با سطح مقطع $A=15.21\text{cm}^2$ تشکیل می‌شود. برای این منظور آب از پایین به داخل مواد جامد پمپ می‌شود. جهت یکنواخت سازی جریان آب، در زیر استوانه یک صفحه تخلخل فلزی (۲) وجود دارد. فشار آب زیر صفحه در محفظه توزیع (۳) توسط یک پمپ دیافراگمی (۴) تأمین می‌گردد که آب را به مدار پمپ می‌کند. تانک ذخیره (۵) به اتمسفر راه دارد. جریان آب با دو شیر تنظیم می‌شود و میزان جریان با جریان سنج مستقیم اندازه‌گیری می‌گردد. شیر ایمنی (۹) فشار پمپ را زیر ۱.۵ بار نگه می‌دارد. جریان بعد از عبور در داخل استوانه از مسیر (۱۰) دوباره به تانک ذخیره برمی‌گردد. برای اندازه‌گیری اختلاف فشار در ارتفاع توده، دو عدد کولپینگ در بالا و پایین سیلندر کار گذاشته شده‌اند. فشار نسبی با کولپینگ اندازه‌گیری شده و اختلاف فشار به وسیله یک مانومتر دو لوله‌ای سنجیده می‌شود.



شکل ۶: شماتیک اجزای سیستم بستر سیالی - ستون آب

روش انجام آزمایش [۲]

الف - آزمایش با ستون هوا

۱. شیر بای پس زیر جریان سنج با سطح مقطع متغیر را کاملاً باز کنید.
۲. شیر سوزنی جریان سنج با سطح مقطع متغیر را کاملاً ببندید.
۳. کمپرسور را روشن کنید.
۴. شدت جریان را توسط باز کردن شیر سوزنی با مقادیر کوچک افزایش دهید.
۵. به ازای افزایش هر 2 l/min اختلاف فشار را برحسب شدت جریان ثبت کنید.
۶. به محض دیدن حرکت در اولین ذره، به سرعت شروع سیالی شدن (U_{min}) رسیده اید. شدت جریان و افت فشار مربوطه را یادداشت کنید.
۷. آزمایش را تا رسیدن به دبی 30 l/min ادامه دهید. بعد از رسیدن به مقادیر خاصی از جریان، شدت جریان فقط توسط بستن شیر بای پس اضافه خواهد شد.
۸. بعد از رسیدن به حداکثر شدت جریان، این بار آن را کاهش دهید. به ازای هر 4 l/min کاهش دبی، اختلاف فشار را برحسب دبی ثبت کنید.

ب - آزمایش با ستون آب

۱. اتصال هوای فشرده را به مانومتر لوله ای وصل کنید و با ونت کردن، مانومتر را روی وسط ستون تنظیم کنید.
۲. شیر بای پس زیر جریان سنج با سطح مقطع متغیر را کاملاً باز کنید.
۳. شیر سوزنی روی مانومتر با سطح مقطع متغیر را کاملاً ببندید.
۴. پمپ را روشن کنید.
۵. شدت جریان را توسط باز کردن شیر سوزنی با مقادیر کوچک افزایش دهید و توده را مشاهده کنید.
۶. شدت جریان و افت فشار را یادداشت کنید.
۷. به محض دیدن حرکت در اولین دانه به سرعت شروع سیالی شدن (U_{min}) رسیده اید. شدت جریان و افت فشار مربوطه را یادداشت کنید.
۸. آزمایش را تا رسیدن به شدت جریان 1.5 l/min ادامه دهید. بعد از رسیدن به مقادیر خاصی از جریان، شدت جریان فقط توسط بستن شیر بای پس اضافه خواهد شد.

خواسته‌های آزمایش

۱. مقادیر U را برای ستون آب و هوا به‌دست آورید (فقط منحنی‌های افزایش دبی).
۲. منحنی تغییرات ΔP برحسب U را برای هردو ستون رسم کنید و از روی آن U_{min} را به‌دست آورید.
۳. با استفاده از معادله (۵)، مقدار U_{min} را محاسبه کنید. این مقدار را با مقدار به‌دست‌آمده در سوال ۲ و نیز مقداری که حین آزمایش یادداشت کرده‌اید مقایسه کرده و خطا را گزارش کنید.
۴. با استفاده از معادله (۶) مقدار U_{min} را محاسبه نمایید. مقدار به‌دست آمده را با مقدار حاصل از معادله ۵ مقایسه نمایید و دلیل خطا در مقدار به‌دست آمده را ذکر کنید.
۵. منحنی افزایش و کاهش دبی برای ستون گاز را در یک نمودار برای مقایسه ترسیم نمایید. اختلاف مشاهده شده (پدیده Hysteresis) ناشی از چیست؟
۶. منحنی ارتفاع ستون بستر را برحسب شدت جریان حجمی رسم کنید و روی آن بحث نمایید (فقط برای ستون آب).

منابع:

- 1- Germán González Silva, N. P. J., Oscar Fabio Salazar (2012). Fluid Dynamics of Gas – Solid Fluidized Beds. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development: page 1.
- 2- مصلحی، پ. (۱۳۹۱). "دستور کار آزمایشگاه مکانیک سیالات"، تهران: دانشگاه صنعتی شریف.
- 3- Deyi, K. (2013). CFD Simulation Of Particle Mixing In a Fluidized Bed. (Introduction): page 1.
- 4- Holdich, R. G. (2002). Fundamentals of Particle Technology. (Fluidisation): page 68.
- 5- Daizo Kunii, O. L. (1991). Fluidization Engineering. (Introduction): page 2.
- 6- Samarasiri, Kasun. (2015). Reactor Design for the Conversion of Waste Plastic into Fuel Oil and Gas: page 31.
- 7- Subramanian, Ram. (2019). Flow through Packed and Fluidized Beds: pages 2 to 5.