

مدل سازی حذف سولفید هیدروژن توسط کاتالیست محلول کیلات آهن در برج جذب تماس آشفته

پژوهش‌نفت

سال بیستم

شماره ۶۲

صفحه ۹۳-۸۴، ۱۳۸۹

خالد فرصت*^۱، جعفر صادق زاده اهری^۱ و مریم سعدی^۲

۱- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده گاز

۲- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده مهندسی توسعه

forsatk@ripi.ir

(محلول کاتالیست)، ارتفاع استاتیکی و قطر آکنه‌ها بر میزان بازدهی جذب، با استفاده از مدل تهیه شده مورد بررسی قرار گرفت.

چکیده

در این تحقیق مطالعات تجربی و مدل‌سازی ریاضی برج جذب تماس آشفته (TCA) در فرایند سولفورزدایی از جریان‌های گازی حاوی سولفید هیدروژن توسط محلول کیلات آهن مورد بررسی قرار گرفته است. سولفورزدایی از جریان گازی به واسطه واکنش یون سولفید هیدروژن با یون فریک است که به رسوب گوگرد می‌انجامد. برج جذب تماس آشفته مورد استفاده حاوی آکنه‌های کروی توخالی با دانسیته پایین و به قطرهای ۲۰ و ۲۵ میلیمتر بوده که در بین صفحات مشبکی در داخل برج محصور بودند و با دمیدن جریان گاز از پایین برج در بین صفحات مشبک به حرکت درمی‌آمدند. داده‌های تجربی در شرایط مختلف عملیاتی (دبی گاز ۲۸-۲۲ lit/min، دبی محلول کیلات آهن ۰/۲-۰/۵ lit/min، غلظت گاز سولفید هیدروژن ۳۰۰۰-۴۰۰۰ ppm و ارتفاع استاتیکی آکنه‌ها ۱۳ و ۲۳ سانتیمتری) به دست آمد و در نهایت یک مدل ریاضی به منظور پیش‌بینی عملکرد برج جذب مورد نظر تهیه شد. بدین منظور با توجه به موازنه جرم اجزاء در فازهای گاز و مایع، دستگاه معادلات دیفرانسیل حاصل، با استفاده از روش‌های عددی حل شد. صحت مدل با مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های تجربی مورد آزمون قرار گرفت که حاکی از تطابق قابل قبول نتایج مدل‌سازی با داده‌های تجربی است. همچنین تأثیر دبی مایع

مقدمه

ادوات مختلفی به منظور جذب گازهای ترش نظیر سولفید هیدروژن از یک جریان گازی پیشنهاد شده‌اند. که یکی از این ادوات، برج جذب تماس آشفته^۱ است. این نوع برج، یک برج تماسی غیر هم جهت است که برای فراورش گاز در یک سیستم گاز-مایع-جامد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این برج‌ها جریان گاز فاز پیوسته و جریان فاز مایع ناپیوسته می‌باشد و در آنها از آکنه‌های کروی توخالی با دانسیته پایین به منظور افزایش تماس فازهای گاز و مایع استفاده می‌شود. آکنه‌های مورد اشاره در بین صفحات مشبکی در داخل برج محصور بوده و در اثر عبور گاز با سرعت بالا به حرکت در آمده و در نتیجه باعث ایجاد اغتشاش بیشتر در فازهای گاز و مایع می‌شوند. از مزایای

1. Turbulent Contact Absorber

بین صفحات مشبک فلزی (توری فلزی) که نسبت فضای خالی به کل سطح آن برابر ۷۰ بود، محصور بودند. به منظور توزیع مایع نیز یک توزیع کننده دوشی شکل به قطر ۴ سانتیمتر و با روزنه‌هایی به قطر ۲ میلی‌متر و از جنس تفلون درون برج تعبیه شد. با توجه به کارهای انجام شده توسط سایر محققین [۱۰-۶]، رژیم جریان در داخل برج به صورت رژیم تماس متلاطم^۷ و دبی گاز طوری تعیین شد تا سرعت فضایی گاز در ستون مورد نظر بیش از ۱ متر بر ثانیه باشد. در طی انجام آزمایش‌ها، ابتدایی هوای ورودی به برج توسط کنتور گاز تعیین و سپس با حجم مشخصی از جریان گازی با درصد ترکیب H_2S ۱۳٪ و CO_2 ۷٪، اختلاط پیدا می‌کند. مخلوط نهایی به عنوان خوراک از پایین برج وارد می‌شود. جریان گازی مورد نظر پس از تماس متقابل با محلول کیلات آهن و جذب H_2S موجود در آن (واکنش ۱) از بالای برج خارج می‌شود. محلول کیلات آهن خروجی از پایین برج نیز به اکسیدایزر منتقل شده و پس از احیا توسط جریان هوا (واکنش ۲) دوباره به برج جذب برگشت داده می‌شود.

$$H_2S(aq) + 2Fe^{3+} \rightarrow S \downarrow + 2H^+ + 2Fe^{2+} \quad (1)$$
$$\frac{1}{2}O_2(aq) + 2Fe^{2+} + H_2O \rightarrow 2OH^- + 2Fe^{3+} \quad (2)$$

در آزمایش‌های انجام شده از محلول کیلات آهن با غلظت ۲۰۰۰ ppm و با pH=۹ استفاده شد. مقدار H_2S خروجی از برج جذب با استفاده از یک دستگاه آنالایزر سولفید هیدروژن^۸، مقدار کل آهن به روش جذب اتمی و با استفاده از دستگاه پرکین المر^۹ و غلظت Fe^{3+} و Fe^{2+} با استفاده از یک دستگاه پتانسیو متر مدل A 1054 از شرکت روزمونت مجهز به الکتروود مدل ۳۸۹ با دقت ± 0.1 mV تعیین شدند. برای اندازه‌گیری pH محلول نیز از یک دستگاه pH متر مدل A 1054 از شرکت روزمونت و مجهز به الکتروود مدل ۳۸۹ با دقت ± 0.1 mV استفاده شد. محدوده آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

این برج‌ها می‌توان به قابلیت کارکرد در ظرفیت‌های بالایی از گاز و مایع بدون وقوع پدیده گرفتگی (به دلیل در حرکت بودن آکنه‌های کروی توخالی در بین صفحات مشبک محصور کننده) و شدت بالای انتقال جرم و حرارت اشاره کرد [۱]. مطالعات اولیه برای کاربرد این قبیل برج‌ها توسط داگلاس و همکارانش^۱ [۳ و ۲] انجام گرفت و در ادامه انیل و همکارانش^۲ دو نوع شرایط عملیاتی شامل سیالیت با طغیان اولیه^۳ و سیالیت بدون طغیان اولیه^۴ را برای یک برج تماس آشفته گزارش کردند [۴].

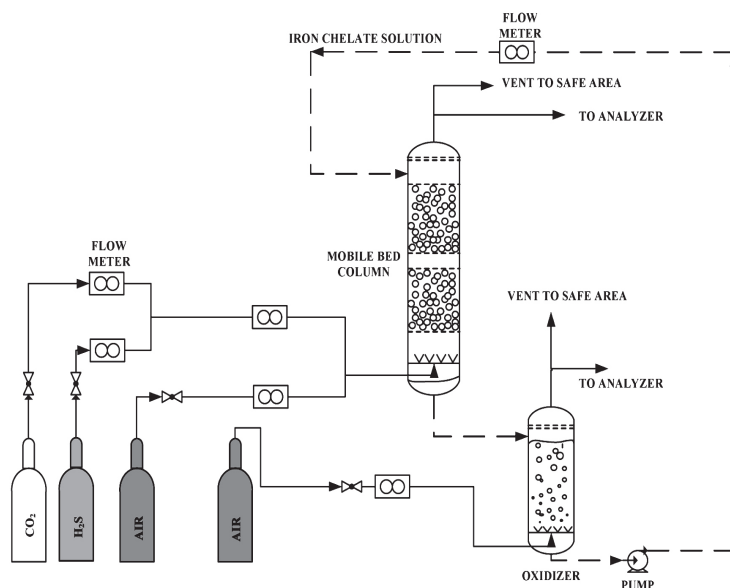
برج‌های تماس آشفته در فرایندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی کاربرد دارند. این برج‌ها در پدیده‌های فیزیکی در فرایندهایی نظیر خنک‌سازی هوا، مرطوب‌سازی، رطوبت‌زدایی و جداسازی ذرات به کار می‌روند. در پدیده‌های شیمیایی برای فرایندهایی مانند سولفورزدایی گازها، جذب، دفع و تقطیر کاربرد دارند و در پدیده‌های بیولوژیکی نیز در فرایندهایی نظیر تخمیر الکل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یک روش مؤثر برای حذف سولفید هیدروژن، فرایند سولفیران می‌باشد که دانش فنی آن توسط پژوهشگاه صنعت نفت توسعه یافته است [۵]. این فرایند با استفاده از کاتالیست محلول کیلات آهن، سولفید هیدروژن را به گوگرد تبدیل می‌کند، که شامل سه مرحله جذب سولفید هیدروژن؛ احیاء محلول کاتالیست و جداسازی گوگرد می‌باشد. با توجه به امکان جایگزینی برج تماس آشفته با برج آکنده موجود در این فرایند، در این تحقیق تلاش شده است که با انجام عملیات آزمایشگاهی مورد نیاز، نسبت به مدل‌سازی برج تماس آشفته به منظور بررسی دقیق عملکرد آن در فرایند سولفیران اقدام شود.

بخش تجربی

به منظور انجام آزمایش‌های مورد نیاز، یک سامانه^۵ آزمایشگاهی (شکل ۱) تهیه شد. برج تماس آشفته مورد استفاده در این سامانه، از جنس شیشه و با قطر ۶ و ارتفاع ۷۰ سانتیمتر می‌باشد و از آکنه‌های کروی توخالی از جنس پلی پروپیلن با قطرهای ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر ساخت شرکت سین کوتا^۶ در آزمایش‌های مختلف استفاده شد. آکنه‌ها

1. Douglas et al.
2. O'Neill et al.
3. Fluidization with Preliminary Flooding
4. Fluidization without Preliminary Flooding
5. Set Up
6. CINCOTTA
7. Turbulent Contacting Bed Regime
8. H2S Analyzer (Sensitron Model PL 4)
9. Perkin Elmer- Model 2320



شکل ۱- شماتیک سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده در اخذ داده‌ها

ترک می‌کند. مدل‌سازی برج بر اساس برقراری موازنه جرم انجام گرفته است. برای این منظور با استفاده از المان نشان داده شده در شکل ۳، می‌توان برای تغییرات غلظت H_2S در فاز گاز و یون‌های فرو و فریک آهن در فاز مایع موازنه جرم را به صورت زیر نوشت:

- تغییرات غلظت سولفید هیدروژن در فاز گاز براساس رابطه ذیل بیان می‌شود:

$$-\frac{d}{dz}(V_g * W_1 * W_2 * C_{H_2S,g}) * dz = \quad (3)$$

$$N * W_1 * dz \rightarrow \frac{dn_{H_2S,g}}{dz} = -N * W_1$$

- با توجه به واکنش جذب (واکنش ۱) تغییرات غلظت یون‌های فریک (Fe^{3+}) و فرو (Fe^{2+}) نیز به صورت روابط ذیل تعیین می‌شوند:

$$\frac{dn_{Fe^{3+}}}{dz} = -2N * W_1 \quad (4)$$

$$\frac{dn_{Fe^{2+}}}{dz} = -2N * W_1 \quad (5)$$

در روابط بالا، N میزان فلاکس عبوری H_2S جذب شده می‌باشد که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$N = K_{gp}(P_{H_2S,g} - He * C_{H_2S}^i) \quad (6)$$

به دلیل سریع و برگشت ناپذیر بودن واکنش بین سولفید هیدروژن و یون فریک [۱۱]، غلظت H_2S در سطح مشترک

جدول ۱ - شرایط عملیاتی آزمایش‌های انجام شده

شماره	پارامتر	دامنه
۱	دبی گاز (لیتر بر دقیقه)	۲۲-۲۸
۲	دبی محلول کاتالیست (لیتر بر دقیقه)	۰/۲-۰/۵
۳	غلظت مولی سولفید هیدروژن در گاز ورودی (ppm)	۳۰۰۰-۴۰۰۰
۴	قطر آکنه (سانتیمتر)	۲/۵ و ۲
۵	ارتفاع استاتیکی آکنه‌ها (سانتیمتر)	۲۳ و ۱۳
۶	نسبت سطح منافذ توزیع کننده به سطح کل (%)	۷۰

مدل ریاضی

به منظور مدل‌سازی برج تماس آشفته مورد نظر، برج با یک سیستم فرضی مدل‌سازی شد (شکل ۲). فرض می‌شود سیستم متشکل از دو صفحه موازی با عرض W_1 و ارتفاع H است که به فاصله W_2 از یکدیگر قرار گرفته‌اند. مایع با ضخامت δ از بالای برج به پائین جریان دارد. فاز گاز نیز از پائین وارد شده و از بالا پس از انجام انتقال جرم (همراه با واکنش) و کاهش درصد گاز ترش (H_2S) همراه، برج را

$$\frac{A_w}{A_i} = 1 - \exp \left\{ -1.45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_i} \right)^{3/4} \left(\frac{\rho_i U_i}{A_i \mu_i} \right)^{1/10} \left(\frac{A_i U_i^2}{g} \right)^{-1/20} \left(\frac{\rho_i U_i^2}{A_i \sigma_i} \right)^{2/10} \right\} \quad (13)$$

$$A_i = \frac{6 * (1 - \varepsilon_0)}{d_p} \quad (14)$$

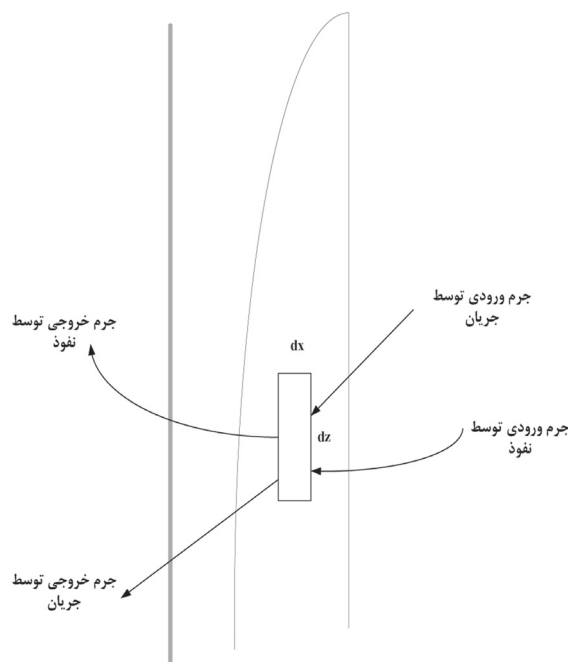
$$K_{gPa} = 0.00220 * G^{0.47} * L^{0.51} \quad (15)$$

$$K_{gP} = \frac{K_{gPa}}{A_w} \quad (16)$$

برای حل مجموعه معادلات دیفرانسیلی معمولی^۱ حاصله (روابط ۳ تا ۵) روش رانگ-کوتای^۲ درجه چهارم مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور برنامه کامپیوتری در محیط نرم افزار مطلب نسخه ۷/۱^۳ ایجاد شد.

نتایج مدل‌سازی بستر تماس آشفته

به‌منظور بررسی کارایی مدل توسعه داده شده، برنامه کامپیوتری تهیه شده برای شرایط عملیاتی مختلف اجراء شد و نتایج مدل‌سازی با اطلاعات آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. اطلاعات و داده‌های مورد نیاز برای اجرای برنامه شبیه‌ساز به منظور پیش‌بینی غلظت سولفید هیدروژن در خروجی از بستر آشفته، در جداول ۲ تا ۶، ارائه شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی



شکل ۳- المان موازنه جرم

دو فاز گاز و مایع صفر فرض می‌شود، لذا معادله (۶) به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$N = K_{gP} * P_{H_2S,g} \quad (7)$$

برای محاسبه عرض بستر و ضخامت لایه فیلم نیز می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$W_i = \frac{A_w * V_{pack}}{H} \quad (8)$$

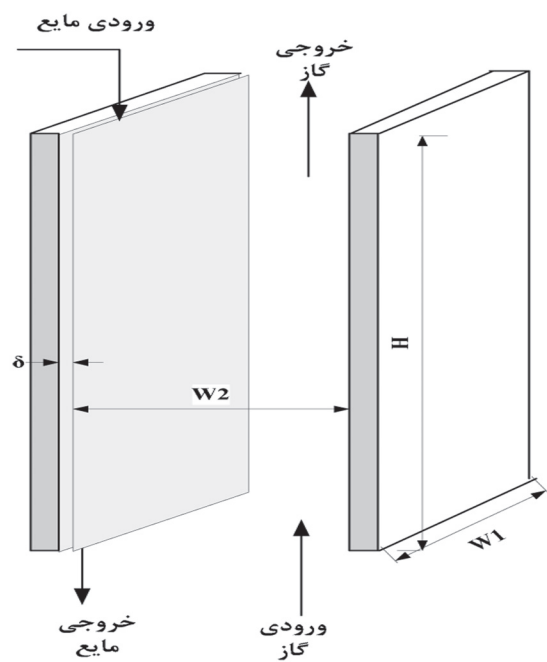
$$\delta = \frac{H_i * A}{A_w * V_{bed}} \quad (9)$$

برای حل معادلات فوق لازم است پارامترهای مربوط به انتقال جرم (K_{gPa}) و هیدرودینامیک (مساحت سطح تماس دو فاز گاز و مایع (A_i), سطح مخصوص بستر (A_w) و ارتفاع دینامیکی بستر (H)) سیستم تعیین شوند. لذا از روابط زیر برای محاسبه پارامترهای مورد نیاز استفاده شده است [۶ و ۱۲-۱۴]:

$$\varepsilon_g = 0.19 (We_g)^{0.11} (Fr_g)^{0.22} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{sl} = \frac{H_i}{H_s} = 12.8 * \left(\frac{H_s}{d_p} \right)^{-0.4} \left(f \frac{d}{D} \right)^{-0.58} (Ga)^{0.09} (Fr_i)^{1.66} (Re_i)^{-0.34} (We_i)^{-0.34} \quad (11)$$

$$\frac{H}{H_s} = \frac{(1 - \varepsilon_{sl} - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon_g)} \quad (12)$$



شکل ۲- طرح شماتیکی از بستر تماس آشفته

1. Ordinary Differential Equations (ODE's)
2. Runge-Kutta
3. MATLAB Version 7.1.0246(R14)

روی داده (واکنش ۱)، غلظت یون Fe^{3+} در خروجی از برج ($Z = 0$) نسبت به غلظت آن در ورودی ($Z = H_{final}$) کاهش و غلظت یون Fe^{2+} در خروجی از برج ($Z = 0$) نسبت به غلظت آن در ورودی ($Z = H_{final}$) افزایش می‌یابد. تغییرات غلظت H_2S در فاز مایع نیز به دلیل غلظت بسیار کم آن در این فاز، بسیار ناچیز است.

جدول ۴- دبی جریانات ورودی (ارتفاع استاتیکی ۲۳ cm و قطر آکنه ۲ cm)

شماره آزمایش	دبی حجمی هوا (lit/min)	غلظت H_2S ورودی (ppm)	دبی کاتالیست (lit/min)
۱	۲۱/۹۴	۱۱۳۵	۰/۲۸
۲	۲۲/۵۶	۷۲۶	۰/۳۳
۳	۲۳/۴	۱۱۳۵	۰/۲۸
۴	۲۵	۲۳۳۰	۰/۲۸

جدول ۵- دبی جریانات ورودی (ارتفاع استاتیکی ۱۴ cm و قطر آکنه ۲/۵ cm)

شماره آزمایش	دبی حجمی هوا (lit/min)	غلظت H_2S ورودی (ppm)	دبی کاتالیست (lit/min)
۱	۲۱/۹۴	۱۱۳۵	۰/۲۳
۲	۲۳/۴	۴۴۲	۰/۳۹
۳	۲۳/۴	۴۹۳	۰/۳۹
۴	۲۳/۴	۸۱۵	۰/۳۹
۵	۲۳/۴	۱۳۰۵	۰/۳۹
۶	۲۳/۴	۳۶۰۰	۰/۳۹
۷	۲۳/۴	۴۰۰۰	۰/۳۹
۸	۲۳/۴	۴۰۰۰	۰/۴۵

جدول ۶- دبی جریانات ورودی (ارتفاع استاتیکی ۲۳ cm و قطر آکنه ۲/۵ cm)

شماره آزمایش	دبی حجمی هوا (lit/min)	غلظت H_2S ورودی (ppm)	دبی کاتالیست (lit/min)
۱	۲۳/۴	۳۶۰۰	۰/۴۵
۲	۲۳/۴	۳۶۰۰	۰/۵

غلظت سولفید هیدروژن در خروجی بستر آشفته در شرایط مختلف عملیاتی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل توسعه داده شده، در جداول ۷ تا ۱۰، نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که از این جداول معلوم است، میزان خطای پیش‌بینی در حد قابل قبول است و این مسئله مؤید عملکرد مناسب مدل می‌باشد. به منظور بررسی چگونگی تغییرات غلظت اجزاء مختلف در طول بستر، نتایج حاصل از مدل‌سازی در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴، تغییرات غلظت H_2S در فاز گاز در طول برج کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در خروجی غلظت H_2S در فاز گاز به حداقل می‌رسد. تغییرات غلظت یون‌های Fe^{3+} و Fe^{2+} در طول برج نیز مطابق انتظار می‌باشد. بدین ترتیب که مطابق با واکنش‌های

جدول ۲- اطلاعات ورودی برنامه برای مدل‌سازی بستر تماس آشفته

مقدار	کمیت
۳۰°C	دما
۱ bar	فشار
۶ cm	قطر بستر
۲/۵mm	قطر اریفیس
٪۷۰	درصد باز بودن سطح مقطع

جدول ۳- دبی جریانات ورودی (ارتفاع استاتیکی ۱۳ cm و قطر آکنه ۲ cm)

شماره آزمایش	دبی حجمی هوا (lit/min)	غلظت H_2S ورودی (ppm)	دبی کاتالیست (lit/min)
۱	۲۷/۹۱	۳۳۲	۰/۲۱
۲	۲۷/۹۱	۴۸۳	۰/۲۱
۳	۲۱/۹۴	۵۶۱	۰/۳۷
۴	۲۱/۹۴	۵۶۱	۰/۲۳
۵	۲۱/۹۴	۶۵۰	۰/۲۳
۶	۲۱/۹۴	۸۵۰	۰/۲۳
۷	۲۱/۹۴	۱۱۳۵	۰/۲۳
۸	۲۱/۹۴	۱۱۳۵	۰/۲۸

جدول ۹- نتایج مدل‌سازی و اطلاعات آزمایشگاهی میزان جذب H_2S مطابق جدول ۵

شماره آزمایش	غلظت H_2S ورودی (ppm)	درصد جذب H_2S نسبت به ورودی	
		داده‌های آزمایشگاهی	نتایج مدل‌سازی
۱	۱۱۳۵	۹۴/۷۱	۹۶/۶۱
۲	۴۴۲	۹۸/۴۲	۹۸/۶۵
۳	۴۹۳	۹۶/۹۶	۹۸/۶۵
۴	۸۱۵	۹۶/۹۳	۹۸/۶۲
۵	۱۳۰۵	۹۷/۰۱	۹۸/۶۳
۶	۳۶۰۰	۹۸/۱۹	۹۸/۶۴
۷	۴۰۰۰	۹۷/۸۸	۹۸/۶۴
۸	۴۰۰۰	۹۸/۷۰	۹۹/۰۲

جدول ۷- نتایج مدل‌سازی و اطلاعات آزمایشگاهی میزان جذب H_2S مطابق جدول ۳

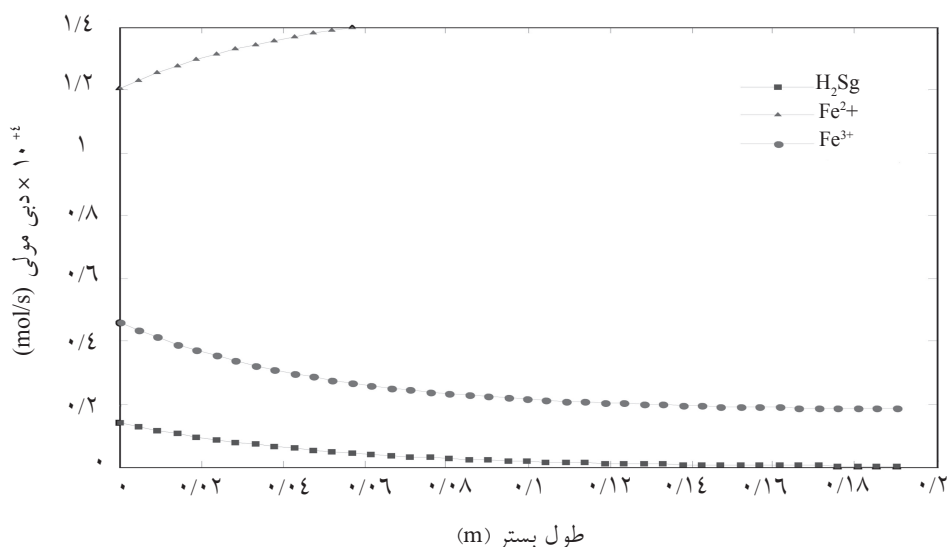
شماره آزمایش	غلظت H_2S ورودی (ppm)	درصد جذب H_2S نسبت به ورودی	
		داده‌های آزمایشگاهی	نتایج مدل‌سازی
۱	۳۳۲	۹۸/۴۹	۹۴/۸۶
۲	۴۸۳	۸۷/۵۸	۹۴/۸۶
۳	۵۶۱	۹۹/۲۹	۹۸/۸۶
۴	۵۶۱	۹۸/۵۷	۹۷/۰۸
۵	۶۵۰	۹۸/۴۶	۹۷/۰۸
۶	۸۵۰	۹۷/۶۵	۹۷/۰۸
۷	۱۱۳۵	۹۶/۰۴	۹۷/۰۷
۸	۱۱۳۵	۹۷/۳۶	۹۷/۹۶

جدول ۸- نتایج مدل‌سازی و اطلاعات آزمایشگاهی میزان جذب H_2S مطابق جدول ۴

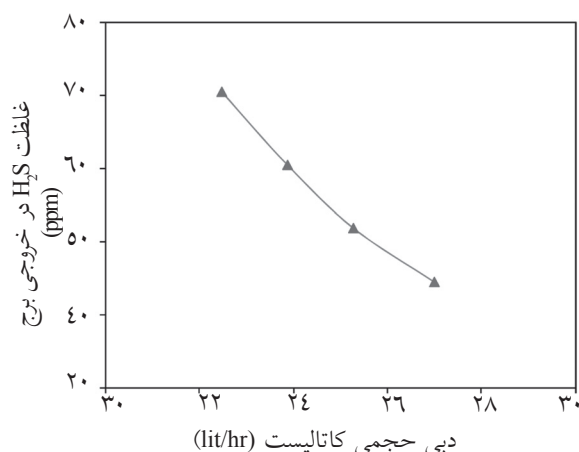
شماره آزمایش	غلظت H_2S ورودی (ppm)	درصد جذب H_2S نسبت به ورودی	
		داده‌های آزمایشگاهی	نتایج مدل‌سازی
۱	۱۱۳۵	۹۸/۶۸	۹۹/۹۰
۲	۷۲۶	۹۹/۵۹	۹۹/۹۴
۳	۱۱۳۵	۹۹/۳۸	۹۹/۸۷
۴	۲۳۳۰	۹۹/۵۷	۹۹/۸۴

جدول ۱۰- نتایج مدل‌سازی و اطلاعات آزمایشگاهی میزان جذب H_2S مطابق جدول ۶

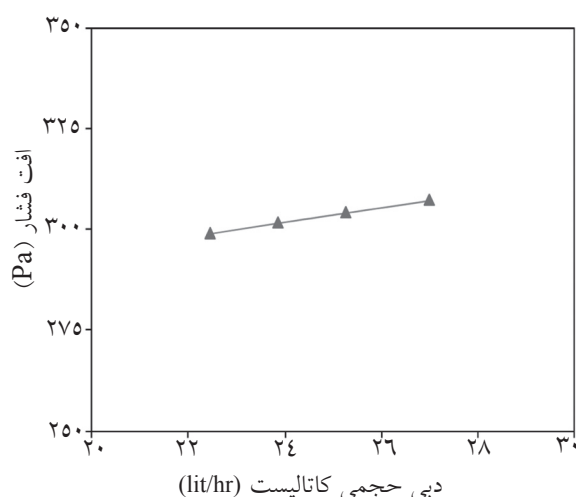
شماره آزمایش	غلظت H_2S ورودی (ppm)	درصد جذب H_2S نسبت به ورودی	
		داده‌های آزمایشگاهی	نتایج مدل‌سازی
۱	۳۶۰۰	۹۹/۶۷	۹۹/۹۵
۲	۳۶۰۰	۹۹/۸۱	۹۹/۹۷



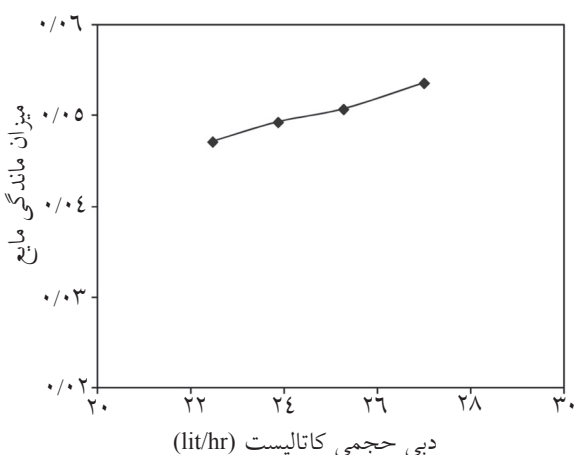
شکل ۴- تغییرات مولی اجزاء مختلف در طول بستر برای آزمایش شماره ۸ جدول ۳- الف



شکل ۵- تأثیر دبی کاتالیست بر میزان جذب گاز H₂S (دبی گاز / lit/hr، قطر آکنه ۲/۵ cm، ارتفاع استاتیکی بستر ۱۴ cm و غلظت H₂S در خوراک ۴۰۰۰ ppm)



شکل ۶- تأثیر دبی کاتالیست بر میزان افت فشار (دبی گاز / lit/hr، قطر آکنه ۲/۵ cm، ارتفاع استاتیکی بستر ۱۴ cm و غلظت H₂S در خوراک ۴۰۰۰ ppm)



شکل ۷- تأثیر دبی کاتالیست بر میزان ماندگی مایع در برج (دبی گاز / lit/hr، قطر آکنه ۲/۵ cm، ارتفاع استاتیکی بستر ۱۴ cm و غلظت H₂S در خوراک ۴۰۰۰ ppm)

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در عملکرد بستر تماس آشفته

پس از اثبات کارایی مدل، در این قسمت با بهره‌گیری از مدل ارائه شده به بررسی تأثیر برخی از پارامترهای عملیاتی در میزان جذب گاز سولفید هیدروژن توسط محلول کیلات آهن اشاره می‌شود.

تأثیر دبی کاتالیست (فاز مایع)

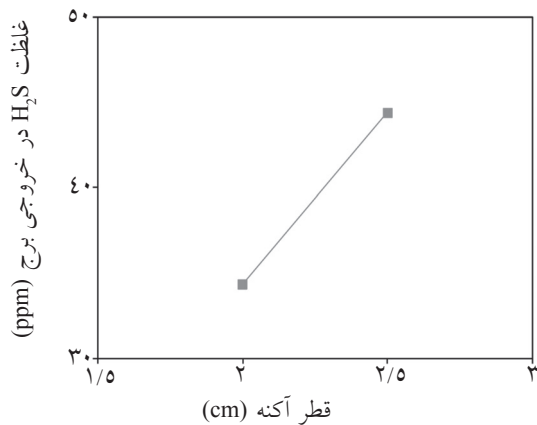
برای شرایط عملیاتی ثابت (دبی گاز ۱۴۰۰ lit/hr، قطر آکنه ۲/۵ cm، ارتفاع استاتیکی بستر ۱۴ cm و غلظت H₂S در خوراک ۴۰۰۰ ppm) با کاهش دبی فاز مایع، انتظار می‌رود به علت کاهش تعداد مول‌های Fe³⁺ در تماس با فاز گاز، میزان جذب H₂S کاهش و در نتیجه غلظت H₂S در خروجی افزایش یابد. شکل ۵، نشان‌دهنده تأثیر دبی (سرعت) فاز مایع در میزان جذب H₂S است. همان‌گونه که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود با افزایش میزان دبی مایع، افت فشار و میزان ماندگی مایع در برج نیز افزایش می‌یابد.

تأثیر ارتفاع استاتیکی

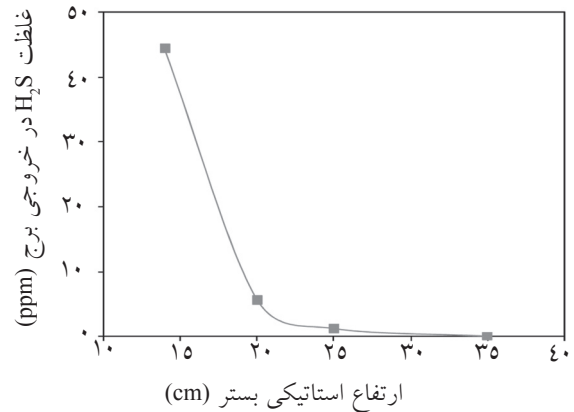
کاملاً بدیهی است که در صورت ثابت ماندن همه متغیرهای عملیاتی نظیر سرعت گاز و مایع، غلظت H₂S در گاز ورودی، قطر برج و قطر آکنه، با افزایش ارتفاع استاتیکی به دلیل افزایش سطح تماس دو فاز گاز و مایع، میزان جذب H₂S افزایش یافته و میزان آن در خروجی کاهش یابد. شکل ۸، تأثیر ارتفاع استاتیکی در میزان جذب H₂S را نشان می‌دهد. شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز بیانگر تأثیر ارتفاع استاتیکی بر میزان افت فشار و ماندگی مایع می‌باشند همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش ارتفاع باعث افزایش افت فشار و کاهش میزان ماندگی مایع خواهد شد.

تأثیر قطر آکنه

قطر آکنه نیز یکی از عوامل موثر در میزان جذب گاز H₂S می‌باشد. با افزایش قطر آکنه به دلیل کاهش تعداد آکنه‌ها (ارتفاع آکنه‌ها ثابت فرض شده است) و در نتیجه کاهش سطح تماس دو فاز مایع و گاز، در صورت ثابت ماندن سایر متغیرهای عملیاتی (دبی گاز ۱۴۰۰ lit/hr، ارتفاع استاتیکی بستر ۱۴ cm، دبی کاتالیست ۲۷ lit/hr و غلظت H₂S در خوراک ۴۰۰۰ ppm)، میزان جذب H₂S کاهش و میزان غلظت H₂S در جریان گاز خروجی افزایش می‌یابد (شکل ۱۱).



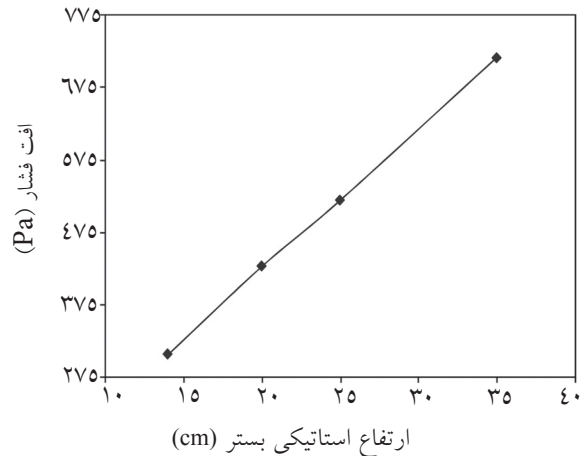
شکل ۱۱- تأثیر قطر آکنه بر میزان جذب گاز H₂S (دبی گاز ۱۴۰۰ lit/hr، ارتفاع استاتیکی بستر ۱۴ cm، دبی کاتالیست ۲۷ lit/hr و غلظت H₂S در خوراک ۴۰۰۰ ppm)



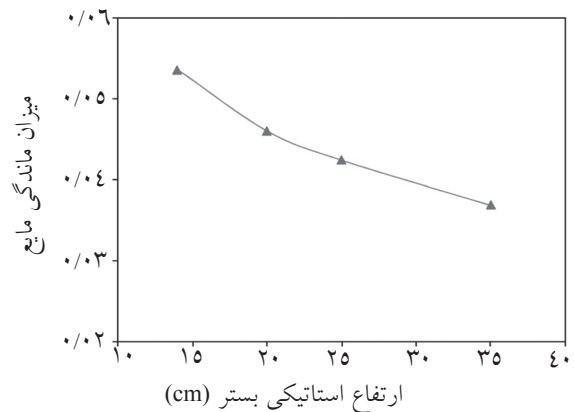
شکل ۸- تأثیر ارتفاع استاتیکی بستر بر میزان جذب گاز H₂S (دبی گاز ۱۴۰۰ lit/hr، قطر آکنه ۲/۵ cm، دبی کاتالیست ۲۷ lit/hr و غلظت H₂S در خوراک ۴۰۰۰ ppm)

نتیجه گیری

در این تحقیق، با توجه به ارجحیت نسبی برج تماس آشفته بر برج تماس بستر ثابت (جلوگیری از پدیده گرفتگی و همچنین امکان فراورش گاز تا حد پنج تا شش برابر)، ضمن اخذ داده‌های تجربی جذب گاز سولفید هیدروژن توسط محلول کیلات آهن، مدل‌سازی برج مورد نظر صورت پذیرفت. به منظور مدل‌سازی، لازم بود تا ضریب انتقال جرم مابین دو فاز گاز و مایع (K_{ga}) و همچنین مقادیر مربوط به پارامترهای هیدرودینامیکی برج تعیین شوند (مساحت سطح تماس دو فاز گاز و مایع (A_p)، سطح مخصوص بستر (A_w) و ارتفاع دینامیکی بستر (H)). بدین منظور از روابط تجربی ارائه شده در سایر مراجع استفاده شد. پس از اثبات اعتبار مدل ارائه شده با توجه به نتایج تجربی اخذ شده، تأثیر پارامترهای عملیاتی (دبی فاز مایع (کاتالیست)، ارتفاع استاتیکی بستر و قطر آکنه) بر راندمان برج تماس آشفته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش ارتفاع استاتیکی آکنه‌ها به دلیل افزایش سطح و زمان تماس و افزایش دبی محلول کیلات آهن نیز به دلیل افزایش میزان مول آهن فریک سبب افزایش میزان جذب شده خواهد شد. همچنین بررسی تأثیر پارامتر قطر آکنه (با فرض یکسان بودن ارتفاع استاتیکی) حکایت از آن داشت که با افزایش این پارامتر، میزان جذب کاهش می‌یابد که این امر ناشی از کاهش میزان سطح انتقال جرم می‌باشد. البته باید توجه داشت که



شکل ۹- تأثیر ارتفاع استاتیکی بستر بر میزان افت فشار (دبی گاز ۱۴۰۰ lit/hr، قطر آکنه ۲/۵ cm، دبی کاتالیست ۲۷ lit/hr و غلظت H₂S در خوراک ۴۰۰۰ ppm)



شکل ۱۰- تأثیر ارتفاع استاتیکی بستر بر میزان ماندگی مایع در برج (دبی گاز ۱۴۰۰ lit/hr، قطر آکنه ۲/۵ cm، دبی کاتالیست ۲۷ lit/hr و غلظت H₂S در خوراک ۴۰۰۰ ppm)

U_a : سرعت ظاهری فاز α (m/s)

V_g : سرعت فاز گاز (m/s)

V_{bed} : حجم بستر (m^3)

V_{pack} : حجم پرکن ها (m^3)

$We_\alpha = \frac{U_\alpha^2 \rho_l d_f}{\sigma_l}$: عدد بی بعد وبر در فاز α

W_1 : عرض بستر (m)

W_2 : فاصله دو صفحه بستر (m)

Z : طول برج (m)

ϵ_0 : تخلخل بستردر حالت استاتیکی، حجم بستر بر حجم

سیستم خالی (m^3/m^3)

ϵ_g : میزان ماندگی فاز گاز، حجم گاز موجود در بستر بر حجم

بستر در حالت استاتیکی (m^3/m^3)

ϵ_{Sl} : میزان ماندگی فاز مایع، حجم مایع موجود در بستر بر

حجم بستر در حالت استاتیکی (m^3/m^3)

μ_a : ویسکوزیته فاز α (kg/m.s)

δ : ضخامت فیلم ریزان مایع (m)

P_a : دانسیته فاز α (kg/m^3)

P_p : دانسیته پرکن (kg/m^3)

σ_l : کشش سطحی مایع (N/m)

σ_c : کشش سطحی بحرانی آکنه (N/m)

افزایش پارامتر ارتفاع استاتیکی و دبی محلول، به دلیل افزایش افت فشار و همچنین تغییر رژیم جریان با محدودیت مواجه می‌باشند.

علائم نشانه‌ها

A : سطح مقطع بستر (m^2)

A_t : مساحت سطح تماس موثر مابین دو فاز، سطح تماس

دو فاز برحجم بستر (m^2/m^3)

A_w : سطح مخصوص بستر برحسب سطح بستر برحجم

بستر (m^2/m^3)

C_j : غلظت جزء j (mol/m^3)

d : قطر اوریفیس (m)

d_p : قطر معادل ذرات آکنه (m)

D : قطر معادل برای سطح آزاد برج (m)

f : درصد باز بودن سطح مقطع در پائین برج

$Fr_\alpha = \frac{U_\alpha}{\sqrt{g * d_p}}$: عدد بی بعد فرود در فاز α

g : شتاب جاذبه (m/s^2)

G : دبی مولی جریان گاز بر مبنای سطح مقطع بستر

($mol/(m^2.s)$)

$Ga = \frac{g * d_p^3 * \rho_p}{\mu_l^2}$: عدد بی بعد گالیله

H : ارتفاع دینامیکی بستر (m)

H_i : ارتفاع فاز مایع در بستر (m)

H_s : ارتفاع استاتیکی بستر (m)

He : ضریب هنری ($m^3.atm/mol$)

K_{gPa} : ضریب انتقال جرم در فاز گاز ($mol/(m^3.atm.s)$)

K_{gp} : ضریب تصحیح شده انتقال جرم در فاز گاز

($mol/(m^2.atm.s)$)

L : دبی جرمی جریان مایع بر مبنای سطح مقطع بستر

($g/(m^2.s)$)

n_j : تغییرات مول جزء j بر حسب زمان (mol/s)

N : فلاکس عبوری H_2S جذب شده ($mol/(m^2.s)$)

P_j : فشار جزئی جزء i (atm)

P_{ji} : فشار جزئی جزء i در سطح مشترک (atm)

$Re_\alpha = \frac{U_\alpha \rho_\alpha d_p}{\mu_\alpha}$: عدد بی بعد رینولدز در فاز α

منابع:

- [1]. Bruce A.E.R., Sai P.S.T. & Krishnaiah K., "Liquid phase mixing in turbulent bed contactor", Chem. Eng. Sci., Vol. 58, Issue 15, pp. 3453- 3463, 2003.
- [2]. Douglas H.R., Snider I.W.A. & Tomlinson G.H., "The Turbulent contact absorber", Chem. Eng. Prog., Vol. 59, No. 12, pp. 85-89, 1963.
- [3]. Tichy J. & Douglas W.J.M., "Bed expansion in a mobile-bed contactor", Can. J. Chem. Eng., Vol. 50, No. 6, pp. 702-706, 1972.
- [4]. O'Neill B.K., Nicklin D.J. & Morgan N.J., "The Hydrodynamics of gas-liquid contacting in towers with fluidized packing", Can. J. Chem. Eng., Vol. 50, No. 5, pp. 595- 601, 1972.
- [5]. Khattaty M.R., Forsat Kh., Hashemi R. & Manafi Varkiani H., Process for removing sulfur particles from an aqueous catalyst solution and removing hydrogen sulfide and recovering sulfur from a gas stream, U.S. Patent: 7,419,652 B2 ,2008.
- [6]. McMichele W.J., Fan L.S. & Wen C.Y., "Analysis of sulfur dioxide wet limestone scrubbing data from pilot plant spray and TCA scrubbers", Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev., Vol. 15, No. 3, pp. 459- 467, 1976.
- [7]. Nagl G.J., Multi-Bed mass transfer column with mobile packing, U.S. Patent: 5296205, 1994.
- [8]. MERICHEM Presentation, <http://www.gtp-merichem.com>, 2008.
- [9]. Gimenes M.L. & Handley D., "A Model for particle collection in a turbulent bed contactor", Trans IChemE, Vol. 76(A), pp. 855-863, 1998.
- [10]. Uchida S., Chang C.S. & Wen C.Y., "Mechanics of a turbulent contact absorber", Can. J. Chem. Eng., Vol. 55, Issue 4, pp. 392-396, 2009.
- [11]. Kohl A.L. & Nielsen R.B., Gas purification, 5th Ed., Gulf Publishing Company, 1997.
- [12]. Kito M., Tabei K. & Murata K., "Gas and liquid holdups in mobile beds under the countercurrent flow of air and liquid", Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., Vol. 17, No. 4, pp. 568-571, 1978.
- [13]. Onda K., Sada E. & Takeuchi H., "Gas absorption with chemical reaction in packed bed", J. Chem. Eng. Japan, Vol. 1, pp. 56-62, 1968.
- [14]. Wubs H.J., & Beenackers A.A.C.M., "Kinetics of H₂S absorption into aqueous ferric solutions of EDTA and HEDTA", AIChE J., Vol. 40, No. 3, pp. 433-444, 1994.