روش جدید برای شیرین سازی گاز طبیعی با ادغام روش بیولوژیکی و فرایند Seaboard

جواد امیرفخری، منوچهر وثوقی*+، محمد سلطانیه

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی ونفت، مرکز مهندسی بیوشیمی وکنترل محیط زیست، صندوق پستی ۶۸۹۱-۱۱۳۶۵

چکیده: اساس روش جدید ارایه شده برمبنای فرایند Seaboard برای شیرین‌سازی گاز طبیعی استوار است، با این تفاوت که به جای مرحله هوادهی، از یک راکتور بافلدار بی هوازی برای حذف سولفید استفاده می‌شود. برای تهیه میکروارگانیسم مناسب از لجن حاصل از واحد لجن فعال تصفیه فاضلاب شهری که به مدت یک سال به صورت بی‌هوازی باقی‌مانده بود استفاده شد. این لجن در داخل راکتور بافلدار بی‌هوازی که دارای ۵ بخش برابر وحجم فعال ۱۰ لیتر بود به مدت دو هفته به‌وسیله‌ی تیوسولفات وسپس به مدت ۱۵روز به‌وسیله‌ی سولفید خوراک‌دهی شدکه در نتیجه حداکثر میزان حذف سولفید $mmolS^{-2}l^{-1}h^{-1}$ ۳/۰۳ مشاهده شد. مطالعات میکروسکوپی نشان داد که جمعیت میکروبی غالب در بیوراکتور از گونه Thiobacilli هستند. در ادامه با استفاده از روش تاگوچی ماده غذایی مورد نیاز میکروارگانیسم‌ها بهینه‌سازی شد و اثر هرکدام برمیزان حذف سولفید و گوگرد تولیدی بررسی شد. از مهم‌ترین مزایای این روش حذف معایب فرایند Seaboard، زمان راه‌اندازی اولیه بسیار کوتاه، سرعت بالای حذف سولفید، عدم استفاده از سوش خالص که درنتیجه باعث افزایش امکان صنعتی شدن فرایند می‌شود، عدم نیاز به هوادهی ومقاومت بسیار خوب سیستم در برابر شوک ناگهانی سولفید می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شیرین سازی گاز، راکتور بافلدار بی هوازی ،تیوباسیلی، روش تاگوچی.

***KEY WORDS**: Natural gas sweetening, Anaerobic baffled reactor (ABR), Thiobacilli, Taguchi method.*

مقدمه

H_2S یکی از مهم‌ترین ناخالصی‌های موجود در گاز طبیعی است که قبل از انتقال گاز باید آن را جداسازی کرد. زیرا تماس باغلظت ppm ۵ از آن روی چشم و شش‌ها اثر گذاشته وغلظت‌های بیشتر از آن باعث از بین رفتن توانایی بویایی و در نهایت مرگ می‌شود [۱]. سوختن H_2S نیز تولید SO_2 می‌کند. این ماده افزون بر این‌که یکی از آلاینده های هوا محسوب می‌شود در نتیجه ترکیب با رطوبت اتمسفری تولید باران‌های اسیدی می‌کند. از دیگر مضرات H_2S می‌توان به ایجاد خوردگی و تولید بوی بد اشاره کرد.

سیستم های بیولوژیکی برای حذف H_2S به خاطر کاهش تولید آلاینده‌های ثانویه، عملکرد در فشار اتمسفری، کاهش انرژی مورد نیاز، هزینه‌های سرمایه گذاری وعملیاتی از اوایل دهه هشتاد میلادی مورد توجه قرار گرفتند و تا به امروز سوش های متفاوتی مانند *Thiobacillus denitrificans*، *Thiobacillus ferrooxidans* و *Chlorobium thiosulfatophilum* مورد آزمایش قرار گرفته‌اند [۲]. به جز دو طرح محدود صنعتی [۳و۴] به جرأت می‌توان گفت که فرایند سولفورزدایی بیولوژیکی از گاز طبیعی با شکست

*عهده دار مکاتبات

+E-mail:vosoughi@sharif.edu

Archive of SID

www.SID.ir

مواجه شده است. فعالیت بهینه *Thiobacillus ferrooxidans* و *Thiobacillus thiooxidans* در pH اسیدی (زیر۳) است که درنتیجه مشکلات مربوط به خوردگی تشدید می شود. همچنین تهیه کلنی از باکتری *Thiobacillus ferrooxidans* به چند دلیل مشکل می‌باشد:

اولاً در کشت‌های مایع و یا جامد حاوی آهن به‌عنوان منبع رشد، به علت پایین بودن انرژی حاصل از اکسایش آهن (II) به آهن (III)، باکتری با اکسید کردن مقدارهای زیاد Fe^{2+} صرفاً قادر به تولید تعداد محدودی سلول خواهد بود. ثانیاً به علت این‌که *Thiobacillus ferrooxidans* اتوتروف اجباری است، وجود مقدارهای اندک مواد آلی در محیط کشت مانع رشد باکتری در کشت مایع و تشکیل کلنی در کشت آگاردار خواهد شد و به علت این‌که به‌طور معمول همراه آگار ناخالصی آلی وجود دارد، رشد باکتری با اشکال مواجه شده و یا ممانعت می‌شود [۵].

باکتری‌های فتواتوتروفی که قابلیت حذف سولفید را دارند در گروه *Chromatiaceae* و *Chlorobiaceae* قرار می‌گیرند [۶]. مهم‌ترین مشکل استفاده ازاین باکتری‌ها نیاز به انرژی تابشی و در نتیجه نیاز به سطوح بسیار شفاف و بزرگ می باشد که این موضوع باعث افزایش شدید هزینه‌ها می‌شود [۷].

استفاده از *Thiobacillus denitrificans* نیز دارای دو مشکل عمده پایین بودن سرعت حذف سولفید در شرایط بی هوازی [۸] وکم بودن زمان اقامت میکروب‌ها درداخل بیوراکتور می باشد. حداکثر بار حذف سولفید توسط این باکتری در شرایط بی‌هوازی $2/3\ mmol\ S^{-2}l^{-1}h^{-1}$ گزارش شد که در این حالت ۹۷ درصد سولفید ورودی حذف می‌شد. برای حل مشکل دوم می‌توان باکتری را بر روی سطوح خاصی تثبیت نمود [۹] که این امر برای تصفیه حجم زیادی از گاز توجیه پذیر نیست.

باکتری‌های گونه *Thiobacilli* نیز با وجود این که دارای سرعت حذف سولفید بالایی می باشند ($3/2\ mmol\ S^{-2}l^{-1}h^{-1}$) اما به علت نوع فرایند به کاربرده شده (تماس مستقیم بیوگاز با باکتری در داخل راکتور fixed-film) تنها موفق به حذف ۶۹/۵ درصد از سولفید ورودی شده اند [۱۰]. افزون بر موردهای ذکر شده، مساله اساسی در راه صنعتی شدن فرایندهای بیولوژیکی شیرین‌سازی گاز طبیعی، تولید حجم زیادی از میکروارگانیسم خالص می‌باشد که اقتصادی نبوده و حتی در صورت تکثیر این میکروارگانیسم‌ها و تلقیح آن به بستر، احتمال آلودگی در حین کار بسیار بالاخواهد بود.

به‌نظر می‌رسد که فرایندهای غیرمستقیم (جذب H_2S به‌وسیله‌ی محلول جاذب و سپس تماس این محلول با باکتری در داخل بیوراکتور) بی‌هوازی گزینه بسیار مناسب‌تری برای حذف سولفید باشند، زیرا در روش تماس مستقیم گاز با باکتری مقاومت اضافی انتقال جرم از فاز گاز به مایع نیز وجود دارد که باعث محدودیت در انتقال جرم می‌شود. همچنین برای افزایش میزان جذب باید فشار را زیاد و دما را کم کنیم که این امر بر فعالیت بهینه باکتری‌ها اثر منفی دارد. مشکل دیگر فرایندهای مستقیم تامین اکسیژن باکتری‌های هوازی است زیرا افزون بر مسایل اقتصادی مخلوط هوا وگاز طبیعی خاصیت انفجاری دارد.

سیستم‌های بی‌هوازی که تا کنون برای حذف سولفید به کار رفته اند به ۳ دلیل عمده زیر موفقیت‌آمیز نبوده‌اند:

۱- پایین بودن سرعت حذف سولفید

۲- انتخاب نامناسب نوع فرایند

۳- طبیعت فتواتوتروف بعضی از باکتری‌های به کاربرده شده

در روش جدید ارایه شده با استفاده از باکتری‌های شیمیواتوتروف تیوباسیلی و یک فرایند غیرمستقیم بی هوازی به حذف H_2S پرداخته می‌شود که در نتیجه ضمن عدم نیاز به هوادهی هیچ کدام از معایب بالا نیز وجود نخواهند داشت.

مواد و روش‌ها

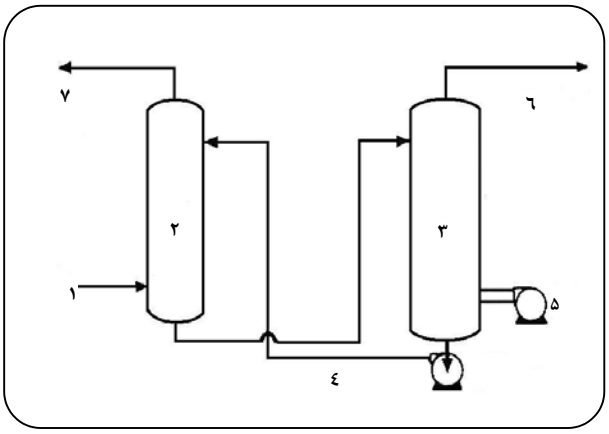
روش‌های اندازه گیری

سولفید با استفاده از روش *تروپر* و *اشلیگل* از روی شدت رنگ آبی تشکیل شده اندازه‌گیری شد. مقدارهای سولفات به روش کدورت سنجی با استفاده از باریم کلرید و تیوسولفات به کمک تیتراسیون (یدومتری) تعیین شد. برای اندازه‌گیری گوگرد مقدار جذب نور توسط نمونه در ۳۸۲ نانومتر اندازه‌گیری و با استفاده از منحنی استاندارد میزان گوگرد مشخص شد [۱۱].

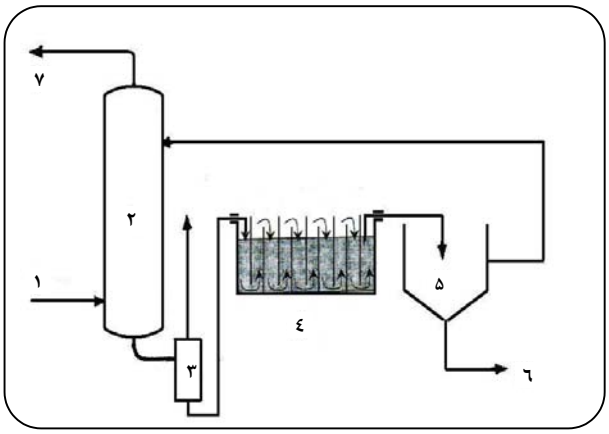
بیوراکتور

بیوراکتور مورد استفاده از نوع بافلدار بی هوازی (ABR) شامل ۵ خانه و حجم فعال ۱۰ لیتر بود. برای افزایش زمان اقامت میکروارگانیسم‌ها، بیوراکتور با قطعات سنگ پومیس (سنگ پا) به قطر ۰/۵ تا ۲ سانتی‌متر پر شد که درنتیجه حجم فعال آن به ۹ لیتر کاهش پیدا کرد. راکتور بافلدار بی هوازی دارای مزایای فراوانی ازجمله طراحی ساده، مقاومت در برابر شوک‌های بار آلی و هیدرولیکی، بالا بودن زمان ماند میکروارگانیسم‌ها در آن و پایین بودن هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری آن نسبت به سایر

Archive of SID
www.SID.ir



شکل۱ـ نمودار فرایند Seaboard برای شیرین سازی گاز طبیعی: ۱ـ ورودی گاز ترش ۲ـ برج جذب ۳ـ برج دفع ٤ـ محلول عاری از سولفید ۵ـ دمنده هوا ٦ـ خروج هوا و H_2S ۷ـ خروج گاز شیرین.



شکل۲ـ نمودار فرایند جدید ارایه شده برای سولفور زدایی بیولوژیکی از گاز طبیعی: ۱ـ گاز ترش ورودی۲ـ برج جذب ۳ـ گاززدا ٤ـ راکتور بافلدار بی هوازی ۵ـ تانک ته نشینی ٦ـ محلول خروجی برای بازیافت گوگرد ۷ـ خروج گاز شیرین.

بیوراکتورهای بی‌هوازی است [۱۲].

همچنان که در پیش ذکر شد زمان اقامت کوتاه باکتری‌ها در داخل بیوراکتور یکی از مشکلاتی بوده است که محققین با آن روبرو بوده‌اند. استفاده از راکتور بافلدار بی‌هوازی ـ که زمان اقامت سلولی درآن گاهی تا ۱۰۰روز نیز می‌رسد ـ به همراه پرکن‌های ذکر شده باعث از بین رفتن این مشکل می‌شود.

تهیه میکروارگانیسم مناسب

به این منظور از لجن حاصل از واحدلجن فعال تصفیه فاضلاب شهری شهرک غرب تهران که به مدت یک سال به صورت بی‌هوازی باقی‌مانده بود استفاده شد. از آنجا که فاضلاب شهری حاوی گونه های متعددی از میکروارگانیسم‌هاست، می‌توان انتظار وجود باکتری‌های اکسیدکننده سولفید را نیز در آن داشت. پس از تلقیح، بیوراکتور ابتدا دو هفته با تیوسولفات و سپس به مدت۱۱ روز با سولفید خوراک‌دهی شد [۱۱]. سپس برای شناسایی نوع میکروارگانیسم‌های موجود به‌وسیله‌ی مشاهده میکروسکوپی، رنگ آمیزی گرم و عکس برداری اقدام شد.

شرح فرایند

فرایند Seaboard نخستین فرایند مایع قابل بازیافت برای جذب H_2S است که در سال ۱۹۲۰ به‌وسیله‌ی کمپانی *کوپرز* ارایه شد. دراین روش ابتدا H_2S به‌وسیله‌ی محلول رقیقی از سدیم کربنات جذب می‌شود آنگاه محلول حاصل به‌وسیله‌ی هوا بازیافت شده، H_2S به اتمسفر تخلیه می‌شود (شکل ۱).

از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به سادگی و جنبه اقتصادی آن اشاره کرد. معایب این فرایند نیز عبارت‌اند از:

۱- تولید تیوسولفات در برج دفع که باعث کاهش قدرت جذب H_2S به‌وسیله‌ی محلول در برج جذب می‌شود.

۲- عدم حذف H_2S ،زیرا در این فرایند H_2S در نهایت به هوا وارد می‌شود [۱۳و۱۴].

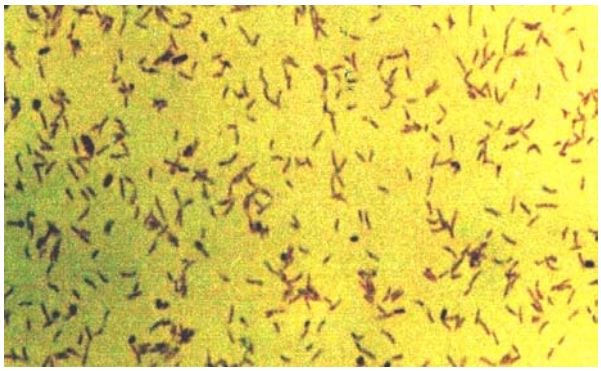
اساس روش جدید ارایه شده بر مبنای فرایند Seaboard استوار است با این تفاوت که به جای مرحله کاهش محلول به‌وسیله‌ی هوا از یک راکتور بافلدار بی هوازی استفاده می‌کنیم (شکل ۲). واکنش‌های صورت گرفته شده دربرج جذب عبارتند از:

$$Na_2CO_3 + H_2S \Leftrightarrow NaHCO_3 + NaHS \qquad (۱)$$

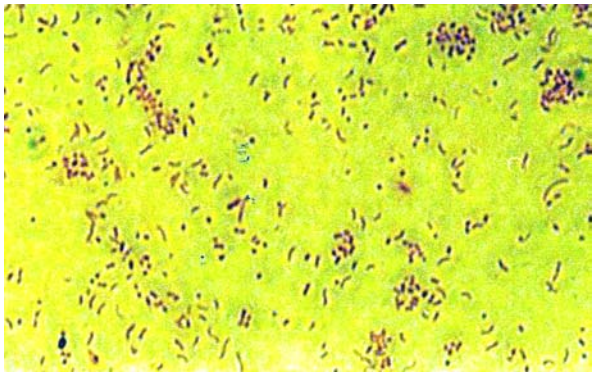
$$Na_2CO_3 + CO_2 + H_2O \Leftrightarrow 2NaHCO_3 \qquad (۲)$$

برای سادگی کار با داشتن اطلاعات مربوط به برج جذب [۱۳و۱۴] محلولی محتوی، $NaHCO_3$ $10 gl^{-1}$ و $178\ mg\ S^{-2}l^{-1}$ (برای ایجاد این غلظت سولفید از $Na_2S.9H_2O$ استفاده شد.) به عنوان ورودی به بیوراکتور در نظر گرفته شد. افزون بر این برای تامین احتیاجات غذایی میکروارگانیسم‌ها از جمله فسفر و نیتروژن از KH_2PO_4 و NH_4Cl استفاده شد که مقدار آنها در جدول ۱ ذکر شده است. لازم به توضیح است که نیترات نقش انتقال دهنده‌ی الکترون را در واکنش‌های بیولوژیکی بی‌هوازی داراست.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل۳ـ باکتری‌های کف راکتور.



شکل٤ـ باکتری‌های سطح راکتور.

همچنین خوراک ورودی روزانه تهیه و به صورت پیوسته به سیستم تزریق شد.

نتیجه‌ها و بحث

میزان حذف سولفید

در تمام مدت آزمایش که ۱۵روز طول کشید میزان حذف سولفید ۱۰۰ درصد بود. ابتدا راکتور با زمان اقامت هیدرولیکی ۵۰ ساعت راه اندازی شد و پس از ۵ روز برای بررسی اثر شوک هیدرولیکی زمان اقامت به ۲۸ ساعت و سپس ۹ ساعت کاهش یافت که در نتیجه شوک‌های ورودی نیز تغییری در میزان حذف ایجاد نکرد. فراورده‌های تولیدی شامل گوگرد و سولفات بودند که با افزایش بار سولفید ورودی، میزان تولید گوگرد نیز افزایش می‌یافت به طوری که در بار $0/62\ mmol\ S^{-2}l^{-1}h^{-1}$ بیشتر از ۶۱ درصد فراورده‌ی تولیدی گوگرد بود. حداکثر میزان حذف سولفید نیز $3/03\ mmol\ S^{-2}l^{-1}h^{-1}$مشاهده شد [۱۱]. در این حالت به تقریب تمام سولفید ورودی در خانه اول حذف می‌شد که نشان‌دهنده پایین بودن بار سولفید ورودی و امکان رسیدن به مقدارهای بالاتر برای حذف سولفید است.

واکنش‌های بیولوژیکی حذف سولفید توسط تیوباسیلوس‌ها در شرایط بی‌هوازی در معادله‌های (۳) و (۴) آورده شده است[۱۵].

$$5H_2S + 2NO_3^- \rightarrow 5S^\circ + N_2 + 2OH^- + 4H_2O \qquad (3)$$

$$5H_2S + 8NO_3^- + 2OH^- \rightarrow 5SO_4^{-2} + 4N_2 + 6H_2O \qquad (4)$$

شناسایی میکروارگانیسم‌ها

برای شناسایی باکتری های موجود نمونه هایی از سطح وکف راکتور تهیه شد. ابتدا نمونه ها به صورت زنده در زیر میکروسکوپ مورد مطالعه قرار گرفته، سپس برای تشخیص نوع گرم، مورد رنگ آمیزی قرار گرفتند و در نهایت از آنها عکس‌برداری شد. شکل ۳ مربوط به باکتری‌های کف راکتور است که مشخصات آنها به قرار زیر بود:

۱- همگی گرم منفی بودند

۲- باسیل‌های کوتاه متحرک وغیر متحرک

۳- وجود گرانول‌های گوگرد در اطراف آنها

۴- نیمه شفاف بوده وتعدادی از آنها تشکیل زنجیره داده بودند

با توجه به قابلیت اکسید کنندگی سولفید و طبیعت اتوتروف آنها این باکتری‌ها در گروه *Thiobacilli* قرار می‌گیرند [۱۶].

سطح راکتور شامل دوگروه عمده از باکتری‌ها بود، افزون بر باسیل‌های توضیح داده شده که جمعیت اصلی باکتری‌ها را تشکیل می‌دادند سلول‌های کوکسی و دایره‌ای شکل نیز دیده شدند (شکل ۴) که دارای نقاط زرد رنگی در داخل خود بوده و با تغییر تنظیم میکروسکوپ رنگ آنها به قرمز تغییر می‌کرد. این باکتری‌ها گرم منفی بوده و با توجه به توانایی مصرف سولفید توسط آنها جزء باکتری‌های گوگردی بی‌رنگ که دارای گوگرد درون سلولی هستند طبقه بندی می شوند [۱۷].

pH مناسب برای فعالیت باکتری‌های گونه تیوباسیلی در محدوده ۶/۵ تا ۹ بوده و دمای مناسب نیز ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مخلوط باکتری‌هایی مورد استفاده در این روش دارای هیچ کدام از معایب ذکر شده برای سایر میکروارگانیسم ها نمی باشد زیرا:

- با توجه به pH مناسب برای فعالیت آنها (۶/۵ تا ۹) مشکلات مربوط به خوردگی از بین می‌رود.
- ضمن عدم نیاز به هوادهی به خاطر طبیعت بی‌هوازی آنها،

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱ـ ترکیب و غلظت ماده غذایی ورودی به بیوراکتور.

ماده	غلظت(mg/l)
KNO_3	۲۵۰
Dextrose	۲۵۰
KH_2PO_4	۱۰۵
NH_4Cl	۲۱
$MgSO_4.7H_2O$	۶/۹
$Na_2HPO_4.12H_2O$	۱۵۰

جدول ۲ـ غلظت‌های انتخابی برای بهینه‌سازی مواد.

	$NaHCO_3$ (gl^{-1})	KNO_3 (gl^{-1})	$Na_2HPO_4.12H_2O$ (gl^{-1})	دکستروز (gl^{-1})
حالت۱	۱	۲	۱	۳
حالت۲	۱۰	۴	۶	۶
حالت۳	۲۰	۶	۱۲	۹

جدول ۳ـ نتیجه‌های حاصل از تجزیه‌ی ارلن‌ها.

شماره آزمایش / پارامتر	درصد حذف سولفید	درصد گوگرد در فراورده‌های تولید شده	درصد سولفات در فراورده‌های تولید شده
۱	۸۰/۴	۴۵/۵	۵۴/۵
۲	۱۰۰	۷۱/۵	۲۸/۵
۳	۱۳/۶	۰	۱۰۰
۴	۲۳	۷/۸	۹۲/۲
۵	۱۰۰	۸۲/۸	۱۷/۲
۶	۱۰۰	۷۷/۸	۲۲/۲
۷	۴۳/۳	۶۱/۲	۳۸/۸
۸	۲۷/۱	۲۵	۷۵
۹	۲۴	۰	۱۰۰

جدول ٤ـ مقدار بهینه مواد مورد آزمایش بر اساس روش تاگوچی.

ترکیب	$NaHCO_3$ (gl^{-1})	KNO_3 (gl^{-1})	$Na_2HPO_4.12H_2O$ (gl^{-1})	دکستروز (gl^{-1})
مقدار بهینه	۱۰	۴	۱	۶

شیمیو اتوتروف بوده و در نتیجه برای رشد و نمو احتیاج به انرژی نورانی ندارند.

ـ سرعت حذف سولفید در آنها بالاست.

ـ تهیه آنها برای مقیاس صنعتی کاملا توجیه پذیر و اقتصادی است زیرا از واحد لجن فعال تصفیه فاضلاب شهری به‌دست آمده‌اند.

بررسی اثر غلظت $NaHCO_3$، KNO_3، $Na_2HPO_4.12H_2O$ و دکستروز بر میزان حذف سولفید و گوگرد تولیدی

فراورده‌های تولیدی در فرایند سولفورزدایی بیولوژیکی شامل گوگرد وسولفات است اما تولید گوگرد به دلیل‌های زیر مناسب‌تر است:

۱- گوگرد در آب نامحلول بوده ودر نتیجه جداسازی آن به سادگی صورت می پذیرد.

۲- با بازیافت و خالص سازی گوگرد از آن می توان به عنوان ماده اولیه در تهیه مواد دیگر استفاده کرد.

۳- از لحاظ نظری تولید یک مول سولفات احتیاج به دو مول اکسیژن دارد، درحالی که برای تولید یک مول گوگرد نیاز به نیم مول اکسیژن می باشد.

بنابراین، در بهینه‌سازی غلظت مواد ذکر شده افزون‌بر حذف سولفید، میزان گوگرد تولید شده نیز به عنوان یک هدف در نظرگرفته شد. برای رسیدن به این منظور از روش تاگوچی و آرایه L_9 استفاده شد [۱۸]. برای مواد ذکر شده سه غلظت انتخابی در نظر گرفته شد که در جدول ۲ آمده است.

در حالت عادی با داشتن چهار متغیر و سه حالت باید $3^4=81$ آزمایش انجام داد تا بتوان بهینه مواد بالا را تعیین کرد، ولی در روش تاگوچی با ۹ آزمایش می توان به این هدف رسید. به همین دلیل ۹ ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتر حاوی ترکیب‌های بالا بر اساس آرایه L_9 روش تاگوچی در نظر گرفته شد. ارلن‌ها به مدت ۶۸ ساعت با pH اولیه ۸/۵ در دمای ۳۱ درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شدند. برای حفظ شرایط بی هوازی درب ارلن‌ها به‌وسیله پنبه، پارافیلم و فویل بسته شد. پس از این مدت ارلن‌ها از لحاظ مقدار سولفید باقی‌مانده، سولفات و گوگرد تولید شده مورد آزمایش قرار گرفتند که نتیجه‌های آن در جدول ۳ آمده است.

پس از انجام محاسبه‌های لازم که در مرجع [۱۸] به‌طور کامل شرح داده شده است مقدارهای بهینه این مواد به صورت

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۴ تعیین شدند.لازم به ذکر است که مقدار بهینه برای حذف سولفید و تولید گوگرد یکسان بودند.

افزایش غلظت دکستروز تا میزان $6\ gl^{-1}$ باعث افزایش سرعت حذف سولفید ومیزان گوگرد تولیدی می شود. از آن جا که دکستروز منبع کربن آلی است این امر می تواند به خاطر افزایش فعالیت باکتری‌های هتروتروف اختیاری و یا اجباری باشد. نیترات نیز افزون بر این‌که نقش پذیرنده‌ی الکترون را در واکنش‌ها دارد از فعالیت باکتری‌های کاهنده سولفات (SRB) که باعث تولید سولفید می‌گردند جلوگیری می‌کند [۱۹]. $NaHCO_3$ نیز به عنوان منبع کربن باکتری‌های اتوتروف عمل می کند.

برای بررسی عملی نتیجه‌های حاصل، آزمایش با یک ارلن و شرایط بهینه به‌دست آمده تکرار شد که در نتیجه پس از گذشت ۵۵ ساعت میزان حذف سولفید ۱۰۰ درصد شد. در این حالت بیش از ۹۹/۵ درصد از فراورده‌ی تولید شده گوگرد بود.

نتیجه‌گیری نهایی

روش ذکر شده در این مقاله دارای پتانسیل فراوانی برای تبدیل شدن به یک طرح صنعتی برای شیرین سازی گاز طبیعی به طریقه بیولوژیکی است زیرا:

۱- از یک فرایند دو مرحله ای برای حذف H_2S استفاده می‌شود (مرحله اول شامل جذب H_2S و مرحله دوم شامل تولید بیولوژیکی گوگرد). فرایندهای یک مرحله ای یا تماس مستقیم گاز با باکتری دارای معایبی از جمله محدودیت انتقال جرم، مشکل تامین اکسیژن باکتری‌های هوازی و کاهش عملکرد بهینه میکروارگانیسم ها دراثر افزایش فشارمی باشند.

۲- با استفاده از راکتور بافلدار بی‌هوازی، مشکل شستشوی باکتری‌ها از سیستم حل می‌شود.

۳- تهیه میکروارگانیسم مورد نظر به آسانی و با هزینه کم صورت می گیرد.

۴- میزان سولفید حذف شده به ازای واحد زمان وحجم راکتور بالاست.

۵- زمان راه اندازی اولیه سیستم بسیار کوتاه است.

۶- معایب فرایند Seaboard از بین می رود.

۷- عدم نیاز به هوادهی، انرژی تابشی و pH پایین باعث کاهش هزینه ها می شود.

۸- مقاومت این سیستم در برابر شوک‌های وارده بسیار بالاست.

۹- گوگرد تولیدی در شرایط بهینه بیش از ۹۹/۵ درصد از فراورده‌ها را تشکیل می‌داد که با بازیافت وفروش آن می توان قسمتی از هزینه ها را جبران کرد.

از جمله معایب این روش می‌توان به افزایش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نسبت به فرایندهای یک مرحله‌ای و تشکیل رسوب کربنات در برج جذب برای گازهای با غلظت بالای کربن دی اکسید اشاره کرد.

تاریخ دریافت: ۸۳/۳/۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۴/۵/۳

مراجع

[1] Devai, I. and Delunce, R., Emission of reduced malodorous sulfur gases from wastewater treatment plants, *Water Environment Research,* **71**, p. 203 (1999).

[2] Jensen, A. B. and Webb, C., Treatment of H_2S-containing gases: A review of microbiological alternatives, *Enzyme and Microbial Technology*, **17**, p. 2 (1995).

[3] Satoh, H., Yoshizawa, J., and Kametani, S., Bacteria help desulfurize gas, *Hydrocarbon processing*, p.76-D (1988).

[4] Hoksberg, A., Biological process for H_2S removal from gas streams the Shell-Paques/THIOPAQ^{TM} gas desulfurisation process, LRGCC 2003 conference proceedings, Laurance reid gas conditioning conference, pp. 1-17, (2003).

[۵] نوحی، اشرف السادات؛ ستاره، محمد؛ "تیوباسیلوس فرواکسیدا نس عامل بالقوه خوردگی بیولوژیک در صنایع"، چهارمین کنگره ملی خوردگی، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ص‌ص ۱۴۵-۱۳۱، (۱۳۷۴).

Archive of SID
www.SID.ir

[6] Pfennig, N., "The Photosynthetic Bacteria", Clayton, R. K. and Sistrom, W. R., Eds. Plenum,New York, (1978).

[7] Janssen, A. J. H., Sleyster, R., Van der kaa, C., Jochemsen, A., Bontsema, J. and Lettinga, G., Biological sulfide oxidation in a fed-batch reactor, *Biotechnology and Bioengineering*, **47**, p. 327 (1995).

[8] Sublette, K.L. and Sylvester, N.D., Oxidation of hydrogen sulfide by *Thiobacillus denitrificans*: desulfurization of natural gas, *Biotechnology and Bioengineering*, p. 249 (1987).

[9] Fidler, B. R., and Sublette, K. L., A novel approach to hydrogen sulfide removal from natural gas, *Society of Petroleum Engineers (SPE)*, No. 81203, (2003).

[10] Gadre, R. V., Removal of hydrogen sulfide from biogas by chemoautotrophic fixed-film bioreactor, *Biotechnology and Bioengineering*, **34**, p. 410 (1989).

[11] Amirfakhri, J., Vossoughi, M. and Soltanieh, M., Assessment of desulfurization of natural gas by chemoautotrophic bacteria in an Anaerobic Baffled Reactor (ABR), *Chemical Engineering and Processing*, **45**, p. 232 (2006).

[۱۲] امیرفخری، جواد؛ شایگان، جلال‌الدین؛ "بررسی ویژگی‌های راکتور بافلدار بی‌هوازی (ABR) در تصفیه پساب‌های صنعتی و شهری"، مجله آب و فاضلاب، شماره ۵، (تابستان ۱۳۸۳).

[13] Kohl, A. L. and Riesenfelo, F. C., "*Gas Purification*", Campbell Petroleum Series, U.S.A, (1985).

[14] Maddox, R. N. and Sheerar, L. F., "Gas conditioning and processing", Gulf Publishing Company, U.S.A, (1985).

[۱۵] سلیمی، فهیمه؛ یغمایی، سهیلا ؛" مروری بر فرایندهای بیولوژیکی تصفیه گاز طبیعی و بازیافت گوگرد" نهمین کنگره مهندسی شیمی ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت، (۱۳۸۳).

[16] Harrison, A. P., Jr., The acidophilic *Thiobacilli* and other acidophilic bacteria that share their habitat, *Annual review of microbiology*, **38**, p. 265 (1984).

[17] Staley, J. T., Bryant, M. P., Pfennig, N., Holt, J. G., "BERGEY'S MANUAL OF Systematic Bacteriology", Williams & Wilkins Company, U.S.A., **3**, p. 1834 (1984).

[18] Ross, P. J., "Taguchi Techniques for Quality Engineering", McGraw-Hill, Singapore, (1996).

[19] McInerney M. J, Han, S.O., Maudgalya, S., Moutakki, H., Folmsbee, M., Knapp, R., Nagle, D., Jackson, B.E., Staudt, M. and Frye, W., "Development of more effective biosurfactant for enhanced oil recovery", University of Oklahoma, (2003).

Archive of SID

www.SID.ir