بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه اصفهان

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی

مطالعه آزمایشگاهی و مدلسازی ریاضی جذب CO_2 در یک راکتور بستر فورانی

استادان راهنما:

دکتر محمد صادق حاتمی پور

دکتر امیر رحیمی

پژوهشگر:

محمد رضا حق نگهدار

مهرماه ۱۳۸۸

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکـارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامـه متعلق به دانشگاه اصفهان است.

دانشگاه اصفهان

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی آقای محمد رضا حق نگهدار تحت عنوان

مطالعه آزمایشگاهی و مدل سازی ریاضی جذب CO_2 در یک راکتور بستر فورانی

در تاریخ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	با مرتبه‌ی علمی	امضا
۲- استاد مشاور پایان نامه	با مرتبه‌ی علمی	امضا
۳- استاد داور داخل گروه	با مرتبه‌ی علمی	امضا
۴- استاد داور خارج از گروه	با مرتبه‌ی علمی	امضا

امضای مدیر گروه

اکنون که فصلی مهم و مؤثر از دفتر زندگیم به پایان می‌رسد بر خود لازم می‌دانم تشکر و قدردانی خود را از تمام کسانی که مرا در طول این مرحله یاری کرده‌اند، ابراز دارم. در ابتدا از پدر گرانقدرم که تکیه‌گاه محکمی برای من در تمام مراحل زندگیم بوده‌اند و مادر مهربانم که همواره غریق دریای رحمتش بوده‌ام، از صمیم قلب سپاسگزارم. از اساتید راهنمای عالیقدرم جناب آقای دکتر محمد صادق حاتمی پور و جناب آقای دکتر امیر رحیمی تشکر را دارم که در طول انجام این پایان‌نامه بنده را از نظرات خود محروم نکردند.

در ادامه از تمام عزیزانی که مرا در طول این رساله یاری کردند سپاس‌گزارم که در این میان باید از آقای مهندس محسن غلامی و آقای مهندس احمد میرزائی صمیمانه قدردانی کنم.

به امید آنکه در این فرصت کوتاه یادگیری توانسته باشم سرمستی و نشاط برآمده از آموختن را در خود پایدار و استوار گردانم و باشد که اندیشه‌هایمان هرگز از شراب ناب آموختن تهی نگردد.

تقدیم به:

مادرم اسوه فداکاری و دلسوزی

چکیده:

با افزایش نگرانی‌های مربوط به گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوا و تشدید قوانین زیست‌محیطی مربوط به میزان انتشار دی‌اکسیدکربن توسط صنایع مختلف، لزوم بررسی دقیق‌تر روش جذب همراه با واکنش گاز، بعنوان یکی از روشهای اساسی و کاربردی در شرایط کنونی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از بسترهای فورانی پودر– ذره در جداسازی دی‌اکسیدکربن از گازهای حاصل از احتراق یکی از روش‌های جدیدی است که به تازگی مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر مطالعه آزمایشگاهی به همراه مدلسازی ریاضی فرآیند جذب همراه با واکنش دی‌اکسیدکربن در دوغاب هیدروکسیدکلسیم در یک راکتور بستر فورانی پودر– ذره مورد بررسی قرار گرفته است.

ابتدا در بخش مطالعه آزمایشگاهی با استفاده از بستر فورانی موجود آزمایش‌های متعددی جهت بررسی تاثیر پارامترهای مختلف عملیاتی از قبیل نسبت مولی جاذب به جذب شونده، غلظت دی‌اکسیدکربن در جریان گاز ورودی، ارتفاع بستر، سرعت ظاهری جریان گاز، نوع جاذب مورد استفاده و اختلاف دمای نزدیکی به دمای اشباع آدیاباتیکی بر عملکرد راکتور بررسی شده و سپس در بخش مدلسازی با استفاده از قوانین بقا و بر مبنای مدل هیدرودینامیکی جریان لوله‌ای، یک مدل ریاضی در حالت عملکرد غیرهمدمای بستر جهت بررسی پدیده‌های انتقال جرم و حرارت درون راکتور و تاثیر آن‌ها بر بازده جداسازی راکتور توسعه داده شده است. دقت مدل ارائه شده در بخش نتایج با مقایسه داده‌های حاصل از مدل و نتایج آزمایشگاهی در نمودارهای جداگانه بررسی شده است.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در این روش بازده جداسازی دی‌اکسیدکربن تا بیش از ۵۶ ٪ می باشد همچنین مشخص گردید که سرعت ظاهری جریان گاز، نوع جاذب مورد استفاده و اختلاف دمای نزدیکی به دمای اشباع آدیاباتیکی تاثیر قابل توجهی بر میزان بازده جداسازی دارند، در حالی‌که نسبت مولی جاذب به جذب شونده، غلظت دی‌اکسیدکربن در جریان گاز ورودی و ارتفاع بستر تاثیر چندانی بر میزان بازده جداسازی دی‌اکسیدکربن ندارند.

همچنین در این تحقیق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده معادله سرعت واکنش CO_2 با $Ca(OH)_2$ برای سیستم فوق تصحیح شد. نتایج مدل با استفاده از سینتیک تصحیح شده تطابق بسیار مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: جداسازی دی‌اکسید کربن، مدلسازی ریاضی، بستر فورانی، راندمان جداسازی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول آشنایی با اصول عملکرد و کاربردهای راکتور بستر فورانی

۱-۱) اهمیت و روشهای جداسازی دی اکسیدکربن ۱

۱-۱-۱) جذب دی اکسیدکربن توسط محلول سود ۲

۱-۱-۲) جذب دی اکسیدکربن توسط دوغاب آهک ۳

۱-۱-۳) محلول نمکهای بازی ۳

۱-۱-۴) فرآیند کربنات پتاسیم داغ ۴

۱-۱-۵) محلول آمونیاک ۵

۱-۳) شرایط لازم برای فورانی شدن ۱۰

۱-۴) پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد بسترهای فورانی ۱۲

۱-۴-۱) حداقل سرعت فوران ۱۲

۱-۴-۲) حداکثر ارتفاع قابل فوران ۱۳

۱-۴-۳) قطر ناحیه فوران ۱۴

۱-۴-۴) ارتفاع فواره ۱۵

۱-۴-۵) کسر خالی در ناحیه حلقوی ۱۵

۱-۴-۶) کسر خالی در نواحی فوران و فواره ۱۵

۱-۴-۵) افت فشار ۱۶

فصل دوم مروری بر مطالعات انجام شده قبلی

۲-۱) مدل ماتور و لیم (۱۹۷۴) ۱۸

۲-۱-۱) فرضیات مدل ماتور و لیم (۱۹۷۶) ۱۹

۲-۲) مدل لیم و ماتور (۱۹۷۶) ۲۰

۲-۳) مدل پیسی نیسی و همکاران (۱۹۷۹) ۲۰

۲-۳-۱) فرضیات مدل پیسی نیسی و همکاران (۱۹۷۹) ۲۱

۲-۴) مدل اسمیت و همکاران (۱۹۸۲) ۲۱

۲-۴-۱) فرضیات مدل اسمیت و همکاران (۱۹۸۲) ۲۱

عنوان **صفحه**

۲-۵) مدل ویسواناتان (۱۹۸۴)..... ۲۲

۲-۵-۱) فرضیات مدل ویسواناتان (۱۹۸۴)..... ۲۲

۲-۶) مدل لیم وهمکاران (۱۹۹۱)..... ۲۳

۲-۸) مدل سانچز و همکاران (۲۰۰۰)..... ۲۴

۲-۹) مدلسازی های دینامیکی..... ۲۵

۲-۱۰) مطالعات آزمایشگاهی..... ۲۵

فصل سوم مدلسازی ریاضی

۳-۱) تعریف درصد تبدیل (بازده جداسازی)..... ۲۸

۳-۲) توصیف فرآیند..... ۳۰

۳-۲-۱) مکانیسم و مراحل جذب دی اکسیدکربن در دوغاب هیدروکسید کلسیم..... ۳۲

۳-۳) سینتیک واکنش نیمه خشک دی اکسیدکربن و هیدروکسیدکلسیم..... ۳۳

۳-۴) معرفی مدل دینامیکی جریان لوله های..... ۳۴

۳-۴-۱) مسیر جریان گاز..... ۳۶

۳-۵) فرضیات مدل..... ۴۰

۳-۶) معادلات حاکم..... ۴۲

۳-۶-۱) معادلات موازنه جرم ناحیه فوران..... ۴۲

۳-۶-۲) معادلات موازنه انرژی ناحیه فوران..... ۴۷

۳-۶-۲) معادلات موازنه جرم ناحیه فواره..... ۴۹

۳-۶-۳) معادلات موازنه انرژی ناحیه فواره..... ۵۰

۳-۶-۴) معارلات موازنه جرم ناحیه حلقوی..... ۵۱

۳-۶-۵) معادلات موازنه انرژی در ناحیه حلقوی..... ۵۳

۳-۷) تعیین پارامترهای مورد نیاز در مدلسازی..... ۵۴

۳-۷-۱) ویسکوزیته مخلوط گازی..... ۵۴

۳-۷-۲) ضریب نفوذ بخارآب در مخلوط گازی..... ۵۶

۳-۷-۳) ظرفیت حرارتی مخلوط گازی..... ۵۶

عنوان **صفحه**

۳-۷-۴) دانسیته مخلوط گازی ۵۷

۳-۷-۵) آنتالپی واکنش ۵۷

۳-۷-۶) ضرایب انتقال جرم و حرارت ۵۷

۳-۸) حل مدل و محاسبات عددی ۵۸

۳-۸-۱) خلاصه معادلات حاکم مدل ۵۸

۳-۸-۲) شرایط مرزی ۵۹

۳-۸-۳)حل معادلات حاکم ۶۱

فصل چهارم مطالعات آزمایشگاهی

۴-۱) مواد شیمیایی مورد استفاده ۶۲

۴-۱-۱) اکسید کلسیم ۶۲

۴-۱-۲) هیدروکسید سدیم ۶۲

۴-۱-۳) دی اکسیدکربن ۶۳

۴-۲) تجهیزات و دستگاه های مورد استفاده ۶۳

۴-۲-۱) دستگاه آنالیزور دی اکسیدکربن ۶۳

۴-۲-۲) پمپ پریستالیک ۶۴

۴-۳) معرفی چیدمان مورد استفاده ۶۵

۴-۳-۱) راکتور ۶۵

۴-۳-۲) ذرات جامد ۶۵

۴-۳-۳) جریان گاز ورودی ۶۶

۴-۳-۴) ترموکوپل ۶۷

۴-۳-۵) سیستم کنترل ۶۷

۴-۳-۶) مخزن دوغاب ۶۸

۴-۳-۷) سیستم گرمکن ۶۸

۴-۴) روند آمادهسازی و انجام آزمایشات ۶۸

عنوان **صفحه**

۴-۵) نکات قابل توجه در حین آزمایش ۶۸

۴-۶) نتایج مطالعه آزمایشگاهی ۷۰

۴-۶-۱) تعریف اختلاف دمای نزدیکی به دمای آدیاباتیک اشباع (ΔT) ۷۱

۴-۶-۲) تاثیر اختلاف دمای نزدیکی به دمای آدیاباتیک اشباع (ΔT) ۷۲

۴-۶-۳) تاثیر نسبت مولی جاذب به جذب شونده $\frac{Ca}{C}$ ۷۳

۴-۶-۴) تاثیر غلظت ورودی دی اکسیدکربن ۷۴

۴-۶-۵) تاثیر زمان ماند ظاهری جریان گاز ۷۵

۴-۶-۶) مقایسه بین جاذب های مورد استفاده ۷۷

فصل پنجم نتایج و بحث

۵-۱) ارزیابی هیدرودینامیکی مدل ۷۹

۵-۱-۱) بررسی مکان هندسی جریان لوله ها ی محاسبه شده ۸۰

۵-۲) تاثیر شرایط عملیاتی و پارامترهای ساختاری بر بازده جداسازی راکتور ۸۳

۵-۲-۱) تاثیر افزایش ارتفاع ساکن بستر ۸۳

۵-۲-۲) تاثیر افزایش سرعت ظاهری جریان گاز ۸۴

۵-۲-۳) تاثیر افزایش نسبت مولی جاذب به جذب شونده ($\frac{Ca}{C}$) ۸۵

۵-۲-۴) تاثیر افزایش اختلاف دمای نزدیکی به دمای اشباع آدیاباتیک (ΔT) ۸۷

۵-۲-۵) تاثیر افزایش غلظت دی اکسیدکربن در خوراک راکتور ۸۷

۵-۳) اصلاح معادله سرعت ۹۰

۵-۴) نتایج حاصل از مدلسازی با استفاده از معادله سرعت اصلاح شده ۹۰

۵-۴-۱) تاثیر افزایش نسبت مولی جاذب به جذب شونده ($\frac{Ca}{C}$) ۹۱

۵-۴-۲) تاثیر افزایش سرعت ظاهری جریان گاز ۹۲

۵-۴-۳) تاثیر افزایش غلظت دی اکسیدکربن در خوراک راکتور ۹۳

۵-۴-۴) تاثیر افزایش اختلاف دمای نزدیکی به اشباع (ΔT) ۹۴

۵-۵) نتیجه گیری ۹۵

عنوان **صفحه**

۵-۶) پیشنهادات ۹۶
منابع و مآخذ: ۹۷

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل(۱-۱). نمایی از فرآیند جذب دی اکسیدکربن توسط محلول سود سوزآور ۳

شکل(۱-۲). نمایی از فرآیند جذب دی اکسیدکربن توسط دوغاب آهک.....۵

شکل(۱-۳). نمایی از فرآیند جذب دی اکسیدکربن توسط کربنات پتاسیم.....۶

شکل(۱-۴). نمایی از فرآیند جذب دی اکسیدکربن توسط آمونیاک ۷

شکل(۱-۵). نمایی از فرآیند جذب دی اکسیدکربن توسط آلکانول آمین ها ۷

شکل(۱-۶). نمای شماتیک دو بستر سیالی و فورانی ۸

شکل(۱-۷). مسیر گردش ذرات در یک بستر فورانی.....۹

شکل(۱-۸). دیاگرام فازی برای سیستم‌های گاز-جامد ۱۳

شکل(۱-۹). افت فشار در بستر فورانی بر حسب شدت جریان گاز.....۱۶

شکل(۲-۱). دیاگرام مدل یک بعدی همدما برای راکتور بستر فورانی.....۱۹

شکل(۲-۲). نحوه تقسیمات راکتور در مدل سانچز و همکاران.....۲۴

شکل(۳-۱). شمای فرآیند حذف CO_2 توسط آهک هیدراته (بدون ورود و خروج ذرات).....۳۰

شکل(۳-۲). شمای فرآیند حذف CO_2 توسط آهک هیدراته (همراه با ورود و خروج ذرات).....۳۱

شکل(۳-۳). تقسیم بندی مناطق مختلف راکتور بر مبنای مدل جریان لوله ۳۵

شکل(۳-۴). نحوه تقسیمات و المان انتخابی برای محاسبات مکان هندسی نقاط مرزی هر جریان ۳۶

شکل(۳-۵). خطوط جریان محاسبه شده توسط لیم و ماتور.....۳۸

شکل(۳-۶). خطوط جریان بدست آمده به روش متوسط زمانی ۳۸

شکل(۳-۷). نتایج شبیه‌سازی خطوط جریان ذرات جامد در ناحیه حلقوی یک راکتور بستر فورانی
تماما استوانه ای با روش DEM ۳۹

شکل(۳-۸). نتایج شبیه‌سازی حرکت ذرات جامد در یک راکتور بستر فورانی نیمه مخروطی ۳۹

شکل(۳-۹). المان انتخابی برای ناحیه فوران.....۴۲

شکل(۳-۱۰). المان انتخابی برای ناحیه فواره.....۴۸

شکل(۳-۱۱). المان انتخابی برای ناحیه حلقوی.....۵۱

شکل(۴-۱). تصویر دستگاه آنالیزور دی‌اکسیدکربن.....۶۴

شکل(۴-۲). تصویر پمپ پریستالیک... .....۶۶

شکل(۴-۳). تصویر از نمای روبروی چیدمان مورد استفاده..... .....۶۷

عنوان **صفحه**

شکل(۴-۴). تصویر از نمای کناری چیدمان مورد استفاده..... ۶۸

شکل(۴-۵). شماتیک چیدمان مورد استفاده..... ۷۰

شکل(۴-۶). نمودار کالیبراسیون پمپ پریستالیک برای دوغاب ۷۱

شکل(۴-۷). تعریف اختلاف دمای نزدیکی به اشباع..... ۷۲

شکل(۴-۸). نمودار تاثیر ΔT بربازده جداسازی CO_2 ..... ۷۴

شکل(۴-۹). نمودار تاثیر نسبت مولی $\frac{Ca}{C}$ بر بازده جداسازی CO_2 ..... ۷۵

شکل(۴-۱۰). نمودار تاثیر غلظت CO_2 بربازده جداسازی CO_2 ..... ۷۶

شکل(۴-۱۱). نمودار تاثیر ارتفاع بستر بر بازده جداسازی CO_2 ..... ۷۷

شکل(۴-۱۲). نمودار تاثیر سرعت گاز بر بازده جداسازی CO_2 ..... ۷۸

شکل(۴-۱۳). نمودار تاثیر استفاده از **س**ود به عنوان جاذب بر بازده جداسازی CO_2 ..... ۷۹

شکل(۵-۱). نتایج حاصل از مدلسازی مکان هندسی جریان لوله های محاسبه شده ۸۲

شکل(۵-۲). خطوط جریان حاصل از مدلسازی DEM یک بستر فورانی کاملا مخروطی CO_2 ..... ۸۳

شکل(۵-۳). خطوط جریان ذرات جامد حاصل از مدلسازی DEM یک بستر فورانی نیمه مخروطی در ناحیه حلقوی. خطوط پیوسته مربوط به مدلسازی DEM تاکچی و همکاران و خطوط خط چین پیش بینی حاصل از مدلسازی سالیوان و همکاران نمودار تاثیر استفاده از سود به عنوان جاذب بر بازده جداسازی CO_2. ..... ۸۴

شکل(۵-۴). تغییرات بازده جداسازی دی‌اکسیدکربن در راکتور با افزایش ارتفاع بستر ۸۵

شکل(۵-۵). تغییرات بازده جداسازی دی‌اکسیدکربن راکتور با افزایش سرعت گاز ۸۶

شکل(۵-۶). نمودار نتایج حاصل از مدلسازی تغییرات بازده راکتور نسبت به افزایش نسبت مولی $\frac{Ca}{C}$ ۸۷

شکل(۵-۷). نمودار نتایج مدلسازی تغییرات بازده راکتور نسبت به افزایش ΔT ۸۸

شکل(۵-۸). نمودار تاثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در خوراک راکتور..... ۸۹

شکل(۵-۹). نتایج حاصل از مدلسازی تغییرات بازده راکتور نسبت به افزایش نسبت مولی بر اساس سینتیک اصلاح شده و اصلاح نشده $\frac{Ca}{C}$..... ۹۲

شکل(۵-۱۰). تغییرات بازده جداسازی دی‌اکسیدکربن راکتور با افزایش سرعت گاز بر اساس سینتیک اصلاح

عنوان **صفحه**

شده و اصلاح نشده ۹۳
شکل(۵-۱۱). نمودار تاثیرافزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در خوراک راکتور بر اساس سینتیک اصلاح شده و اصلاح نشده.....۹۴
شکل(۵-۱۲). نمودار نتایج مدلسازی تغییرات بازده راکتور نسبت به افزایش ΔT بر اساس سینتیک اصلاح شده و اصلاح نشده.....۹۵

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول(۳-۱). جدول خلاصه معادلات حاکم مـدل ۶۰
جدول(۴-۱). مشخصات دستگاه آنالیزور دی‌اکسـیدکربن..... ۶۵
جدول(۴-۲). توزیع اندازه ی قطر ذرات جامد مورد اسـتفاده..... ۶۶
جدول(۴-۳). مشخصات، شرایط و پارامترهای انجام آزمایش..... ۷۱
جدول (۵-۱). مقایسه خطای نسبی مدل با داده‌های تجربی بر اساس سینتیک اصلاح شده و اصلاح نشده: تاثیر افزایش نسبت مولی جاذب به جذب شونده ۹۲
جدول (۵-۲). مقایسه خطای نسبی مدل با داده‌های تجربی بر اساس سینتیک اصلاح شده و اصلاح نشده: تاثیر افزایش سرعت گـاز..... ۹۳
جدول (۵-۳). مقایسه خطای نسبی مدل با داده‌های تجربی بر اساس سینتیک اصلاح شده و اصلاح نشده: تاثیر افزایش غلظت دی¬اکسیدکربن در خوراک راکتور..... ۹۴
جدول (۵-۴). مقایسه خطای نسبی مدل با داده‌های تجربی بر اساس سینتیک اصلاح شده و اصلاح نشده: تـــاثیر افـــزایش. ΔT ۹۵

نمادها

A [–]	سطح مقطع
Ar [–]	سرعت ظاهری گاز
a [m^2/m^3]	سطح مخصوص ذرات جامد به ازای واحد حجم بستر
Ca/S [–]	نسبت مولی جاذب به جذب شونده
Cp [J/kg/K]	ظرفیت حرارتی
E [–]	بازده جداسازی راکتور
D [cm^2/s]	ضریب نفوذ
d_{in} [m]	قطر اوریفیس ورودی
d_p [m]	قطر ذرات جامد
G [$kg/s/m^2$]	شار جرمی گاز
g [m/s2]	ثابت گرانش
H [m]	ارتفاع
h [$w/m^2/s$]	ضریب انتقال حرارت جابجائی
H_m [m]	حداکثر ارتفاع قابل فوران
H_{mix} [J/kg]	آنتالپی مخلوط گازی
H_v [J/kg]	آنتالپی بخار آب
H_p [J/kg]	آنتالپی ذرات جامد با آب همراه آن ها
k [$mol/m^2.s$]	ثابت سرعت واکنش
k_y [s^{-1}]	ضریب انتقال جرم
m [kg]	جرم آب موجود بر سطح ذرات جامد
Mw [kg/mol]	جرم ملکولی
n [mol/s]	دبی مولی
P [kpa]	فشار
Q [kg/s]	دبی جرمی گاز

q [w/m^2]	انتقال حرارت جابجایی
r_c [kg/m^2/s]	سرعت واکنش مصرف دی‌اکسیدکربن
r_w [kg/m^2/s]	سرعت تبخیر یا چگالش بخار آب در واحد سطح ذرات جامد
r_s [kg/m^2/s]	شعاع ذرات جامد با احتساب ضخامت آب روی آن ها
r_s [m]	شعاع ناحیه فوران
RH [–]	رطوبت نسبی فاز گاز
S [kg/s/m^2]	شار جرمی ذرات جامد
S_g [m^2/ kg]	سطح اولیه ذرات جاذب به ازای واحد جرم
R [m]	شعاع جریان لوله از محور راکتور، ثابت سینتیکی گازها
R [J/mol/K]	ثابت سینتیکی گازها
t [s]	زمان
T [K]	دما
U [m/s]	سرعت ظاهری گاز
U^* [m/s]	سرعت بی بعد گاز
U_{mf} [m/s]	حداقل سرعت سیالی شدن
U_{ms} [m/s]	حداقل سرعت فورانی شدن
U_t [m/s]	سرعت حد ذرات
W_s [g/min]	دبی جرمی دوغاب ورودی
W [–]	میزان تبدیل ذرات جاذب
X [kg/kg]	جز جرمی دی‌اکسیدکربن به ازای واحد جرم هوای خشک
V [m/s]	سرعت ظاهری ذرات جامد، حجم مولی
Y [kg/kg]	جزء جرمی بخارآب به ازای واحد جرم هوای خشک عاری از دی‌اکسید کربن
y [–]	جزء مولی
z [m]	فاصله عمودی از ورودی گاز

زیرنویس‌ها

a	منطقه حلقوی
aq	محلول
c	بستر، حالت بحرانی
f	منطقه فواره
g	فاز گاز
in	ورودی
l	مایع
p	ذرات جامد
pg	جامد- گاز
r	در راستای شعاع
s	منطقه فوران، فاز جامد
t	کل
w	آب
0	ورودی

حروف یونانی

ΔT [°C]	اختلاف دمای نزدیکی به دمای اشباع آدیاباتیک
Δh_c [°C]	آنتالپی واکنش
η [°C]	ممان دو قطبی بر حسب دبای
ω [–]	ضریب بی مرکزی
μ [Pa s]	ویسکوزیته
θ [degree]	زاویه قسمت مخروطی بستر
ρ [kg/m^3]	چگالی