Research Article

DOI: 10.22034/ijche.2022.328710.1178

DOR: 20.1001.1.17355400.1402.22.126.6.5

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

Determining the Tail Gas Analyzer Control Loop Equations for Required Air Flow Adjustment in Sulfur Recovery Unit

N. Raeisi Ardali[1], N. Mostoufi[2*], M. Soleimani[3]

1- Ph. D. Student of Chemical Engineering, University of Tehran

2- Professor of Chemical Engineering, University of Tehran

3- M. Sc. in Gas Process Engineering, Ilam Gas Treating Company

Email: mostoufi@ut.ac.ir

Abstract

Measurement of sulfur compounds in the tail gas flow in the sulfur recovery unit is necessary in order to fine control the combustion furnace airflow and efficiency enhancement. In this research, required equations for calculation of air demand in feedforward and feedback control loops in the sulfur recovery unit of Ilam Gas Treating Plant are developed. First, the process was simulated. Then, using MLP neural network and nonlinear regression, K factor was determined for tail gas analyzer air demand calculation. Total required air is sent to the combustion furnace through two lines: trim and main, such that 92.5% of air is passed through the main line. Meanwhile, tail gas analyzer air demand is in the range of -5 to +5 % of the total required air. The presented equations in this research can be employed for other sulfur recovery units.

Received: 7 February 2022
Accepted: 9 March 2022
Page Number: 55-65

Keywords:

Sulfur Recovery Unit,
Process imulation,
Artificial Neural Network,
Tail Gas Analyzer,
Hydrogen Sulfide

Please Cite this Article Using:

Raeisi Ardali, N., Mostoufi, N., Soleimani, M., "Determining the Tail Gas Analyzer Control Loop Equations for Required Air Flow Adjustment in Sulfur Recovery Unit", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 22, No. 126, pp. 55-65, In Persian, (2023).

مقـــالـــه پـــژوهشی

DOI: 10.22034/ijche.2022.328710.1178
DOR: 20.1001.1.17355400.1402.22.126.6.5

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

تعیین رابطهٔ حلقهٔ کنترلی آنالیزور Tail Gas برای تنظیم هوای مورد نیاز واحد بازیافت گوگرد

ناهید رئیسی اردلی[۱]، نوید مستوفی[۲*]، مجید سلیمانی[۳]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

۳- کارشناس ارشد مهندسی گاز، پالایشگاه گاز ایلام

پیام نگار: mostoufi@ut.ac.ir

چکیده

اندازه‌گیری ترکیبات گوگردی موجود در جریان Tail Gas واحد بازیافت گوگرد به‌منظور کنترل دقیق جریان هوای ورودی به کورهٔ احتراق و افزایش راندمان امری ضروری است. در این تحقیق روابط لازم برای تنظیم جریان هوای ورودی کورهٔ احتراق واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه گاز ایلام با ترکیب دو حلقهٔ کنترلی پیش‌خور و پس‌خور ارائه شده است. پس از شبیه‌سازی فرایند، با استفاده از شبکهٔ عصبی MLP و برازش غیرخطی، شاخص مجهول K برای محاسبهٔ هوای مورد نیاز آنالیزور Tail Gas تعیین شد. بدین منظور هوای مورد نیاز با دو خط Trim و Main به‌سمت کورهٔ احتراق ارسال می‌شود؛ به‌طوری‌که ۹۲/۵٪ از جریان هوا از خط Main عبور می‌کند. لازم به ذکر است که تنظیم جریان هوا در حلقهٔ کنترلی پس‌خور در بازه ۵+ تا ۵-٪ از کل هوای مورد نیاز است. روابط ارائه‌شده در این تحقیق، در سایر واحدهای بازیافت گوگرد قابل استفاده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸
شماره صفحات: ۵۵ تا ۶۵

کلیدواژه‌ها:
واحد بازیافت گوگرد،
شبیه‌سازی فرایند،
شبکهٔ عصبی،
آنالیزور **Tail Gas**،
هیدروژن سولفید

* تهران، دانشگاه تهران، دانشکدگان فنی، دانشکدهٔ مهندسی شیمی، آزمایشگاه طراحی و شبیه‌سازی فرایندها

استناد به مقاله:

رئیسی اردلی، ن.، مستوفی، ن.، سلیمانی، م.، "تعیین رابطهٔ حلقهٔ کنترلی آنالیزور Tail Gas برای تنظیم هوای مورد نیاز واحد بازیافت گوگرد"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست‌ودوم، شماره ۱۲۶، صص. ۶۵-۵۵، (۱۴۰۲).

۱. مقدمه

در واحد بازیافت گوگرد، ترکیبات گوگرددار موجود در گازهای اسیدی پالایشگاه‌های نفت و گاز با فرایند کلاوس به گوگرد مولکولی تبدیل می‌شود[۱]. با توجه به ماهیت آلایندگی واحدهای بازیافت گوگرد و هم‌چنین محدودیت روزافزون مقررات زیست‌محیطی، اندازه‌گیری ترکیبات موجود در گازهای انتهایی و تصفیهٔ آن امری ضروری است[۲]. اندازه‌گیری برخط ترکیبات موجود در گازهای انتهایی فرایند و کنترل فرایند، روشی مناسب و به‌صرفه برای افزایش بازده واحد و کاهش آثار مربوط به اغتشاش‌های ایجادشده در فرایند است[۳]. اولین گزارش مربوط به کاربرد آنالیزر برخط ترکیبات موجود در گاز خروجی واحد بازیافت گوگرد مربوط به کروماتوگراف (سَوانگار) گازی نصب‌شده در شرکت داو کمیکال[1] بوده است. سپس شرکت‌های آمیکو[2] و دوپون[3] از نصب آنالیزورهای Tail Gas مبتنی بر پرتو فرابنفش در پالایشگاه آموکو[4] خبر دادند. عمر مفید آنالیزورهای گازی بین ۲۵-۱۵ سال است و در صورت مراقبت و تعمیر مناسب به‌مدت ۳۰ سال نیز قابل استفاده‌اند[۴].

برای کنترل جریان هوای ورودی به کورهٔ احتراق در فرایند کلاوس، از ترکیب دو حلقهٔ کنترلی پیش‌خور و پس‌خور استفاده می‌شود؛ در حلقهٔ کنترلی پیش‌خور، مقدار تقریبی هوای مورد نیاز برای احتراق ترکیبات گوگردی و هیدوکربنی موجود در گاز اسیدی خوراک واحد، براساس اندازه‌گیری غلظت H_2S و شدت جریان گاز اسیدی خوراک حساب می‌شود. حلقهٔ کنترلی پس‌خور آنالیزور Tail gas، نیز برای تنظیم دقیق میزان هوای مورد نیاز انجام واکنش کلاوس در کورهٔ احتراق و در بازهٔ محدود طراحی شده است. در حلقهٔ کنترلی پس‌خور، با اندازه‌گیری غلظت هیدروژن سولفید و دی‌اکسید گوگرد موجود در جریان Tail gas، فرمان کنترلی مربوط به تنظیم جریان هوای مورد نیاز ورودی به کورهٔ احتراق ارسال می‌شود[۵]. حلقهٔ کنترلی پس‌خور، در بیشتر واحدهای بازیافت گوگرد به‌دلیل محدودیت‌های عملیاتی، مشکلات طراحی و مجهول‌بودن بعضی شاخص‌ها و توابع مورد نیاز در سرویس قرار نگرفته و در حالت دستی است که باعث خستگی متصدی واحد، بروز خطای انسانی، نداشتن کنترل دقیق جریان هوای ورودی و کاهش بازده واحد می‌شود.

تأثیر شدت جریان[۶] و فشار هوای ورودی[۷]، ترکیب مولی گاز اسیدی ورودی به رآکتور کلاوس، نسبت هوا به گاز اسیدی، زمان ماند در رآکتور و دمای احتراق بر راندمان عملیاتی رآکتور کلاوس و مقدار و کیفیت محصول گوگرد[۸و۱]، با استفاده از شبیه‌سازی فرایند و براساس تجربهٔ متخصصان و تئوری فازی مطالعه شده است. شبیه‌سازی فرایند بازیافت گوگرد برای کاهش مصرف انرژی، افزایش بازیابی انرژی و افزایش راندمان به‌وسیلهٔ خالد انجام شده است[۹]. محققان در زمینهٔ کنترل فرایند بازیافت گوگرد، روش‌های کنترل خودبهینه[۱۰]، نورو- فازی[۱۱]، تطبیقی[۱۲]، تطبیقی- پیش‌بینی و استفاده از سامانهٔ خبره[۵] را برای فرایند کلاوس و بستر کاتالیستی ارائه کرده‌اند. مطابق نتایج، نسبت H_2S به SO_2 در جریان خروجی در شرایط کنترلی بهینه نسبت‌به کنترل کلاسیک حالت پایدارتری دارد و این نتیجه به‌ویژه در شرایط بروز تغییرات ناگهانی مربوط‌به شدت جریان گاز اسیدی خوراک واحد صادق است.

در زمان آفلاین‌بودن آنالیزور برای تعمیرات و بررسی، می‌توان از سنسورهای نرم‌افزاری برای اندازه‌گیری شاخص‌های مد نظر استفاده کرد. بولف و همکاران[۱۳] روش سنسور نرم‌افزاری را براساس شبکهٔ عصبی و منطق فازی به‌منظور شناسایی مدل دینامیکی برای کنترل فرایند بازیافت گوگرد و به حداکثررساندن انتشار H_2S و SO_2 ارائه کردند. فورتونا و همکاران[۱۴] سنسور نرم‌افزاری را برای تحلیل شرایط واحد بازیافت گوگرد شرکت پتروشیمی ایتالیا طراحی کردند و به‌صورت موازی با سامانهٔ موجود- که در بسیاری از مواقع از سرویس خارج بوده- قرار دادند و از سه استراتژی متفاوت شبکهٔ عصبی مصنوعی، منطق فازی و روش حداکثر مربعات برای مدل‌سازی بهره گرفتند و بهترین پاسخ را منطبق بر مدل NMA شبکهٔ عصبی مصنوعی یافتند.

یوان و همکاران[۱۵]، سنسور نرم‌افزاری پیش‌بینی غلظت SO_2 در گاز خروجی را بر اساس دبی جریان گاز اسیدی و دبی جریان هوای ورودی و با استفاده از مدل SIAE[5] و یادگیری عمیق ارائه داده‌اند. در این روش دقت پیش‌بینی افزایش یافته است؛ اما به‌دلیل بازسازی داده‌های ورودی در هرلایه، زمان محاسبات نیز افزایش یافته است. در همین راستا کوروری و همکاران[۱۶]، سنسور

1. Dow Chemical
2. Amico
3. Dupont
4. Amoco

5. Stacked Isomorphic Autoencoder (SIAE)

نرم‌افزاریِ بر اساس شبکهٔ عصبی بازگشتی[1] (RNN) را برای محاسبهٔ غلظت SO_2 و H_2S موجود در گاز خروجی با استفاده از داده‌های مربوط‌به شدت جریان گاز اسیدی و هوای ورودی به کوره ارائه داده‌اند. سنسور نرم‌افزاری مبتنی بر شبکهٔ عصبی بازگشتی در مقایسه با سنسور نرم‌افزاری مبتنی بر حافظهٔ طولانی – کوتاه مدت[2] برای پیش‌بینی غلظت SO_2 و H_2S موجود در گاز خروجی عملکرد بهتر و پیچیدگی محاسباتی کمتری دارد[۱۷].

در مورد تعیین الگوریتم کنترلی آنالیزور Tail Gas و محاسبهٔ جریان هوای مورد نیاز تا کنونی تحقیقی ارائه نشده است؛ لذا در تحقیق حاضر به بررسی الگوریتم کنترلی آنالیزور Tail Gas در پالایشگاه گاز ایلام پرداخته و مقدار جریان هوای مورد نیاز در کورهٔ واکنش تنظیم‌شده به‌وسیلهٔ دو حلقهٔ کنترلی پیش‌خور و پس‌خور حساب شده است. در بخش‌های بعدی به‌ترتیب به توضیح سامانهٔ کنترلی هوای مورد نیاز برای کورهٔ احتراق و واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه گاز ایلام پرداخته شده است. در ادامه، نتایج و روابط مربوط‌به محاسبهٔ شدت جریان هوای مورد نیاز در کورهٔ احتراق واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه گاز ایلام ارائه شده است.

۲. سامانهٔ کنترل هوای مورد نیاز برای کورهٔ احتراق

برای هر واحد بازیابی گوگرد، یک حلقهٔ کنترلی پیش‌خور در نظر گرفته می‌شود که شدت جریان هوا را بر اساس ترکیب درصد اجزا و شدت جریان گاز اسیدی خوراک واحد، تنظیم می‌کند. عملکرد این حلقهٔ کنترلی به دقت آن در اندازه‌گیری، محاسبه و تجهیزات کنترلی حلقه وابسته است. در صورتی‌که غلظت H_2S در گاز اسیدی خوراک نسبتاً ثابت باشد. در بهترین حالت کنترل جریان هوا با اختلاف ۳±٪ انجام می‌شود. این خطای کنترلی ناشی از باند سکون، حساسیت و خطای کالیبراسیون سنسورها، کنترلر، شیر اصلی هوا و عملگر است.

استفاده از آنالیزور گازی خوراک، تغییرات ترکیب خوراک را شناسایی می‌کند؛ اما این آنالیزور نمی‌تواند عملکرد کورهٔ واکنش و سایر تجهیزات پایین‌دستی را پیش‌بینی کند. کورهٔ واکنش از نظر سینتیکی محدودیت دارد و محصولات متفاوتی از جمله H_2، CO، COS و CS_2 را نیز تولید می‌کند که میزان تولید این محصولات به‌وسیلهٔ آنالیزور خوراک قابل تعیین نیست. در صورتی‌که مقدار آن‌ها بر میزان هوای مورد نیاز، تأثیر دارد و باید در نظر گرفته شوند. مقداری از COS و CS_2 در رآکتور کاتالیستی اول، آب‌کافت و به H_2S تبدیل می‌شود. میزان آب‌کافت آن‌ها به فعالیت کاتالیست بستگی دارد. علاوه بر این درصورتی‌که از گرمکن‌های حرارت مستقیم در واحد بازیابی گوگرد استفاده شود، باید انحراف از استوکیومتری کلاوس و تولید CO و H_2 در نظر گرفته شود.

تنها راه‌حل برای در نظرگرفتن تمامی عوامل، اندازه‌گیری دقیق در نقطه‌ای است که بعد از آن تغییر دیگری در فرایند رخ ندهد؛ به‌عبارت دیگر جریان گاز خروجی یا Tail Gas. از همین روست که در واحد بازیابی گوگرد، از حلقهٔ کنترلی پیش‌خور برای محاسبه و تنظیم نسبت تقریبی هوا به گاز اسیدی استفاده می‌شود و سپس با استفاده از آنالیزور Tail Gas در حلقهٔ کنترلی پسخور، نسبت هوا به گاز اسیدی به‌طور دقیق تنظیم می‌شود. معادلهٔ زیر تخمینی از میزان هوای مورد نیاز برای دست‌یابی به درصد تبدیل بیشینه بر اساس غلظت هیدروژن سولفید و دی‌اکسید گوگرد اندازه‌گیری‌شده با آنالیزور Tail Gas در حلقهٔ پسخور است[۱۸]:

$$\text{Air Demand} = K\,(2\,[SO_2] - [H_2S]) \qquad (۱)$$

بیشترین میزان تبدیل و بازیافت گوگرد زمانی رخ می‌دهد که نسبت هیدروژن سولفید به دی‌اکسید گوگرد در Tail Gas خروجی از آخرین رآکتور ۱:۲ باشد[۱۵]. این نسبت با تنظیم مقدار اکسیژن اضافی ورودی به مرحلهٔ اول (Trim Air) کنترل می‌شود؛ به‌گونه‌ای که اگر میزان هوای در دسترس برای واکنش کم باشد مقدار H_2S در گاز خروجی افزایش می‌یابد و اگر مقدار هوای ورودی زیادتر از مقدار مطلوب آن باشد میزان ترکیب SO_2 در گاز خروجی افزایش می‌یابد، به همین منظور نسبت مقدار H_2S به SO_2 در گاز خروجی کنترل می‌شود[۵].

در معادلهٔ (۱) K ثابتی است که در هر واحد عملیاتی مقداری مشخص است؛ بنابر این رابطه، مقدار هوای مورد نیاز یک تابع خطی از غلظت هیدروژن سولفید و دی‌اکسید گوگرد است. وقتی مقدار هوای مورد نیاز برابر صفر باشد، واحد بازیابی گوگرد در نسبت استوکیومتری کار می‌کند و نیاز به فرمان کنترلی پسخور نیست.

1. Recurrent Neural Networks (RNNs)
2. Long Short-Term Memory (LSTM)

چون حلقهٔ کنترلی پسخور آنالیزور Tail Gas برای تنظیم دقیق‌تر حلقهٔ کنترل پیش‌خور استفاده می‌شود، نیازی به کنترل کامل کل هوای ورودی فرایند ندارد. تجربه نشان داده است که با کنترل ۱۰٪ از هوای فرایندی مورد نیاز، در بازه ۵+ تا ۵- درصد تنظیم می‌شود. در این حالت، ریسک ناپایداری کورهٔ واکنش در صورت شکست این حلقهٔ کنترلی نیز وجود ندارد.

۳. شرح فرایند بازیابی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام

فرایند بازیابی گوگرد در شرکت پالایش گاز ایلام، بر اساس فرایند کلاوس اصلاح شده است. در این فرایند یک مرحلهٔ حرارتی برای سوختن جزئی H_2S با هوا وجود دارد که در ادامهٔ آن سه مرحلهٔ کلاوس کاتالیستی در نظر گرفته شده است. جریان Tail Gas خروجی از مرحلهٔ سوم نیز برای سوختن به زباله‌سوز حرارتی ارسال می‌شود. حداکثر میزان بازیابی گوگرد برای خوراک گاز اسیدی با شرایط فوق، ۹۶/۷ درصد است. گاز خروجی از برج احیا آمین واحد شیرین‌سازی، خوراک واحد بازیابی گوگرد است که مشخصات آن در جدول (۱) آورده شده است. هم‌چنین طرحواره‌ای از فرایند بازیافت گوگرد در پالایشگاه گاز ایلام در شکل (۱) نمایش داده شده است.

در این واحد ابتدا ذرات مایع موجود در خوراک گاز اسیدی حذف می‌شود. جریان خروجی بعد از پیش‌گرم‌شدن با جریانی از بخار در مبدل حرارتی، به‌همراه قسمتی از هوای گرم‌شده و گاز سوختی وارد مشعل کورهٔ اصلی فرایند می‌شود تا یک سوم از H_2S به SO_2 تبدیل شود.

از حرارت تولیدشده در اثر احتراق در کوره، در بویلر حرارتی برای تولید بخار فشار متوسط استفاده می‌شود. سولفور تولیدشده نیز در کندانسور اول، به مایع، تبدیل و به واحد ذخیره و نگه‌داری ارسال می‌شود. تقریباً ۶۰٪ از گوگرد موجود در گاز اسیدی خوراک واحد بازیابی گوگرد، در این مرحله بازیابی می‌شود و حدود ۴۰٪ از این ترکیبات گوگردی در گاز خروجی از کندانسور باقی می‌ماند.

ادامهٔ فرایند تبدیل ترکیبات گوگردی موجود در گاز به گوگرد مولکولی در سه مرحلهٔ رآکتور کاتالیستی انجام می‌شود. کاتالیست مورد استفاده در رآکتور اول آلومینای فعال و لایه‌ای تیتانیوم اکسید فعال و در رآکتور دوم و سوم آلومینای فعال است. واکنش بین H_2S و SO_2، در رآکتور کاتالیستی تا رسیدن به تعادل پیش می‌رود. در رآکتور کاتالیستی دما به‌حدی بالاست که COS و CS_2 ایجاد می‌شود، از این رو برای اطمینان از آب‌کافت COS و CS_2 دمای سطح پایین کاتالیست باید حداکثر ۳۰۰ درجهٔ سلسیوس باشد و گاز خروجی با دمای ۲۴۸°C از رآکتور کاتالیستی وارد کندانسور دوم می‌شود و گوگرد مولکولی تولیدشده در رآکتور از جریان گاز جدا می‌شود[۱۹].

در نهایت جریان گاز خروجی از سومین رآکتور کاتالیستی وارد آخرین (چهارمین) کندانسور گوگرد می‌شود. برای بازیابی حداکثر مقدار گوگرد، آخرین کندانسور در دمای پایین‌تری کار می‌کند. گاز خروجی از این کندانسور (Tail Gas) هم‌چنان شامل ترکیبات احتراق‌پذیر و ترکیبات گوگردی (H_2S، H_2 و CO) است که در دودکش سوزانده می‌شود. در شرکت پالایش گاز ایلام با توجه به فعالیت دو واحد بازیابی گوگرد، جریان گاز خروجی از دودکش با فرض ترکیب جزئی ۴۶/۸۹۹٪ H_2S در خوراک حدود ۸/۴۶ کیلوتن در سال گاز SO_2 به جو منتشر می‌کند.

جدول ۱. مشخصات گاز اسیدی خوراک واحد بازیابی گوگرد.

Table 1. Soluphur recovery unit Sour feed gas properties.

		Lean Case Acid Gas		Rich Case Acid Gas		
Mole Flow (kmole/hr)		456.31		487.29		
Tempereature (C)		54		54		
Pressure (barg)		1.51		1.51		
Mole Composition						
	Hydrocarbons	H_2O	C_2H_6S	CH_4S	CO_2	H_2S
Rich Case Acid Gas	0.302	8.81	0.111	0.537	43.341	46.899
Lean Case Acid Gas	0.26	8.882	0.127	0.611	53.87	36.25

۴. نتایج و بحث

۴-۱ مطالعهٔ میزان جریان هوای مورد نیاز برای احتراق گاز اسیدی در حلقهٔ کنترلی پیش‌خور

هوای ورودی به کورهٔ واکنش باید برای احتراق تمام ترکیبات هیدروکربنی موجود در گاز اسیدی و احتراق H_2S موجود در آن به اندازهٔ کافی باشد، به‌گونه‌ای که در جریان گاز خروجی واحد یا Tail Gas، نسبت H_2S به SO_2 برابر ۲ باشد. مقدار هوای مورد نیاز بر اساس مقدار جریان گاز اسیدی و جریان گاز سوخت ورودی به کوره، حساب می‌شود که مقدار جریان گاز سوخت در حالت نرمال صفر است[۱۹]. نسبت هوا به گاز اسیدی و نسبت هوا به گاز سوخت به‌صورت دستی تعیین می‌شود. برای محاسبهٔ مقدار کل هوای مورد نیاز می‌توان معادلهٔ زیر را بیان کرد.

Total Air Demand= (Acid Gas Flow× (Air/ Acid Gas)) + (Fuel Gas Flow× (Air/ Fuel Gas)) (۲)

طبق استوکیومتری واکنش (۳) برای احتراق هر ۱ مول H_2S، ۱/۵ مول اکسیژن مورد نیاز است.

$$3H_2S + \frac{3}{2}\ O_2 \rightarrow SO_2 + 2H_2S + H_2O + heat \quad (۳)$$

$$2H_2S + SO_2 \leftrightarrow \frac{3}{x}\ S_x + 2H_2O + heat \quad (۴)$$

بر اساس واکنش‌های (۳) و (۴)، به‌ازای هر ۳ مول H_2S، یک مول از آن به SO_2 تبدیل می‌شود و ۲ مول باقی‌مانده با SO_2 تولیدشده واکنش می‌دهد و گوگرد تولید می‌کند؛ بنابراین مقدار اکسیژن ورودی باید به‌گونه‌ای باشد که یک‌سوم از H_2S، موجود در خوراک بسوزد. بنابراین مقدار اکسیژن و درنتیجه مقدار هوای مورد نیاز چنین حساب می‌شود:

REQUIRED O_2= (1.5× (X_{H2S} @ ACID GAS) × ACID GAS FLOW)/3 (۵)

REQUIRED AIR= (REQUIRED O_2)/ (X_{O2} @ AIR FLOW) (۶)

AIR/ACID GAS =0.5× (X_{H2S} @ ACID GAS)/ (X_{O2} @ AIR FLOW) (۷)

مقدار جزء مولی اکسیژن در هوا در شرایط طراحی واحد به‌وسیلهٔ شرکت لایسنسور ۲۰/۰۷۸ درصد در نظر گرفته شده است. درنتیجه نسبت هوا به گاز اسیدی بر اساس غلظت H_2S موجود در گاز اسیدی و طبق معادلهٔ زیر حساب خواهد شد.

AIR/ACID GAS =2.49× (X_{H2S} @ ACID GAS) (۸)

که با تعیین ترکیب درصد H_2S در گاز اسیدی نسبت هوا به گاز اسیدی و درنتیجه دبی هوا حساب می‌شود. لازم به تذکر است که این معادله برای نسبت مولی جریان‌هاست و بر اساس وزن مولکولی باید برای نسبت جریان جرمی تصحیح شود. هم‌چنین در این حالت فقط هوای لازم برای احتراق هیدروژن سولفید حساب شده است. به‌دلیل مناسب‌بودن غلظت گاز اسیدی و با توجه به این‌که دمای کوره در حالت نرمال به دمای ۹۰۰ درجهٔ سلسیوس در نظر گرفته‌شده در طراحی می‌رسد، نیاز به استفاده از گاز سوخت در این واحد نیست و عملاً در حالت نرمال این مسیر بسته است و با این وجود، کل هوای مورد نیاز برای احتراق بر اساس مقدار جریان گاز اسیدی حساب می‌شود.

برای محاسبهٔ نسبت شدت جریان حجمی هوا به شدت جریان حجمی گاز اسیدی از قانون گازهای حقیقی استفاده می‌شود.

$$P_{Air}\ V_{Air} = z_{Air}\ n_{Air}\ R\ T_{Air} \quad (۹)$$

$$P_{AcidGas}\ V_{AcidGas} = z_{AcidGas}\ n_{AcidGas}\ R\ T_{AcidGas} \quad (۱۰)$$

$$\frac{V_{Air}}{V_{AcidGas}} = \frac{n_{Air}}{n_{AcidGas}} \times \frac{\left(z_{Air}\ T_{Air}/P_{Air}\right)}{\left(z_{AcidGas}\ T_{AcidGas}/P_{AcidGas}\right)} \quad (۱۱)$$

$$\frac{V_{Air}}{V_{AcidGas}} = (2.49 \times (X_{H2S} @ \text{ACID GAS})) \times \frac{\left(z_{Air}\ T_{Air}/P_{Air}\right)}{\left(z_{AcidGas}\ T_{AcidGas}/P_{AcidGas}\right)} \quad (۱۲)$$

$$\frac{V_{Air}}{V_{AcidGas}} = \left(2.49 \times (X_{H2S} @ \text{ACID GAS})\right) \times 1.154 = 2.87 \times (X_{H2S} @ \text{ACID GAS}) \quad (۱۳)$$

معادلهٔ (۱۳) برای محاسبهٔ نسبت حجمی شدت جریان هوا به گاز اسیدی در غلظت‌های مختلف از هیدروژن سولفید قابل استفاده است. در جدول (۲) نسبت مولی و نسبت حجمی جریان هوا به گاز اسیدی برای دو حالت خوراک بر اساس نقشه‌های فرایندی واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه گاز ایلام و نسبت به احتراق هیدروژن سولفید حساب شده است. در شکل (۱)، تغییرات نسبت دبی مولی و حجمی هوا به گاز اسیدی در بازه کمترین و بیشترین غلظت هیدروژن سولفید بر اساس مقادیر طراحی واحد آورده شده است.

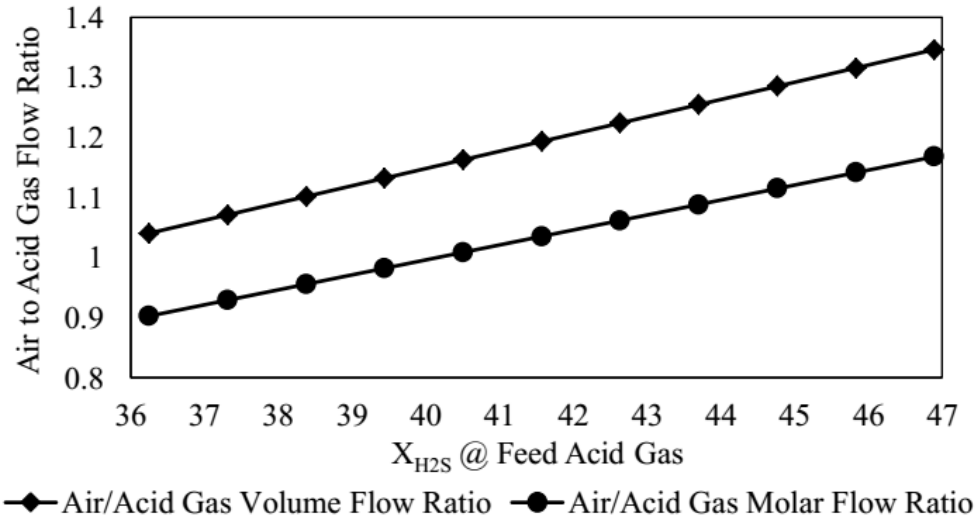
پس از محاسبهٔ مقدار هوای مورد نیاز، سیگنال مربوطه، جریان هوا را از راه دو شیر کنترلی تنظیم می‌کند، سامانهٔ کنترلی جریان هوا ابتدا شیر کوچک‌تر (Trim) را که روی خط اصلاحی هوا قرار دارد تنظیم می‌کند و شیر کنترلی روی خط اصلی (Main) با تأخیر تنظیم می‌شود. به‌گونه‌ای که Trim Valve در حدود ۵۰ درصد باز باشد و حدوداً ۷/۵٪ از جریان هوا از خط Trim عبور کند. هم‌چنین مقدار هوای مورد نیاز ارسال‌شده به‌وسیلهٔ آنالیزور Tail Gas نیز بر عملکرد این حلقهٔ کنترلی تأثیر دارد.

در شکل (۲)، طرحواره‌ای از حلقه‌های کنترلی مربوط به جریان هوای مورد نیاز برای احتراق گاز اسیدی در کورهٔ واکنش، واحد بازیافت گوگرد شرکت پالایش گاز ایلام نشان داده شده است. سیگنال Total Calculated Air Demand، نشان‌دهندهٔ میزان کل هوای مورد نیاز برای احتراق درکورهٔ واکنشی است که این میزان هوا مجموع هوای مورد نیاز برای احتراق گاز اسیدی و هوای مورد نیاز برای احتراق گاز سوخت است.

جدول ۲. نسبت مولی و حجمی شدت جریان هوا به گاز اسیدی در پالایشگاه گاز ایلام.

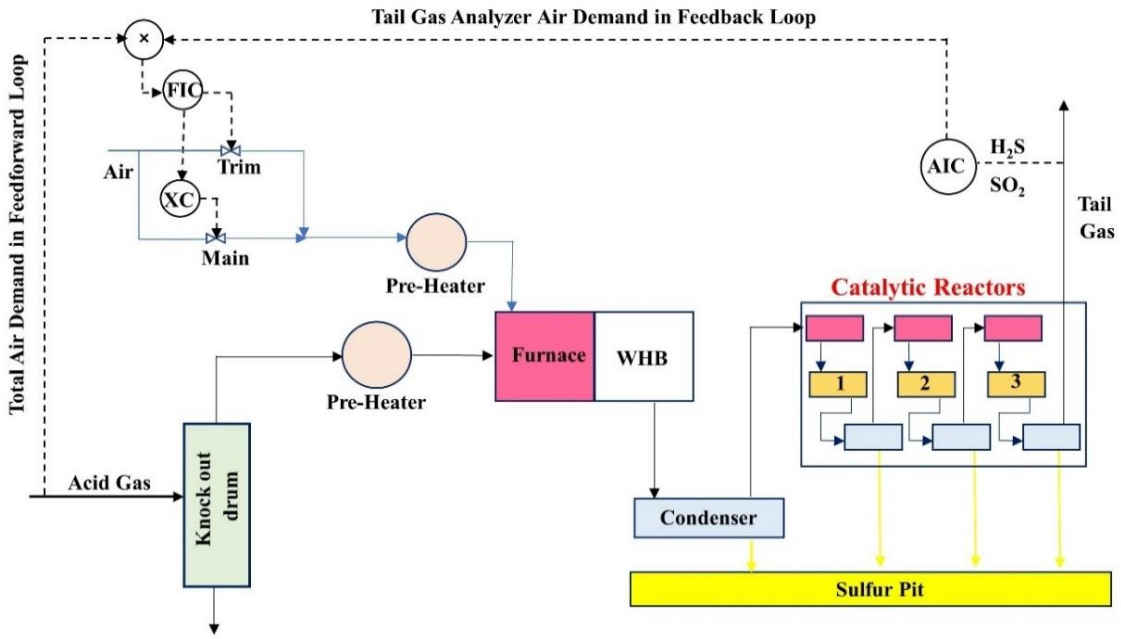
Table 2. Air to acid gas molar and volume flow ratio, Ilam Gas Refinery.

	X_{H2S}	Air/Acid Gas Molar Flow Ratio	Air/Acid Gas Volume Flow Ratio
Rich Case Acid Gas	46.899	1.167	1.34
Lean Case Acid Gas	36.25	0.926	1.04



شکل ۱. تغییرات نسبت دبی مولی و حجمی هوا به گاز اسیدی برحسب غلظت H_2S موجود در خوراک گاز اسیدی.

Figure 1. Air to acid gas molar and volume flow ratio versus H_2S concentration in feed acid gas.



شکل ۲. طرحواره‌ای از فرایند بازیافت گوگرد و حلقه‌های کنترلی جریان هوای مورد نیاز برای احتراق در کورهٔ واکنش، پالایشگاه گاز ایلام.

Figure 2. Sulfur recovery process schematic and required air flow control loops for combustion in the reaction furnace, Ilam gas refinery.

سیگنال Air Demand ارسال‌شده از آنالیزور Tail Gas، بیانگر میزان هوای مورد نیاز بر اساس مقدار H_2S و SO_2 موجود در جریان Tail Gas است، در شرایطی که واحد عملکرد مطلوبی داشته باشد و در شرایط بهینه، نسبت مولی H_2S به SO_2 در جریان Tail Gas باید ۲ باشد. انحراف نسبت مولی H_2S به SO_2 در جریان Tail Gas از مقدار مطلوب ۲ نشان‌دهندهٔ انحراف از شرایط استوکیومتری است و نیاز به اصلاح شدت جریان هوای ورودی به کوره برای تنظیم نسبت مولی H_2S به SO_2 در جریان Tail Gas است. در حلقهٔ کنترلی مورد بررسی پس از مشخص‌شدن مقدار Air Demand و سیگنال خروجی از آنالیزور کنترلر (AIC) در مقدار کل هوای مورد نیاز حساب‌شده بر اساس احتراق جریان گاز اسیدی خوراک، ضرب و مقدار واقعی هوای مورد نیاز حساب می‌شود و به‌عنوان نقطهٔ مطلوب در کنترلر شدت جریان در نظر گرفته می‌شود، متغیر اندازه‌گیری در کنترلر شدت جریان مقدار کل هوای موجود در دو خط Trim و Main است که پس از اندازه‌گیری شدت جریان دو خط و تصحیح آن با اعمال دما و فشار اندازه‌گیری‌شده از جریان هوا در ابتدای خط، تعیین می‌شود. دستور کنترلر شدت جریان به‌وسیلهٔ شیر کنترلی خط Trim اجرا می‌شود. سپس خروجی کنترلر شدت جریان به‌عنوان متغیر اندازه‌گیری‌شده به کنترلر موقعیت شیر اصلی (Main) ارسال می‌شود و در این کنترلر موقعیت شیر کنترلی Trim با تنظیم موقعیت شیر Main تنظیم می‌شود. نقطهٔ مطلوب کنترلر موقعیت را می‌توان با استفاده از تابع Ramp تعیین کرد. در صورتی‌که جریان هوا در خط Trim به بالاترین حد آن برسد، مقدار مقرر برای جریان هوا در خط Main به مقدار مشخصی افزایش می‌یابد و در صورتی‌که جریان هوا در خط Trim به کمترین حد برسد، مقدار مقرر برای جریان هوا در خط Main به مقدار مشخصی کاهش می‌یابد. این تغییرات با شیبی مشخص و در بازه زمانی مشخصی اعمال می‌شوند، به همین دلیل به این تابع Ramp گفته می‌شود.

۲-۴ محاسبهٔ جریان هوای مورد نیاز آنالیزور Tail Gas

برای تعیین ثابت K در معادلهٔ (۱)، مقدار هوای مورد نیاز Tail Gas آنالیزور، واحد بازیافت گوگرد در دو حالت خوراک گاز اسیدی Lean و Rich به‌ترتیب بر اساس داده‌های گزارش‌شده در نقشه‌های فرایندی شبیه‌سازی شده است. پس از بررسی اعتبار نتایج

به‌دست‌آمده (جدول‌های ۶-۳)، از شبیه‌سازی، بین دو نرم‌افزار شبیه‌ساز و MATLAB R2019a ارتباط برقرار شده است. با استفاده از تولباکس شبکهٔ عصبی در نرم‌افزار متلب و با تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی فرایند، شبکهٔ عصبی‌ای آموزش داده شده است به‌نحوی‌که با استفاده از شاخص‌هایی هم‌چون دبی مولی جریان Tail Gas، دبی مولی جریان گاز اسیدی و غلظت H_2S در جریان گاز اسیدی، مقدار ثابت K پیش‌بینی شود و برای محاسبهٔ میزان هوای مورد نیاز به‌وسیلهٔ آنالیزور Tail Gas به کار رود.

جدول ۳. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی و داده‌های PFS برای گاز اسیدی با جزء مولی ۳۶/۲۵ درصد H_2S.

Table 3. Simulation results vs. PFS data for lean case acid gas (H_2S 36.25%).

Unit	H_2S Conversion (%)		Temperature (C)		Sulfur Production (kg/hr)	
	Simulation	PFS	Simulation	PFS	Simulation	PFS
HB-4050	79.4	78.9	HB-4050	955.6	3054.4	2782.5
R-4130	57.7	59.06	R-4130	315.6	1522.8	1630
R-4170	79.19	73.75	R-4170	218.6	552.8	622.3
R-4210	51.8	51.1	R-4210	191.2	153.4	193

جدول ۴. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی و داده‌های PFS برای گاز اسیدی با جزء مولی ۴۶/۸۹۹ درصد H_2S.

Table 4. Simulation results vs. PFS data for rich case acid gas (H_2S 46.899%).

Unit	H_2S Conversion (%)		Temperature (C)		Sulfur Production (kg/hr)	
	Simulation	PFS	Simulation	PFS	Simulation	PFS
HB-4050	81.3	81.2	1057.9	1038.8	4500	3909.3
R-4130	62.2	62.5	312.4	315.5	1895	2251
R-4170	80.4	73.7	216.3	220.6	634	801
R-4210	54.3	52	191	192.4	175	242

جدول ۵. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی و داده‌های PFS برای تولید کلی گوگرد.

Table 5. Simulation results vs. PFS data for overal sulphur production.

Overal	H_2S Conversion (%)		Sulfur Production (ton/day)	
	PFS	Simulation	Simulation	PFS
LeanCase	99.1	98.6	126.8	125.46
RichCase	99.4	98.7	173.9	172.9

جدول ۶. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی و داده‌های PFS برای جریان TailGas

Table 6. Simulation results vs. PFS data for Tail Gas Stream.

Overal	H_2S (kmole/hr)		SO_2 (kmole/hr)	
	Simulation	PFS	Simulation	PFS
LeanCase	1.5	2.3	1.6	1.1
RichCase	1.5	2.9	3.1	1.4

در بستهٔ شبیه‌سازی مورد استفاده، پس از هر بار حل معادلات مربوط به کورهٔ میزان Air Demand با توجه به مقدار هوا و گاز اسیدی ورودی و میزان H_2S و SO_2 در جریان گاز خروجی از کوره گزارش می‌شود. هم‌چنین بلوک محاسباتی به‌نام ADA در این بستهٔ شبیه‌سازی تعبیه شده است که با توجه به جزء مولی H_2S و SO_2 در جریان Tail Gas، مقدار Air Demand را حساب می‌کند و بر اساس مقدار حساب‌شده جریان هوای ورودی به کوره را به‌نحوی تغییر می‌دهد که در نهایت مقدار Air Demand مربوط به Tail Gas به صفر برسد؛ یعنی جایی که نسبت جزء مولی H_2S به SO_2 برابر ۲ است.

چنان‌که در معادلهٔ (۱) نشان داده شده است یکی از شاخص‌های مجهول برای محاسبهٔ مقدار Air Demand، شاخص K است. با بررسی نتایج شبیه‌سازی مشاهده شده است که K مقدار ثابتی ندارد و در بازهٔ بین ۷-۳ متغیر است و مقدار آن تابعی از شاخص‌های مختلف از جمله جزء مولی H_2S و SO_2، دبی مولی جریان Tail Gas، دبی مولی جریان گاز اسیدی و جزء مولی H_2S در جریان گاز اسیدی است. به همین دلیل با استفاده از جعبهٔ ابزار شبکهٔ عصبی در نرم‌افزار متلب و داده‌های استخراج‌شده از شبیه‌سازی، شبکه‌ای عصبی از نوع MLP تشکیل داده شد که بر اساس جزء مولی H_2S و SO_2 در جریان Tail Gas، شدت جریان مولی Tail Gas، شدت جریان مولی گاز اسیدی و جزء مولی H_2S در جریان گاز اسیدی، مقدار K را پیش‌بینی کند و متناسب با آن مقدار هوای مورد نیاز حساب شود. بدین منظور از ۵۰۰ داده استفاده شده است که ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش شبکه و ۳۰٪ از آن برای آزمایش شبکه به کار برده شده است. در جدول (۷) اطلاعات مربوط به شبکهٔ عصبی آورده شده است.

جدول ۷. شاخص‌های شبکهٔ عصبی.

Table 7. Neural network parameters.

Training Function	Activation Function	output	Hidden Layer Size	Input
Levenberg-Marquardt	Sigmoid function	1	3	3

علاوه براین با استفاده از رگرسیون چندگانهٔ تابع ریاضی برای پیش‌بینی مقدار K براساس شاخص‌های گفته‌شده به دست آمده است که در هر دو حالت شبکهٔ عصبی و رگرسیون چندگانه نتایج به‌دست‌آمده در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی قابل قبول است. طبق نتایج به‌دست‌آمده این ثابت بر اساس شدت جریان Tail Gas، شدت جریان گاز اسیدی خوراک واحد و مقدار H_2S موجود در گاز اسیدی خوراک از معادلهٔ زیر حساب می‌شود.

$$\text{Air Demand}=K\ ([H_2S] - 2\ [SO_2]) \qquad (۱۴)$$

$$K = \frac{-Tail\ Gas\ Molar\ Flow \times 100}{Acid\ Gas\ Molar\ Flow \times [H_2S]_{acid\ gas}}$$

به‌طور کلی Air Demand حساب‌شده به‌وسیلهٔ آنالیزور نسبت مقدار هوای مورد نیاز برای جریان Tail Gas به مقدار هوای مورد نیاز بر اساس گاز اسیدی خوراک است که در واحد بازیابی گوگرد شرکت پالایش گاز ایلام مقدار آن بین ۵+ و ۵- درصد است. در حالتی‌که نسبت H_2S به SO_2 برابر ۲ باشد، واحد در حالت استوکیومتری است و مقدار هوای مورد نیاز صفر است. با استفاده از ثابت K تعریف‌شده در معادلهٔ (۱۴)، مقدار هوای مورد نیاز حساب‌شده برحسب درصد تغییرات مورد نیاز در هوای فرایندی است، به‌عنوان مثال مقدار هوای مورد نیاز ۱/۵٪ به معنی ۱/۵ درصد هوای اضافی موجود در فرایند است.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق شدت جریان هوای مورد نیاز در کورهٔ احتراق واحد بازیافت گوگرد شرکت پالایش گاز ایلام در دو حلقهٔ کنترلی پیش‌خور و پس‌خور حساب شده است. بر این اساس، ابتدا در حلقهٔ کنترلی پیش‌خور میزان جریان هوا بر اساس استوکیومتری، با اندازه‌گیری غلظت H_2S و شدت جریان گاز اسیدی خوراک تعیین می‌شود و از راه دو خط جریان Trim و Main به‌سمت کوره ارسال می‌شود. مقدار جریان هوا در دو خط به‌وسیلهٔ دو شیر کنترلی به‌نحوی تنظیم می‌شود که جریان Trim حدود ۷/۵٪ از جریان را عبور دهد. سپس با اندازه‌گیری غلظت H_2S و SO_2 در جریان Tail Gas به‌وسیلهٔ آنالیزور و با محاسبهٔ میزان انحراف از شرایط استوکیومتری مقدار هوای مورد نیاز برای تنظیم دقیق در بازه ۵+ تا ۵- درصد به‌صورت سیگنال پس‌خور ارسال می‌شود. در این تحقیق، ضریب K یکی از شاخص‌های مجهول ضروری در حلقهٔ کنترلی آنالیزور Tail Gas برای محاسبهٔ مقدار هوای مورد نیاز آنالیزور، تعیین شده است. بر اساس نتایج، این ضریب تابعی از شدت جریان

Tail Gas، گاز اسیدی خوراک و غلظت H_2S در گاز اسیدی است. سیگنال ارسال‌شده از آنالیزور Tail Gas در واقع نسبت هوای مورد نیاز به هوای مورد نیاز حساب‌شده بر اساس استوکیومتری است. لازم به ذکر است که در حال حاضر غلظت H_2S موجود در گاز اسیدی خوراک واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه گاز ایلام، به‌وسیلهٔ آزمایشگاه و در دوره‌های مشخص اندازه‌گیری می‌شود که باتوجه به امکان ایجاد تغییرات در این شاخص، عاملی مهم در ایجاد خطا در محاسبهٔ مقدار هوای مورد نیاز استوکیومتری است. در سامانه‌های کنترلی فوق پیشرفتهٔ کورهٔ احتراق[1]، روی جریان گاز اسیدی خوراک واحد نیز آنالیزور گازی، قرار گرفته و غلظت H_2S در گاز اسیدی خوراک به‌صورت برخط اندازه‌گیری می‌شود و تغییرات آن در حلقهٔ کنترلی در نظر گرفته می‌شود؛ لذا پیشنهاد می‌شود که به‌منظور افزایش دقت و کاهش خطای ناشی از تغییرات غلظت H_2S موجود در جریان خوراک، آنالیزور اندازه‌گیری برخط ترکیبات گوگردی و هیدروکربنی روی جریان خوراک گاز اسیدی ورودی واحد در نظر گرفته شود.

۶. تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت پالایش گاز ایلام بابت حمایت مالی و امکان دسترسی به بانک اطلاعات تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

[1] Orazbayev, B. B., Shangitova, Z. Y., Kurmangaziyeva, L. T., Kodanova, S. K., "The study of the main parameters affecting the efficiency of Claus reactor and construction of linguistic models for assessing the quality of produced sulfur", Journal of Sulfur Chemistry, 41(5): pp. 498-507, (2020).

[2] Ibrahim, A. Y. "Performance assessment of a sulphur recovery unit", Petroleum & Petrochemical Engineering Journal, 5(1): p. 000254, (2021).

[3] Hauer, R., Simmonds, S., Pavina, E., McCartney, B. "Claus Sulfur Recovery Tail Gas Applying 100 million Hours of Operational Time to The Next Generation Analyzer", https://ivesequipment.com/images/ives/PDF/Next-Generation-Tail-Gas-Analyzer.pdf, Available in 8 March (2015).

[4] Simmonds, S., Hauer, R., "Analyzers and Next Generation SRU Control", Sulphur, 356, pp. 1-5, (2015).

[5] Raimondi, A., Favela, A., Estrada, R., Nevado, A., Gracia, E., "Adaptive predictive control of the sulfur recovery process at Pemex Cadereyta refinery", International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 26(10): pp. 961-975, (2012).

[6] Abdoli, P., Hazbavi, A., "Effect of increasing amount of inlet Air on reaction furnace temperature and sulfur recovery of Abadan Oil refinery", First International Comprehensive Competition Conference on Engineering Sciences in Iran, Bandar Anzali, Iran, (2016).

[7] Pak Manzar, N., Asaadi, S., Lashkari, S., "Investigation of the effect of inlet air pressure of sulfur recovery unit on the output sulfur compounds using Promex simulation software", The Fourth National Conference on New Research in Chemical Science and Engineering, Tehran, Iran, (2018).

[8] Nagamalleswara, R. K., Haydary, J., "Studies on Sulfur Recovery Plant Performance using Aspen Hysys Sulsim Simulations", Petroleum & Coal Journal, 61(2): pp. 292-305, (2019).

[9] Gharsalla, K. R. M., Process Analysis and Improvement of a Claus Unit of an Existing Gas plant. MSc Thesis, School of Energy, Environment and Agrifood Process System Engineering, Cranfield University, Cranfield, England, (2016).

[10] Shahverdi Fardi, E., Sakhaei Nia, H., Fatoorehchi, H., "Selection of self-optimizing control variables for optimizing of SPGD phases 17&18 sulphur recovery unit", First National Conference on Gas and Petrochemical Processes, Bojnurd, Iran, (2017).

[11] Adimi, M., Gharibi, A., "Fuzzy control of claus process in sulfur recovery unit", The national Conference on Science and Technology of Engineering Sciences of Iran, Babol, Iran, (2017).

[12] Wilson. B, Gough. B, Kay. G, "Adaptive control of sulphur recovery units", Andritz Automation, www.andritz.com, available in 8 March (2011).

[13] Bolf. N, Mohler, I., Golob, M., "Software Sensor for Sulphur Recovery Unit Control", Chemical Engineering Transactions, 17: pp. 1191-1196, (2009).

[14] Fortuna. L, Rizzo. A. Sinatra.M, "Soft Analysers for A Sulfur Recovery Unit", Control Engineering Practice, 11: pp.1491–1500, (2003).

[15] Yuan, X., Wang, Y., Yang, C., Gui, W., "Stacked isomorphic autoencoder based soft analyzer and its application to sulfur recovery unit", Information Sciences, 534: pp. 72-84, (2020).

[16] Curreri, F., Patan`e, L., Xibilia, M. G., "Soft Sensor Transferability between Lines of a Sulfur Recovery Unit", IFAC PapersOnLine, 54(7): pp. 535–540, (2021).

[17] Curreri, F., Patanè, L., Xibilia, M. G., "RNN- and LSTM-Based Soft Sensors Transferability for an Industrial Process", Sensors, 21(3): pp. 823-843, (2021).

[18] Paskall, H. G., Hauer, R. N., Sames, J. A., "Sulfur Plant Process Control Analyzers", Technical Paper, All Western Researchn Sulfur Seminars, (1997).

[19] Operating Manual, Gas Treating Plant Ilam, National Iranian Gas Company, 1, (2006).

1. Advanecd Burner Control Plus, ABC+