

## بررسی تجربی و مدلسازی جذب سولفید هیدروژن در برج‌های سیم مرطوب به وسیله محلول آمین

مجید قاسم زاده<sup>۱</sup>، رضا علیزاده<sup>۱\*</sup>، اسماعیل فاتحی فر<sup>۱</sup>، پرهام روحی<sup>۱</sup>، محبوبه بنی هاشمی<sup>۱</sup>

۱. مرکز تحقیقات مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۸ دی ۹۲

دریافت پس از اصلاح: ۱۶ تیر ۹۳

پذیرش نهایی: ۴ بهمن ۹۳

کلمات کلیدی:

برج سیم مرطوب

سولفید هیدروژن

جذب واکنشی

مونواتانول آمین

مدل‌های بر مبنای سرعت

### چکیده

جذب سولفید هیدروژن توسط محلول‌های آمین، یکی از فرآیندهای با اهمیت در واحدهای پالایشگاهی است. برج‌های سینی‌دار و پر شده از تجهیزات متداول در زمینه جذب سولفید هیدروژن هستند. برای مدل‌سازی این‌گونه تجهیزات مدل‌های تعادلی و بر پایه سرعت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به این‌که جذب سولفید هیدروژن توسط محلول‌های حاوی آمین به صورت واکنشی است، استفاده از مدل‌های تعادلی نتایج دقیقی به دست نخواهد داد. در این پژوهش با معرفی برج جذب سیم مرطوب و ساخت سامانه آزمایشگاهی فشار پائین جذب سولفید هیدروژن توسط محلول‌های آمین در برج جذب سیم مرطوب و انجام آزمایش‌های مختلف، ضریب انتقال جرم و حرارت در فاز گاز به صورت تجربی بر اساس دبی مایع، دمای گاز و مایع ورودی، غلظت آمین و میزان سولفید هیدروژن در محلول به دست آمدند. همچنین با فرض جریان لایه‌ای مایع روی رشته سیم‌ها، توزیع سرعت مایع روی هر سیم و ضریب انتقال جرم در فاز مایع بر اساس دبی مایع و دمای متوسط جریان گاز و مایع محاسبه گردید. به منظور مدلسازی این فرآیند یک کد رایانه‌ای ایجاد گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف از جمله دبی فاز مایع و دمای هر دو فاز بر میزان جذب بررسی گردید.

## ۱- مقدمه

جداسازی گازهای اسیدی همچون سولفید هیدروژن لازمه‌ی بسیاری از فرآیندهای صنعتی از قبیل شیرین سازی گاز طبیعی، خالص سازی هیدروژن، تصفیه گازهای انتهایی واحد کلاوس و همچنین تصفیه گاز سنتز به منظور تولید آمونیاک و متانول می‌باشد.

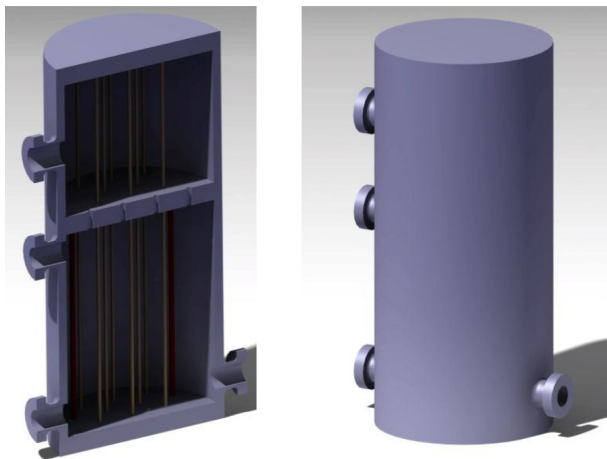
روش‌های مختلفی برای تصفیه گازهای آلوده به سولفید هیدروژن وجود دارد که جذب فیزیکی و شیمیایی، جذب سطحی، غشاء، تبدیل شیمیایی و میعان از آن جمله‌اند. جذب توسط محلول‌های آمین در برج‌های پرشده، رایج‌ترین فرآیند برای حذف این گاز است. برج‌های پرشده به دلیل فراهم نمودن سطح تماس بالا و اختلاط مناسب، یکی از تجهیزات متداول برای تماس گاز و مایع می‌باشند. اما این برج‌ها نواقصی نیز دارند که از آن جمله می‌توان به افت فشار نسبتاً زیاد، ماندگی استاتیکی، طغیان و انحراف جریان به سوی دیواره برج اشاره نمود.

برج‌های سیم مرتوب از جمله تماس دهنده‌های نو ظهوری است که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. در این دستگاه تماس دهنده، سیم‌های موازی جایگزین پرکن‌ها شده‌اند. شکل ۱ نمای بیرونی و برش خورده این برج را نشان می‌دهد.

به دلیل آرایش منظم سیم‌ها بسیاری از مشکلات برج‌های پرشده در این برج وجود ندارد. از جمله مزیت‌های این دستگاه نسبت به برج‌های پرشده عبارت است از:

- افت فشار بسیار کمتر نسبت به برج‌های پرشده
- حذف جریان بر روی دیواره‌ها
- حذف پدیده‌های طغیان، اختلاط محوری و ماندگی در محدوده‌ی وسیعی از شدت جریان سیال

تاکنون تعدادی از محققان بر روی قابلیت‌ها و عملکرد این گونه تماس دهنده‌ها مطالعاتی را انجام داده‌اند. هاتوری<sup>۱</sup> و همکاران سیم‌های مرتوب را به عنوان یک تماس دهنده گاز - مایع معرفی نمودند [۱]. مطالعات آنها بر نحوه تشکیل فیلم مایع بر روی سیم و میزان انتقال حرارت از آن متمرکز بود. چینجو<sup>۲</sup> و همکاران جذب دی اکسید کربن به وسیله آب را بر روی تنها یک سیم مورد بررسی قرار دادند و بازده جذب برج‌های سیم مرتوب را قابل مقایسه با برج‌های پر شده برآورد نمودند [۲].



شکل (۱): نمای بیرونی و نمای برش خورده برج سیم مرتوب

یوکیاما<sup>۳</sup> و همکاران نیز جذب دی اکسید کربن توسط محلول MEA را مورد مطالعه قرار دادند [۳]. آنها نیز تنها از یک سیم مرتوب استفاده کرده و یک مدل ریاضی را برای طراحی اولیه برج‌های سیم مرتوب ارائه نمودند. میگیتا<sup>۴</sup> و همکاران اولین گروهی بودند که یک برج سیم مرتوب شامل ۱۰۹ رشته سیم را مورد بررسی قرار دادند [۴]. آن‌ها با بررسی جذب دی‌اکسید کربن در محلول MEA نشان دادند که بازدهی این دستگاه با بازدهی برج‌های پرشده با حلقه راشینگ کاملاً قابل مقایسه است، در حالی که افت فشار آن به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر می‌باشد. همچنین شیرین سازی گاز طبیعی و جذب هیدرازین و آمونیاک از هوا نیز از دیگر تحقیقات انجام گرفته بر روی برج‌های سیم مرتوب است [۷-۵]. نتایج همگی این مطالعات، نتایج میگیتا و همکارانش را مورد تأیید قرار داده است.

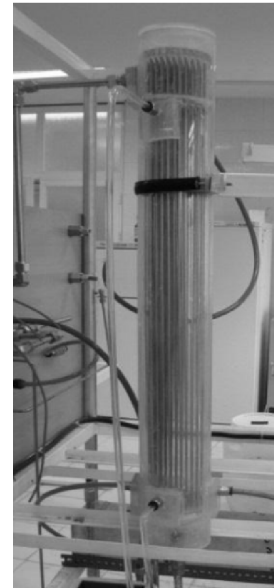
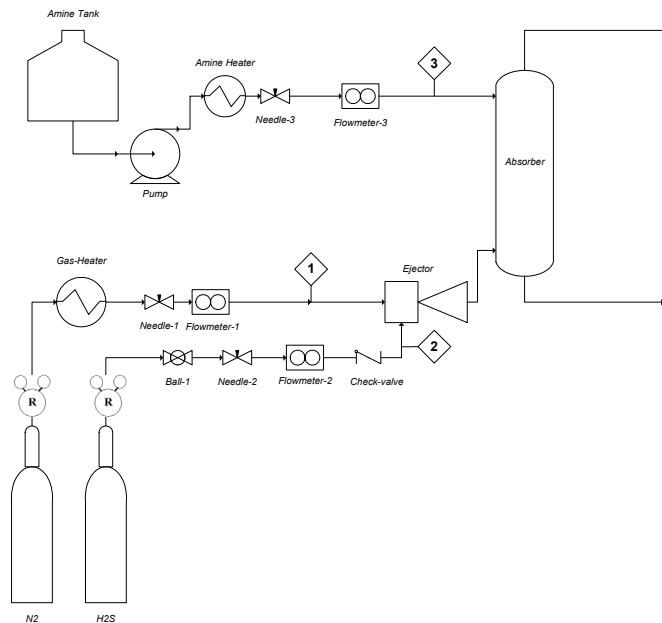
در مقاله پیش رو برای اولین بار به بررسی جذب سولفید هیدروژن توسط محلول MEA در یک برج سیم مرتوب پرداخته شده است تا از مزایای اینگونه از برج‌ها از جمله افت فشار بسیار ناچیز آن‌ها در جذب سولفید هیدروژن بهره گرفته شود. بدین منظور یک برج سیم مرتوب طراحی و ساخته شده و عملکرد آن در شرایط مختلف عملیاتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین یک مدل ریاضی از سیستم مورد نظر توسعه داده شده و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. از این مدل ریاضی به منظور بررسی اثر پارامترهایی مختلف بر بازده جذب سولفید هیدروژن استفاده شده است.

<sup>3</sup> Ushiyama

<sup>4</sup> Migita

<sup>1</sup> Hattori

<sup>2</sup> Chinju



ب

الف

شکل (۲): الف - تصویر سامانه آزمایشگاهی؛ ب - نمودار جریان فرآیندی سامانه آزمایشگاهی

و محلول آمین نیز به منظور استفاده مجدد به برج دفع فرستاده می شود. به منظور تعیین میزان سولفید هیدروژن در جریان گاز خروجی ابتدا جریان گاز توسط یک تماس دهنده در محلول ۰/۰۲ مولار NaOH حل شده و محلول حاصل با استفاده از روش ولهارد تیترا گردیده است. برای حصول اطمینان از نتایج بدست آمده، فاز مایع نیز به طور همزمان آنالیز شده است. همچنین دمای جریان های ورودی و خروجی با استفاده از ترموکوپل اندازه گیری می شود. بکارگیری اتصالات مقاوم به خوردگی و نشت، استفاده از آشکارساز گاز سولفید هیدروژن به منظور آگاهی از نشت احتمالی گاز و همچنین استفاده از تجهیزات حفاظت فردی از جمله تمهیدات بکار گرفته شده در راستای تأمین شرایط ایمن می باشد.

### ۳- مدلسازی و روش حل

مدلسازی جذب سولفید هیدروژن توسط محلول MEA در برج سیم مرطوب به وسیله مدل دیفرانسیلی پاندا انجام گرفته است. این مدل از نوع مدل های بر پایه سرعت می باشد. تئوری دو فیلمی به دلیل سهولت در تعیین پارامترها و در عین حال دقت مناسب آن به عنوان مبنای این مدل در نظر گرفته شده است. در این مدل از فرضیات زیر برای بیان معادلات بقای جرم و انرژی استفاده شده است [۸]:

- معادلات در حالت پایا می باشد.
  - واکنش به قدری سریع است که فقط در یک فیلم نازک انجام می گردد و توده مایع در شرایط تعادل قرار دارد
- $$(k_{H_2S-MEA} \geq 10^9 m^3 kmol^{-1} s^{-1})$$

### ۲- سامانه آزمایشگاهی

آمین مورد استفاده در برج سیم مرطوب از نوع مونو- اتانول آمین و محصول شرکت پتروشیمی اراک می باشد. همچنین از گاز سولفید هیدروژن و گاز نیتروژن با خلوص ۹۹/۹۹۹ محصول شرکت Technical Gas Services برای انجام آزمایشات استفاده شده است.

برج سیم مرطوب از جنس پلکسی گلاس با قطر داخلی ۱۱ سانتی متر و طول ۹۰ سانتی متر ساخته شده است. ارتفاع بخش جذب ۷۰ سانتی متر بوده و تعداد ۸۵ رشته سیم از جنس استیل ضد زنگ با قطر ۳ میلی متر به منظور تماس مایع و گاز بکار گرفته شده است که با آرایش مثلثی در برج قرار گرفته اند. قطر نازل های توزیع کننده محلول آمین برابر با ۳/۸ میلی متر می باشد.

در شکل ۲ نمودار جریان فرآیندی این سامانه نشان داده شده است. محلول آمین تازه از مخزن خود به سمت یک مبدل حرارتی پمپ شده و پس از حصول دمای مورد نظر با عبور از یک شیر سوزنی و فلومتر به مخزن توزیع کننده محلول آمین در قسمت بالای برج جذب فرستاده می شود. گاز سولفید هیدروژن نیز پس از عبور از یک شیر یک طرفه، از طریق یک اجکتور با گاز نیتروژن ترکیب شده و به ورودی پایین برج فرستاده می شود. دمای مخلوط گاز ورودی به برج با عبور جریان گاز نیتروژن از یک مبدل حرارتی تنظیم می گردد. پس از تماس جریان گاز حاوی سولفید هیدروژن و محلول آمین بر روی سیم های برج، گاز خروجی مورد آنالیز قرار گرفته

جدول (۱): روابط بکارگرفته شده برای محاسبه ضرایب انتقال، نفوذ و فاکتور تقویت

فاکتور تقویت	
$E_i = 1 + \frac{D_R C_{Rb}}{v D_A C_{Ai}}$	(۷)
توزیع سرعت مایع بر روی سیم	
$\bar{V}_Z = \frac{v_L}{\pi R_s^2 (\alpha^2 - 1)} = \frac{\rho g R_s^2}{8\mu} \left( 1 - 3\alpha^2 + 4 \frac{\alpha^4 \ln \alpha}{\alpha^2 - 1} \right)$	(۸)
عدد رینولدز	
$Re = \frac{\rho \bar{V}_Z D_H}{\mu}$	(۹)
$D_H = \frac{4A}{P} = R_s (\alpha^2 - 1)$	(۱۰)
ضریب انتقال جرم در فاز مایع	
$k_L = \frac{2D_A}{\alpha R_s - R_s} \left[ 1 - \left( \frac{R_s}{\alpha R_s - R_s} \right)^2 G(\alpha) \right]^{-1}$	(۱۱)
$G(\alpha) = \frac{4}{4\alpha^2 - 3\alpha^4 - 1 + 4\alpha^4 \ln \alpha} \left[ -\frac{1}{15} + \frac{49}{72} \alpha^2 - \frac{2}{3} \alpha^3 - \frac{1}{2} \alpha^4 + \frac{38}{45} \alpha^5 - \frac{7}{24} \alpha^6 + \left( \alpha^4 - \frac{4}{3} \alpha^5 + \frac{1}{2} \alpha^6 \right) \ln \alpha \right]$	
ضریب انتقال جرم در فاز گاز	
$K_G a = \frac{G_B}{Z} \left[ Y_{A(Bottom)} - Y_{A(Top)} + \ln \left( \frac{Y_{A(Bottom)}}{Y_{A(Top)}} \right) \right]$	(۱۲)
$k_G = \frac{K_G}{P}$	(۱۳)
ضریب انتقال حرارت در فاز گاز	
$h_G a = \frac{-G_B (C_{PB} + Y_A C_{PA} + Y_S C_{PS})}{(T_G - T_L) Z}$	(۱۴)

الگوریتم حل معادلات حاکم بر برج سیم مرطوب نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. محاسبات بر مبنای روش حدس و خطا انجام گرفته و در هر مرحله از روش اختلاف محدود برای تعیین گرادیان های غلظت و دما استفاده شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش به مدلسازی و شبیه سازی جذب سولفید هیدروژن در برج سیم مرطوب پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا باید به برآورد ضرایب انتقال جرم و حرارت مختص برج سیم مرطوب پرداخته شود. آزمایش های لازم نیز برای محاسبه ضریب انتقال جرم و حرارت در فاز گاز انجام گرفته و نتایج آن ارائه گردیده است. سپس با استفاده از

مقاومت حرارتی فاز مایع در مقایسه با فاز گاز اندک است. به این ترتیب دمای فصل مشترک برابر با دمای توده مایع در نظر گرفته می شود.

فصل مشترک انتقال جرم و حرارت برای فاز گاز و مایع برابر است.

جریان سیال آرام بوده و از پراکندگی در سیستم صرف نظر می شود.

بر اساس این فرضیات معادلات گرادیان غلظت و دما در جهت محوری مطابق معادلات ۱ الی ۴ خواهد بود [۸]. این معادلات برای یک سیستم ۵ جزئی شامل یک گاز حامل بی اثر (B)، یک ترکیب اسیدی (A)، یک جزء فرار در حلال (S)، یک جز غیر فرار و فعال شیمیایی در حلال (R) و محصول غیر فرار واکنش (P) توسعه داده شده است.

$$\frac{dY_A}{dz} = \frac{-k_{GA} P (y_A - y_{Ai}) a}{G_B} \quad (۱)$$

$$\frac{dY_S}{dz} = \frac{-k_{GS} P (y_S - y_{Si}) a}{G_B} \quad (۲)$$

$$\frac{dT_G}{dz} = \frac{-h_G a (T_G - T_L)}{G_B (C_{PB} + Y_A C_{PA} + Y_S C_{PS})} \quad (۳)$$

$$L_M C_{PL} \frac{dT_L}{dz} = G_B (C_{PB} + Y_A C_{PA} + Y_S C_{PS}) \frac{dT_G}{dz} + G_B [C_{PS} (T_G - T_L) + \lambda_S] \frac{dY_S}{dz} + G_B [C_{PA} (T_G - T_L) - \Delta H_R] \frac{dY_A}{dz} \quad (۴)$$

$$p_{Ai} = \frac{p_A + \frac{k_{LA}^0 E}{k_{GA}} C_{Ae}}{1 + \frac{k_{LA}^0 E}{k_{GA}} He} \quad (۵)$$

همچنین در هر بخش از برج می توان فشار جزئی گاز سولفید هیدروژن را به کمک معادله ۵ تعیین نمود. قانون هنری نیز برای تعیین غلظت سولفید هیدروژن در فاز مایع صادق می باشد (معادله ۶).

$$C_{Ai} = He . p_{Ai} \quad (۶)$$

در جدول ۱ روابط بکار گرفته شده برای محاسبه ضرایب انتقال و نفوذ و فاکتور تقویت ذکر گردیده است [۸]. جریان مایع روی هر سیم به صورت فیلم مایع ریزان در نظر گرفته شده، به گونه ای که تمام سطح سیم توسط مایع جاذب مرطوب می گردد.

## بررسی تجربی و مدلسازی جذب سولفید هیدروژن در برج‌های سیم مرطوب به وسیله محلول آمین

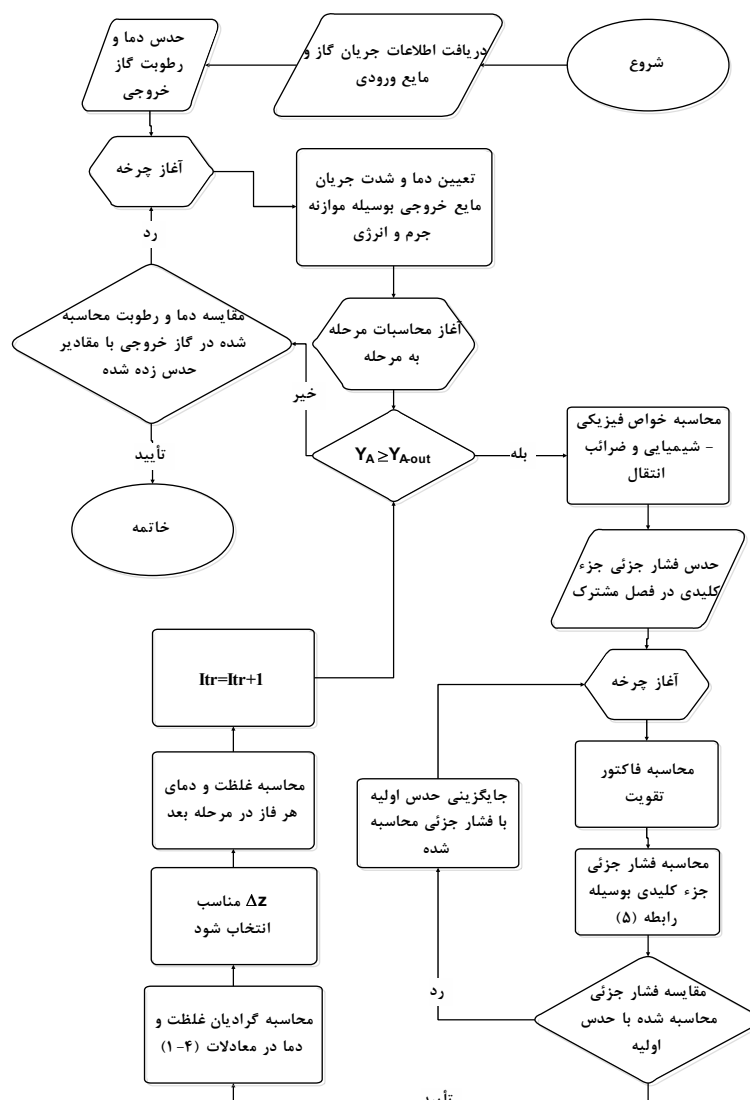
همچنین به منظور محاسبه ضریب انتقال جرم در فاز گاز به عنوان یک پارامتر کلیدی در مدلسازی برج‌های جذب مایع-گاز، تعدادی آزمایش انجام شد که شرایط این آزمایشات و نتایج آن در جدول ۳ ذکر گردیده است. در تمامی این آزمایشات دبی نیتروژن ورودی ۶۰ لیتر بر دقیقه و دبی سولفید هیدروژن ورودی ۱/۶۶ لیتر بر دقیقه می‌باشد در نتیجه ترکیب درصد سولفید هیدروژن ورودی ۲/۶۹ درصد است. مبنای این محاسبات معادله ۱۲ می‌باشد.

ضریب انتقال جرم در فاز مایع تابعی از ضخامت فیلم تشکیل شده روی هر سیم است. با اطمینان از حاکم بودن جریان آرام بر روی سیم‌ها (از طریق محاسبه اعداد رینولدز) و با استفاده از معادله ۱۱ ضریب انتقال جرم در فاز مایع در شکل ۴ و شدت جریان‌های مختلف محاسبه گردیده است. شکل ۴ رابطه ضریب انتقال جرم در فاز مایع با دبی مایع را در سه دمای ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

ضرایب به دست آمده، نتایج تجربی حاصل از سامانه آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدلسازی با هم مقایسه شده است. در مرحله بعد نیز توزیع غلظت سولفید هیدروژن و توزیع دما در طول برج جذب و همچنین تأثیر عواملی همچون دبی فاز مایع و دمای هر دو فاز بر میزان جذب شبیه سازی گردیده است.

### ۴-۱- تخمین ضرایب انتقال حرارت و جرم

مبنای محاسبه ضریب انتقال حرارت در طول برج سیم مرطوب معادله ۱۴ می‌باشد. بدین منظور آزمایش‌های لازم صورت پذیرفته و ضریب انتقال حرارت در دبی‌های مختلف جریان مایع به دست آمده است. در این آزمایشات دمای گاز و مایع ورودی ثابت نگاه داشته شده است و دمای خروجی جریان‌های گاز و مایع ثبت گردیده است. شرایط آزمایشات انجام شده به همراه نتایج آن در جدول ۲ گزارش شده است.



شکل (۳): الگوریتم حل معادلات حاکم منطبق بر روش پانديا

جدول (۲): محاسبه ضریب انتقال حرارت در فاز گاز (دبی گاز: ۶۰ لیتر بر دقیقه)

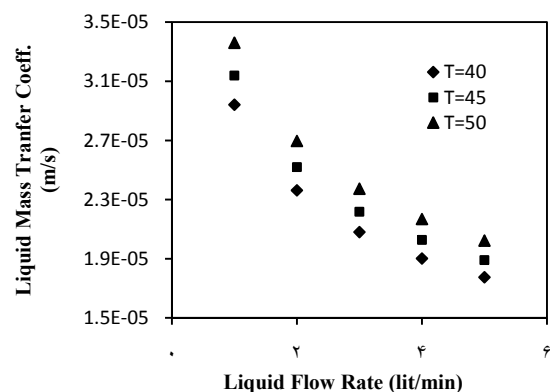
دبی مایع (L/min)	دمای گاز ورودی (°C)	دمای گاز خروجی (°C)	دمای مایع ورودی (°C)	دمای مایع خروجی (°C)	ضریب انتقال حرارت $h_{Ga} \times 10^4 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$
۲	۴۰/۷	۳۸/۳	۴۱/۳	۳۸/۶	۱/۴
۳	۴۱/۱	۳۷/۹	۳۹/۵	۳۸/۳	۱/۶
۴	۳۹/۴	۳۸/۰	۴۰/۱	۳۸/۹	۳/۴
۵	۳۹/۸	۳۸/۰	۴۰/۶	۳۹/۴	۵/۴

جدول (۳): نتایج محاسبه شده ضریب کلی انتقال جرم در فاز گاز

شماره آزمایش	دبی محلول آمین (lit min <sup>-1</sup> )	دمای مایع ورودی (°C)	دمای گاز ورودی (°C)	سولفید هیدروژن در آمین ورودی (ppm)	درصد وزنی آمین	سولفید هیدروژن در گاز خروجی (ppm)	ضریب کلی انتقال جرم در فاز گاز $K_{Ga} \times 10^3 (\text{mol cm}^{-3} \text{ s}^{-1})$
۱	۳	۴۰	۴۰	۰	۰/۱۵	۸۰۳	۱/۷۴۲۸
۲	۳	۴۵	۴۵	۱۰۰۰	۰/۱۸	۷۶۸	۱/۷۶۸۷
۳	۳	۵۰	۵۰	۲۰۰۰	۰/۲۰	۷۸۲	۱/۷۵۵۹
۴	۴	۴۰	۴۰	۱۰۰۰	۰/۱۸	۷۶۸	۱/۷۶۴۸
۵	۴	۴۵	۴۵	۲۰۰۰	۰/۲۰	۷۵۳	۱/۷۷۴۵
۶	۵	۴۰	۴۵	۰	۰/۲۰	۷۳۹	۱/۷۸۳۸
۷	۵	۴۵	۵۰	۱۰۰۰	۰/۱۵	۷۱۸	۱/۷۹۸۰
۸	۵	۵۰	۴۰	۲۰۰۰	۰/۱۸	۷۶۸	۱/۷۶۴۸
۹	۳	۴۰	۴۵	۲۰۰۰	۰/۱۸	۸۰۳	۱/۷۴۲۹
۱۰	۳	۴۵	۴۰	۰	۰/۲۰	۷۸۲	۱/۷۵۶۰
۱۱	۴	۴۰	۴۵	۲۰۰۰	۰/۱۵	۷۵۳	۱/۷۷۴۶
۱۲	۴	۴۵	۵۰	۰	۰/۱۸	۷۰۴	۱/۸۰۷۷
۱۳	۴	۵۰	۴۰	۱۰۰۰	۰/۲۰	۷۴۶	۱/۷۷۹۲
۱۴	۵	۴۰	۵۰	۱۰۰۰	۰/۲۰	۷۵۳	۱/۷۷۴۶
۱۵	۵	۴۵	۴۰	۲۰۰۰	۰/۱۵	۷۶۱	۱/۷۶۹۳

#### ۴-۲- نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی

پس از محاسبه ضرایب انتقال جرم و حرارت، مدل‌سازی برج جذب سییم مرطوب با استفاده از معادلات حاکم و الگوریتم حل انجام گردید. مقایسه‌ی بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از مدل در جدول ۴ ارائه شده است. شرایط انجام آزمایشات منطبق با شرایط مندرج در جدول ۳ می‌باشد. بر اساس نتایج مندرج در جدول ۴ متوسط خطای مطلق مدل ۱۶/۳ درصد می‌باشد. با توجه به فرضیات لحاظ شده در این مدل، تطابق مناسبی بین نتایج مدل‌سازی و تجربی وجود دارد.



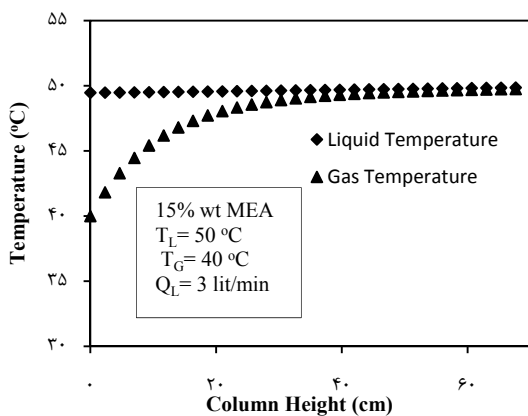
شکل (۴): ضریب انتقال جرم در فاز مایع بر حسب شدت جریان مایع

غلظت سولفید هیدروژن در خوراک گازی ورودی به برج اندک باشد اثر افزایش دما به وسیله واکنش، توسط تبخیر جزء فرار فاز مایع (آب) خنثی شده و توزیع دمای فاز مایع در طول برج تقریباً ثابت می‌ماند.

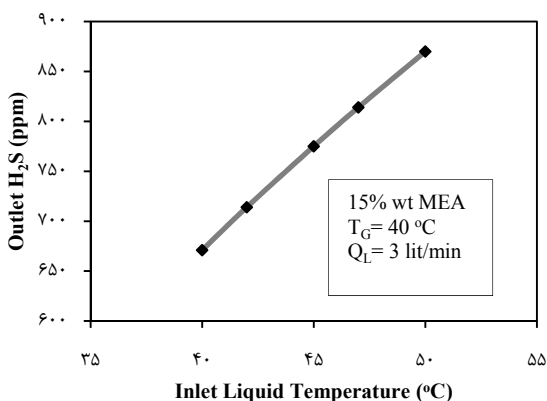
فاز گاز به وسیله انتقال حرارت با فاز مایع به تدریج گرم شده و دمای آن در طول برج به مقدار ماکزیمم رسیده و با دمایی نزدیک به دمای مایع ورودی از برج خارج می‌گردد. شکل ۶ نشان دهنده نتایج شبیه سازی توزیع دمایی فازهای گاز و مایع در طول برج است.

#### ۴-۵- اثر دمای فاز مایع بر میزان جذب

از آنجا که ضریب انتقال جرم در فاز گاز با دما رابطه معکوس دارد؛ لذا با افزایش دما ضریب انتقال جرم کاهش یافته و با توجه به رابطه ۱ در یک طول مشخص از برج غلظت گاز ترش خروجی افزایش می‌یابد. از دیدگاه تعادلی نیز می‌توان این کاهش در میزان جذب را با افزایش مقدار  $K$ -value با دما تفسیر کرد. بنابراین فاکتور جذب کاهش یافته و این بدین معنی است که در یک طول مشخص از برج، مقدار جداسازی کاهش می‌یابد. شکل ۷ نشان دهنده اثر دمای مایع بر غلظت سولفید هیدروژن خروجی است.



شکل (۶): توزیع دمای گاز و مایع در طول برج



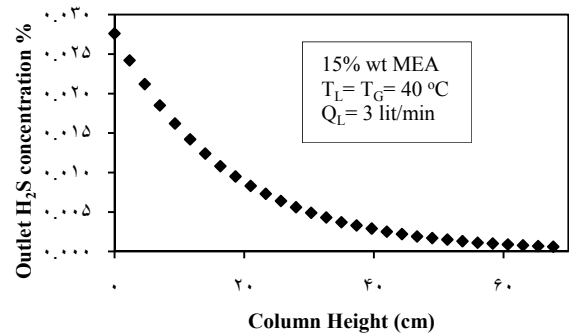
شکل (۷): اثر دمای آمین ورودی بر میزان جذب

جدول (۴) مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی

شماره آزمایش	غلظت سولفید هیدروژن در خروجی (ppm)		درصد خطا
	نتایج تجربی	نتایج مدل‌سازی	
۱	۸۰۳	۶۷۱	۱۶ / ۴
۲	۷۶۸	۸۰۶	۵
۳	۷۸۲	۹۵۱	۲۱
۴	۷۶۰	۵۳۲	۳۰
۵	۷۵۳	۶۷۰	۱۱
۶	۷۳۹	۵۰۴	۳۱
۷	۷۱۸	۸۵۰	۱۸
۸	۷۶۸	۶۷۰	۱۲
۹	۸۰۳	۶۸۲	۱۵
۱۰	۷۸۲	۶۳۵	۱۸
۱۱	۷۵۳	۷۱۰	۵
۱۲	۷۰۴	۸۱۳	۱۵
۱۳	۷۴۶	۶۷۰	۱۰
۱۴	۷۵۳	۵۶۸	۲۴
۱۵	۷۶۱	۶۶۴	۱۲

#### ۴-۳- توزیع غلظت سولفید هیدروژن در طول برج

در شکل ۵ نتایج شبیه سازی توزیع غلظت سولفید هیدروژن در طول برج جذب سیم مرطوب نشان داده شده است. کاهش غلظت سولفید هیدروژن به علت جذب در محلول حاوی آمین مورد انتظار است.



شکل (۵): توزیع غلظت سولفید هیدروژن در طول برج

#### ۴-۴- توزیع دمایی فازهای مایع و گاز

با توجه به این که جذب گاز پدیده‌ای گرمازا است، انتظار می‌رود که دمای فاز مایع در طول برج افزایش یابد. همچنین سرعت واکنش در انتهای برج بیشتر بوده، بنابراین افزایش بیشتر دمای فاز مایع در این ناحیه مورد انتظار است. اما با توجه به انتقال حرارت فاز مایع با گاز سرد ورودی، دمای مایع در انتهای برج کاهش می‌یابد. در نتیجه شاهد ایجاد یک نقطه ماکزیمم در توزیع دمای مایع خواهیم بود. در صورتی که

نیز اثر متغیرهایی همچون دمای فاز گاز و مایع ورودی و شدت جریان فاز مایع بر میزان جذب سولفید هیدروژن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مزایایی همچون افت فشار بسیار کم و ظرفیت جذب و بازدهی همریدیف برج‌های پر شده، این برجه‌ها گزینه مناسبی برای بکارگیری در واحدهای جداسازی به عنوان یک تماس دهنده گاز - مایع می‌باشند.

#### ۶- علائم اختصاری و نمادها

علائم انگلیسی

$a$	سطح ویژه در واحد حجم ( $m^2.m^{-3}$ )
$C$	غلظت ( $mol.m^{-3}$ )
$C_p$	گرمای ویژه ( $J/mol.^{\circ}C$ )
$D$	ضریب نفوذ در مایع ( $m^2.s^{-1}$ )
$D_H$	قطر هیدرولیکی (m)
$E$	فاکتور تقویت
$G$	فلکس مولی گاز ( $mol.m^2.s^{-1}$ )
$g$	شتاب گرانش ( $m.s^{-2}$ )
$\Delta H_R$	گرمای واکنش ( $J.mol^{-1}$ )
$h$	ضریب انتقال حرارت ( $J/m^2.s.^{\circ}C$ )
$He$	ثابت هنری ( $mol.m^3.atm^{-1}$ )
$K_G$	ضریب کلی انتقال جرم ( $mol.m^2.s^{-1}$ )
$k_G$	ضریب انتقال جرم در فاز گاز ( $mol.m^2.s^{-1}.atm^{-1}$ )
$k_L$	ضریب انتقال جرم در فاز مایع ( $mol.s^{-1}$ )
$L_M$	فلکس مولی مایع ( $mol.m^2.s^{-1}$ )
$P$	فشار کل (atm)
$p$	فشار جزئی (atm)
$Re$	عدد رینولدز
$R_s$	شعاع سیم (m)
$T$	دما ( $^{\circ}C$ )
$\dot{V}_L$	دبی حجمی مایع روی هر سیم ( $m^3.s^{-1}$ )
$\bar{V}_z$	سرعت متوسط مایع روی سیم ( $m.s^{-1}$ )
$v$	ضریب استوکیومتری واکنش آمین و سولفید هیدروژن
$Y$	نسبت مولی به گاز حامل
$y$	کسر مولی
$Z$	ارتفاع برج (m)

علائم یونانی

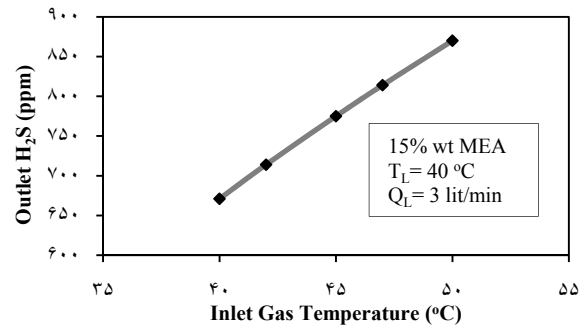
$\alpha$	نسبت شعاع سیم مرطوب به سیم خشک
$\lambda$	گرمای نهان تیخیر ( $J.mol^{-1}$ )
$\mu$	ویسکوزیته ( $kg.m^{-1}.s^{-1}$ )
$\rho$	دانسیته ( $kg.m^{-3}$ )

زیروندها

$A$	ترکیب اسیدی (سولفید هیدروژن)
$B$	گاز حامل بی اثر (نیتروژن)
$b$	توده فاز
$e$	شرایط تعادلی
$G$	فاز گاز
$i$	سطح مشترک
$L$	فاز مایع
$R$	جزء فعال شیمیایی (مونواتانول آمین)
$S$	جزء فرار در حلال (بخار آب)

#### ۴-۶- اثر دمای فاز گاز بر میزان جذب

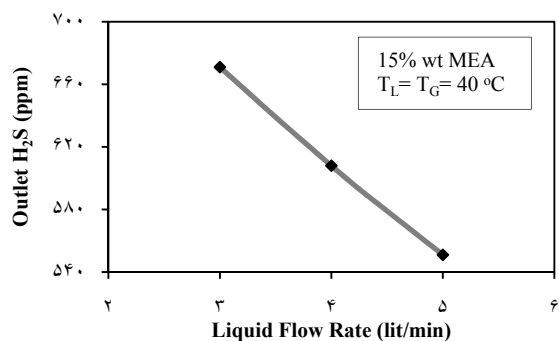
همان‌طور که توضیح داده شد؛ با افزایش دما ضریب انتقال جرم در فاز گاز کاهش یافته و در نتیجه ضریب جذب و مقدار جداسازی نیز کاهش می‌یابد. شکل ۸ نشان دهنده اثر دمای گاز ورودی بر غلظت سولفید هیدروژن خروجی است.



شکل (۸): اثر دمای فاز گاز ورودی بر میزان جذب

#### ۴-۷- اثر شدت جریان مایع بر میزان جذب

با افزایش شدت جریان مایع ضریب انتقال جرم در فاز مایع و گاز هم‌زمان افزایش می‌یابد و طبق معادله ۱ مقدار جداسازی افزایش می‌یابد. در حقیقت با افزایش شدت جریان مایع، فاز گاز با مقدار بیشتری از مایع تماس داده شده و همین امر باعث افزایش جداسازی می‌گردد. شکل ۹ نمایش دهنده اثر شدت جریان مایع بر غلظت سولفید هیدروژن خروجی است.



شکل (۹): اثر شدت جریان مایع بر میزان جذب

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله جذب سولفید هیدروژن با استفاده از محلول مونواتانول آمین در یک برج سیم مرطوب مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور یک برج جذب شامل ۸۵ رشته سیم مرطوب طراحی و ساخته شد. با انجام یک دسته از آزمایشات ضرایب انتقال جرم و حرارت مختص برج سیم مرطوب تعیین گردید. همچنین نتایج مدل‌سازی عملکرد برج با استفاده از روش پاندیا، تطابق خوبی را با نتایج تجربی نشان داد. در پایان



## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران به دلیل حمایت‌های انجام گرفته، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## مراجع

- [4] H. Migita, K. Soga, and H. K. Mori (2005) "Gas absorption in wetted wire column" *AICHE Journal*, 51(8), 2190-2198.
- [5] S. Taheri, S. G. Pakdehi, and A. Rezaei (2010) "Natural gas sweetening by wetted wire column" *World Academy of Science: Engineering and Technology*, 47, 754-757.
- [6] S. G. Pakdehi, and S. Taheri (2010) "Separation of hydrazine from air by wetted wire column", *Chemical Engineering & Technology*, 33, 1687-1694.
- [7] S. G. Pakdehi, and S. Taheri (2008) "A study on performance of wetted wire column (WWC) in separation of ammonia from air", *18<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA 2008)*, Prague, Czech Republic.
- [8] J. D. Pandya (1982) "Adiabatic gas absorption and stripping with chemical reaction in packed tower", *Chemical Engineering Communications*, 19, 343-358.
- [1] K. Hattori, M. Ishikawa, and Y. H. Mori (1994) "Strings of liquid contact beads for gas-liquid operations", *AICHE Journal*, 40(12), 1983-1992.
- [2] H. Chinju, K. Uchiyama, and Y. H. Mori (2000) "String of beads: flow of liquid on vertical wires for gas absorption", *AICHE Journal*, 46, 937-945.
- [3] K. Uchiyama, H. Migita, R. Ohmura, and Y. H. Mori (2003) "Gas absorption into string of beads: liquid flow with chemical reaction: application to carbon dioxide separation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 457-468.

## Experimental study and modeling of hydrogen sulfide absorption with amine solutions in a wetted wire column

M. Ghasemzadeh<sup>1</sup>, R. Alizadeh<sup>1,\*</sup>, E. Fatehifar<sup>1</sup>, P. Roohi<sup>1</sup>, M. Banihashemi<sup>1</sup>

1. Environmental Engineering Research Center, Chemical Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

---

### ABSTRACT

Absorption of hydrogen sulfide with aqueous amine solution is one of the most important processes in refinery units. Tray and packed columns are widely used for removal of hydrogen sulfide. For modeling of these kind equipments, equilibrium and rate-based techniques can be used. Since, the hydrogen sulfide absorption with amine solutions is a reactive absorption; using equilibrium-based models would not attain appropriate results. In this study, the wetted wire column was properly introduced; low pressure experimental setup of hydrogen sulfide absorption with amine solutions was constructed and then different type of experiments were performed. The heat transfer coefficient, the gas phase mass transfer coefficient were determined experimentally based on liquid flow-rate, inlet liquid and gas temperatures, amine weight percent and also hydrogen sulfide loading. Also by assuming laminar liquid film over the wires, velocity distribution and liquid phase mass transfer coefficient were calculated based on liquid flow-rate and mean gas-liquid flow temperatures. For modeling the process the general computer code was created. There is a good consistency between experimental data and simulation results; additionally, the effect of different parameters such as liquid flow rate and gas-liquid phase temperature on absorption amount were examined.

---

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: Jan. 8, 2014

Revised: July 7, 2014

Accepted: Jan. 24, 2015

---

Key words:

Wetted wire column

Hydrogen sulfide

Reactive absorption

MEA

Rate-based models

\* Corresponding author

r.alizadeh@sut.ac.ir

---

All right reserved.