

بهبود فرآیندهای مبتنی بر کلاوس: چالش‌های عملیاتی و راهکارهای پیشنهادی بر اساس شبیه‌سازی

مجتبی عزیزی^{۱*}، محمدامین قنواتی^۲، علی بداغی^۳

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

^۲ دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۳ گروه شیمی، واحد توپسرکان، دانشگاه آزاد اسلامی، توپسرکان، ایران

*نویسنده رابط: Azizi.m_58@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت مقاله: آذرماه ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: اسفند ۱۴۰۳

واژگان کلیدی

اکسیژن غنی شده

آدیباتیک

هم دما

کلاوس بهبودیافته

بازیابی گوگرد

چکیده

هیدروژن سولفید یکی از آلاینده‌ترین گازهای موجود در صنایع شیمیایی مختلف است و به دلیل خواص سمی، خورنده و اشتعال‌پذیر بودن، چالش‌های جدی زیست‌محیطی و ایمنی را به همراه دارد. این گاز عمدتاً در فرآیندهای پالایش نفت، صنایع پتروشیمی، استخراج و فرآوری گاز طبیعی، واحدهای تولید کودهای شیمیایی، و حتی در برخی فرآیندهای صنایع معدنی تولید می‌شود. کنترل و حذف این آلاینده از گازهای صنعتی و جریان‌های فرایندی به دلیل اثرات مخرب آن بر محیط‌زیست و سلامت انسان، از اهمیت بالایی برخوردار است. مهم‌ترین فرآیندها برای حذف این ماده مضر فرآیندهای مبتنی بر کلاوس هستند که این فرآیندها با چالش‌های عملیاتی زیادی مواجه می‌شوند آن‌چه در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود، معرفی این چالش‌ها ارائه راهکار برای حل آن‌ها و بررسی این روش‌ها از طریق شبیه‌سازی است

نحوه ارجاع به این مقاله:

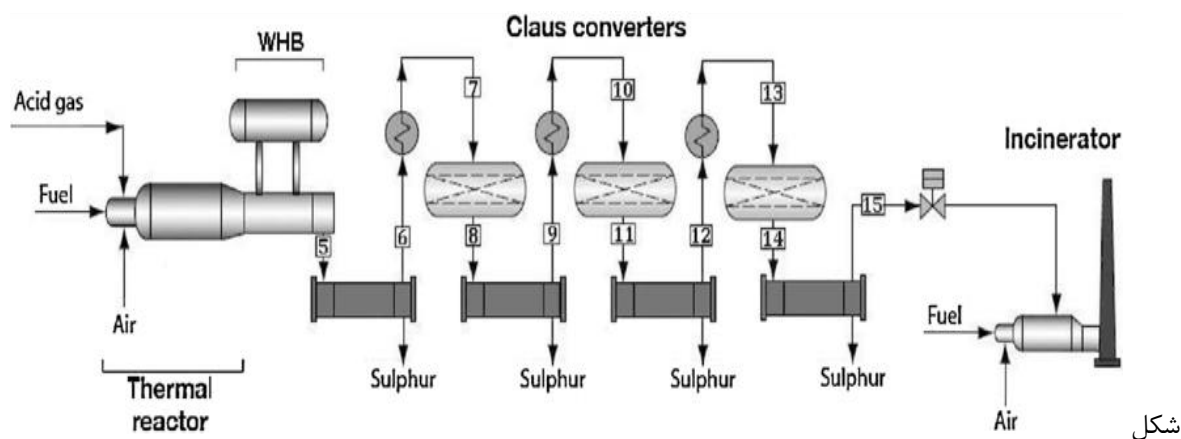
م. عزیزی، م.ا. قنواتی، ع. بداغی. بهبود فرآیندهای مبتنی بر کلاوس: چالش‌های عملیاتی و راهکارهای پیشنهادی بر اساس شبیه‌سازی، ماهنامه رهیافتی در مدیریت نفت و گاز، دوره ۵، شماره ۴، ص. ۱۲-۱، ۱۴۰۳.

مقدمه

در طول سالیان گذشته، فرآیندهای مبتنی بر کلاوس یکی از اصلی‌ترین و پر استفاده‌ترین روش‌ها برای بازیابی گوگرد از جریان‌های حاوی سولفید هیدروژن بوده‌اند. این فرآیندها نقش مهمی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی ایفا می‌کنند، چراکه سولفید هیدروژن یکی از آلاینده‌های سمی و خورنده به شمار می‌رود که باید قبل از انتشار به محیط‌زیست حذف شود [2].

فرآیند کلاوس به طور کلی شامل دو مرحله اصلی است: مرحله احتراق حرارتی و مرحله کاتالیستی. در مرحله حرارتی، بخشی از سولفید هیدروژن در حضور اکسیژن به دی‌اکسید گوگرد تبدیل می‌شود، و در مرحله کاتالیستی، این دی‌اکسید گوگرد باقیمانده سولفید هیدروژن واکنش داده و گوگرد عنصری تولید می‌شود [3].

شکل ۱ شمای کلی این فرآیند را به تصویر می‌کشد:



شکل

۱- شمای کلی فرآیند کلاوس بهبودیافته

به‌طور کلی، استفاده از فرآیندهای مبتنی بر کلاوس نه تنها به کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای آلاینده کمک می‌کند، بلکه امکان بازیابی و استفاده مجدد از گوگرد در تولید محصولات مختلف مانند اسید سولفوریک و کودهای شیمیایی را نیز فراهم می‌آورد [4].

این فرآیند علی‌رغم مزایای زیادی که دارد، با برخی از چالش‌های فرآیندی مواجه است که می‌تواند بر راندمان بازیابی گوگرد و عملکرد کلی سیستم تأثیر بگذارند. جمله این چالش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [5]:

۱- ورود حجم زیادی از ماده بی اثر به فرآیند که منجر به افزایش سایز تجهیزات و هزینه‌های عملیاتی می‌گردد بنابراین اگر بتوان با روشی حضور این گازها را در فرآیند کم کرد از نظر فرآیندی و اقتصادی بسیار به صرفه خواهد بود. اما عدم حضور گازهای بی اثر به مقدار کافی در فرآیند منجر به افزایش بی‌رویه دما می‌گردد که باید برای آن چاره اندیشی کرد [6].

۲- پایین‌تر بودن کارایی فرآیند کلاوس بهبودیافته با ۲ یا ۳ بستر کاتالیستی از استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی، چالشی جدی برای صنایع پالایشگاهی و پتروشیمی محسوب می‌شود. در بسیاری از موارد، این فرآیند به تنهایی قادر به کاهش میزان انتشار ترکیبات گوگردی به سطح موردنظر مقررات زیست‌محیطی نیست. به همین دلیل، در سال‌های گذشته، روش‌های مختلفی برای بهبود عملکرد این فرآیند و افزایش راندمان بازیابی

<http://science-journals.ir>

گوگرد پیشنهاد شده است [7]. این روش‌ها عمدتاً شامل اضافه کردن بسترهای هیدروژناسیون و اکسیداسیون مستقیم است [8] که به منظور افزایش راندمان فرآیند کلاوس و کاهش انتشار ترکیبات گوگردی به محیط زیست طراحی شده‌اند. این فناوری‌ها نقش مهمی در حذف ترکیبات گوگردی باقی‌مانده در گاز خروجی دارند و باعث می‌شوند که فرآیند بازیابی گوگرد بتواند به استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی دست یابد [8].

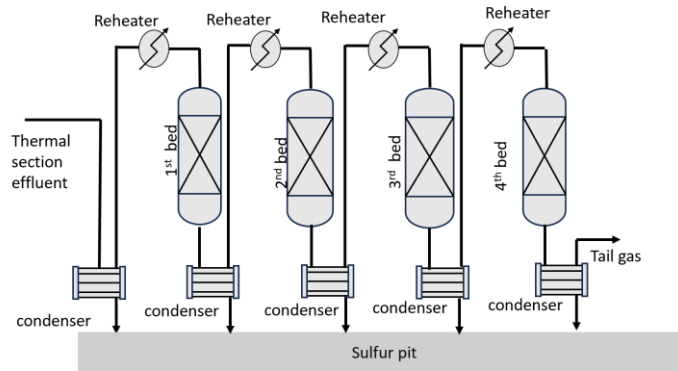
۳- یکی دیگر از مواردی که در این فرآیندها می‌تواند چالش برانگیز باشد، فعالیت بسترهای کاتالیستی به صورت آدیاباتیک است. در فرآیندهای کاتالیستی، کنترل دما یکی از عوامل کلیدی در حفظ عملکرد بهینه واکنش‌ها است. در بسترهای کاتالیستی آدیاباتیک، تبادل حرارتی با محیط اطراف وجود ندارد، به این معنا که گرمای تولیدشده یا مصرف‌شده در واکنش‌ها مستقیماً در همان بستر باقی می‌ماند. این ویژگی می‌تواند منجر به تغییرات شدید دمایی در بستر شود که بر عملکرد فرآیند تأثیر منفی خواهد گذاشت. در بسترهای بلند، اختلاف دمای بالا بین نقاط ورودی و خروجی بستر می‌تواند منجر به غیرفعال شدن جزئی کاتالیست در برخی از نواحی شود. تغییرات دمایی ناگهانی می‌تواند باعث افزایش افت فشار در بستر کاتالیستی شود که در نهایت منجر به کاهش نرخ جریان گاز و کاهش کارایی کلی واحد می‌شود [9].

شبیه‌سازی و روش‌ها

در این پژوهش، به شبیه‌سازی روش‌ها و شرایط خاصی از فرآیند کلاوس پرداخته می‌شود که هدف آن بهبود عملکرد این فرآیند و رفع برخی از نواقص و چالش‌های موجود در آن است. فرآیند کلاوس یکی از مهم‌ترین روش‌های صنعتی برای بازیافت گوگرد از گازهای اسیدی محسوب می‌شود، اما در شرایط عملی با مشکلاتی همچون کاهش راندمان تبدیل، تشکیل ترکیبات نامطلوب و چالش‌های عملیاتی مواجه است.

در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار Promax، سناریوهای مختلفی برای اصلاح و بهینه‌سازی فرآیند کلاوس شبیه‌سازی شده و تأثیر این اصلاحات بر پارامترهای کلیدی فرآیند مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. این پژوهش تلاش دارد تا با ارائه راهکارهای عملی، راندمان فرآیند را افزایش داده، میزان گوگرد بازیافتی را بهبود بخشد و مشکلات عملیاتی را به حداقل برساند. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها می‌توانند مبنایی برای به‌کارگیری روش‌های پیشنهادی در صنایع مرتبط باشند.

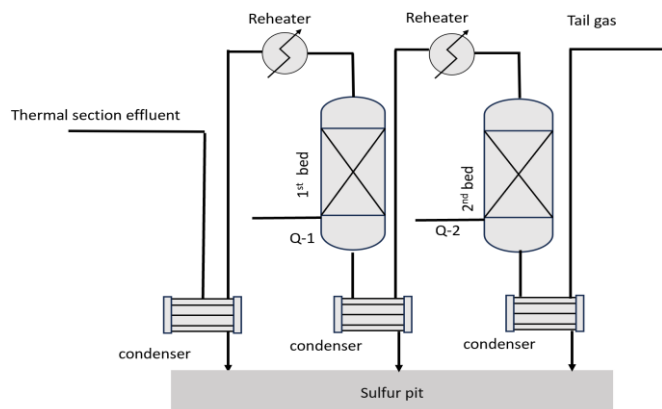
یکی از چالش‌های پیش روی این واحد عدم کارکرد مناسب آن در جهت حذف هیدروژن سولفید با استفاده از تعداد ۲ یا ۳ بستر کاتالیستی است به شکلی که در این موارد درصد تبدیل این ماده مضر معمولاً پایین تر از ۹۹٪ باقی می‌ماند یکی از روش‌هایی که مورد بررسی قرار می‌گیرد در این پژوهش استفاده از ۴ بستر کاتالیستی است تا از این طریق عملکرد بستر ۴ ام در این فرآیند مورد بحث و بررسی قرار گیرد.



شکل ۲- فرآیند کلاوس به ۴ بستر کاتالیستی

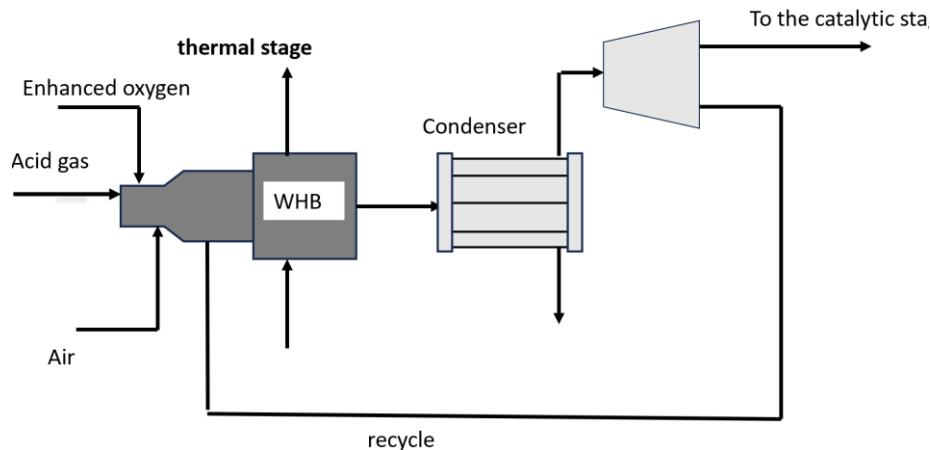
شکل ۲ فرآیند پیشنهادی برای این حالت را به تصویر می‌کشد

یکی دیگر از چالش‌های پیش روی این واحد کنترل دما در بسترهای کاتالیستی است و در این پژوهش حالتی مور بررسی قرار می‌گیرد که با استفاده از جریان انرژی دمایی راکتور ثابت بماند و در واقع به جای بسترهای کاتالیستی آدیاباتیک بسترهای دما ثابت مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۳ فرآیند پیشنهادی برای این حالت را به تصویر می‌کشد.



شکل ۳- بسترهای دما ثابت

یکی دیگر از چالش‌های فرآیندهای مبتنی بر کلاوس حجم زیاد گازهای بی اثر است به همین علت در این روش پیشنهادی به جای استفاده از هوا بخشی از آن به صورت اکسیژن خالص وارد فرآیند می‌گردد



شکل ۴ فرآیند پیشنهادی برای این شکل ۴- فرآیند کلاوس با اکسیژن غنی شده حالت را به تصویر می کشد.

در نهایت، می توان گفت که برای روش Sequential Modular استفاده می شود. این روش یکی از رایج ترین رویکردهای شبیه سازی در مهندسی فرآیند است که در بسیاری از نرم افزارهای شبیه سازی صنعتی از جمله Promax به کار گرفته می شود.

در روش Sequential Modular، فرآیند به مجموعه ای از ماژول های مستقل تقسیم شده و هر ماژول (واحد عملیاتی) به ترتیب و به صورت گام به گام حل می شود. در این روش، ابتدا داده های ورودی هر واحد عملیاتی مشخص شده و سپس خروجی آن محاسبه می شود. این خروجی ها به عنوان ورودی واحدهای بعدی استفاده شده و محاسبات تا زمانی که تمام بخش های فرآیند حل شوند، ادامه می یابد [10].

مزیت اصلی این روش در شبیه سازی فرآیند کلاوس این است که امکان تحلیل دقیق عملکرد هر بخش از فرآیند را فراهم کرده و تغییرات پارامترهای عملیاتی را به صورت جداگانه بررسی می کند. علاوه بر این، استفاده از روش Sequential Modular در نرم افزار Promax، باعث افزایش دقت در مدل سازی واکنش های شیمیایی، تعادل های فازی و انتقال جرم می شود که برای بهینه سازی و بهبود عملکرد فرآیند کلاوس از اهمیت بالایی برخوردار است.

بنابراین، این روش به عنوان یک ابزار قدرتمند در شبیه سازی فرآیندهای صنعتی، نقش مهمی در تحلیل، بهینه سازی و بهبود عملکرد فرآیندهای شیمیایی، از جمله فرآیند کلاوس، ایفا می کند.

همچنین، برای پیش بینی رفتار فرآیند از روش کمینه سازی انرژی آزاد گیبس استفاده می شود. این روش یکی از رویکردهای پیشرفته در شبیه سازی تعادل های شیمیایی است که برای تعیین ترکیب تعادلی یک سیستم در شرایط مشخص به کار می رود.

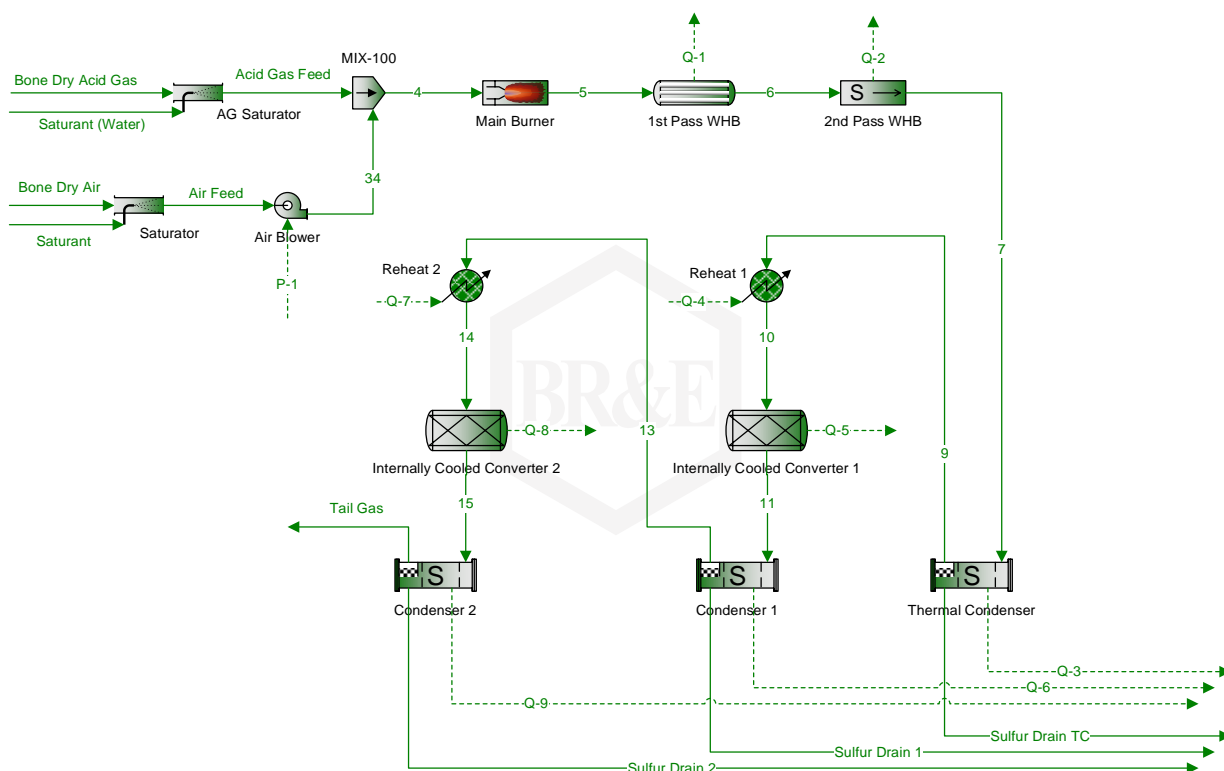
در فرآیند کلاوس، که شامل واکنش های پیچیده گوگردی است، تعیین دقیق ترکیب محصولات واکنش در شرایط مختلف عملیاتی بسیار حائز اهمیت است. روش کمینه سازی گیبس با محاسبه حداقل مقدار انرژی آزاد گیبس در

سیستم، ترکیب تعادلی گونه‌های شیمیایی را پیش‌بینی می‌کند. این روش به‌ویژه زمانی مفید است که واکنش‌های متعدد و هم‌زمان در جریان باشند و اطلاعات دقیق درباره ضرایب تعادل واکنش‌ها در دسترس نباشد [11].

نتایج

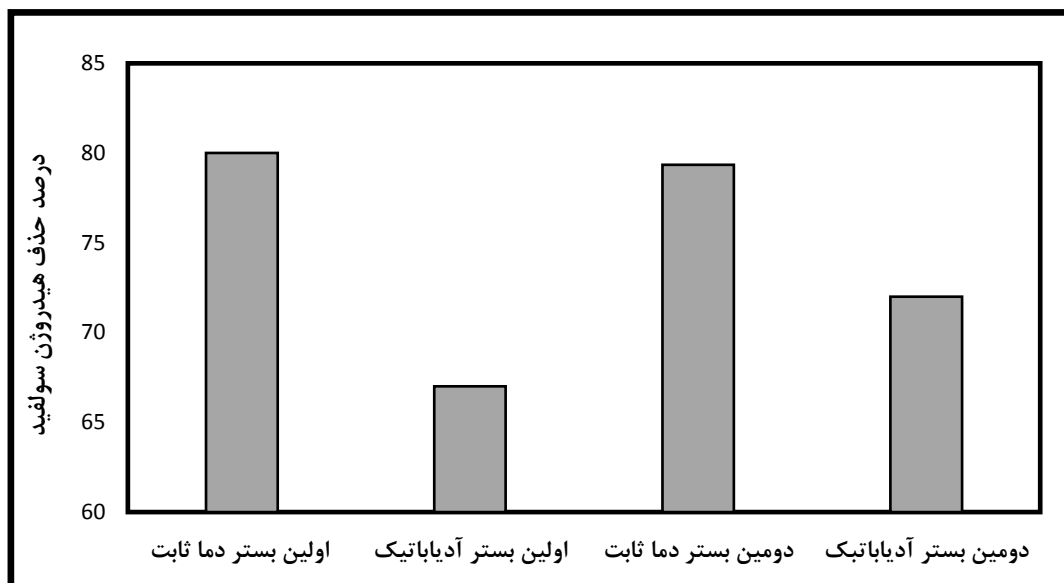
فرآیند کلاوس بهبود یافته با بسترهای دما ثابت

تفاوت اصلی این فرآیند با یک فرآیند کلاوس بهبود یافته با انرژی مصرف شده در بسترهای کاتالیستی جهت ثابت نگه داشتن دما است که همانگونه که بیان شد می‌تواند با کمک به استوکیومتری و تعادل به بهبود نتایج حاصل از بسترهای کاتالیستی کمک کند. شکل ۵ فرآیند شبیه‌سازی شده برای این حالت را به تصویر می‌کشد. این شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار پرومکس پیاده شده است.



شکل ۵- شماتیک شبیه‌سازی شده از فرآیند کلاوس با بسترهای دما ثابت

جریان‌های انرژی Q-5 و Q-8 که به شبیه‌سازی اضافه شده اند باعث ثابت ماندن دما در بسترهای کاتالیستی می‌گردند. این جریان‌ها به ترتیب ۰/۲۰۳۶ و ۰/۰۳۳ مگاوات انرژی لازم دارند که تامین این انرژی در کنار چالش‌هایی که ایجاد می‌کند هزینه‌های تمام شده این فرآیند را با افزایش چشم‌گیری مواجه می‌کند. در شکل ۶ مقایسه عملکرد این بسترها در مقایسه با یک فرآیند کلاوس بهبود یافته معمولی در حذف هیدروژن سولفید آورده می‌شود.



شکل ۶- مقایسه بسترهای دما ثابت و آدیاباتیک

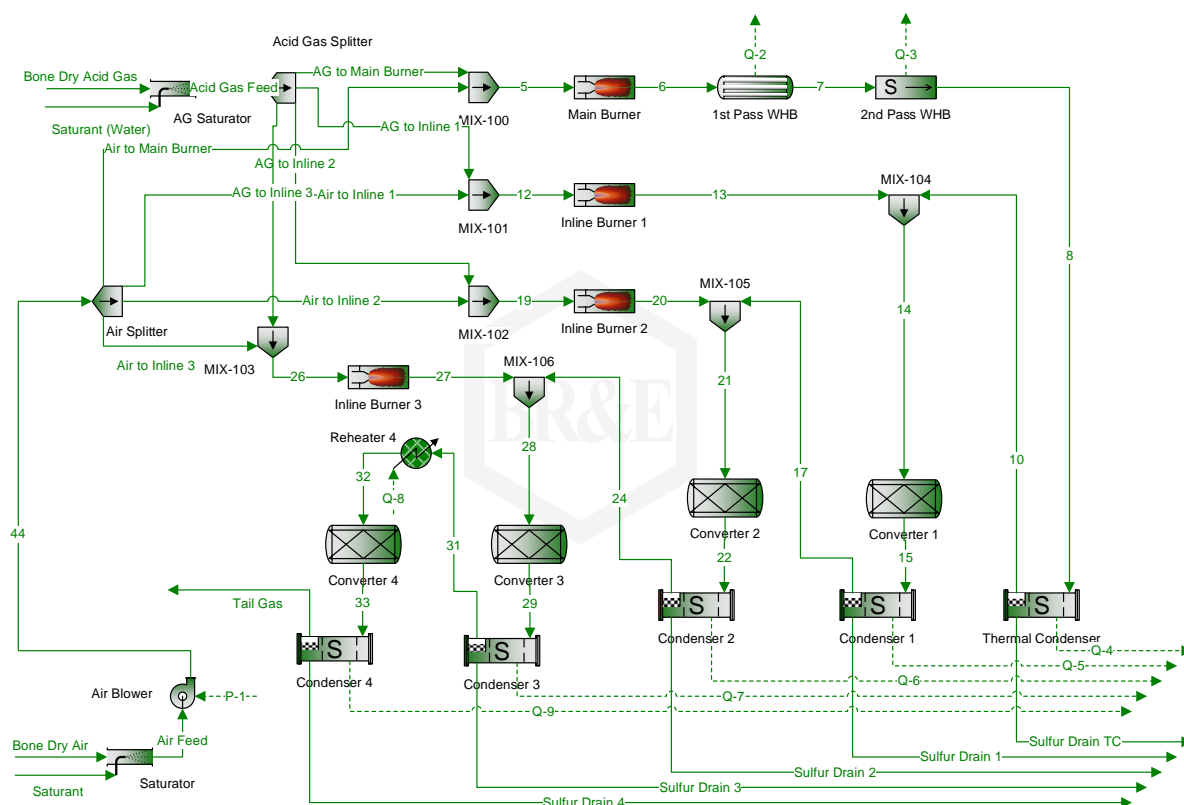
در نهایت می‌توان گفت در مجموع این فرآیند شاهد حذف ۹۸/۷۲٪ از هیدروژن سولفید هستیم که در مقایسه با ۹۷/۴۳٪ در فرآیند کلاوس بهبود یافته معمولی بهبود خوبی از خود نشان می‌دهد.

فرآیند کلاوس بهبود یافته با ۴ بستر کاتالیستی

در فرآیند کلاوس بهبود یافته، معمولاً از دو یا سه بستر کاتالیستی برای تبدیل ترکیبات سولفوری به گوگرد عنصری استفاده می‌شود. با این حال، با توجه به سخت‌گیری‌های جدید در مقررات زیست‌محیطی و استانداردهای مربوط به میزان انتشار آلاینده‌ها، این تعداد بستر کاتالیستی ممکن است برای دستیابی به الزامات مورد نظر کافی نباشد. به همین دلیل، در سال‌های اخیر رویکردهایی برای بهینه‌سازی این فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است.

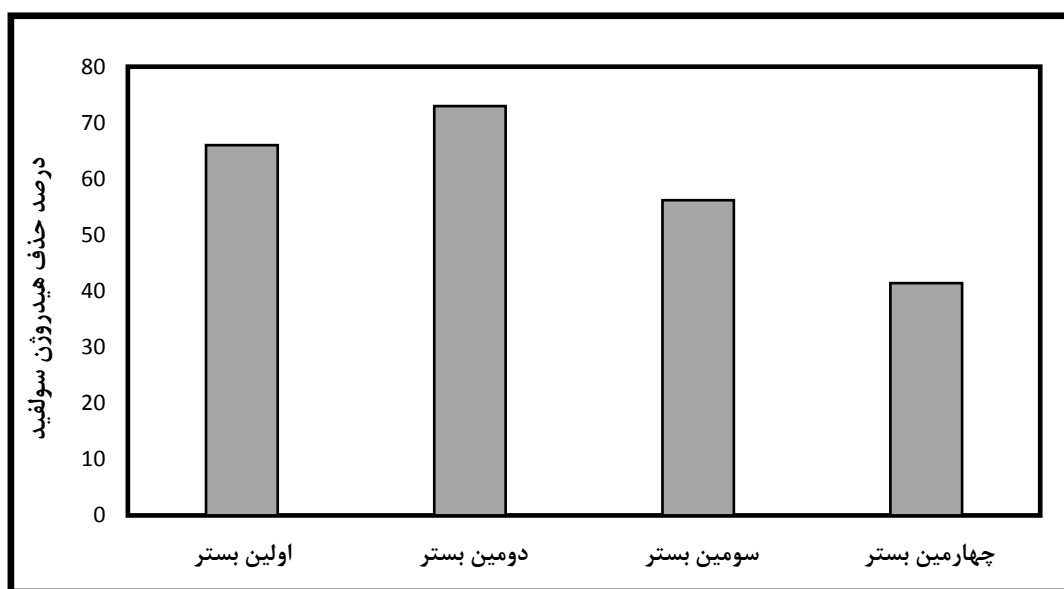
از جمله راهکارهای پیشنهادی می‌توان به افزایش تعداد بسترهای کاتالیستی، به‌کارگیری کاتالیست‌های پیشرفته‌تر با بازدهی بالاتر، استفاده از فناوری‌های تکمیلی مانند واحدهای اکسیداسیون مستقیم یا فرایندهای جذب آلاینده‌های باقی‌مانده اشاره کرد.

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند کلاوس با ۴ بستر کاتالیستی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شکل ۷ فرآیند شبیه‌سازی شده برای این حالت را به تصویر می‌کشد.



شکل ۷- شماتیک شبیه سازی شده از فرآیند کلاوس با ۴ بستر

در ادامه روند حذف هیدروژن سولفید در بسترهای کاتالیستی مختلف مقایسه می‌شود:



شکل ۸- مقایسه روند بسترهای ۴ گانه

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد بسترهای کاتالیستی در فرآیند کلاوس، کارایی آن‌ها به تدریج دچار افت می‌شود. این کاهش کارایی عمدتاً به دلیل کاهش غلظت هیدروژن سولفید در جریان واکنش، کاهش نرخ واکنش در بسترهای پایانی و همچنین محدودیت‌های ترمودینامیکی در تبدیل ترکیبات گوگردی رخ می‌دهد.

تا جایی که در چهارمین بستر کاتالیستی، درصد حذف هیدروژن سولفید به ۴۱/۴٪ کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده افت قابل توجه کارایی در این مرحله است. این کاهش بازدهی می‌تواند منجر به افزایش میزان گوگرد باقی‌مانده در جریان خروجی شده و نیاز به استفاده از روش‌های تکمیلی نظیر اکسیداسیون مستقیم، جذب آلاینده‌های باقیمانده، یا به‌کارگیری کاتالیست‌های با فعالیت بالاتر را ضروری سازد.

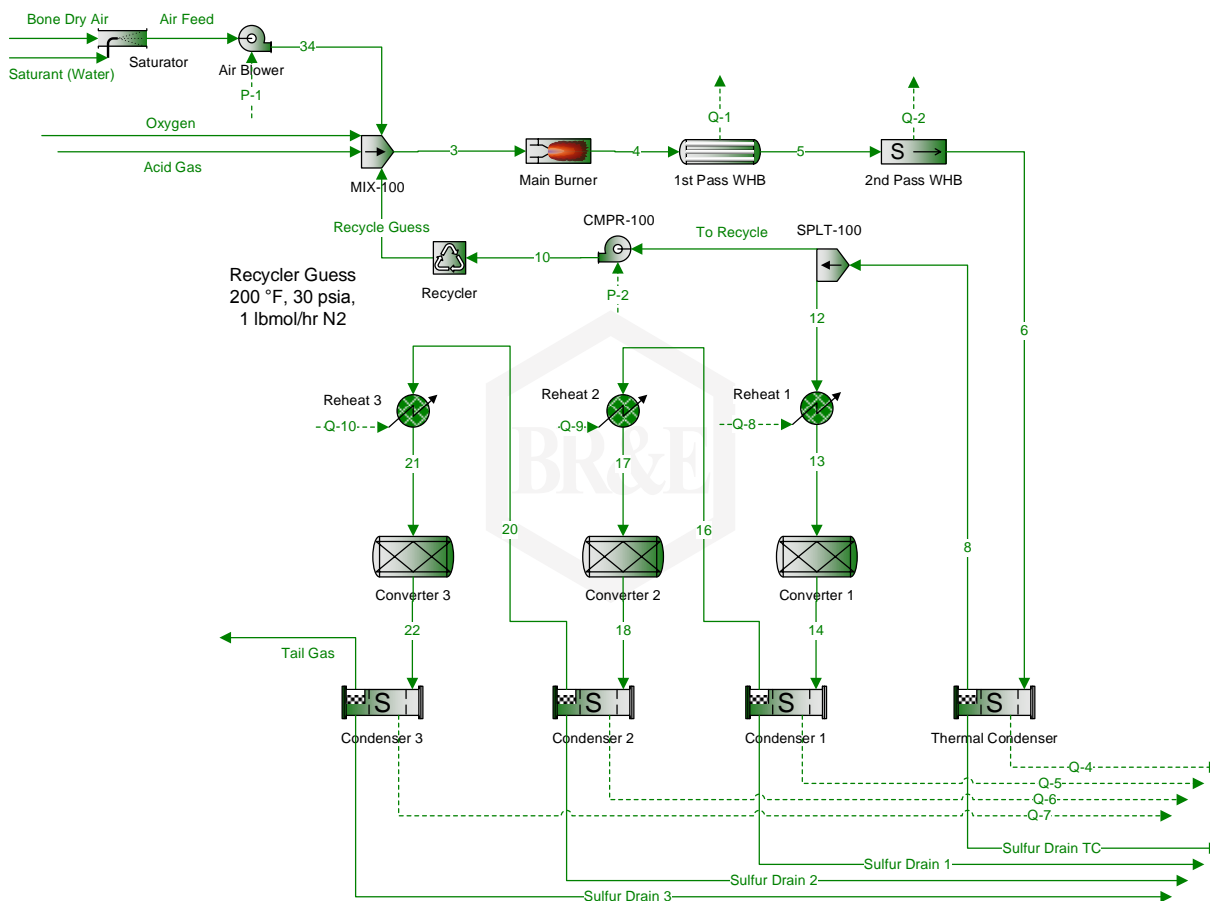
افزون بر این، افزایش تعداد بسترها ممکن است باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی، افت فشار در سیستم و کاهش بهره‌وری کلی فرآیند شود. بنابراین، به جای افزایش تعداد بسترهای کاتالیستی، رویکردهای جایگزینی مانند بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، به‌کارگیری فناوری‌های نوین و استفاده از کاتالیست‌های اصلاح‌شده با قابلیت جذب و تبدیل بهتر ترکیبات سولفور می‌تواند در دستیابی به بازدهی بالاتر و رعایت استانداردهای زیست‌محیطی مؤثرتر باشد.

این فرآیند در مجموع قادر است ۹۹/۴٪ از هیدروژن سولفید را حذف کند، که نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبولی در کاهش آلاینده‌های گوگردی است. با این حال، به دلیل تعداد بالای بسترهای کاتالیستی مورد نیاز برای دستیابی به این میزان حذف، چالش‌های متعددی از جمله افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، افت فشار در سیستم، و کاهش بهره‌وری کلی فرآیند به وجود می‌آید.

افزایش تعداد بسترهای کاتالیستی نه تنها نیاز به تجهیزات پیشرفته‌تر و نگهداری مداوم را افزایش می‌دهد، بلکه باعث پیچیدگی‌های مهندسی و افزایش مصرف انرژی در فرآیند نیز می‌شود. از این رو، به‌کارگیری این روش در مقیاس صنعتی، به‌ویژه در واحدهایی که نیاز به بهره‌وری اقتصادی بالا دارند، چندان منطقی به نظر نمی‌رسد.

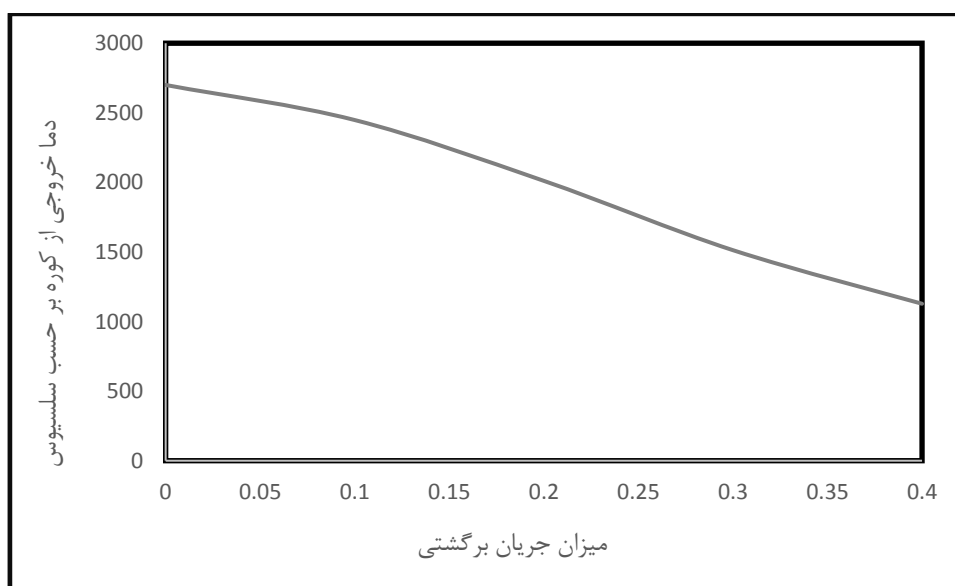
فرآیند کلاوس بهبود یافته با استفاده از اکسیژن غنی شده

همان‌گونه که گفته شد یکی از مشکلات روش‌های مبتنی بر کلاوس حجم زیاد جریان نیتروژن ورودی به آن است که منجر به افزایش سایز تجهیزات و هزینه‌های جاری می‌گردد در این بخش شبیه‌سازی یک واحد کلاوس با سه بستر کاتالیستی که از اکسیژن غنی شده به جای هوا استفاده می‌کند پیاده‌سازی گردید. شکل ۱ فرآیند شبیه‌سازی شده برای این حالت را به تصویر می‌کشد.



شکل ۹- شماتیک شبیه سازی شده از فرآیند کلاوس با اکسیژن غنی شده

مطابق نتایج حاصل استفاده از اکسیژن غنی شده به جای هوا باعث افزایش دمای زیاد در خروجی از کوره واکنش می‌گردد برای مقابله با این مشکل بخشی از جریان گاز خروجی از کندانسور به ابتدای فرآیند بازگردانده می‌شود. در ادامه روند تغییرات دمای خروجی از کوره واکنش با درصدی از جریان که بازگردانده می‌شود ارائه می‌گردد.



شکل ۱۰- پروفایل دمای خروجی از کوره

بر اساس این نتایج کمترین میزان جریان برگشتی که ما را به نتیجه مطلوب می‌رساند در حدود ۰/۳ است که دمای ۱۵۱۳ درجه سلسیوس را در خروجی از کوره ایجاد می‌کند که برای ما مطلوب است.

در نهایت در مجموع ۳ بستر کاتالیستی این فرآیند درصد حذف هیدروژن سولفید به ۹۸/۵٪ می‌رسد که با توجه به کاهش ساینز قابل توجه تجهیزات نتیجه مطلوبی است.

جمع بندی و نتیجه گیری

در نهایت، با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیندهای موردنظر، می‌توان به این جمع‌بندی رسید که هر یک از این فرآیندها، با در نظر گرفتن ملاحظات فنی، اجرایی و اقتصادی، می‌توانند به‌عنوان راه‌حل‌های بالقوه برای چالش‌های مطرح‌شده مورد استفاده قرار گیرند. نتایج حاصل از فرآیند کلاوس بهبود یافته با ۴ بستر کاتالیستی نشان داد که این فرآیند قادر به رعایت مقررات محیط زیستی با حذف ۹۹/۴٪ از هیدروژن سولفید خواهد بود و اگر از نظر اقتصادی جذابیت داشته باشد یک فرآیند مناسب خواهد بود. هم‌چنین استفاده از بستری‌های دما ثابت به جای بستری‌های آدیاباتیک مرسوم منجر به افزایش کارایی فرآیند تا حدود ۱/۳٪ می‌شود که می‌تواند ما را به رعایت مقررات محیط زیستی نزدیک کند. در بخش دیگر نشان داده شد استفاده از اکسیژن غنی شده به جای هوا به کاهش هزینه‌ها و ساینز تجهیزات کمک می‌کند در صورتی که کنترل دمای خروجی از کوره واکنشی هم امکان پذیر است.

در انتها پیشنهاد می‌شود که در مراحل بعدی، مطالعات بیشتری در زمینه بهینه‌سازی و تطبیق این فرآیندها با نیازهای خاص هر مسئله انجام شود تا بتوان بهترین راهکار ممکن را بر اساس داده‌های تجربی و تحلیلی انتخاب و پیاده‌سازی کرد.

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] S. Zarei, "Exergetic, energetic and life cycle assessments of the modified claus process," *Energy*, vol. 191, p. 116584, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116584.
- [3] 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.
- [4] H. Ghahraloud, M. Farsi, and M. R. Rahimpour, "Modeling and optimization of an industrial Claus process: Thermal and catalytic section," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*,

- vol. 76, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1016/j.jtice.2017.03.005.
- [5] L. Zhang, “The common malfunction and treatment method of SuperClaus process equipment,” *Proc. - 2013 Int. Conf. Comput. Inf. Sci. ICCIS 2013*, pp. 1300–1302, 2013, doi: 10.1109/ICCIS.2013.344.
- [6] K. Nagamalleswara Rao and J. Haydary, “Studies on sulfur recovery plant performance using Aspen HYSYS sulsim simulations,” *Pet. Coal*, vol. 61, no. 2, pp. 292–305, 2019.
- [7] X. Zhang, Y. Tang, S. Qu, J. Da, and Z. Hao, “H₂S-selective catalytic oxidation: Catalysts and processes,” *ACS Catal.*, vol. 5, no. 2, pp. 1053–1067, 2015, doi: 10.1021/cs501476p.
- [8] A. N. Zagoruiko, V. V. Shinkarev, S. V. Vanag, and G. A. Bukhtiyarova, “Catalytic processes and catalysts for production of elemental sulfur from sulfur-containing gases,” *Catal. Ind.*, vol. 2, no. 4, pp. 343–352, 2010, doi: 10.1134/S2070050410040082.
- [9] R. Abedini and M. K. Salooki, “a Simple Molar Flow Modeling and Simulation of Catalytic Beds in Claus Process,” vol. 52, no. 3, pp. 173–178, 2010.
- [10] 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.
- [11] J. A. Labarta, M. M. Olaya, and A. F. Marcilla, “What does the NRTL model look like? Determination of boundaries for different fluid phase equilibrium regions,” *AIChE J.*, vol. 68, no. 10, pp. 1–14, 2022, doi: 10.1002/aic.17805.