

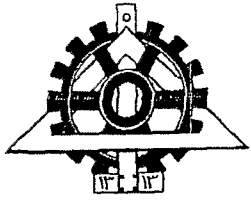


۱۳۸۷ / ۱۱ / ۲۷



۹۳۸۸۰

به نام خدا



دانشگاه تهران
دانشکده های فنی
دانشکده مهندسی شیمی

عنوان:

مطالعه تجربی عوامل موثر بر سطح ویژه انتقال جرم گاز- مایع در
راکتورهای هوادهی شده

نگارش: آریین یزدانی

اساتید راهنما:

دکتر محمدرضا مهرنیا

دکتر حسین بهمنیار

اساتید مشاور:

دکتر حسین صراف زاده

دکتر بابک کفاشی

۱۳۸۷ / ۱۱ / ۲۷

پایان نامه برای دریافت کارشناسی ارشد در رشته مهندسی شیمی

بهمن ماه ۱۳۸۶

۹۳۸۸۵

گویند مرا چو زاد مادر

پستان بدین گرفتن آموخت

شهاب را گاهواره من

بیدار نشست و سخن آموخت

لنجد نهاد بر لب من

بر غنچه گل سخن آموخت

دستم بگرفت و پایا برد

تا شیوه راه رفتن آموخت

یک حرف و دو حرف بر زبانم

الفاظ نهاد و سخن آموخت

پس هستی من ز هستی اوست

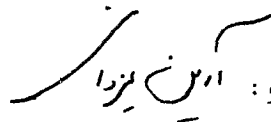
تا هستم و هست دارش دوست

تقدیم بپدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل همراه و یاورم بودند

تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب **آرین یزدانی** تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: 

امضای دانشجو:



تقدیر و تشکر

اینک که به یاری و تمت توجهات ایزد منان این مرحله از زندگی را به انتها می رسانم، ضمن سپاس به درگاه یزدان پاک، بر خود لازم می دانم مراتب قدردانی و امتنان خود را نسبت به اساتید، سروران و عزیزانی که همواره مرهون الطاف خود قرار داده اند، ابراز نمایم. در این راستا بایسته است:

از استاد گرامی و ارجمند جناب آقای دکتر محمدرضا مهرنیا که بزرگوارانه با راهنمایی های ارزشمند خود مرا در انجام این مهم یاری نموده اند تشکر ویژه داشته باشم.

از آقایان دکتر محمد مسین صراف زاده و دکتر بابک کفاشی اساتید گرامی و عزیزم بفاطر رهنمودها و محبت ها و کمک هایشان تشکر می نمایم.

از جناب مهندس یازوکیان سرپرست واحد آزمایشگاه نفت بهران و کلیه عزیزان آن واحد کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از دو دوست عزیزم سرکار خانم مهندس آنیثا شفارودی و دکتر فرشید پژوم شریعتی که صمیمانه و فداکارانه از ابتدا تا انتهای انجام این تحقیق در کنارم حضور داشتند بسیار سپاسگزارم.

و در فاتمه از زحمات بی دریغ و گرمای حضور پدر، مادر و خواهرم در کنارم که در تمامی مراحل مشوق و پشتیبان همیشگی ام بودند سپاسگزاری و تشکر می نمایم.

چکیده

در این تحقیق به مطالعه اثر خواص سیالات بویژه ویسکوزیته آنها بر روی نگهداشت گاز، اندازه حباب ها و چگونگی توزیع اندازه آنها در یک راکتور ستونی حبابی (با حجم ۰/۰۰۸ متر مکعب) حاوی یازده سیال آلی (نفت سفید، دیزل ایزوماکس، روغن های پایه و ترکیبی از آنها) در سرعت های هوادهی گوناگون و فواصل متفاوت از سطح اسپارژر پرداخته شده است.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با افزایش سرعت هوادهی، نگهداشت گاز در تمامی سیستم ها افزایش می یابد. در سیستم های مختلف نرخ افزایش نگهداشت گاز با افزایش سرعت هوادهی با یکدیگر تفاوت دارند. با توجه به نتایج بدست آمده برای محدوده ویسکوزیته سیالات مورد آزمایش شده (m^2/s) ۲/۱۷ الی $(35/9 m^2/s)$ یک رابطه تجربی بین نگهداشت گاز، ویسکوزیته سیالات و سرعت هوادهی بدست آمده که در زیر آورده شده است.

$$\varepsilon_g = 0.461 [u_g]^{0.725} [\mu]^{-0.047} \quad R^2 \cong 0.94$$

نمودار نگهداشت گاز سیالات مختلف در سرعت های هوادهی کمتر از $0/004 m/s$ نزدیک به یکدیگر و در سرعت های هوادهی بیشتر از $0/004 m/s$ از یکدیگر دور شده اند. همچنین نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که منحنی های توزیع اندازه حباب سیالاتی که ویسکوزیته کمتر از $5 \times 10^{-6} m^2/s$ دارند در سرعت های هوادهی کمتر از $0/004 m/s$ تک قله ای بوده و قله آنها در کلاس قطر حباب های متوسط است، این منحنی ها با افزایش سرعت هوادهی به دو قله ای تغییر شکل داده که یک قله در کلاس قطر حباب های ریز و یک قله در کلاس قطر حباب های متوسط پیدا کرده اند اما منحنی های توزیع اندازه حباب سیالاتی که ویسکوزیته بیشتر از $12 \times 10^{-6} m^2/s$ دارند در سرعت های هوادهی کمتر از $0/004 m/s$ دو قله ای بوده که یک قله آنها در کلاس قطر حباب های متوسط و یک قله در کلاس قطر حباب های کوچکتر است، این منحنی ها با افزایش سرعت هوادهی به تک قله ای تغییر شکل داده که تک قله آنها در کلاس قطر حباب های ریز قرار گرفته است. در مورد قطر میانگین حباب ها نیز با

توجه منحنی های توزیع اندازه حباب مشاهده شد که در مورد سیالاتی که ویسکوزیته کمتر از m^2/s ^{-۶} 5×10 دارند افزایش سرعت هوادهی تاثیر چندانی بر روی قطر میانگین حباب ها نگذاشته است اما سیالاتی که ویسکوزیته بیشتر از m^2/s ^{-۶} 12×10 دارند با افزایش سرعت هوادهی (بیشتر از m/s ^{-۶} 0.004) از قطر میانگین یک افت شدید را نشان می دهد زیرا که در این سیستم ها با افزایش سرعت هوادهی جمعیت حباب های ریز به شدت افزایش می یابد.

فصل اول - کلیات

۱- مقدمه	۱
۱-۱- کاربرد راکتورهای ستون حبابی در بیوفرایندها	۲
۲- راکتورهای حبابی: مفاهیم و نوشته های چاپ شده	۴
۱-۲- طراحی و افزایش ظرفیت	۷
۲-۲- دینامیک های سیال و آنالیز جریان	۹
۳-۲- نگهداشت گاز	۱۳
۱-۳-۲- سرعت ظاهری گاز	۱۶
۲-۳-۲- خواص فاز مایع	۱۷
۳-۳-۲- شرایط عملیاتی	۱۷
۴-۳-۲- ابعاد ستون	۱۸
۵-۳-۲- توزیع کننده گاز	۲۰
۶-۳-۲- غلظت جامد	۲۱
۷-۳-۲- خلاصه مطالعات نگهداشت گاز	۲۳
۴-۲- مشخصات حباب	۲۴
۱-۴-۲- سرعت ظاهری گاز	۲۶
۲-۴-۲- خصوصیات فاز مایع و شرایط عملیاتی	۲۷
۳-۴-۲- ابعاد ستون	۲۸
۴-۴-۲- غلظت جامد	۲۸
۵-۴-۲- خلاصه مطالعات خصوصیات حباب	۲۹
۵-۲- ضریب انتقال جرم	۲۹

- ۳۱-۲-۵-۱- سرعت ظاهری گاز
- ۳۲-۲-۵-۲- خصوصیات فاز مایع
- ۳۲-۲-۵-۳- غلظت جامد
- ۳۳-۲-۵-۴- خصوصیات حباب
- ۳۳-۲-۵-۵- ابعاد ستون، اسپارژر گاز و شرایط عملیاتی
- ۳۴-۲-۵-۶- خلاصه مطالعات انتقال جرم
- ۳۴-۲-۶-۶- ضریب انتقال حرارت
- ۳۸-۲-۶-۱- سرعت ظاهری گاز
- ۳۸-۲-۶-۲- خصوصیات فاز مایع
- ۳۸-۲-۶-۳- اندازه جامدات و غلظت آنها
- ۳۹-۲-۶-۴- بررسی انتقال حرارت موضعی محوری / شعاعی
- ۴۰-۲-۶-۵- شرایط عملیاتی و ابعاد ستون
- ۴۱-۲-۶-۶- خلاصه مطالعات انتقال حرارت

فصل دوم - تجهیزات، مواد و روش های آزمایش

- ۴۲-۲- مواد و روش ها
- ۴۳-۲-۱- بیوراكتور
- ۴۵-۲-۲- محیط مدل
- ۴۶-۲-۳- آماده سازی محیط مدل
- ۴۷-۲-۴- اندازه گیری مشخصات فیزیکی - شیمیایی سیالات بکاررفته جهت آزمایش ها
- ۴۷-۲-۵- روش اندازه گیری نگهداشت گاز
- ۴۷-۲-۵-۱- روش اندازه گیری نگهداشت کلی گاز
- ۴۸-۲-۵-۲- روش اندازه گیری نگهداشت محلی گاز

۴۸-۶-۲- روش اندازه گیری قطر حباب و منحنی توزیع

فصل سوم - نتایج و بحث

۵۲-۳- هدف از تحقیق

۵۲-۱-۳- نگهداشت گاز

۵۴-۲-۳- توزیع اندازه حباب و قطر میانگین

۵۴-۱-۲-۳- توضیح منحنی های توزیع اندازه حباب

۵۵-۲-۲-۳- مقایسه منحنی توزیع اندازه حباب بین دو سیال با خواص فیزیکی یکسان

۵۹-۳-۳- نگهداشت کلی گاز برای سیالات کم ویسکوز

۶۱-۴-۳- منحنی های توزیع اندازه حباب

۶۲-۱-۴-۳- منحنی های توزیع اندازه حباب سیالات کم ویسکوز در مقطع پایین ستون

۶۷-۲-۴-۳- منحنی های توزیع اندازه حباب سیالات ویسکوز در مقطع پایین ستون

۷۱-۳-۴-۳- منحنی توزیع اندازه حباب دیزل ایزوماکس در مقطع پایین ستون

۷۳-۴-۴-۳- منحنی های توزیع اندازه حباب سیالات کم ویسکوز در مقطع بالای ستون

۷۸-۵-۴-۳- منحنی های توزیع اندازه حباب سیالات ویسکوز در مقطع بالای ستون

۸۱-۶-۴-۳- منحنی توزیع اندازه حباب دیزل ایزوماکس در مقطع بالای ستون

۸۳-۵-۳- بررسی منحنی های قطر میانگین حباب

۸۳-۱-۵-۳- بررسی منحنی های قطر میانگین حباب در پایین ستون

۸۵-۲-۵-۳- بررسی منحنی های قطر میانگین حباب در بالای ستون

۸۷-۶-۳- بررسی اثر فاصله از سطح اسپارژر بر روی d_s در u_g های متفاوت

۸۷-۱-۶-۳- اثر ارتفاع بر روی d_s در $u_g = 0.1 \times 10^{-2}$

۸۸-۲-۶-۳- اثر ارتفاع بر روی d_s در $u_g = 0.4 \times 10^{-2}$

- ۳-۶-۳- اثر ارتفاع بر روی ds در $u_g = 0.165 \times 10^{-2}$ ۸۹
- ۳-۷-۷- روابط تجربی ارائه شده ۹۱
- ۳-۷-۱- رابطه تجربی برای نگهداشت کلی گاز ۹۱
- ۳-۷-۲- رابطه نگهداشت گاز با تغییر ارتفاع برای سیالات نفتی خالص ۹۲

فصل چهارم - نتیجه گیری کلی و پیشنهادات

- ۴-۱- نتیجه گیری کلی ۹۴
- ۴-۲- پیشنهادات ۹۵
- پیوست ۹۶
- مراجع ۱۱۰

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) رژیم های جریان ممکن در ستون های حبابی ۱۱
- شکل (۲-۱) نقشه رژیم جریان برای ستون های حبابی ۱۲
- شکل (۱-۲) نمایی از بیوراکتور ستونی حبابی با گردش داخلی ۴۴
- شکل (۲-۲) نمایی از سطح توزیع کننده گاز ۴۴
- شکل (۳-۲) تعیین قطر کوچک و بزرگ بیضی ۴۹
- شکل (۴-۲) نمایی از حباب های سیستم $D/HV1150,83\%$ در سرعت ظاهری 0.1 cm/s در مقطع پایین ستون ۵۰
- شکل (۵-۲) نمایی از حباب های سیستم $K/HV1150,69\%$ در سرعت ظاهری 0.165 cm/s در مقطع وسط ستون ۵۱
- شکل (۶-۲) نمایی از حباب های سیستم $D/HV1150,49\%$ در سرعت ظاهری 0.165 cm/s در مقطع وسط ستون ۵۱
- شکل (۱-۳) نمودار نگهداشت گاز بر حسب سرعت ظاهری هوادهی برای جفت سیال با ویسکوزیته حدود 5 cSt ۵۳
- شکل (۲-۳) نمودار نگهداشت گاز بر حسب سرعت ظاهری هوادهی برای جفت سیال با ویسکوزیته حدود 15 cSt ۵۳
- شکل (۳-۳) نمودار نگهداشت گاز بر حسب سرعت ظاهری هوادهی برای جفت سیال با ویسکوزیته حدود 25 cSt ۵۳
- شکل (۴-۳) نمودار نگهداشت گاز بر حسب سرعت ظاهری هوادهی برای جفت سیال با ویسکوزیته حدود 35 cSt ۵۳
- شکل (۵-۳) منحنی توزیع اندازه حباب سیستم $D/HV1150,83\%$ در $u_g = 0.1 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ در مقطع پایین ستون ۵۵

- شکل (۸-۳) منحنی نگهداشت کلی گاز برای سیستم های حاوی سیالات کم ویسکوز و دیزل در راکتور ستونی هوادهی شده ۶۰
- شکل (۹-۳) منحنی نگهداشت کلی گاز برای سیستم های حاوی سیالات ویسکوز به همراه دیزل ۶۱
- شکل (۱۰-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات کم ویسکوز، در $u_g=0/1 \times 10^{-2}$ در مقطع پایین ستون ۶۲
- شکل (۱۱-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات کم ویسکوز، در $u_g=0/2 \times 10^{-2}$ در مقطع پایین ستون ۶۳
- شکل (۱۲-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات کم ویسکوز، در $u_g=0/4 \times 10^{-2}$ در مقطع پایین ستون ۶۴
- شکل (۱۳-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات کم ویسکوز، در $u_g=0/5 \times 10^{-2}$ در مقطع پایین ستون ۶۵
- شکل (۱۴-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات کم ویسکوز، در $u_g=0/65 \times 10^{-2}$ در مقطع پایین ستون ۶۶
- شکل (۱۵-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات ویسکوز، در $u_g=0/1 \times 10^{-2}$ در مقطع پایین ستون ۶۷
- شکل (۱۶-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات ویسکوز، در $u_g=0/2 \times 10^{-2}$ در مقطع پایین ستون ۶۸
- شکل (۱۷-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات ویسکوز، در $u_g=0/4 \times 10^{-2}$ در مقطع پایین ستون ۶۹
- شکل (۱۸-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات ویسکوز، در $u_g=0/5 \times 10^{-2}$ در مقطع پایین ستون ۷۰
- شکل (۱۹-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات ویسکوز، در $u_g=0/65 \times 10^{-2}$ در مقطع پایین ستون ۷۱

- شکل (۲۰-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیال دیزل، در سرعت های هوادهی متفاوت، در مقطع پایین ستون ۷۲
- شکل (۲۱-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات کم ویسکوز، در $u_g=0.1 \times 10^{-2}$ در مقطع بالای ستون ۷۴
- شکل (۲۲-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات کم ویسکوز، در $u_g=0.2 \times 10^{-2}$ در مقطع بالای ستون ۷۴
- شکل (۲۳-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات کم ویسکوز، در $u_g=0.4 \times 10^{-2}$ در مقطع بالای ستون ۷۵
- شکل (۲۴-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات کم ویسکوز، در $u_g=0.5 \times 10^{-2}$ در مقطع بالای ستون ۷۶
- شکل (۲۵-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات کم ویسکوز، در $u_g=0.65 \times 10^{-2}$ در مقطع بالای ستون ۷۷
- شکل (۲۶-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات ویسکوز، در $u_g=0.1 \times 10^{-2}$ در مقطع بالای ستون ۷۸
- شکل (۲۷-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات ویسکوز، در $u_g=0.2 \times 10^{-2}$ در مقطع بالای ستون ۷۹
- شکل (۲۸-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات ویسکوز، در $u_g=0.4 \times 10^{-2}$ در مقطع بالای ستون ۷۹
- شکل (۲۹-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات ویسکوز، در $u_g=0.5 \times 10^{-2}$ در مقطع بالای ستون ۸۰
- شکل (۳۰-۳) منحنی توزیع اندازه حباب در سیالات ویسکوز، در $u_g=0.65 \times 10^{-2}$ در مقطع بالای ستون ۸۱

- شکل (۳-۳۱) منحنی توزیع اندازه حباب در سیال دیزل، در سرعت های هوادهی متفاوت، در مقطع بالای ستون ۸۲
- شکل (۳-۳۲) نمودار تغییرات d_s با سرعت هوادهی برای سیالات کم ویسکوز در مقطع پایین ستون ۸۴
- شکل (۳-۳۳) نمودار تغییرات d_s با سرعت هوادهی برای سیالات ویسکوز در مقطع پایین ستون ۸۵
- شکل (۳-۳۴) نمودار تغییرات d_s با سرعت هوادهی برای سیالات کم ویسکوز در مقطع بالای ستون ۸۶
- شکل (۳-۳۵) نمودار تغییرات d_s با سرعت هوادهی برای سیالات ویسکوز در مقطع بالای ستون ۸۷
- شکل (۳-۳۶) نمودار تغییرات d_s با فاصله از سطح اسپارژر در $u_g=0.1 \times 10^{-2}$ ۸۸
- شکل (۳-۳۷) نمودار تغییرات d_s با فاصله از سطح اسپارژر در $u_g=0.4 \times 10^{-2}$ ۸۹
- شکل (۳-۳۸) نمودار تغییرات d_s با فاصله از سطح اسپارژر در $u_g=0.65 \times 10^{-2}$ ۹۰
- شکل (۳-۳۹) مقایسه داده های تجربی و داده های بدست آمده از معادله ۹۲

فهرست جداول

- جدول (۱-۱) کاربردهای بیوشیمیایی راکتورهای ستونی حبابی ۳
- جدول (۲-۱) خلاصه ای از خواص چند سیستم مطرح شده در مقالات مطالعه شده ۵
- جدول (۳-۱) مقادیر تجربی سرعت گذار و نگهداشت گاز برای ستون های حبابی سیستم آب- هوا ۱۳
- جدول (۴-۱) روابط نگهداشت گاز برای ستون های حبابی ۱۵
- جدول (۵-۱) روابط نگهداشت گاز برای حباب های کوچک و بزرگ ۲۳
- جدول (۶-۱) روابط سرعت صعود حباب ۲۴
- جدول (۷-۱) روابط مربوط به اندازه حباب های تولید شده از یک ارفیس ۲۶
- جدول (۸-۱) روابط ضریب انتقال جرم برای ستون های حبابی گاز - مایع ۳۱
- جدول (۹-۱) ضریب انتقال حرارت برای ستون های حباب و دوغایی ۳۷
- جدول (۱-۲) خواص فیزیکی سیالات بکار رفته در آزمایش ها در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد ۴۷

فصل اول ✓

کلیات



(۱) مقدمه:

راکتورهای چند فازي شامل سه دسته اصلي، با نام های راکتور بستر چکان^۱، راکتور بستر سیال^۲ و راکتور ستون حبابي^۳ است. یک راکتور ستون حبابي بطور کلی از یک ظرف استوانه ای به همراه یک توزیع کننده گاز در کف آن تشکیل شده است. گاز به شکل حباب داخل یک فاز مایع یا سوسپانسیون مایع- جامد پخش می شود. این راکتورها در زمانی که یک فاز جامد وجود دارد، به طور کلی به عنوان راکتورهای ستونی حبابدار دوغابي^۴ نامیده می شوند. ستون های حبابي به طور گسترده ای به عنوان تماس دهنده ها و راکتورهای چند فازي در صنایع شیمیایی، پتروشیمیایی و متالورژی بکار می روند [۱]، خصوصاً در فرایندهایی که شامل واکنش هایی مثل اکسیداسیون، کلراسیون، آلکیلایسیون، پلیمریزاسیون و هیدراسیون می باشند، همچنین برای تولید سوخت ترکیبی بوسیله فرایندهای تبدیلی گاز و در فرایندهای بیوشیمی مانند تخمیر و تصفیه بیولوژیکی آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می گیرند [۲ و ۳]. برخی از کاربردهای شیمیایی به خوبی شناخته شده، فرایند معروف فیشر- تروپش^۵ است که فرایند گدازش غیر مستقیم زغال سنگ جهت تولید سوخت های ترابری، اختلاط متانول و ساخت سایر سوخت های ترکیبی که از نظر محیطی نسبت به مشتقات نفتی دارای فواید فراوانی است می باشد [۱].

راکتورهای ستونی حبابي به علت مزایای فراوانشان که هم در طراحی و هم در عملیات موجود است زمینه کاربردی وسیعی را در مقایسه با سایر راکتورها دارا هستند. آنها دارای مشخصه های انتقال گرمی و حرارتی بسیار خوبی هستند، به این معنی که ضرایب انتقال جرم و حرارت بالایی دارند. به سبب عدم وجود بخش های متحرک و کامپکت ها هزینه نگهداری و تعمیر ناچیز و هزینه عملیاتی پایینی دارند. ماندگاری کاتالیست یا سایر مواد پکینگی بالا است [۱]. علاوه بر این، افزودن کاتالیست به صورت مستقیم و قابلیت بازپس گیری و عملیات پلاگ - آزاد از مزایای دیگر است که ستون های

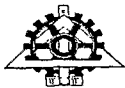
¹ Trickle bed reactor

² Fluidized bed reactor

³ Bubble column

⁴ Slurry bubble column

⁵ Fischer - Tropsch

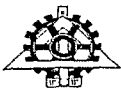


حبابی را به عنوان یک راکتور جالب و جذاب در آورده است [۳]. به علت اهمیت صنعتی و زمینه کاربرد وسیع راکتورهای ستونی حبابی، در ۲۰ سال گذشته طراحی و تغییر ساینز، بررسی هیدرودینامیک و چگونگی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر نحوه عملکرد این راکتورها بطور گسترده مورد توجه بوده است.

تحقیقات اخیر در مورد ستون های حبابی به طور مکرر بر روی موضوعات زیر تمرکز می کند: مطالعات نگهداشت گاز [۴-۱۱]، مشخصات حباب [۱۶-۳، ۱۲]، بررسی های رژیم جریان و مطالعات محاسباتی دینامیک سیال [۲۱-۱، ۱۷]، سنجش انتقال حرارت محلی و متوسط [۲۶-۲۲] و مطالعات انتقال جرم [۲۷-۳۱]. اثرات ابعاد ستون، طراحی داخلی ستون، شرایط عملیاتی مثل فشار و دما، اثر سرعت ظاهری گاز، نوع و غلظت جامد بطور معمول در این مطالعات مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. بیشتر مطالعات تجربی در جهتی انجام گرفته اند که اثرات شرایط عملیاتی، خواص فیزیکی آبی و ابعاد ستون بر روی عملکرد ستون های حبابی را تعیین کنند [۳۲]. اگرچه تحقیقات متعدد و بسیار زیادی در منابع چاپ شده موجود است اما هنوز ستون های حبابی بطور کامل قابل فهم و درک نیستند به این دلیل که اکثر این مطالعات در یک فاز (گاز یا مایع) جهت داده شده اند. به هر حال مهمترین نقطه مورد توجه باید مطالعه اثر متقابل فازها بر هم قرار گیرد [۳۳].

۱-۱) کاربرد راکتورهای ستون حبابی در بیوفرایندها

مهمترین زمینه کاربرد ستون های حبابی استفاده آنها به عنوان بیوراکتورها است که بوسیله استفاده از میکروارگانیزم ها محصولات صنعتی با ارزشی مانند آنزیمها، پروتئین ها، آنتی بیوتیک ها و غیره تولید می شود. چندین تحقیق بیوشیمی اخیر که در آنها از یک ستون حبابی به عنوان یک بیوراکتور استفاده شده است در جدول (۱-۱) ارائه شده است.



جدول (1-1) کاربردهای بیوشیمیایی راکتورهای ستونی حبابی

Bioproduct	Biocatalyst	Reference
Thienamycin	<i>Streptomyces cattleya</i>	[34]
Glucoamylase	<i>Aureobasidium pullulans</i>	[35]
Acetic acid	<i>Acetobacter aceti</i>	[36]
Monoclonal antibody	Hybridoma cells	[37]
Plant secondary metabolites	<i>Hyoscyamus muticus</i>	[38]
Taxol	<i>Taxus cuspidate</i>	[39]
Organic acids (acetic, butyric)	<i>Eubacterium limosum</i>	[40]
Low oxygen tolerance	<i>Arabidopsis thaliana</i>	[41]
Ethanol fermentation	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	[42]

Arcuri و همکاران [۳۲] با استفاده از *Streptomyces cattleya* تولید *Thienamycin* را در یک بیوراکتور ستون حبابی که بصورت پیوسته عمل می کرد مورد مطالعه قرار دادند. Federici و همکاران تولید *Glucoamylase* را بوسیله *Acetobasidium pullulans* انجام دادند. Sun & Furusaki [۳۶] تولید اسید اسیتیک در ستون های حبابی با استفاده از *Acetobacter aceti* مورد تحقیق قرار دادند. Rodrigues [۳۷] گزارش کرد که با کشت سلول های *Hybridoma* در یک راکتور ستون حبابی *Monoclonal antibody* را به مقدار ۵۰۳ میکرو گرم بر لیتر روز تولید کرده است. Bordonaro & Curis [۳۸] یک راکتور ستون حبابی به حجم ۱۵ لیتر جهت تولید کشت میکروب *Hyoscyamus muticus* با متابولیسم ثانویه طراحی کردند. Son و همکاران [۳۹] یک بیوراکتور جدید را برای تولید *Taxol* بوسیله *Taxus cuspidate* گسترش دادند و در انواع گوناگونی از بیوراکتورها سلول ها را با هم ترکیب کردند تا چگونگی رشد را بیازمایند. Chang و همکاران [۴۰] *Eubacterium limosum* را بر روی منوکسیدکربن کشت کردند تا اسید آلی تولید کنند. Shiao و همکاران [۴۱] میزان تحمل *Arabidopsis thaliana* با ریشه های کرکدار را در شرایط کمبود اکسیژن در راکتور ستون حبابی بررسی کردند. اخیراً مطالعه ای که با هدف تولید یک محصول بیولوژیکی انجام نگردیده، بلکه در عوض به بررسی مشخصه های هیدرودینامیکی و انتقال حرارت در ستون حبابی و در حضور میکروارگانیسم ها پرداخته است بوسیله Prakash و همکاران انجام شده است [۳]. آنها از یک سوسپانسیون متشکل از سلول های مخمر (*Saccharomyces cerevisiae*) به عنوان فاز جامد در سیستم آب - هوا استفاده کردند. به عنوان مثالی دیگر می توان به مطالعات Ogbonna و همکاران