

تحلیل و شبیه‌سازی فرآیند تصفیه گازهای انتهایی: بررسی کارایی حلال‌های مختلف در حذف هیدروژن سولفید در برج جذب به وسیله نرم‌افزار اسپن هایسیس

مجتبی عزیزی^{۱*}، محمدامین قنواتی^۲، سید کرم ساعدی^۳، فرید عزیزی^۴

۱-دانشکده شیمی و مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران - ایران

صندوق پستی ۱۶۷۶۵-۳۳۵۴

۲-دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳-دانشکده مدیریت تکنولوژی و مدیریت صنعتی دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات

۴-دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم آباد

ایمیل نویسنده مسئول: azizi.m_58@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲

چکیده

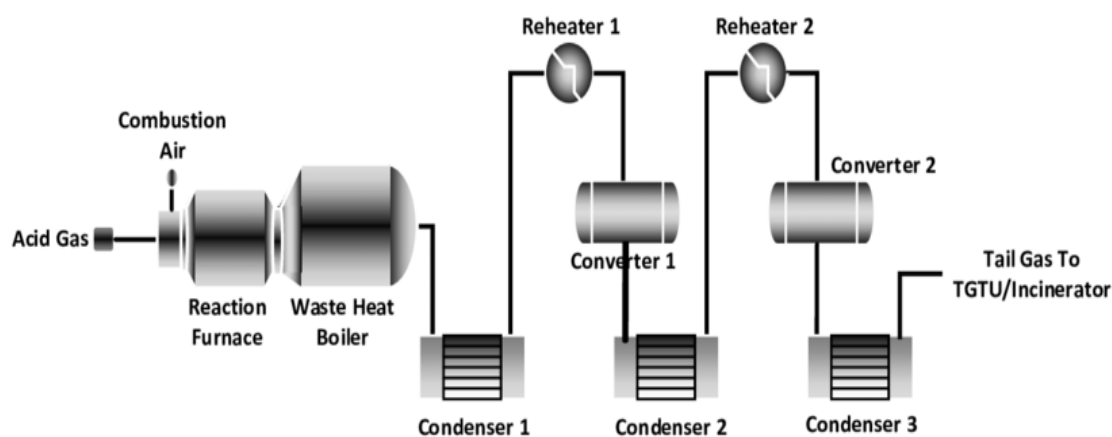
آلاینده‌های ناشی از فرآیندهای صنعتی، به‌ویژه ترکیبات گوگردی، به یکی از چالش‌های اساسی در صنایع شیمیایی تبدیل شده است. هیدروژن سولفید یکی از ترکیبات گوگردی مضر است که به دلیل سمی بودن، خاصیت خوردگی بالا و اثرات زیست‌محیطی نامطلوب، نیازمند حذف موثر از جریان‌های گازی می‌باشد [۱]. فرآیند کلاوس به‌عنوان یک روش متداول برای بازیابی گوگرد از جریان‌های گاز اسیدی شناخته شده است. با این حال، این فرآیند به‌تنهایی قادر به حذف کامل آلاینده‌ها، به‌ویژه در پاسخ به استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی، نیست. به همین دلیل، واحدهای تصفیه گازهای انتهایی به‌عنوان مکمل فرآیند کلاوس طراحی شده‌اند [۲]. این واحدها با استفاده از روش‌های متنوع، مانند جذب آمینی و هیدروژناسیون، قادر به حذف مقادیر باقی‌مانده ترکیبات گوگردی از جریان گاز خروجی هستند [۳]. در این پژوهش، شبیه‌سازی یک واحد تصفیه گازهای انتهایی با استفاده از نرم‌افزار اسپن هایسیس انجام شده است. هدف اصلی، بررسی عملکرد فرآیند، تحلیل تأثیر تغییرات شرایط عملیاتی، و مقایسه کارایی سه حلال مختلف در حذف هیدروژن سولفید می‌باشد. این شبیه‌سازی امکان ارزیابی دقیق و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی واحد را فراهم کرده و به بهبود طراحی و کارایی این واحدها در مقیاس صنعتی کمک می‌کند. این مقاله با ارائه تحلیل‌های جامع از عملکرد فرآیند، می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری در خصوص طراحی و بهره‌برداری بهینه از واحدهای تصفیه گازهای انتهایی در صنایع مرتبط باشد.

واژگان کلیدی: هیدروژن سولفید - کلاوس - تصفیه گازهای انتهایی - حلال‌های آمینی.

مقدمه

هیدروژن سولفید یک ترکیب سمی و مضر است که به ویژه در صنایع شیمیایی به میزان قابل توجهی تولید می شود. این گاز می تواند اثرات مخربی بر محیط زیست و سلامت انسان ها داشته باشد. برای حذف این ترکیب خطرناک، روش های متعددی توسعه یافته اند. یکی از مهم ترین این روش ها، فرایندهای مبتنی بر واکنش کلاوس است که به طور گسترده برای تبدیل هیدروژن سولفید به گوگرد عنصری و آب به کار می رود. این روش به دلیل کارایی بالا و توانایی در کاهش آلاینده ها، در بسیاری از صنایع کاربرد وسیعی پیدا کرده است.

کارایی فرایندهای مبتنی بر کلاوس به عوامل متعددی وابسته است که از مهم ترین آن ها می توان به نوع و تعداد بسترهای کاتالیستی اشاره کرد. در این فرآیند، بسترهای کاتالیستی نقش مهمی در تبدیل هیدروژن سولفید به گوگرد عنصری ایفا می کنند. انتخاب نوع کاتالیست و تعداد مراحل بسترهای کاتالیستی می تواند بر بازده فرآیند و میزان حذف آلاینده ها تأثیر زیادی داشته باشد. به عنوان مثال، استفاده از بسترهای کاتالیستی چندمرحله ای، معمولاً به افزایش بازده و حذف کامل تر هیدروژن سولفید منجر می شود، در حالی که نوع کاتالیست می تواند روی دما و شرایط عملیاتی مورد نیاز برای دستیابی به کارایی بالا تأثیرگذار باشد. شکل ۱ یک فرآیند کلاوس بهبود یافته با دو بستر کاتالیستی را نشان می دهد. [4,5].



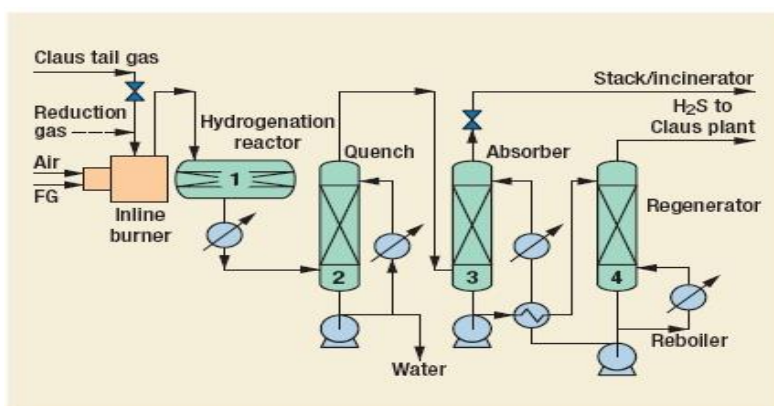
شکل ۱ فرآیند کلاوس بهبود یافته

با وضع مقررات زیست محیطی جدید و سخت گیرانه تر، نیاز به حذف کامل تر و موثرتر ترکیبات مضرمانند هیدروژن سولفید به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در این شرایط، برخی از فرایندهای مبتنی بر کلاوس، از جمله فرآیند کلاوس بهبود یافته، دیگر قادر به ارائه کارایی لازم برای برآورده سازی استانداردهای جدید نیستند. این محدودیت ها شامل کاهش بازده حذف گوگرد در غلظت های

پایین هیدروژن سولفید و ناکارآمدی در حذف ترکیبات آلاینده ثانویه است. به همین دلیل، تحقیقات و توسعه روش های جایگزین یا مکمل، به شدت مورد توجه قرار گرفته است [6].

یکی از این روش ها، واحد تصفیه گازهای انتهایی^۱ است. این واحد برای افزایش کارایی فرآیند حذف هیدروژن سولفید طراحی شده و امکان بازیابی گوگرد از گازهای خروجی فرآیند کلاوس را فراهم می کند. با استفاده از این روش، میزان انتشار ترکیبات گوگردی به حداقل رسیده و با رعایت استانداردهای زیست محیطی، اثرات مخرب بر محیط زیست کاهش می یابد [7].

اساس این روش بر استفاده از یک راکتور هیدروژناسیون و یک برج جذب آمینی استوار است. در این فرآیند، گازهای خروجی ابتدا وارد راکتور هیدروژناسیون می شوند، جایی که ترکیبات گوگردی باقی مانده مانند گوگرد دی اکسید و گوگرد عنصری به هیدروژن سولفید تبدیل می شوند. سپس گاز حاوی به برج جذب آمینی هدایت می شود، جایی که آمین به عنوان جاذب شیمیایی عمل کرده و هیدروژن سولفید را به طور مؤثر جدا می کند. این روش نه تنها باعث افزایش بازیابی گوگرد می شود، بلکه انتشار گازهای آلاینده به محیط زیست را نیز به حداقل می رساند. شکل ۲ شمای کلی این واحد را نشان می دهد [8].



شکل ۲ فرآیند تصفیه گازهای انتهایی

درون برج جذب آمین، می توان از انواع مختلف حلال های آمینی استفاده کرد که بسته به شرایط فرآیند و نوع ترکیبات موجود در گازهای خروجی انتخاب می شوند. از جمله حلال های رایج می توان به مونواتانول آمین^۲، دی اتانول آمین^۳، متیل دی اتانول آمین^۴ و آمین های ترکیبی یا اصلاح شده اشاره کرد. هر یک از این حلال ها ویژگی های خاص خود را دارند جدول ۱ مقایسه میان این حلال ها را ارائه می دهد [9].

¹ Tail Gas Treatment Unit

² MEA

³ DEA

⁴ MDEA

جدول ۱ مقایسه میان حلال‌ها

کاربرد	حلال
به دلیل ظرفیت جذب بالا برای H_2S و CO_2 ، برای حذف کامل تر این گازها مناسب است، اما ممکن است در برابر تخریب حرارتی و شیمیایی حساس تر باشد.	MEA
پایداری بیشتری نسبت به MEA دارد و در کاربردهایی با غلظت پایین تر H_2S مؤثر	DEA
به دلیل انتخاب پذیری بالا برای H_2S و قابلیت کار در فشارهای پایین تر، در فرآیندهای صنعتی پیشرفته ترجیح داده می‌شود.	MDEA

استفاده از ترکیبات یا حلال‌های اصلاح شده می‌تواند تعادل بهتری بین کارایی جذب، پایداری و هزینه‌های عملیاتی ارائه دهد [10].

شبیه سازی و روش‌ها

جهت شبیه‌سازی این فرآیند، از نرم‌افزار شبیه‌ساز اسپن هایسیس^۵ استفاده می‌کنیم. این نرم‌افزار یکی از ابزارهای قدرتمند در مهندسی شیمی است که قابلیت مدل‌سازی دقیق فرآیندهای پیچیده مانند واحد تصفیه گازهای انتهایی را دارد. این نرم‌افزار با ارائه قابلیت‌های پیشرفته در شبیه‌سازی فرآیندهای شیمیایی، امکان تحلیل عملکرد فرآیند، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، و ارزیابی اثرات تغییرات مختلف در پارامترهای فرآیندی را فراهم می‌کند. این نرم‌افزار به کاربران اجازه می‌دهد تا سناریوهای مختلف را شبیه‌سازی و بررسی کنند و از نتایج آن برای طراحی، عیب‌یابی، و بهبود کارایی واحدهای صنعتی استفاده کنند. در این واحد به خصوص استفاده از این نرم‌افزار شبیه‌ساز برخی از امکانات مهم را در اختیار کاربر قرار می‌دهد که برخی از آن‌ها عبارتند از: شبیه‌سازی فرآیند اجازه می‌دهد تا عملکرد واحد در شرایط مختلف عملیاتی بررسی شود و بازده حذف هیدروژن سولفید و مقدار گوگرد بازیابی شده به صورت دقیق محاسبه شود. اثر تغییرات دما، فشار، نوع حلال، و غلظت گازهای ورودی در عملکرد کلی این فرآیند، از طریق تحلیل نتایج شبیه‌سازی، می‌توان بهترین ترکیب از شرایط عملیاتی را شناسایی کرد که نه تنها بازده فرآیند را افزایش دهد، بلکه هزینه‌های عملیاتی و انتشار آلاینده‌ها را نیز کاهش دهد. این قابلیت‌ها امکان طراحی و اجرای فرآیندهایی با کارایی بالا و سازگار با استانداردهای زیست‌محیطی را فراهم می‌کند. در شبیه‌سازی فرآیند تصفیه گازهای انتهایی از دو بسته ترمودینامیکی زیر استفاده می‌شود که هر یک کاربرد خاصی در مدل‌سازی این نوع فرآیندها دارند:

⁵ Aspen HYSYS

۱- Peng-Robinson (PR): این بسته ترمودینامیکی برای مدل سازی رفتار فازی گازها و مایعات در فشارها و دماهای بالا استفاده می شود. در این فرآیند، PR معمولاً برای شبیه سازی رفتار گازهای ورودی و محصولات خروجی، شامل هیدروژن سولفید، دی اکسید کربن، و گوگرد استفاده می شود. این معادله حالت ترمودینامیکی به صورت زیر است [11].

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a\alpha}{v(v+b) + b(v-b)} \quad (1)$$

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (2)$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

$$\alpha = (1 + m(1 - \sqrt{T_r}))^2 \quad (4)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (5)$$

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \quad (6)$$

۲- Acid Gas - Chemical Solvents: این بسته برای شبیه سازی فرآیندهای جذب شیمیایی با استفاده از حلال های آمینی طراحی شده است. این بسته می توان واکنش های شیمیایی بین هیدروژن سولفید و حلال های آمینی را با دقت مدل سازی کرد.

برای شبیه سازی این فرآیند در نرم افزار اسپن هایسیس، از روش Sequential Modular استفاده شده است. این روش یکی از رویکردهای متداول در شبیه سازی فرآیندهای پیچیده است. در این روش، هر تجهیز (مانند راکتور هیدروژناسیون، برج آمینی، و مبدل های حرارتی) به صورت جداگانه و به ترتیب شبیه سازی می شود. خروجی هر تجهیز به عنوان ورودی تجهیز بعدی مورد استفاده قرار می گیرد. این روش امکان مدیریت ساده تر فرآیندهای پیچیده را فراهم می کند، زیرا هر بخش به صورت مستقل حل شده و خطاهای احتمالی محدود به همان بخش خواهند بود. پس از شبیه سازی تمامی تجهیزات و ترکیب داده ها، فرآیند به صورت کلی حل می شود و نتایج نهایی به دست می آید [12].

بحث و نتایج

در ابتدای ارائه نتایج، جریان گاز اسیدی که از فرآیند کلاوس خارج می شود و حاوی مقادیر مختلفی از آلاینده ها است، به منظور حذف این ترکیبات مضر به فرآیند تصفیه گازهای انتهایی وارد می شود. در این مرحله، بررسی دقیق شرایط عملیاتی و ترکیب درصد گاز خروجی ضروری است تا کارایی فرآیند و بازده حذف آلاینده ها بهینه شود. شرایط عملیاتی و ترکیب درصد این جریان مطابق جدول ۲ تنظیم و تحلیل شده است.

جدول ۲ شرایط عملیاتی و ترکیب درصد این جریان ورودی به واحد

کیلوپاسکال	۱۳۶,۳	واحد	فشار	سلسیوس	۱۶۹	واحد	دما
	ترکیب درصد		ماده		ترکیب درصد		ماده
	۰/۰۱۱۶		هیدروژن سولفید		۰/۰۲۲		هیدروژن
	۰/۰۰۵۸		گوگرد دی اکسید		۰/۶۰۹۲		نیتروژن
	۰/۳۵۰۷		آب		۰/۰۰۰۳		کربن مونو اکسید
	۰/۰۰۰۱		گوگرد عنصری		۰/۰۰۰۱		کربن دی اکسید

این داده‌ها به‌عنوان ورودی شبیه‌سازی فرآیند مورد استفاده قرار گرفته و مبنای ارزیابی عملکرد واحد تصفیه گازهای انتهایی قرار می‌گیرند.

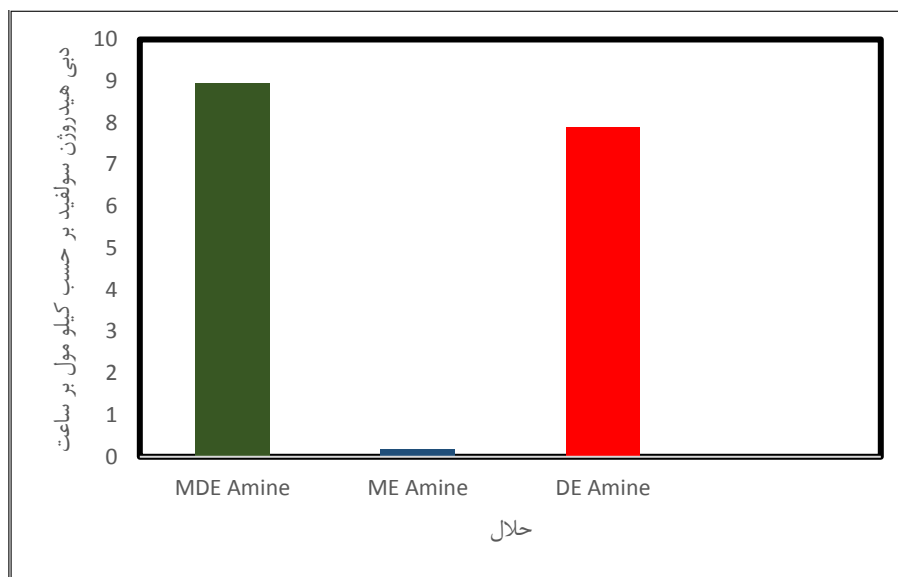
در قسمت اول این فرآیند، که در راکتور هیدروژناسیون اتفاق می‌افتد، تمامی ترکیبات حاوی گوگرد مانند گوگرد دی‌اکسید و گوگرد عنصری از طریق واکنش‌های شیمیایی به هیدروژن سولفید تبدیل می‌شوند. این مرحله به منظور آماده‌سازی گاز برای فرآیند جذب در بخش آمینی طراحی شده است. لازم به ذکر است گاز خروجی از این راکتور قبل از وارد شدن به مرحله جذب آمینی از یک برج خنک کننده عبور می‌کند.

پس از این مرحله، گاز حاصل، که عمدتاً حاوی هیدروژن سولفید است، وارد برج جذب آمینی می‌شود. شرایط عملیاتی و ترکیب درصد جریان گاز ورودی به این بخش در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ شرایط عملیاتی و ترکیب درصد این جریان ورودی به برج جذب

کیلوپاسکال	۱۱۵/۳	واحد	فشار	سلسیوس	۳۹/۱۲	واحد	دما
	ترکیب درصد		ماده		ترکیب درصد		ماده
	۰/۰۲۶۵		هیدروژن سولفید		۰/۰۳۳۷		هیدروژن
	۰		گوگرد دی اکسید		۰/۸۷۸۰		نیتروژن
	۰/۰۶۱۱		آب		۰		کربن مونو اکسید
	۰		گوگرد عنصری		۰/۰۰۰۷		کربن دی اکسید

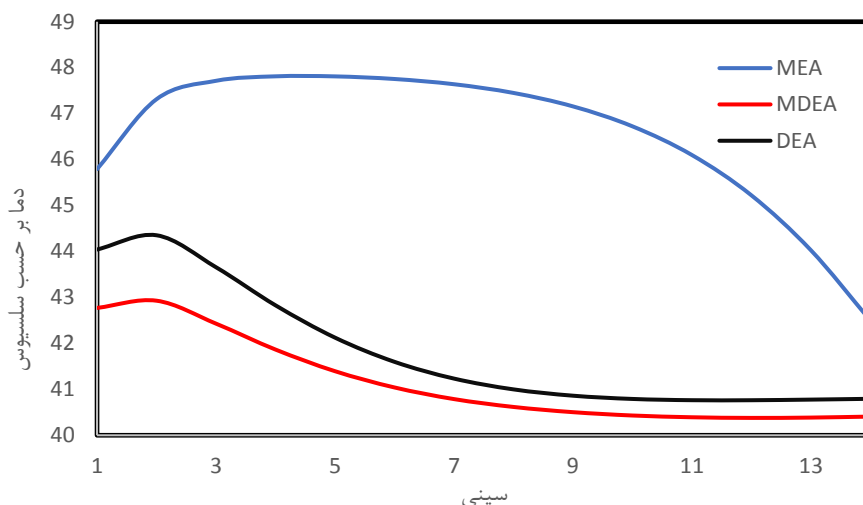
این جریان، پس از وارد شدن به برج آمینی، با استفاده از یک حلال آمینی، تحت فرآیند جذب شیمیایی قرار می گیرد. در این فرآیند، هیدروژن سولفید موجود در جریان گاز به طور مؤثر توسط حلال جدا شده و وارد فاز مایع می شود. برای این کار سه حلال متفاوتی که در قسمت قبل از آن ها نام برده شد مورد بررسی قرار گرفتند شرایط این بررسی به این صورت است که هر سه حلال با میزان برابر و در شرایط عملیاتی یکسان به برج جذب آمینی وارد می شوند. اساس مقایسه بر میزان هیدروژن سولفید باقی مانده درون جریان گاز خروجی از برج جذب است. این مقایسه به بهینه سازی انتخاب حلال در شرایط عملیاتی مشخص کمک می کند و می تواند مبنایی برای طراحی و بهبود فرآیندهای صنعتی مشابه باشد. در این مقایسه دبی جریان حلال ورودی برابر ۵۰۰ کیلو مول بر ساعت است و این جریان حلال حاوی حلال مورد نظر و آب می باشد میزان آب درون این جریان برابر ۸۶/۸۷٪ می باشد. شکل ۳ مقایسه میان این حلال ها را نشان می دهد



شکل ۳ مقایسه میان کارایی ۳ حلال مختلف

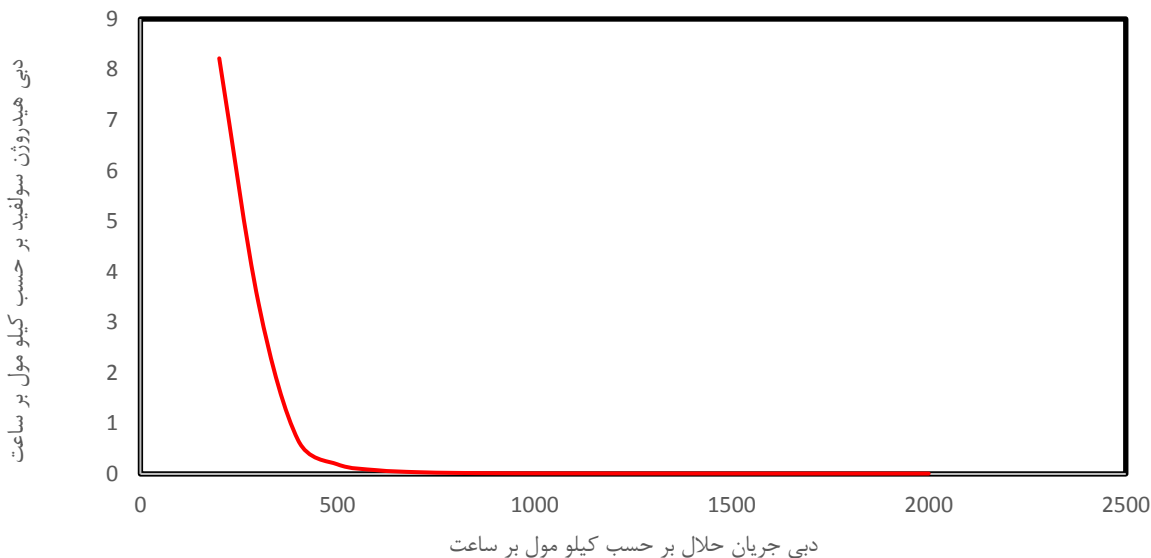
بر اساس این مقایسه حلال MEA از دو حلال دیگر عملکرد بهتری دارد. البته باید توجه داشت که عواملی مانند شرایط عملیاتی می‌توانند بر این مقایسه اثر بگذارند. هم‌چنین باید به محدودیت‌های عملیاتی این حلال که در قسمت قبل به آن‌ها اشاره شد توجه داشت. بنابراین برای استفاده از MEA در کاربردهای صنعتی، لازم است مزایا و محدودیت‌های آن به دقت بررسی شود و با توجه به شرایط عملیاتی، این حلال بهینه‌سازی شود یا از ترکیبات جایگزین در صورت نیاز استفاده گردد.

شکل ۴ نمایانگر پروفایل دمایی درون برج جذب برای هر یک از حلال‌ها است. این پروفایل دمایی نشان می‌دهد که چگونه دما در طول برج جذب تغییر می‌کند و اطلاعات مهمی در مورد عملکرد جذب و رفتار ترمودینامیکی هر حلال فراهم می‌کند. مطابق این شکل پیک دمایی عمولاً در نزدیکی نقطه تماس اولیه گاز و حلال، واکنش‌های شیمیایی بین گاز اسیدی و حلال رخ می‌دهد، که منجر به تولید حرارت می‌شود. میزان و محل پیک دما بستگی به نوع حلال و نرخ واکنش آن دارد. MEA پیک دمایی بالاتری دارد که به دلیل سرعت واکنش بالاتر با هیدروژن سولفید است. حلال‌هایی که ظرفیت جذب بیشتری دارند، ممکن است شیب دمایی ملایم‌تری نشان دهند. بنابراین مطابق این شکل ظرفیت جذب MEA در غلظت‌های بالا می‌تواند یک چالش برای آن باشد.



شکل ۴ پروفایل دمایی برج جذب

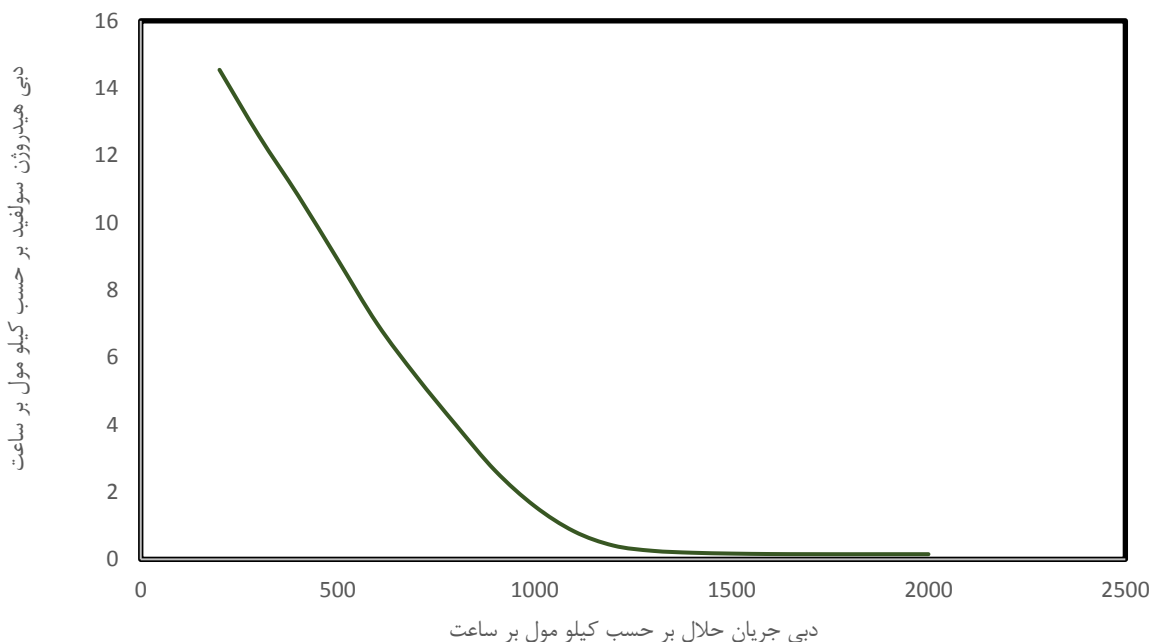
در مرحله بعد، دبی جریان حلال ورودی به برج جذب برای هر سه حلال تغییر داده شد. این تغییرات به منظور ارزیابی تأثیر دبی حلال بر میزان حذف هیدروژن سولفید انجام گرفت. این بررسی به ما نشان می‌دهد که افزایش یا کاهش دبی حلال چگونه بر بازده حذف هیدروژن سولفید تأثیر می‌گذارد. شکل ۵ این پارامتر را برای حلال MEA نشان می‌دهد



شکل ۵ تأثیر دبی حلال MEA بر کارایی برج

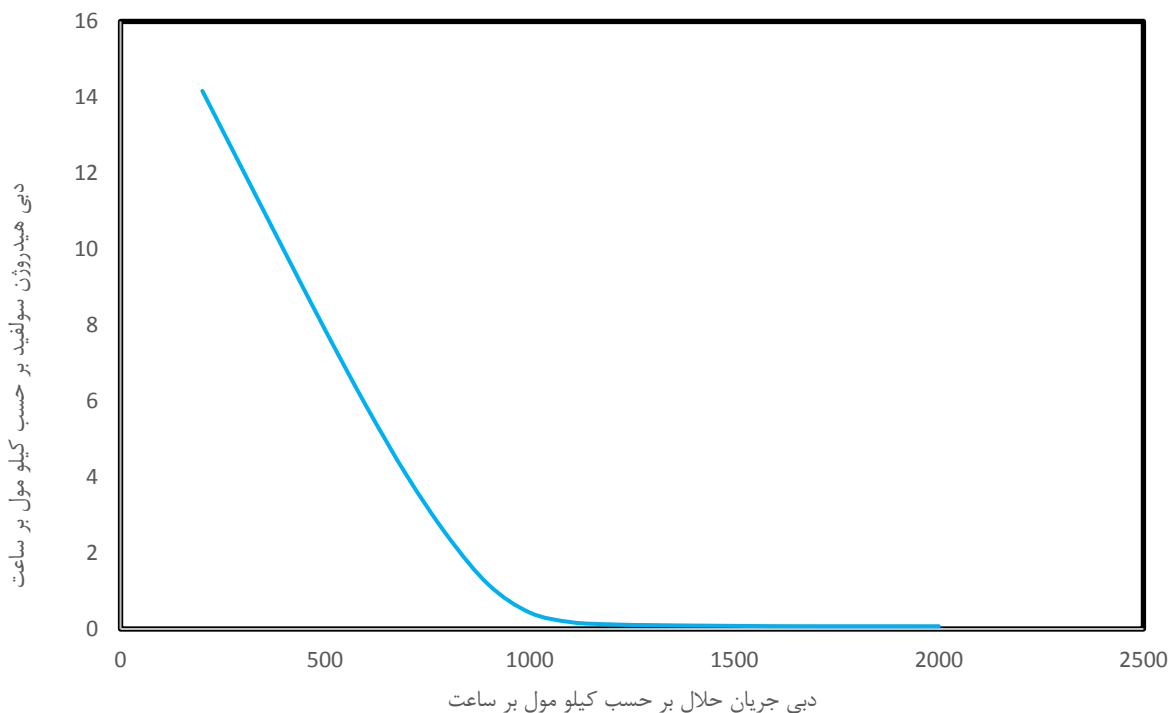
این شکل نشان می‌دهد که با افزایش دبی حلال، تماس بیشتری بین حلال و گاز اسیدی ایجاد می‌شود که می‌تواند میزان حذف هیدروژن سولفید را افزایش دهد. اما پس از یک حد مشخص، افزایش بیشتر دبی ممکن است بازده را به دلیل اشباع یا محدودیت‌های

انتقال جرم تغییر چندانی ندهد. این حد برای این حلال در حدود ۷۰۰ کیلو مول بر ساعت است. شکل ۶ این پارامتر را برای حلال MDEA نشان می دهد



شکل ۶ تاثیر دبی حلال MDEA بر کارایی برج

مطابق نتایج حاصل این حلال برای رسیدن به نقطه ای که بیشترین حذف را داشته باشد باید دبی در حدود ۱۴۰۰ کیلو مول بر ساعت داشته باشد که نسبت به حلال قبل عدد به مراتب بزرگتری است. شکل ۷ این پارامتر را برای حلال DEA نشان می دهد مطابق نتایج حاصل از شبیه سازی، برای دستیابی به نقطه ای که در آن بیشترین حذف هیدروژن سولفید اتفاق می افتد، دبی بهینه حلال برابر با ۱۱۰۰ کیلو مول بر ساعت تعیین شد. این مقدار به گونه ای است که عملکرد آن میان دو حلال دیگر قرار می گیرد. افزایش بیشتر از این دبی، احتمالاً تأثیر ناچیزی بر بازده جذب خواهد داشت و تنها هزینه های عملیاتی را افزایش می دهد.



شکل ۷ تاثیر دبی حلال DEA بر کارایی برج

بنابراین، حلال MEA در شرایط بررسی شده عملکرد بهتری نسبت به دو حلال دیگر از خود نشان می دهد. این نتیجه نشان دهنده ویژگی های مطلوب MEA در جذب هیدروژن سولفید است. MEA با سرعت بیشتری با هیدروژن سولفید واکنش می دهد که منجر به جذب مؤثرتر می شود. در مقایسه با حلال های دیگر قادر است در شرایط مشابه مقدار بیشتری از هیدروژن سولفید را از جریان گاز حذف کند. اما با وجود عملکرد برتر، باید محدودیت های MEA مانند خوردگی تجهیزات، نیاز به انرژی بالاتر برای احیا، و کاهش بازده در غلظت های بالای کربن دی اکسید مدنظر قرار گیرد. بنابراین MEA با توجه به بازده بالای خود، می تواند به عنوان گزینه ای مناسب در فرآیندهای تصفیه گاز استفاده شود، به شرطی که محدودیت های آن در طراحی فرآیند و انتخاب مواد تجهیزات به دقت لحاظ گردد.

نیتجه گیری

در این مطالعه، عملکرد سه حلال مختلف در فرآیند حذف هیدروژن سولفید از جریان گازهای اسیدی بررسی شد در واحد تصفیه گازهای انتهایی بررسی شد. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با استفاده از نرم‌افزار Aspen HYSYS و با رویکرد Sequential Modular، امکان تحلیل دقیق عملکرد فرآیند و مقایسه حلال‌ها را فراهم کرد. بر اساس نتایج حلال MEA به دلیل واکنش پذیری بالا، توانست عملکرد بهتری نسبت به دو حلال دیگر ارائه دهد و بیشترین میزان حذف هیدروژن سولفید را در شرایط عملیاتی یکسان نشان دهد. دبی بهینه حلال برای دستیابی به حداکثر حذف هیدروژن سولفید، برای هر سه حلال تعیین شد. MEA در مقایسه با حلال‌های دیگر، به دبی کمتری نیاز داشت که از نظر اقتصادی مزیت محسوب می‌شود. پروفایل دمایی برج جذب و تأثیر تغییرات دبی حلال بر بازده فرآیند، تحلیل شد که نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در رفتار حلال‌ها بود این پروفایل‌های دمایی هم واکنش سریع تر میان این حلال و گاز اسیدی را در مقایسه با دو حلال دیگر نشان می‌داد. اگرچه MEA به‌عنوان گزینه‌ای برتر شناخته شد، اما باید محدودیت‌های عملیاتی آن، از جمله نیاز به انرژی بالاتر برای احیا و احتمال خوردگی تجهیزات، در طراحی فرآیند مدنظر قرار گیرد. در نهایت، انتخاب حلال مناسب باید با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی خاص و اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی صورت گیرد. به صورت کلی در این تحقیق نشان داده شد که واحد تصفیه گازهای انتهایی می‌تواند تقریباً تمام هیدروژن سولفید باقی مانده درون جریان گاز اسیدی که از فرآیندهایی نظیر کلاوس نشات می‌گیرد را حذف کند این تحقیق می‌تواند مبنایی برای طراحی، بهبود، و بهینه‌سازی واحدهای تصفیه گازهای اسیدی در مقیاس صنعتی باشد.

منابع

- [1] P. C. Bhomick and K. S. Rao, "Sources And Effects of Hydrogen Sulfide," *Int. Peer Rev. J.*, vol. 3, no. 3, pp. 914–918, 2014, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/320945067>
- [2] J. F. Strickland, M. Quinlan, and D. Velasquez, "TAIL GAS CLEAN-UP PROCESSES : CAPABILITIES AND RELATIVE COSTS PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DES GAZ DE QUEUE : PERFORMANCES ET COÛTS RELATIFS".
- [3] L. Khazini, E. Fatehifar, B. Fouladpanjeh, and M. Ebrahimzadeh, "A Simulation of a Claus Tail Gas Treatment Unit in a Petroleum Refinery," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 36, no. 22, pp. 2431–2442, 2014, doi: 10.1080/15567036.2010.536831.
- [4] A. Irankhah, "Modified Claus Process Catalysts for Sulfur Recovery," *Farayandno*, vol. 11, no. 53, pp. 31–48, 2016, doi: 20.1001.1.17356466.1395.11.53.3.5.
- [5] M. A. Zahid, M. Ahsan, I. Ahmad, and M. N. A. Khan, "Process modeling, optimization and cost analysis of a sulfur recovery unit by applying pinch analysis on the claus process in a gas processing plant," *Mathematics*, vol. 10, no. 1, 2022, doi: 10.3390/math10010088.
- [6] S. R. Unit, "Different Sulfur Recovery Options; Applicability, Advantages and Disadvantages," *J. Iran. Chem. Eng.*, vol. 19, no. 108, pp. 20–40, 2020, doi: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17355400.1399.19.108.2.4>.
- [7] Y. Al Wahedi, A. I. Torres, S. Al Hashimi, N. I. Dowling, P. Daoutidis, and M. Tsapatsis, "Economic assessment of Temperature Swing Adsorption systems as Claus Tail Gas Clean Up Units," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 126, pp. 186–195, 2015, doi: 10.1016/j.ces.2014.12.015.
- [8] L. Khazini, E. Fatehifar, M. A. Kaynejad, R. Alizadeh, and A. Elkamel, "Control of Claus unit tail gas in an oil refinery," *2nd Int. Conf. Environ. Comput. Sci. ICECS 2009*, pp. 309–311, 2009, doi: 10.1109/ICECS.2009.52.
- [9] N. Hüser, O. Schmitz, and E. Y. Kenig, "A comparative study of different amine-based solvents for CO₂-capture using the rate-based approach," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 157, pp. 221–231, 2017, doi: 10.1016/j.ces.2016.06.027.
- [10] L. A. Pellegrini, M. Gilardi, F. Giudici, and E. Spatolisano, "New solvents for co₂ and h₂s removal from gaseous streams," *Energies*, vol. 14, no. 20, 2021, doi: 10.3390/en14206687.
- [11] J. S. Lopez-Echeverry, S. Reif-Acherman, and E. Araujo-Lopez, "Peng-Robinson equation of state: 40 years through cubics," *Fluid Phase Equilib.*, vol. 447, pp. 39–71, 2017, doi: 10.1016/j.fluid.2017.05.007.
- [12] J. M. Montagna and O. A. Iribarren, "A new strategy for process simulation with the sequential modular approach," *Comput. Ind.*, vol. 12, no. 1, pp. 23–29, 1989, doi: 10.1016/0166-3615(89)90028-6.

