دانشکده فنی

پایان نامه کارشناسی ارشد

مطالعه تجربی و شبیه سازی عددی اثرات هندسی ناودانی بر راندمان انتقال جرم در راکتورهای دو فازی گاز– مایع به کمک دینامیک سیالاتی محاسباتی

از:

داود نوروزی

استاد راهنما:

دکتر الهیار داغبندان

اسفند ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی

گروه مهندسی شیمی

عنوان

مطالعه تجربی و شبیه سازی عددی اثرات هندسی ناودانی بر راندمان انتقال جرم در راکتورهای دو فازی گاز– مایع به کمک دینامیک سیالاتی محاسباتی

از:

داود نوروزی

استاد راهنما:

دکتر الهیار داغبندان

اساتید مشاور:

دکتر محمد علی صالحی

دکتر غلام خیاطی

اسفند ۱۳۹۰

تقدیم به:

پدر و مادر عزیز و مهربانم

تقدیر و تشکر

از همکاری، راهنمایی‌ها و مساعدت‌های آقای دکتر الهیار داغبندان که فراتر از استاد راهنما بودند تشکر می‌کنم. همچنین از راهنمایی‌ها و نظرات تخصصی اساتید مشاورم، آقایان دکتر محمد علی صالحی و دکتر غلام خیاطی سپاسگزاری می‌نمایم.

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه
فهرست شکل‌ها.....چ
فهرست جدول‌ها.....خ
چکیده فارسی.....د
چکیده انگلیسی.....ذ

فصل ۱: مقدمه **۱**
۱-۱- مقدمه..... ۲
۱-۲- انواع راکتورهای دو فازی..... ۳
۱-۳- . پارامترهای موثر در عملیات راکتورهای دو فازی..... ۵
۱-۴- کاربردهای راکتور دو فازی.....۶
۱-۵- مزایای راکتور دو فازی.....۶
۱-۶- معایب راکتور دو فازی..... ۷
۱-۷- مروری بر کارهای انجام شده..... ۷
۱-۷-۱- نتیجه گیری..... ۱۰
۱-۸- اهمیت تحقیق..... ۱۱
۱-۹- اهداف تحقیق..... ۱۱

فصل ۲: مفاهیم اولیه **۱۲**
۲-۱- مقدمه[۱۵]..... ۱۳
۲-۲- معادلات حاکم بر جریانات دو فازی[۱۵]..... ۱۵
۲-۲-۱- مقدمه..... ۱۵
۲-۲-۲- فرمول بندی معادلات دو فازی..... ۱۵
۲-۲-۳- عبارت نیروی میان فازی..... ۱۷
۲-۳- مدل سازی آشفتگی جریان دو فازی[۱۵]..... ۲۲
۲-۳-۲- همبستگی‌های سرعت (روابط سرعت)..... ۲۴
۲-۳-۳- ماندگی نوسان دار..... ۲۴
۲-۴- معادلات فاز گازی..... ۲۵
۲-۴-۲- نیروی کشش میان وجهی..... ۲۵
۲-۴-۳- انتقال انرژی از فاز گاز به فاز مایع.....۲۶
۲-۵- ماندگی گاز..... ۲۸
۲-۵-۲- پارامترهای موثر بر ماندگی گاز در راکتورهای دو فازی..... ۳۱
۲-۶- ضرایب انتقال جرم.....۳۶

۲-۶-۲- پارامترهای موثر بر ضرایب انتقال جرم در راکتورهای دو فازی ۳۷
۲-۷- دینامیک سیالاتی محاسباتی[۵۰] ۳۸
۲-۷-۱- پیش پردازنده ۳۹
۲-۷-۲- حل کننده ۳۹
۲-۷-۳- پس پردازنده ۳۹
۲-۸- مدل‌های ارائه شده برای بررسی جریان چند فازی ۴۰
۲-۸-۱- روش اولر-لاگرانژ ۴۰
۲-۸-۲- روش اولر-اولر ۴۰
۲-۹- مدل کردن آشفتگی ۴۲
۲-۹-۲- مدل اسپالارت آلماراس ۴۵
۲-۹-۳- مدل کی-اپسیلون ۴۶
۲-۹-۴- مدل کی-امگا ۴۷
۲-۹-۵- مدل تنش رینولدز ۴۸

فصل ۳: آزمایش‌ها و نتایج **۴۹**
۳-۱- مقدمه ۵۰
۳-۲- دستگاه آزمایش ۵۰
۳-۲-۲- تجهیزات ۵۱
۳-۳- روش انجام آزمایش‌ها[۵۱] ۵۴
۳-۴- محاسبات[۵۱] ۵۴
۳-۴-۱- مقدار اکسیژن جذب شده ۵۴
۳-۴-۲- انحلال پذیری اکسیژن در حالت اشباع ۵۵
۳-۴-۳- ضریب انتقال جرم حجمی اکسیژن ۵۶
۳-۴-۴- ماندگی گاز ۵۶
۳-۵- نتایج آزمایش‌ها ۵۶
۳-۵-۱- بدون ناودانی ۵۶
۳-۵-۲- ناودانی با قطر ۴ سانتیمتر ۵۹
۳-۵-۳- ناودانی با قطر ۵سانتیمتر ۶۱
۳-۶- مقایسه بین سه حالت راکتور دو فازی ۶۳
۳-۶-۱- ضریب انتقال جرم حجمی ۶۳
۳-۶-۲- ماندگی گاز ۶۶
۳-۷- نتیجه گیری ۶۸

فصل ۴: شبیه سازی با دینامیک سیالاتی محاسباتی **۶۹**
۴-۱- مقدمه ۷۰
۴-۲- دینامیک سیالاتی محاسباتی ۷۱

۴-۲-۱- مزایای دینامیک سیالاتی محاسباتی[۵۳] ۷۲
۴-۲-۲- محدودیت‌های CFD [۵۳] ۷۴
۴-۳- اجزای یک روش حل عددی ۷۵
۴-۳-۱- مراحل مدل سازی ۷۶
۴-۳-۲- فرضیات مورد استفاده ۷۶
۴-۳-۳- استراتژی تولید شبکه ۷۷
۴-۳-۴- استقلال از شبکه ۷۸
۴-۳-۵- خواص سیال ۷۹
۴-۳-۶- شرایط مرزی ۷۹
۴-۳-۷- مدل آشفتگی ۸۰
۴-۳-۸- حل عددی و گسسته سازی ۸۱
۴-۳-۹- شرایط همگرایی ۸۱
۴-۴- صحت سنجی نتایج ۸۲
۴-۵- نتایج مدل سازی ۸۳

فصل ۵: جمع‌بندی و پیشنهادها **۸۵**
۵-۱- مقدمه ۸۶
۵-۲- جمع بندی ۸۶
۵-۳- پیشنهادها ۸۸

مراجع **۸۹**

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱) راکتور ستونی حباب دار ساده ۳
شکل (۱-۲) راکتور دو فازی با گردش جریان داخلی ۴
شکل (۱-۳) راکتور دو فازی با گردش با جریان خارجی ۵
شکل (۲-۱) ارتباط بین تعداد سلول‌های شبکه و عدد Re در روش‌های مختلف عددی[۵۴] ۴۳
شکل (۳-۱) راکتور دو فازی استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها ۵۱
شکل (۳-۲) کمپرسورهای استفاده شده برای هوادهی ۵۱
شکل (۳-۳) رواترهای استفاده شده برای اندازه گیری دبی هوای ورودی ۵۲
شکل (۳-۴) ناودانی استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها ۵۳
شکل (۳-۵(توزیع کننده های گاز استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها ۵۳
شکل (۳-۶) . تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی با دبی هوای ورودی برای سه نوع توزیع کننده گاز ۵۸
شکل (۳-۷) تغییرات ماندگی گاز با شدت جریان هوا برای سه نوع توزیع کننده ۵۸
شکل (۳-۸) نمودار تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی با شدت جریان هوا به تفکیک نوع توزیع کننده گاز ۶۰
شکل (۳-۹) نمودار تغییرات ماندگی گاز با شدت جریان هوا به تفکیک نوع توزیع کننده گاز برای راکتور با ناودانی با قطر ۴ سانتیمتر ۶۰
شکل (۳-۱۰) نمودار تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی با شدت جریان هوا برای راکتور با ناودانی با قطر ۵ سانتیمتر ۶۲
شکل (۳-۱۱) نمودار تغییرات ماندگی گاز با شدت جریان هوا به تفکیک نوع توزیع کننده گاز برای راکتور با ناودانی به قطر ۵ سانتیمتر ۶۲
شکل (۳-۱۲) نمودار تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی با شدت جریان هوا با توزیع کننده آنتنی برای راکتور دو فازی ۶۳
شکل (۳-۱۳) نمودار تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی با شدت جریان هوا با توزیع کننده صلیبی ۶۴
شکل (۳-۱۴) نمودار تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی با شدت جریان هوا با توزیع کننده میله ای برای راکتور دو فازی ۶۵
شکل (۳-۱۵) نمودار تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی با شدت جریان هوا با توزیع کننده تک نازلی برای راکتور دو فازی ۶۵

شکل (۳-۱۶) نمودار تغییرات ماندگی گاز با شدت جریان هوا برای سه حالت برای راکتور دو فازی با توزیع کننده آنتنی..... ۶۶
شکل (۳-۱۷) نمودار تغییرات ماندگی گاز با شدت جریان هوا برای راکتور دو فازی با توزیع کننده صلیبی ۶۷
شکل (۳-۱۸) نمودار تغییرات ماندگی گاز با شدت جریان هوا برای راکتور دو فازی با توزیع کننده میله ای..... ۶۷
شکل (۳-۱۹) نمودار تغییرات ماندگی گاز با شدت جریان هوا برای راکتور دو فازی با توزیع کننده تک نازلی..... ۶۸
شکل (۴-۱) (الف) هندسه مدل و شرایط مرزی. (ب) شبکه ایجاد شده برای مدل سازی..... ۸۰
شکل (۴-۲) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیه سازی ۸۳
شکل (۴-۳) تغییرات سرعت گاز پس از شروع هوادهی در راکتور..... ۸۳
شکل (۴-۴) تغییرات کسر حجمی فاز گاز پس از شروع هوادهی..... ۸۴

فهرست جدول‌ها

جدول (۲-۱) روابط ارائه شده برای ماندگی گاز ۳۰
جدول (۲-۲) روابط تجربی برای پیش بینی ضرایب انتقال جرم ۳۷
جدول (۳-۱) نتایج آزمایش‌ها برای راکتور بدون ناودانی ۵۷
جدول (۳-۲) نتایج آزمایش‌های مربوط به راکتور با ناودانی با قطر ۴ سانتیمتر ۵۹
جدول (۳-۳) نتایج مربوط به آزمایش‌ها راکتور دو فازی با ناودانی با قطر ۵ سانتیمتر ۶۱
جدول (۴-۱) بررسی استقلال از شبکه ۷۸
جدول (۴-۲) خواص سیال‌های استفاده شده برای شبیه سازی ۷۹

چکیده

مطالعه تجربی و شبیه سازی عددی اثرات هندسی ناودانی بر راندمان انتقال جرم در راکتورهای دو فازی گاز- مایع به کمک دینامیک سیالاتی محاسباتی

داود نوروزی

راکتورهای دو فازی در ساده‌ترین حالت به صورت یک استوانه‌ی عمودی است، که در داخل آن پر از مایع بوده و فاز گاز از قسمت زیرین توسط یک توزیع کننده وارد راکتور می‌شود. این راکتورها به دلیل ساختار ساده و بالا بودن میزان انتقال جرم و حرارت به طور گسترده در صنایع شیمیایی، پتروشیمی، متالوژی و بیولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این جا از راکتورهای دو فازی با گردش جریان داخلی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. از محلول سولفیت سدیم برای فاز مایع و از هوا برای فاز گاز استفاده شده است. برای بررسی اثرات هندسی ناودانی بر میزان انتقال جرم از دو ناودانی با قطر ۴ و ۵ سانتی متر استفاده شده است. برای بررسی انتقال جرم، در اینجا ضریب انتقال جرم حجمی اکسیژن محاسبه شده است. پارامتر ماندگی گاز نیز به دلیل تأثیر بر میزان انتقال جرم بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان دهنده این است که با افزایش قطر ناودانی انتقال جرم و ماندگی گاز افزایش می‌یابد. آزمایش‌ها با تغییر نوع توزیع کننده گاز نیز انجام شده است که نتایج نشان دهنده این است که با افزایش تعداد سوراخ‌های توزیع کننده انتقال جرم و ماندگی گاز افزایش می‌یابد. برای بررسی بیشتر، راکتور با دینامیک سیالاتی محاسباتی شبیه سازی شده است. تولید هندسه مدل با نرم افزار Gambit 2.3.16 و مدل سازی با نرم افزار Fluent 6.3.26 انجام شده است. نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد و حداکثر ۱۰ درصد خطا دارد.

کلمات کلیدی: راکتور دو فازی، انتقال جرم، ناودانی، ماندگی گاز، دینامیک سیالاتی محاسباتی

Abstract

Experimental study and numerical simulation of geometric effects of downcomer on the efficiency of mass transfer in airlift reactors with computational fluid dynamics

Airlift reactor in the simplest form is a vertical cylinder that the inside was filled with liquid and gas phase is inserted from the underside in reactor by a distributor. These reactors are widely used in chemical industry, petrochemical, metallurgy, and biology due to the simple structure and high level of heat and mass transfer. Here the two-phase reactor with internal circulation has been used for testing. From Sodium sulfite solution is used liquid phase and air to gas phase. To examine the effects of draft-tube geometry on mass transfer rates of both is used draft-tube 4 and 5 cm in diameter. For mass transfer examine, has been calculated the volumetric oxygen mass transfer coefficient here. In this research the gas hold up is investigated for affecting on mass transfer. Test results show that mass transfer and gas hold up was increasing with increase the draft-tube diameter. Tests have been done by changing the type of gas distributor that the results are illustrated that mass transfer and gas hold up are increase with the number of distributor holes increasing. For further review, the reactor is simulated using computational fluids dynamics. Geometry of the model with Gambit2.3.16 software and modeling with Fluent 6.3.26 software has been done. Simulation results match well with experimental results and the maximum error is 10%.

Keywords: Airlift Reactor, Mass Transfer, Draft-tube, Gas Hold up, Computational Fluids Dynamics

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- مقدمه

هدف تحقیق حاضر انجام یک بررسی جامع و پر دامنه از آنالیز تجربی و شبیه سازی اثرات هندسی ناودانی در راکتور دو فازی گاز-مایع بر راندمان انتقال جرم در حالت دو بعدی و نمایش کارایی این روش آنالیز در انجام یک شبیه سازی دقیق به کمک دینامیک سیالات محاسباتی است. راکتورهای دو فازی (ستون حباب دار) از جمله راکتورهایی هستند که برای انتقال جرم و یا واکنش شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این راکتورها یک یا چند گاز در تماس با فاز مایع قرار گرفته و با یکی از اجزای آن واکنش می‌دهد و یا انتقال جرم بین فازها رخ می‌دهد. راندمان انتقال جرم در این نوع راکتورها از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا در اغلب فرآیندهای شیمیایی هدف از تماس گاز و مایع انتقال اجزا از یک فاز به فاز دیگر است. بدین جهت تحقیقات و ارائه‌ی شرایطی که راندمان انتقال جرم را در این نوع راکتورها افزایش دهد، آغاز شد. در ادامه کارهای قبلی صورت گرفته، بررسی انتقال جرم و ماندگی گاز در این نوع راکتورها هدف تحقیق حاضر است.

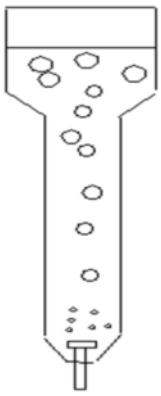
در بخش تجربی برای انجام آزمایش‌ها از یک راکتور دو فازی با گردش جریان داخلی استفاده شده است. از هوا برای فاز گاز و از محلول سولفیت سدیم برای فاز مایع استفاده شده است. برای بررسی راندمان انتقال جرم و ماندگی گاز از دو ناودانی با قطر متفاوت استفاده شده و آزمایش‌ها در شدت‌های مختلف هوادهی و با توزیع کننده های گاز متفاوت تکرار شده است. شرح کامل دستگاه آزمایش، نحوه انجام آزمایش‌ها و نتایج حاصل، در فصل سوم آمده است.

بررسی تجربی فرآیندها و انجام آزمایش‌ها برای آن مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است و علاوه بر آن انجام آزمایش در همه شرایط امکان پذیر نیست. از این رو در سال‌های اخیر استفاده از دینامیک سیالاتی محاسباتی برای بررسی هیدرودینامیک جریان و پارامتر های موثر بر انتقال جرم در راکتور های دو فازی افرایش یافته است. در تحقیق حاضر نیز راکتور دو فازی که برای آزمایش‌ها استفاده شده است با ابزار دینامیک سیالاتی محاسباتی شبیه سازی شده است. از نرم افزار Gambit برای رسم هندسه و شبکه بندی راکتور و از نرم افزار Fluent برای تعریف فیزیک مسئله، اعمال شرایط مرزی، اجرای مدل و تحلیل نتایج استفاده شده است.

۱-۲- انواع راکتورهای دو فازی

یکی از مهم‌ترین تجهیزاتی که در فرآیندهای تولید مواد شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، راکتورها یا به عبارت دیگر محفظه انجام واکنش است. در گستره علم شیمی یک مهندس شیمی و یا یک شیمیدان با انواع راکتورهای شیمیایی اعم از راکتورهای مخلوط شونده، لوله ای و ... سرو کار دارد و از این تجهیزات جهت تولید فراورده های شیمیایی استفاده می‌کند.

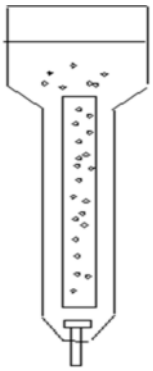
راکتورهای دو فازی از جمله راکتورهایی هستند که در سال‌های اخیر برای انجام عمل انتقال جرم و یا واکنش شیمیایی به کار گرفته شده‌اند..در این راکتورها یک یا چند گاز در تماس با فاز مایع قرار گرفته و با یکی از اجزای آن واکنش می‌دهد و یا انتقال جرم بین فازها رخ می‌دهد. این راکتورها در ساده‌ترین شکل به صورت یک استوانه عمودی بوده که در آن فاز گاز توسط یک توزیع کننده که در زیر ستون قرار گرفته از پایین به داخل فاز مایع دمیده می‌شود. فاز مایع ممکن است به صورت مداوم و یا غیر مداوم هم جهت و یا خلاف جهت گاز حرکت کند. در این گونه راکتورها فاز گاز فاز پراکنده و فاز مایع فاز پیوسته است..در این نوع از راکتورها به منظور کاهش سرعت خطی گاز و تسهیل جداسازی گاز از مایع و نیز کاهش تولید کف قسمت فوقانی ستون را پهن‌تر از قسمت زیرین آن می‌سازند. در این گونه ستون‌ها نسبت طول به قطر متفاوت و به طور معمول بین ۳ تا ۶ است ولی تا نسبت ۱۰ نیز استفاده می‌شود. این نوع راکتورها به طور گسترده در صنایع شیمیایی و بیوشیمیایی استفاده می‌شود. در شکل (۱-۱) تصویر شماتیک راکتور ستونی حباب دار آورده شده است.



شکل (۱-۱) راکتور ستونی حباب دار ساده

از اواسط سال ۱۹۷۰ توجه زیادی به این نوع راکتورها معطوف شد و به موازات کاربرد وسیع راکتورهای دو فازی در صنایع مختلف، اصلاحاتی برای بهبود عملکرد این نوع راکتورها انجام شد.

در کاربرد های صنعتی با توجه به ملاحظات مهندسی انواع مختلفی از راکتورهای دو فازی مورد استفاده قرار می‌گیرند که عمدتاً در تجهیزات درونی و نحوه حرکت سیال اختلاف دارند. در تحقیقات مختلف سعی شده است که با اضافه نمودن تجهیزات انتقال جرم را در این نوع راکتورها افزایش دهند. امروزه با توجه به اصلاحات انجام گرفته راکتورهای دو فازی حباب دار به دو دسته کلی راکتور با گردش جریان داخلی[۱] و گردش خارجی[۲] جریان تقسیم شده‌اند. در راکتور دو فازی با گردش جریان داخلی که در شکل (۲) تصویر شماتیک آن نشان داده شده است برای گردش جریان در داخل راکتور یک لوله داخلی (ناودانی) هم محور با ستون اصلی در راکتور نصب می‌شود و راکتور را به دو قسمت بالا رونده[۳] و پایین رونده[٤] تقسیم می‌کند که این دو قسمت از بالا و پایین با هم ارتباط دارند. در این نوع راکتورها اختلاف ماندگی گاز بین دو قسمت سبب گردش مایع می‌شود.



شکل (۱-۲) راکتور دو فازی با گردش جریان داخلی

در راکتور دو فازی با گردش جریان خارجی که در شکل (۳) تصویر شماتیک آن نشان داده شده است، دو قسمت بالا رونده و پایین رونده کاملاً از هم جدا هستند و ناودانی به موازات ستون اصلی به آن متصل می‌شود. عامل گردش جریان در این نوع راکتورها مانند راکتورهای با گردش داخلی اختلاف ماندگی گاز در دو قسمت راکتور

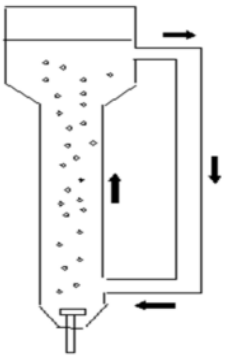
[1] Internal-loop airlift reacto

[2] Externa-loop airlift rector

[3] Riser

[4] Downcomer

است. در این نوع راکتورها در برخی موارد برای گردش بهتر جریان و افزایش انتقال جـرم از دو توزیـع کننـده گـاز استفاده می‌شود که یکی از آن‌ها در قسمت ناودانی نصب می‌شود. میزان انتقـال جـرم در راکتورهـای دو فـازی بـه شکل هندسی ستون، ابعاد ناودانی، ماندگی گاز، رژیم جریان و اندازه حباب‌ها بستگی دارد. در تحقیق حاضـر بـرای انجام آزمایش‌ها و بررسی انتقال جرم در از راکتورهای دو فاز با گردش جریان داخلی استفاده شده است.



شکل (۱-۳) راکتور دو فازی با گردش با جریان خارجی

۱-۳- . پارامترهای موثر در عملیات راکتورهای دو فازی

پارامترهای موثر بر راکتورهای دو فازی به دو دسته کلی متغیر های عملیاتی و متغیرهای طراحی تقسیم مـی‌شـود.

متغیر های عملیاتی عبارتند از:

- سرعت جریان گاز
- سرعت جریان مایع
- ترکیبات و دمای خوراک
- فشار

و همچنین متغیر های طراحی که عبارتند از:

- نوع دمنده
- هندسه‌ی راکتور و ابعاد آن
- نوع و اندازه‌ی غلظت کاتالیست در راکتورهای سه فازی

و نیز خواص فیزیکی و ترمودینامیکی مانند:

- سینتیک واکنش
- تشکیل حباب و صعود
- ماندگی گاز و توزیع آن
- رژیم جریان
- سطح موثر انتقال جرم فاز گاز و مایع

۱-۴- کاربردهای راکتور دو فازی

راکتور دو فازی در صنایع شیمیایی و بیولوژیکی از جمله در تخمیر های هوازی و عملیات تصفیه‌ی فاضلاب و عملیات مشابه به طور گسترده استفاده می‌شوند. عمده کاربرد های راکتور های دو فازی عبارتند از:

- سنتز متانول
- سنتز فیشر
- هیدروژناسیون روغن‌ها
- تصفیه فاضلاب
- آلکیل دار کردن متانول و بنزن
- تولید بیو مس
- تولید پروتئین‌های تک یاخته

۱-۵- مزایای راکتور دو فازی

- به دلیل تنش‌های کم موجود در داخل راکتور این نوع راکتور برای کشت میکروب و سلول‌های گیاهی مناسب است.
- عدم تحرک مکانیکی اجزا که باعث کاهش هزینه های نگهداری دستگاه شده است.
- هزینه ساخت پایین