دانشگاه تهران
پردیس دانشکده های فنی
دانشکده مهندسی شیمی

تشخیص کیفیت سیالیت در بسترهای سیال با استفاده از دیده‌بانی ارتعاشات بستر

نگارش: مژگان عباسی

استاد راهنما: دکتر رحمت ستوده قره باغ

استاد مشاور: دکتر نوید مستوفی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته
مهندسی شیمی- طراحی فرایند

شهریور ماه ۱۳۸۷

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به پدر و مادر مهربان

و

برادر و خواهران عزیزم

که تمامی هستی و زندگی خود را مدیون وجودشان هستم.

چکیده

روش های مختلفی برای اندازه‌گیری پارامتر های هیدرودینامیکی بستر های سیال وجود دارد که به دو دسته اصلی روش های تداخلی و غیر تداخلی تقسیم می شوند. شناخت درست پدیده ها در بستر سیال نیاز به داده های قابل اعتمادی دارد که این امر وابسته به روش اندازه گیری است. روش دیده بانی ارتعاشات، به عنوان یک روش غیر تداخلی، می تواند برای تعیین پارامتر های هیدرودینامیکی در بسترهای سیال مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق آزمایش ها در یک بستر سیال به ارتفاع ۲ متر و قطر داخلی ۱۵ سانتی متر در رژیم جریان حبابی و برای ذرات شن با قطر متوسط ۱۵۰، ۲۸۰، ۴۹۰ و ۷۴۰ میکرومتر صورت گرفت. به منظور بررسی اثر پارامتر های مختلف روی هیدرودینامیک بستر سیال، آزمایش ها در سرعت های مختلف جریان گاز و برای بستر های از ذرات در ارتفاع های مختلف انجام شد. سیگنال های ارتعاشی ثبت شده توسط دو شتاب سنج در شرایط عملیاتی مختلف در دو حوزه زمان (تحلیل آماری) و فرکانس (تبدیل فوریه سریع و موجک) تجزیه و تحلیل شدند. از نتیجه های کلی این تحقیق می توان به این نکته اشاره نمود که تغییرات انحراف استاندارد سیگنال های ارتعاشی با سرعت گاز در محدوده مشخصی خطی بوده و با خطای متوسط کمتر از ۱۰ درصد، سرعت حداقل سیالیت را می توان محاسبه نمود. در مورد سیگنال های ارتعاشی مقدار بیشینه موجود روی منحنی تغییرات درجه اوج (گشتاور چهارم آماری) برحسب سرعت ظاهری گاز نشان دهنده سرعت حداقل سیالیت می باشد که خطای نسبی این روش نسبت به روش اول کمتر می باشد. با انتقال داده ها به حوزه فرکانس تغییرات در رژیم ها و نوع رژیم موجود در بستر سیال از روی وضعیت و شکل پیک های موجود در تابع چگالی قابل تشخیص است.

تقدیر و تشکر

پس از حمد و سپاس خداوند تبارک و تعالی، بدینوسیله از خانواده مهربانم که در تمام مراحل تحصیل پشتیبان من بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

بر خود لازم می‌دانم از دو استاد بزرگوار جناب آقای دکتر رحمت ستوده قره‌باغ و جناب آقای دکتر نوید مستوفی که در طول این دورهٔ تحصیلی از محضر ایشان درس علم و اخلاق فراگرفتم صمیمانه تشکر و سپاسگزاری نمایم. امیدوارم در ادامه راه نیز بتوانم از راهنمایی‌های این دو استاد عزیز بهره‌مند گردم.

از جناب آقای دکتر محجوب که در این تحقیق با راهنمایی‌های ارزشمند خود و در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی، کمک شایانی در پیشبرد این پروژه داشته‌اند، تشکر می‌نمایم.

ازهیات محترم داوران جناب آقای دکتر علی وطنی و جناب آقای دکتر حجت احمدی که این پایان نامه را مطالعه کرده و نظرات ارزنده خویش را بیان نموده‌اند تشکر و قدردانی می نمایم.

در پایان نیز از جناب آقای علی شهسواری و سرکار خانم نسیم صالحی نیک به دلیل همکاری های ارزنده‌شان و تمامی دوستان عزیزم صمیمانه تشکر نموده و برای تمامی آن‌ها روزهایی پر از موفقیت و کامیابی آرزومندم.

فهرست صفحه

فصل اول: مقدمه ای بر بستر سیال ۱

مقدمه ۲

۱-۱- پدیده سیالیت ۲

۱-۲- بسترهای حبابی ۴

۱-۳- بهم چسبیدگی و کلوخه شدن ۷

۱-۴- روش های اندازه گیری در بستر سیال ۸

۱-۴-۱- روش تداخلی ۹

۱-۴-۲- روش غیر تداخلی ۱۰

فصل دوم: روش تجزیه و تحلیل داده ها ۱۶

۲- روش های تجزیه و تحلیل داده ها ۱۷

۲-۱- روش آماری ۱۷

۲-۱-۱- انحراف استاندارد ۱۸

۲-۱-۲- میانگین گیری ۱۸

۲-۱-۳- درجه اوج یا کشیدگی ۱۹

۲-۱-۴- عدم تقارن ۱۹

۲-۲- حوزه فرکانس ۲۰

۲-۲-۱- تبدیل فوریه ۲۰

۲-۲-۲- تبدیل فوریه زمان کوتاه ۲۳

۲-۲-۳- تبدیل موجک ۲۵

فصل سوم: تجهیزات اندازه گیری و روش آزمایش ۳۲

۳-۱- مشخصات بستر سیال شده ۳۳

۳-۲- مشخصات ذرات مورد استفاده ۳۴

۳-۲-۱- محاسبه توزیع اندازه و قطر متوسط ذرات (d_p) ۳۵

۳-۳- انتخاب حسگر ارتعاش ۳۶

۳-۳-۱- پارامتر های اصلی در انتخاب شتاب سنج ۳۷

۳-۳-۲- محدوده فرکانسی شتاب سنج ۳۹

۳-۴- مشخصات شتاب سنج پیزوالکتریک ۴۱

۳-۵- روش آزمایش ۴۱
فصل چهارم: بحث و نتیجه گیری ۴۴
۴-۱- تحلیل آماری ۴۵
۴-۲- تحلیل در حوزه فرکانس ۵۶
۴-۲-۱- تبدیل موجک ۵۶
۴-۲-۲- تبدیل فوریه سریع ۶۱
فصل پنجم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات ۷۱
۵-۱- نتیجه گیری ۷۲
۵-۲- پیشنهادها ۷۳
مراجع ۷۰

فهرست شکل ها صفحه

شکل ۱-۱- انواع رژیم های بستر سیال ۴
شکل ۱-۲- چگونگی حرکت گاز درون بستر سیال ۵
شکل ۱-۳- حرکت جامدات در بستر های سیال حبابی ۶
شکل ۱-۴- نمایی از فیبر نوری ۱۰
شکل ۲-۱- تبدیل فوریه سری زمانی ۲۰
شکل ۲-۲- تبدیل فوریه سیگنال پایا ۲۲
شکل ۲-۳- تبدیل فوریه سیگنال غیر پایا ۲۲
شکل ۲-۴- تبدیل فوریه زمان کوتاه یک سیگنال ۲۴
شکل ۲-۵- تبدیل فوریه زمان کوتاه سیگنال غیر پایا ۲۴
شکل ۲-۶- تبدیل موجک سیگنال متغیر با زمان ۲۶
شکل ۲-۷- مقایسه موجک و موج سینوسی ۲۶
شکل ۲-۸- تبدیل موجک پیوسته ۲۷
شکل ۲-۹- جابجایی سیگنال در تبدیل موجک ۲۷
شکل ۲-۱۰- مراحل تعیین ضرایب موجک پیوسته ۲۹
شکل ۲-۱۱- موجک هار ۳۰
شکل ۲-۱۲- موجک مادر دبچیز ۳۰
شکل ۳-۱- شمایی از راکتور بستر سیال در مقیاس آزمایشگاهی ۳۴
شکل ۳-۲- شتاب سنج پیزوالکتریک ۳۶
شکل ۳-۳- رابطه حساسیت با اندازه شتاب سنج ۳۸
شکل ۳-۴- جرم شتاب سنج ۳۸
شکل ۳-۵- محدوده دینامیکی شتاب سنج ۳۹
شکل ۳-۶- محدوده فرکانسی ۴۰
شکل ۳-۷- اثر حوزه فرکانس نمونه برداری بر همپوشانی امواج ۴۳

شکل ۴-۱- نمونه ای از سیگنال ارتعاشی زمان گسسته ثبت شده با فرکانس ۲۴ KHz
برای ذرات شن با قطر متوسط ۴۹۰ میکرومتر و ارتفاع بستر ساکن ۱۵ سانتیمتر ۴۵
شکل ۴-۲- تغییرات انحراف استاندار برحسب سرعت ظاهری گاز ۴۸
شکل ۴-۳- محاسبه سرعت حداقل سیالیت برای ذرات شن با قطر متوسط ۱۵۰ میکرومتر
و شتاب سنج در فاصله ۵ سانتیمتری از صفحه توزیع کننده ۴۸
شکل ۴-۴- محاسبه سرعت حداقل سیالیت برای ذرات شن با قطر متوسط ۱۵۰ میکرومتر
و شتاب سنج در فاصله ۱۰ سانتیمتری از صفحه توزیع کننده ۴۹
شکل ۴-۵- محاسبه سرعت حداقل سیالیت برای ذرات شن با قطر متوسط ۴۹۰ میکرومتر
و شتاب سنج در فاصله (الف) ۵ سانتیمتری (ب) ۱۰ سانتیمتری از صفحه توزیع کننده ۵۰
شکل ۴-۶- تغییرات انحراف استاندار برحسب سرعت ظاهری گاز در فواصل مختلف از صفحه توزیع کننده ۵۰
شکل ۴-۷- روند تغییرات درجه اوج با سرعت ظاهری گاز برای ذرات شن با قطر متوسط
(الف) ۲۸۰ میکرومتر (ب) ۴۹۰ میکرومتر ۵۲
شکل ۴-۸- تغییرات گشتاور چهارم سیگنال ارتعاشی بر حسب سرعت ظاهری گاز برای ذرات شن
با قطر متوسط ۱۵۰ میکرومتر ۵۳
شکل ۴-۹- تغییرات سیگنال زمانی با افزایش سرعت ظاهری گاز (الف) تک حباب با فاصله زمانی زیاد
(ب) تک حباب با فاصله زمانی کم (ج) بستر سیال شده ۵۴
شکل ۴-۱۰- سرعت حداقل سیالیت برای ذرات شن با قطر متوسط مختلف ۵۶
شکل ۴-۱۱- نمونه ای از سیگنال اصلی و مقیاس های اطلاعاتی حاصل از آن ۵۸
شکل ۴-۱۲- سیگنال اصلی و تفکیک آن به فرکانس های بالا و پایین برای ذرات شن
با قطر متوسط ۴۹۰ میکرومتر و ارتفاع بستر ۱۵ سانتیمتر ۵۹
شکل ۴-۱۳- توزیع انرژی مقیاس های مختلف سیگنال با تغییرات سرعت ۶۰
شکل ۴-۱۴- تابع چگالی طیفی ذرات شن با قطر متوسط ۱۵۰ میکرومتر، ارتفاع بستر ساکن ۱۵ سانتیمتر
و شتاب سنج در فاصله ۱۰ سانتیمتری از صفحه توزیع کننده ۶۲
شکل ۴-۱۵- تابع چگالی طیفی ذرات شن با قطر متوسط ۱۵۰ میکرومتر، ارتفاع بستر ساکن ۱۵ سانتیمتر
و شتاب سنج در فاصله ۱۰ سانتیمتری از صفحه توزیع کننده ۶۴

شکل ۴-۱۶- تغییرات انرژی تابع چگالی طیفی با سرعت ظاهری گاز برای ذرات شن با قطر متوسط ۱۵۰ میکرومتر ۶۶
شکل ۴-۱۷- تابع چگالی طیفی ذرات شن با قطر متوسط ۴۹۰ میکرومتر، ارتفاع بستر ساکن ۱۵ سانتیمتر
و شتاب سنج در فاصله ۱۰ سانتیمتری از صفحه توزیع کننده ۶۷
شکل ۴-۱۸- تغییرات انرژی تابع چگالی طیفی با سرعت ظاهری گاز برای ذرات شن با قطر متوسط ۴۹۰ میکرومتر ۶۸
شکل ۴-۱۹- تابع چگالی طیفی برای ذرات شن با قطر متوسط ۲۸۰ میکرومتر، ارتفاع بستر ساکن (الف) ۷/۵ سانتیمتر
(ب) ۱۵ سانتیمتر (ج) ۲۲/۵ سانتیمتر و شتاب سنج در فاصله ۵ سانتیمتری از صفحه توزیع کننده..... ۶۹

فهرست جدول ها **صفحه**

جدول ۱-۱ خلاصه ای از روش های تداخلی و غیر تداخلی در بسترهای سیال ۱۱
جدول ۳-۱- خواص ذرات شن..... ۳۶
جدول ۳-۲- مشخصات شتاب سنج مدل A/120/V..... ۴۱
جدول ۴-۱- مقادیر حداقل سرعت سیالیت از روش PUNCOCHAR ۵۱
جدول ۴-۲- مقادیر حداقل سرعت سیالیت از روی نمودار تغییرات گشتاور چهارم..... ۵۵

فصل اول

مقدمه ای بر بستر سیال

مقدمه

سیالیت عملی است که در آن ذرات جامد از طریق معلق شدن در یک گاز یا مایع به یک حالت شبه سیال درآورده می شوند. در این روش ذرات و سیال، رفتاری غیرمعمول از خود نشان داده که امروزه روش های بسیاری برای تشخیص ابن رفتارها ارائه شده است.

۱-۱- پدیده سیالیت

اگر سیالی از درون یک بستر آکنده حاوی ذرات ریز جامد عبور داده شود، سیال به آرامی از میان فضاهای تهی بین ذرات ثابت عبور می کند. در ابتدا بستر ثابت است؛ با افزایش سرعت جریان، ذرات از یکدیگر جدا شده و بعضی از آن ها در مناطق محدودی لرزش و حرکت می کنند، در این حالت بستر انبساط یافته است.

در سرعتی کمی بالاتر، زمانی خواهد رسید که همه ذرات توسط گاز یا مایعی که بطرف بالا حرکت می کند به صورت تقریباً معلق در می آیند. در این زمان نیروی اصطکاکی بین ذره و سیال برابر و در جهت عکس وزن ذرات می باشد، نیروی فشاری ناشی از مواد در قسمت بالایی، بین ذرات مجاور از بین رفته، و افت فشار در طول هر قسمتی از بستر تقریباً برابر با وزن سیال و ذرات در آن قسمت خواهد شد. بستر تقریبا سیال شده محسوب می شود و از آن به عنوان یک بستر سیال اولیه یا یک بستر در حداقل سیالیت نام برده می شود [۱].

در سیستم های مایع – جامد، یک افزایش سرعت جریان بالاتر از حداقل سیالیت، موجب انبساط یکنواخت و مداوم در بستر می شود. ناپایداریهای خالص جریان از بین رفته و کم می شود، و ناهمگونی یا فضاهای تهی مایع در مقیاس بزرگ، تحت شرایط نرمال مشاهده نمی شود. بستری با این شرایط، بستر سیال ملایم یا بستر سیال همگون نامیده می شود.

سیستم های گاز – جامد، رفتاری کاملاً متفاوت دارند. با یک افزایش در شدت جریان بالاتر از حداقل سیالیت، ناپایداری زیادی همراه با حباب ها و کانال های گازی مشاهده می شود. در شدت جریان های بالاتر، بهم ریختگی بیشتر و حرکت ذرات شدیدتر می شود. البته حجم بستر نسبت به حالت حداقل سیالیت تغییر چندانی نمی کند. به چنین بستری، بستر سیال حبابی گفته می شود. در شرایط بسیار خاصی، سیستم های مایع – جامد هم رفتاری مشابه به بستر های حبابی دارند.

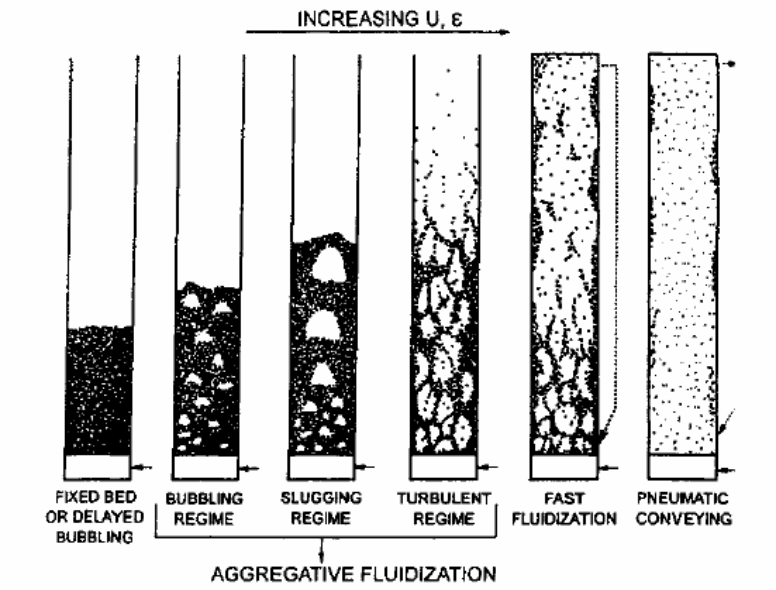
در سیستم های گاز–جامد، حبابهای گازی به هنگام صعود در اثر بهم پیوستن رشد می کنند، و در یک بستر به اندازه کافی عمیق و کم قطر، ممکن است در نهایت به قطر ظرف برسند. در بسترهای شامل ذرات ریز، این ذرات به آرامی از کناره دیواره اطراف حباب های گازی صعود کننده، به سمت پایین جریان دارند. این حالت را لخته ای همراه با لخته های محوری می نامند [۱].

برای ذرات درشت و سخت، قسمتی از بستر که بالای حباب قرار دارد، شبیه ضربه یک پیستون به بالا رانده می شود. ذرات پس از ضربه به سمت پایین حرکت کرده و در نهایت پخش می شوند. در این زمان ضربه دیگری شکل می گیرد، و این حرکت تناوبی و دوره ای ناپایدار تکرار می شود؛ این حالت بستر لخته ای مسطح نامیده می شود. پدیده لخته ای خصوصیت مهم در بسترهای سیال طویل و باریک می باشد. وقتی که ذرات بسیار ریز در یک سرعت جریان کافی گاز سیال می شوند، سرعت حد ذرات افزایش یافته و سطح بالایی بستر محو می شود، همراه بری ذرات افزایش یافته و به جای حباب ها، یک حرکت در هم ذرات و حباب های گازی مشاهده می شود. این بستر سیال درهم است.

با یک افزایش در سرعت گاز، ذرات همراه با گاز به خارج حمل می شوند. در این حالت پراکندگی یا رقیقی در بستر ایجاد می شود. برای عملکرد پایدار باید ذرات حمل شده توسط

سیکلون جمع آوری و به بستر برگردانده شوند. در حالت دیگر، شدت حمل ذرات در بستر های سیال به مراتب بیشتر می شود؛ این حالت، سیالیت سریع نامیده می شود.

در بسترهای سیال و بسترهای سیال سریع، جریان مداوم و یکنواختی از ذرات به ابتدای بستر باز می گردد. این بسترها به بستر های سیال گردشی معروف هستند.



شکل ۱-۱- انواع رژیم های بستر سیال

۱-۲- بسترهای حبابی

اولین دیدگاه در بسترهای حبابی این بود که تمام گاز مازاد بر حداقل سرعت سیالیت، به صورت حباب هایی از درون بستر عبور می کند به طوریکه امولسیون در شرایط حداقل سیالیت، بدون حرکت باقی می ماند، بجز زمانیکه به کناری حرکت می کند تا اجازه عبور به حباب را بدهد به این دیدگاه مدل ساده دو فازی گویند.

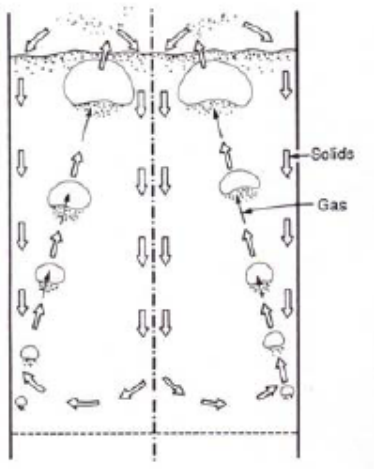
بسیاری از مطالعات در بسترهای بزرگ برای ذرات کوچک و ریز مشخص می کنند که فرضیات تئوری ساده دو فازی کاملاً محقق نیست [۱]:

- میزان حباب ها برابر با گاز مازاد نمی باشد.

- درصد تهی امولسیون با افزایش سرعت گاز بالاتر از حداقل سرعت سیالیت در کسر فضای تهی در شرایط حداقل سیالیت باقی نمی ماند.

- امولسیون ضرورتاً عاری از جریان نیست بلکه دارای یک الگوی جریانی است.

مولروس و وردر[1] [۱] عنوان کردند که با عبور یک جریان گاز از یک صفحه پخش کن با افت فشار بالا، جریان قوی رو به بالایی از ذرات امولسیون نزدیک به دیواره بستر و شروع شونده از نزدیک انتهای بستر ایجاد می شود که در قسمت های بالاتر بستر این ناحیه بالا رونده متمایل به مرکز بستر می شود (شکل ۱-۲).

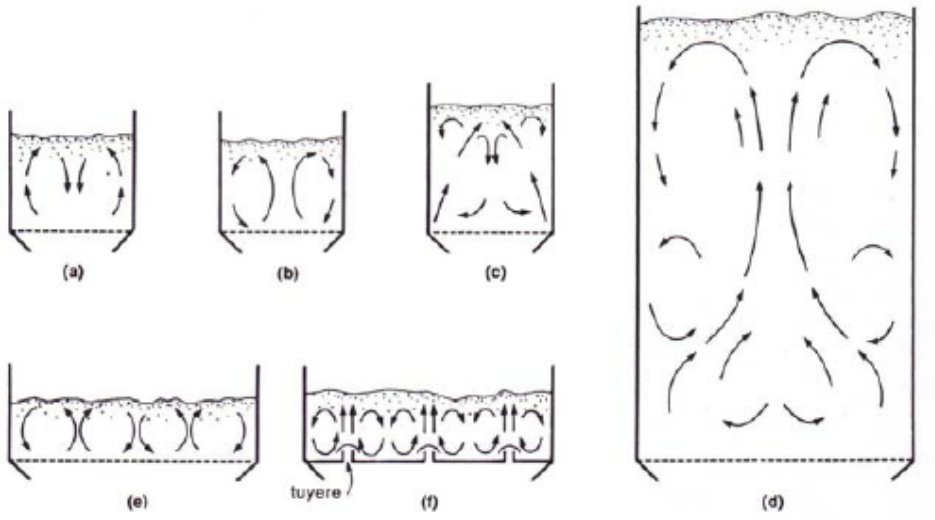


شکل ۱-۲. چگونگی حرکت گاز درون بستر سیال

در نتیجه در سرعت کم سیالیت در بسترهای با نسبت نزدیک طول به قطر، ولی کمتر از واحد، ذرات امولسیون به صورت یک حلقه گردابی با جریانی به سمت بالا در کناره دیواره و به سمت پایین در محور بستر گردش می کنند (شکل ۱-۳ a). هرچند در شدت جریان های بالای گاز این الگوی جریان ممکن است بخاطر سرعت زیاد صعود حباب ها در بستر بر عکس شود (شکل ۱-۳ b).

[1] Molerus & Werther

به میزانی که نسبت طول به قطر بستر به واحد نزدیک می شود، ذرات امولسیون شروع به حرکت به سمت پایین دیواره نزدیک سطح بستر می کنند (شکل ۱-۳ c). در بسترهای عمیق تر یک حلقه گردابی بالای حلقه گردابی اصلی، با جریانی رو به بالا در خط مرکزی بستر تشکیل می شود (شکل ۱-۳ d).



شکل ۱-۳. حرکت جامدات در بستر های سیال حبابی

در بستر های بسیار کم عمق مجهز به پخش کن های یکنواخت، حلقه های گردابی با نسبت طول به قطر برابر با یک ایجاد می شود (شکل ۱-۳ e). در بسترهایی از کاتالیزور FCC انتقال به جریان بالا رونده امولسیون در سرعت های خیلی نزدیک به حداقل سرعت سیالیت نسبت به بسترهایی با ذرات گلدارت B اتفاق می افتد.

حباب ها در بستر سیال دارای مرزهای تعریف شده ای هستند و گاز در عرض این مرزها عبور می کند. در حباب های بدون ابر آهسته، گاز مستقیماً از درون حباب جریان می یابد و سپس مجدداً به داخل امولسیون بر می گردد. در حالیکه در حباب های ابری تند می توان انتقال را در دو مرحله مشاهده نمود، یعنی بین حباب و ابر و بین ابر و امولسیون [۱].

از آنجاییکه واکنش درون این حباب ها رخ می دهد در نتیجه باید اطلاعاتی در مورد اندازه حباب و فضای تهی امولسیون داشت. روابط زیادی برای محاسبه قطر حباب ها ارائه شده اند که در محدوده های خاصی جواب های خوبی می دهند و برای شرایط دیگر درست نمی باشند [۱]. تلاش های بسیاری صورت گرفته است تا بتوان قطر حباب ها را به درستی بدست آورد که ادامه نیز دارد [۱].

۱-۳- بهم چسبیدگی و کلوخه شدن

بعضی مواد خاص در بستر سیال زمانیکه دما افزایش می یابد، به نقطه ای می رسند که در آن شروع به ذوب شدن کرده و بهم می چسبند. این دما، که اغلب پایین تر از دمای ذوب توده مواد می باشد، پایین ترین دمای ذوب شدن نامیده می شود، که اغلب بسترها در دمایی بالاتر از این دما عمل می کنند تا از مشکلات ناشی از کلوخه شدن کاتالیست ها جلوگیری شود. به عبارت دیگر، افزایش سرعت سیالیت در دماهایی بالاتر از حداقل دمای ذوب، از غیرسیال شدن جلوگیری کرده و اندازه اولیه ذرات را افزایش می دهد [۲].

این طور به نظر می رسد که غیرسیال شدن وابسته به تعادل بین نیروی چسبندگی سطوح ذرات و انرژی سینتیک آنها به دلیل نیروی سیالی است که روی آنها عمل می کند. امروزه تلاش های بسیاری صورت گرفته است تا از غیر سیال شدن بسترهای شامل ذرات چسبنده جلوگیری شود. با وجود مطالعات زیادی که در این زمینه صورت گرفته است ولی هنوز مدلی که بتواند به طور قابل قبولی پیش بینی کند که تحت چه شرایطی غیرسیال شدن رخ می دهد، وجود ندارد [۲].

چسبندگی در نتیجه جابجایی شبکه های خالی یا حرکت اتم ها در سطح ذرات رخ می دهد. اگر سرعت چسبندگی به حد کافی بالا باشد ، ذرات مشابه در تماس و برخورد با یکدیگر پیوندهایی را تشکیل می دهند که منجر به کلوخه شدن می شود. پایین ترین دمای

ذوب را می توان به کمک یک دستگاه اندازه گیری انبساط حرارتی اندازه گیری کرد، که در آن میزان انبساط و انقباض نسبی یک نمونه ماده دانه ای شکل را با افزایش دما بررسی می کنند.

در ابتدا که دما افزایش می یابد، یک افزایش طولی در توده نمونه به دلیل انبساط حرارتی مشاهده می شود، ولی زمانیکه دما بالاتر می رود سطح ذره نرم شده، در نتیجه انقباض نیز اثر متقابلی روی انبساط پیدا کرده و شدت آن را کاهش می دهد؛ در نتیجه نمودار به صورت خط صافی در می آید. دمایی که در آن منحنی به شدت به سمت پایین رفته و سرعت انقباض نمونه افزایش می یابد را مینیمم دمای ذوب گویند.

با استفاده از این روش در بسترهای سیال، ذرات به طور کلی به دو دسته تقسیم بندی می شوند [۲]:

- ذراتی مانند پودر ذغال سنگ و دانه های پلی الفین که در مینیمم دمای ذوب، به سرعت کلوخه شده و باید سرعت گاز را افزایش داد تا بستر در حال سیالیت باقی بماند.

- جامدات یونی همانند کلرید سدیم و کلسیم که سرعت کلوخه سازی در آنها پایین است و افزایش ناچیزی در سرعت لازم است که از غیر سیال شدن سیال در حین کلوخه سازی جلوگیری شود.

به دلیل مشکلات ناشی از وجود کلوخه در بستر، تشخیص زمان اولیه تشکیل کلوخه در بستر از اهمیت بالایی قرار دارد. اولین قدم در این مورد، توانایی در تعیین اندازه متوسط ذرات در داخل بستر می باشد که در حین عملیات انجام پذیر نمی باشد. در نتیجه باید از روش های دیگر استفاده نمود.

۱-۴- روش های اندازه گیری در بستر سیال

امروزه از روش های متفاوتی برای بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی بستر سیال استفاده می شود. این روش ها به طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می شوند که عبارتند از [۳]:

۱- روش تداخلی[۲]

۲- روش غیر تداخلی[۳]

که در ادامه هر یک از این روش ها به طور مختصر توضیح داده شده اند.

۱-۴-۱- روش تداخلی

در روش تداخلی پویشگر وارد بستر شده و سیگنال های مورد نظر را ثبت می کند. معمولاً از پویشگر فشار و فیبر نوری برای اندازه گیری در داخل بستر استفاده می شود.

پویشگر فشار

پویشگر های فشار سخت، تقریباً ارزان می باشند و ابزاری برای اندازه گیری نوسانات فشار در بستر می باشند. نوسانات فشار از حرکت حباب ها در بستر ایجاد می شود، البته منشا آن به طور کامل مشخص نمی باشد. معمولاً نوسانات فشار ناشی از ایجاد حباب در توزیع کننده، بهم پیوستن حباب ها، انفجار حباب ها در سطح بستر و اغتشاشات ناشی از جریان گاز و خوشه ها در بستر می باشد [۳].

فیبر نوری

بسیاری از محققان از پویشگر فیبر نوری برای تعیین پارامترهای بستر سیال استفاده کرده اند، زیرا طراحی آن ها بسیار ساده، نسبت سیگنال به نویز بالایی دارند. در این پویشگر ها نور خروجی از لیزر به درون یک فیلتر با هسته ای با قطر کوچک متمرکز می شود، سپس به

[2] Invasive
[3] None-Invasive