چکیده

بیوگاز یک منبع انرژی پایدار است که از هضم بی هوازی پسماندهای آلی تولید می شود. بیوگاز خام را می توان برای سوزاندن در کوره یا تولید برق مصرف کرد، ولی از آنجا که محتوای انرژی بیوگاز با غلظت متان نسبت مستقیم دارد، لذا برای تزریق به شبکه گاز یا مصرف به عنوان سوخت خودرو باید بیوگاز را بهبود داد و دی اکسید کربن و سایر نا خالصی ها را حذف کرد. در این مقاله یک فرآیند برای بهبود بیوگاز براساس فشرده‌سازی بخار کم فشار ارائه شده است که همراه با انبساط حلال تمیز خروجی از ریبویلر برج بازیابی حلال و ارسال بخار گرم متراکم به ریبویلر بهینه‌سازی گردیده است. دو حالت متداول و بهینه توسط نرم‌افزار اسپن هایسیس و بر اساس حلال های آمین خالص و آمین فعال شده شبیه‌سازی شده است. نتایج بدست آمده حاکی از افزایش بازیابی مقدار دی اکسید کربن و همچنین کاهش بارحرارتی ریبویلر برج دفع به مقدار $\frac{GJ}{t_{CO۲}}$ ۳/۶۲ بود که در مقایسه با فرآیند مبنا ۲۸/۷۴ درصدکاهش داشته است و همچنین کاهش دیوتی پمپ به kj/h ۳۴۶ برای محلول مونواتانول آمین-پیرازین بوده است. برآوردهای اقتصادی انجام شده نشان داد حلال MEA از لحاظ صرفه جویی در هزینه به عنوان حلال مناسب برای فرآیند بیوگاز می باشد ولی از لحاظ عملکردی و تاثیر بر پارامترهای انرژی فعال کننده پیرازین در ترکیب با دیگر حلال‌ها تأثیر بسیار زیادی در کاهش شدت انرژی بازیابی حلال داشته است.

کلمات کلیدی: بیوگاز، شبیه‌سازی، بیومتان، محیط زیست، مونواتیلن آمین

۱-مقدمه

انتشار گاز دی‌اکسید کربن و تشخیص این پدیده که اخیراً به افزایش دمای جهانی منجر شده است و همچنان در سراسر جهان یک مشکل بوده، حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین، طیف گسترده‌ای از استراتژی‌های جدید برای کاهش انتشار دی اکسید کربن با جذب و تزریق دی‌اکسیدکربن ارتقاء می‌یابد. از نظر تئوری، جذب و ذخیره‌سازی دی-اکسیدکربن به عنوان روش مؤثر در ادامه استفاده از سوخت‌های فسیلی ضمن کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در هوا در نظر گرفته شده است[۱]. استفاده از سوخت‌های فسیلی در بخش حمل و نقل غالب بوده است، اگرچه منابع انرژی تجدیدپذیر در بازار انرژی معرفی شده‌اند. با توجه به گزارش اخیر شبکه سیاست انرژی تجدیدپذیر قرن بیست و یکم، سهم قابل تجدید انرژی جهانی در سال ۲۰۱۶ به ۲۰/۵ درصد افزایش یافت. با این حال، نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش‌های مختلف مشابه نیست؛ به عنوان مثال؛ استفاده از انرژی در بخش حمل و نقل، شامل ۳۲ درصد کل مصرف انرژی در جهان است، که از بین آن انرژی‌های تجدیدپذیر مانند سوخت‌های زیستی و برق تجدیدپذیر تنها ۳/۱ درصد را شامل می‌شود [۲].

بررسی روند تغییرات کمیت و کیفیت آلاینده‌های هوا نشان می‌دهد که آلاینده‌های حاصل از فعالیت‌های انسان این مسئله را چنان می‌تواند تشدید کند که ادامه زندگی برای خود انسان و سایر موجودات غیرممکن شود. بخش‌های مختلف سهم متفاوتی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند و با توجه به روند رو به رشد تولید و انتشار این گازهای خطرناک و تهدید حیات زیستی کره زمین، اهمیت پرداختن به این موضوع را می‌رساند[۳و۴]. در طی دهه‌های اخیر غلظت جهانی دی‌اکسید کربن در اتمسفر به سرعت رو به افزایش بوده و این روند نیز ادامه دارد. انتشار دی-اکسید کربن بر غلظت دی‌اکسید کربن در اتمسفر و تغییرات آب و هوایی سهم به سزایی دارد. استراتژی‌های مرتبط با کاهش انتشار دی‌اکسید کربن نظیر جذب و ذخیره‌سازی کربن، پتانسیل بالایی برای مقابله با این روند را داراست. بیوگاز یک مخلوط گازی تولید شده توسط هضم هوازی یا بی‌هوازی زیست توده است، که اساساً از متان و دی-اکسید کربن تشکیل شده است. به این دلیل بیوگاز به طور قابل توجهی در اثرات گلخانه‌ای سهیم بوده و کاربرد آن می‌تواند منجر به کاهش ردپای کربن و کاهش گازهای گلخانه‌ای گردد[۵و۶].

جذب دی‌اکسید کربن از ارتقاء بیوگاز می‌تواند به عنوان جذب پیش از احتراق دسته‌بندی شوند. فن‌آوری‌های مختلف برای جذب دی‌اکسید کربن پیش از احتراق در گذشته ما مورد بررسی قرار گرفته‌اند. طبق این نتیجه‌گیری، با در نظر گرفتن خلوص دی‌اکسید کربن، نسبت جذب دی‌اکسید کربن و راندمان، جذب شیمیایی آمین‌ها مناسب‌ترین فن‌آوری است[۷ و۸]. با این حال، از آنجا که بیوگاز خام عمدتاً شامل متان (۶۵ درصد حجمی) و دی‌اکسید کربن (۳۵ درصد حجمی) است، یک فرآیند ارتقاء به طور معمول برای حذف دی‌اکسید کربن و سایر ناخالصی‌های ناخواسته قبل از آن که بتواند به عنوان سوخت وسیله نقلیه مورد استفاده قرار گیرد، مورد نیاز است. اگر دی‌اکسید کربن از بیوگاز خام حذف و ذخیره‌سازی شود، انتشار دی‌اکسید کربن منفی می‌تواند به راحتی با هزینه کم تشخیص داده شود، چون دی‌اکسید کربن محصول جانبی ارتقاء است. به خاطر رشد سریع بیوگاز، پتانسیل زیادی برای جذب دی‌اکسید کربن وجود دارد[۹].

بیومتان یک جانشین گاز طبیعی است که می‌تواند از خالص‌سازی بیوگاز ناشی شود. بیوگاز یک ترکیب گازی متشکل از متان، دی‌اکسید کربن و سایر ناخالصی‌ها است که از هضم بی‌هوازی ترکیبات آلی تولید می‌شود. بیومتان به عنوان یک حامل انرژی امیدبخش محسوب می‌شود، چرا که به نگرانی‌های زیست محیطی مربوط به افزایش انتشار دی‌اکسید کربن در اتمسفر توجه داشته؛ یک جایگزین برای گاز طبیعی فسیلی با منبع انرژی تجدیدپذیر به شمار می‌رود و به ایجاد تنوع در زنجیره تأمین انرژی می‌پردازد [۱۰]. نیاز انرژی برای جذب شیمیایی شامل کار برای فشرده‌سازی بیوگاز و گرما در دمای بالا در محدوده ۱۰۰ تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد برای احیاء آمین در یک ستون دفع است. لازم به ذکر است که نوع آمین، تأثیر زیادی بر کاربرد انرژی در جذب شیمیایی دارد. به عنوان مثال، بیوگاز ارتقاء یافته با استفاده از منواتانول آمین نسبت به دی‌اتانول آمین به گرمای بیشتری نیاز دارد تا آمین را در ستون دفع احیا کند. با این حال، در حالی که فشار عملیاتی در محدوده ۸۰۰-۳۰۰ کیلوپاسکال هنگام استفاده از مونواتانول آمین است، محدوده فشار ۷۰۰۰-۴۵۰۰ کیلوپاسکال برای حلال متیل دی‌اتانول آمین، بسته به نیاز به تصفیه، مورد نیاز است [۱۱و۱۲]. این به این معنی است که مقدار کمتری از کار برای فشرده‌سازی بیوگاز

قبل از ستون جاذب با مونواتانول آمین نسبت به متیل دی‌اتانول آمین مورد نیاز است. وو[۱] و همکاران [۱۳] جذب شیمیایی را با مونواتانول آمین برای ارتقاء بیوگاز ارزیابی کردند. آن‌ها ثابت کردند که حدود ۲/۵kWh/m^{۳} از بیومتان به شکل برق و بخار برای بدست آوردن بیومتان با خلوص ۹۶ درصد مولی متان مورد نیاز است.

بیشتر تحقیقات مربوط به جذب شیمیایی بر چگونگی کاهش بار گرمایی در ریبویلر متمرکز است. به عنوان مثال، نجات[۲] و همکاران [۱۵] نشان دادند هنگامی که متیل دی‌اتانول آمین با مخلوطی از متیل دی‌اتانول آمین و سولفولان جایگزین شود، دیوتی گرمایی ریبویلر به میزان تقریبا ۴۷ درصد کاهش می‌یابد. در یک مطالعه دیگر، پلگرینی[۳] و همکاران [۱۶] نیاز انرژی برای تولید بیومتان مایع از یک مخلوط بیوگاز با ۶۰ درصد مولی متان و ۴۰ درصد مولی دی‌اکسید کربن را بررسی کردند. آن‌ها جذب مونواتانول آمین را به عنوان روش ارتقاء به منظور رسیدن به الزامات خلوص بیومتان مایع مورد ارزیابی قرار دادند و یک دیوتی تبرید خارجی برای مایع‌سازی را در نظر گرفتند. آن‌ها دریافتند که حدود ۲۹ درصد از متان موجود در جریان بیوگاز خام در صورتی که این فرآیند باید با کار و گرما و با در نظر گرفتن فرآیندهای مهندسی مرسوم مورد استفاده قرار گیرد، مصرف خواهد شد. نتایج نشان داد که ارتقاء بیوگاز شامل ۵۷/۴ درصد از کل نیاز انرژی است. دفع دی‌اکسید کربن از طریق جذب شیمیایی یک واکنش گرماده است که منجر به افزایش دمای بیومتانی می‌شود که ستون را ترک می‌کند. این امر در تضاد با دیوتی خنک کننده برای فرآیند مایع‌سازی بعدی است. بنابراین، یک مدل شبیه‌سازی جامع شامل هم ارتقا مبتنی بر جذب و هم مایع‌سازی در تعیین مصرف واقعی انرژی و بهبود انرژی پتانسیل کمک می‌کند. علاوه بر روش‌های ارتقاء فوق‌الذکر، جداسازی برودتی در ستون‌های تقطیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در جداسازی برودتی، تفاوت در نقطه جوش برای اجزای مختلف گاز به منظور جداسازی اجزاء مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷]. به دست آوردن مقادیر بالای متان و میزان بازیافت دی‌اکسید کربن به عنوان مزایای این تکنولوژی به شمار می‌آید. علاوه بر این، جداسازی برودتی نیاز خنک کنندگی در تولید بیومتان مایع را کاهش می‌دهد، چون ارتقاء بیوگاز در دمای پایین‌تر رخ می‌دهد. یوسف و همکاران [۱۸] یک ستون تقطیر یک مرحله‌ای را برای یک مخلوط بیوگاز با ۶۰

۱ - Vo et al
۲ - Nejat et al
۳ - Pellegrini et al

درصد مولی متان و ۴۰ درصد مولی دی‌اکسید کربن ساختند که بیومتان خالص با ۹۴/۵ درصد مولی متان و یک جریان دی اکسید کربن با خلوص ۹۹/۷ درصد مولی به صورت محصول بدست آورد. در یک مطالعه موفق دیگر یوسف و همکاران [۱۹]، دو ستون تقطیر را در بالا و زیر فشار بحرانی متان خالص به ترتیب به منظور ارتقا بیوگاز تا ۹۷ درصد مولی متان بکار گرفتند. هنگامی که بازیافت حرارت در طراحی فرآیند در نظر گرفته شد، نیاز انرژی ویژه به ۰/۲۵ kWh/Nm^3 از بیوگاز خام برای تولید دی‌اکسید کربن مایع با خلوص ۹۹/۷ درصد مولی در ۱۱۰ بار و بیومتان با خلوص ۹۷/۱ درصد مولی متان در ۵ بار کاهش یافت. لانگ[۴] و همکاران [۲۰] ستون‌های تقطیر فشار دوگانه را با یک ستون در فشار عملیاتی بالا به عنوان یک بخش دفع بدون کندانسور و یک ستون در فشار عملیاتی پایین به عنوان بخش غنی‌سازی بدون ریبویلر پیشنهاد کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از فن‌آوری‌های جداسازی دما پایین سودمند است، در حالی که غلظت دی‌اکسید کربن در گاز خوراک بالا بوده است.

در این تحقیق، برای اولین بار، به منظور تصفیه بیوگاز از چند حلال شیمیایی استفاده شد و عملکرد آن ها از لحاظ فرآیندی و اقتصادی مورد مقایسه قرار گرفته است. به علاوه ارتقای فرآیند بیوگاز با روش جذب شیمیایی براساس حلال مونواتانول آمین در دو حالت متداول و بهینه با استفاده از نرم‌افزار اسپن هایسیس شبیه‌سازی و بررسی شد. همچنین به منظور مقایسه عملکرد حلال‌های آلکانول آمین بکار رفته در فرآیند با هم مقایسه شد. همچنین آنالیز اقتصادی به منظور بررسی هزینه های عملکردی و تاثیر حلال های مصرفی بر میزان مصرف انرژی بررسی شد.

۲-اساس شبیه‌سازی و بسته ترمودینامیکی

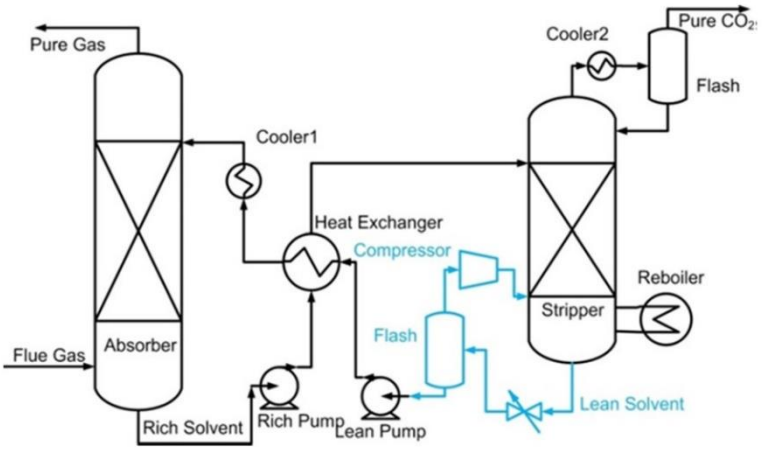
شبیه‌سازی فرآیندها در واقع اعمال معادلات موازنه جرم و انرژی به همراه شرایط تعادل فازها در یک سیستم است که معمولاً جهت سهولت کار به حالت پایای سیستم بسنده می‌شود. موارد کاربرد شبیه‌سازها در بررسی عملکرد، رفع تنگناها و مشکلات فرآیندی، ایجاد تغییرات در شرایط عملیاتی و پیش‌بینی نتایج حاصل از آن می‌باشد. شبیه‌سازی هر فرآیندی با استفاده از شبیه‌سازهای تجاری با انتخاب یک سیستم مشخص شروع می‌شود. برای نمونه در شبیه-سازی اسپن هایسیس به صورت پیش فرض سیستم واحدها (احاد و ابعاد)، SI می‌باشد. اغلب شبیه‌سازهای تجاری

٤ - Lange et

به کاربر اجازه ایجاد تغییر در سیستم احاد و ابعاد را می‌دهند. علاوه بر انتخاب سیستم واحدها (انگلیسی، آمریکایی یا SI) تنظیمات پایه شبیه‌سازی نیز بسیار حائز اهمیت است که این امر در شناخت ترکیبات شیمیایی موجود در فرآیند و همچنین انتخاب یک بسته ترمودینامیکی دقیق برای محاسبات فیزیکی-ترمودینامیکی کاربرد پیدا می-نماید. فهم واکنش‌های فرآیند، نوع آن‌ها، ضرایب استوکیومتری و اطلاعات کنتیکی همگی از موارد بسیار مهم در تکمیل یک فلوشیت در محیط شبیه‌سازی هستند. در نسخه‌های پیشین اسپن هایسیس از معادله ترمودینامیکی "بسته آمین" استفاده شده است، در حالی که در نسخه‌های جدید این نرم‌افزار بسته ترمودینامیکی پیشرفته "گاز اسیدی" ارائه شده است که دارای دقت بالایی است و توسط دیگر محققین توصیه شده است. بنابراین در این کار شبیه‌سازی، جهت مدل‌سازی فرآیند ارتقای بیوگاز از نرم‌افزار اسپن هایسیس و بسته سیالاتی قدرتمند گاز اسیدی استفاده شده است. بسته سیالاتی گاز اسیدی برخلاف ورژن قدیمی بسته آمین دارای تغییرات وسیعی است. در نسخه بسته گاز اسیدی کاربر قادر است تا علاوه بر حلال‌های آمین به صورت تکی از مخلوط آمین‌ها نیز استفاده نماید. در بسته سیالاتی گاز اسیدی واکنش‌های شیمیایی برای هم حلال و مخلوط آمین‌ها با گازهای اسیدی و حتی مرکاپتان‌ها با ذکر پارامترهای کنتیکی و ثوابت تعادل به صورت خودکار تعبیه شده است. همچنین این واکنش‌های شیمیایی در کنار ضرایب دوتایی تجربی باعث شده تا بسته ترمودینامیکی گاز اسیدی به یک معادله قوی برای شبیه‌سازی واحدهای تصفیه گاز تبدیل گردد. لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر جهت مدل‌سازی فرایند بهبود بیوگاز از نرم‌افزار اسپن هایسیس ۱۰.۱ و مدل ترمودینامیکی قدرتمند گاز اسیدی استفاده شده است.

۳- ساختار بهینه برای ارتقای بیوگاز

فرآیند فشرده‌سازی بخار ضعیف یک ساختار انتگراسیون شده پیشرفته است که توسط طیف وسیعی از محققین برای بهینه‌سازی جذب دی‌اکسید کربن توصیه شده است [۲۰-۲۳]. ارتقای بیوگاز و جذب پس از احتراق دی‌اکسید کربن تشابهات بسیار زیادی بهم دارند؛ لذا می‌توان به دلیل وجود این تشابهات از ساختار بهینه فشرده‌سازی بخار ضعیف برای هر دو منظور استفاده نمود. فشار پایین جاذب و خوراک، بالا بودن غلظت دی‌اکسید کربن در خوراک ورودی، بالا بودن نرخ انرژی مصرف شده از تشابهات هر دو سیستم می باشند.



شکل۱- شماتیک فرآیند بهینه [۲۳]

تفاوت ساختار بهینه با شکل متداول جذب دی‌اکسید کربن در تغییراتی است که در بخش دفع و بازیابی حلال رخ داده است. در فرآیند بهینه شکل (۱) مایع خروجی از ریبویلر در دمای بالا ابتدا به وسیله یک شیر کاهنده فلش شده و طی یک جداکننده دو فازی عمودی بخار و مایع حاصل از فلش جداسازی می‌شوند. مایع تفکیکی در سیستم بهینه همان حلال ضعیف است که باید به وسیله یک پمپ فشار از دست رفته را جبران و دوباره در برج جذب استفاده شود در حالی که بخار بالای جداکننده دوباره به وسیله یک کمپرسور تا فشار عملیاتی ریبویلر متراکم شده و با دمای بالاتری دوباره در ریبویلر مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴]. مزیت این روش این است که بخار گرم تامین شده از طریق کمپرسور کمک زیادی به بازیابی بخار در برج دفع نموده و این کار موجب می‌شود تا ریبویلر برج دفع تقاضای کمتری برای بخارسازی داشته باشد که در نهایت منجر به کاهش بار حرارتی ریبویلر و انرژی مصرفی حلال خواهد شد.

۴-انرژی بازیابی حلال

به صورت عمومی هدف از کار شبیه‌سازی به حداقل رساندن انرژی بازیابی (احیاء) حلال براساس رابطه (۱) می‌باشد [۲۶]:

$$\mathbf{E_{regen}}(\frac{\mathbf{GJ}}{\mathbf{t_{CO2}}}) = \frac{\mathbf{\emptyset_{boiler}}}{\mathbf{G_{CO2,capt}}} \quad (۱)$$

جایی که $\emptyset_{boiler}$ بر حسب گیگاژول بر ثانیه، انرژی فراهم شده برای بازیابی حلال در ریبویلر و $G_{CO۲,capt}$ میزان دی‌اکسید کربن تولید شده بر اساس واحد تن در ثانیه از خروجی بالای برج دفع می‌باشد [۲۶]. باید توجه داشت که پارامتر E_{regen} در این مطالعه به عنوان یک شاخص رقابتی است که برای پنج حلال محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته است.

۵-آنالیز انتشار دی‌اکسید کربن

فرآیند ارتقای بیوگاز از نظر زیست محیطی و بخصوص انتشار کلی دی‌اکسید کربن خالص ($n_{CO_{۲,net}}$) باید ارزیابی گردد. بدون شک هر چه مصرف انرژی در یک فرآیند شیمیایی کاهش یابد این مسئله تأثیر زیادی در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن دارد؛ زیرا با کاهش مصرف یوتیلیتی سوخت کمتری برای تولید یوتیلیتی‌های برق و بخار مورد نیاز خواهد بود. در این مطالعه فرض شده است که یوتیلیتی برق و بخار از طریق احتراق سوخت فسیلی تأمین شده است. همچنین چگالنده برج دفع نیز آب خنک کننده را برای سرمایش استفاده نموده است که از این طریق نیز انتشاری متوجه سیستم نخواهد بود.

از طرف دیگر دی‌اکسید کربن تولیدی از طریق ارتقای بیوگاز به مصارفی همچون ازدیاد برداشت نفت خام یا تولید محصولات شیمیایی نظیر اوره یا متانول می‌رسد که در این صورت این جریان نمی‌تواند در محاسبات جزء انتشار مستقیم باشد. بنابراین در این مطالعه انتشار مستقیم فقط از طریق جریان گاز تصفیه و انتشار غیرمستقیم فقط به وسیله پمپ حلال، کمپرسور و ریبویلر برج دفع می‌باشد.

براساس استانداردهای موجود به ازای تولید هر مگاوات ساعت برق معادل با ۵۹۶ کیلوگرم دی‌اکسید کربن و برای تأمین هر میلیون بی‌تی‌یو گرما ۲۰۵/۳ پوند دی‌اکسید کربن منتشر می‌شود [۲۷]. براساس رابطه (۲) [۲۷] انتشار کلی خالص دی‌اکسید کربن عبارتست از مجموع انتشار مستقیم و غیرمستقیم و اختلاف این دو با دی‌اکسید کربن وارد شده توسط منبع بیوگاز. پارامتر انتشار خالص ($n_{CO_{۲,net}}$) می‌تواند منفی باشد که در این صورت بهترین نتیجه

حاصل شده است. در صورت صفر شدن پارامتر انتشار خالص ($n_{CO_{۲,net}}$) دستیابی به انتشار صفر یا همان Zero Emission محقق شده است. پارامتر $n_{CO_{۲,net}}$ به عنوان یک شاخص زیست محیطی برای فرآیند ارتقای بیوگاز براساس حلال مونواتانول آمین مصرفی در این مطالعه محاسبه شده است.

$$n_{CO_{۲,net}} = n_{CO_{۲,direct}} + n_{CO_{۲,indirect}} - n_{CO_{۲,inlet}} \quad (۲)$$

۶- ارزیابی اقتصادی

هدف از ارزیابی اقتصادی فرایند بهبود بیوگاز محاسبه پارامتر هزینه کلی تولید (*TPC*[۵]) هر کیلوگرم از بیومتان می‌باشد که از بین همه پارامترهای رقابتی دارای اهمیت بالاتری است. جهت محاسبه هزینه تولید کلی *TPC* از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$TPC(\frac{USD}{kg}) = \frac{Total\ Annual\ Cost}{Total\ Annual\ Product} \quad (۳)$$

در اینجا TAC هزینه کلی سالانه بوده که به پارامترهای هزینه سرمایه‌گذاری سالانه و هزینه عملیاتی سالانه بستگی داشته و از مجموع این دو پارامتر حاصل شده است (رابطه ۴):

$$\text{Total Annual Cost} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{CRF}} + \text{OPEX}_y \quad (۴)$$

بنابراین هزینه عملیاتی سالانه که از طریق ابزار مالی اسپن هایسیس (APEA[۶]) حاصل شده است و بخش عمده آن را هزینه یوتیلیتی برق و بخار و آب خنک کننده تشکیل داده است. پارامتر CRF[۷] (رابطه ۵) به دو پارامتر *i* و *n* بستگی دارد که به ترتیب نرخ نزولی سود بانکی و عمر اقتصادی پروژه هستند در این پروژه فرض شده است که:

۱- نرخ نزول سود بانکی ۸ درصد است.

۲- عمر اقتصادی طرح تصفیه بیوگاز ۲۵ سال است.

۳- هر سال معادل با ۸۱۵۰ ساعت است.

۵- Total Product Cost
۶- Aspen Process Economic Analyzer
۷- Capital Recovery Factor

$$CRF = \frac{i \times (۱ + i)^n}{(۱ + i)^n - ۱} \quad (۵)$$

$$OPEX_y = Steam\ Cost + Cooling\ Water\ Cost + Electricity\ Cost \quad (۶)$$

هزینه سرمایه‌گذاری ثابت به مجموعه‌ای از هزینه‌های دیگر ارتباط دارد که طبق جدول (۱) براساس هزینه تجهیزات (PEC۸) محاسبه می شوند.

جدول۱. پارامترهای کلیدی برای برآورد اقتصادی [۲۸]

I. *هزینه سرمایه گذاری ثابت* (FCI)	
A. *هزینه مستقیم* (DC)	
A.۱. *هزینه عمده* (ONSC)	
هزینه تجهیزات خریداری شده (PEC)	PEC
خریداری شده-نصب تجهیزات	۹۰٪ PEC
لوله کشی	۷۰٪ PEC
ابزار دقیق و کنترل	۴۰٪ PEC
تجهیزات و مواد الکتریکی	۱۵٪ PEC
A.۲. *هزینه خارج از سایت* (OFSC)	
زمین	۱۰٪ PEC
کارهای عمرانی، سازه ای و معماری	۹۰٪ PEC
امکانات خدماتی	۱۰۰٪ PEC
کل هزینه مستقیم (DC) = (ONSC) + (OFSC)	
B. *هزینه غیر مستقیم* (IC)	
B.۱. *مهندسی و نظارت*	۷۵٪ PEC
B.۲. *هزینه های ساخت و ساز*	۱۵٪ DC

۸ -Purchased Equipment Cost

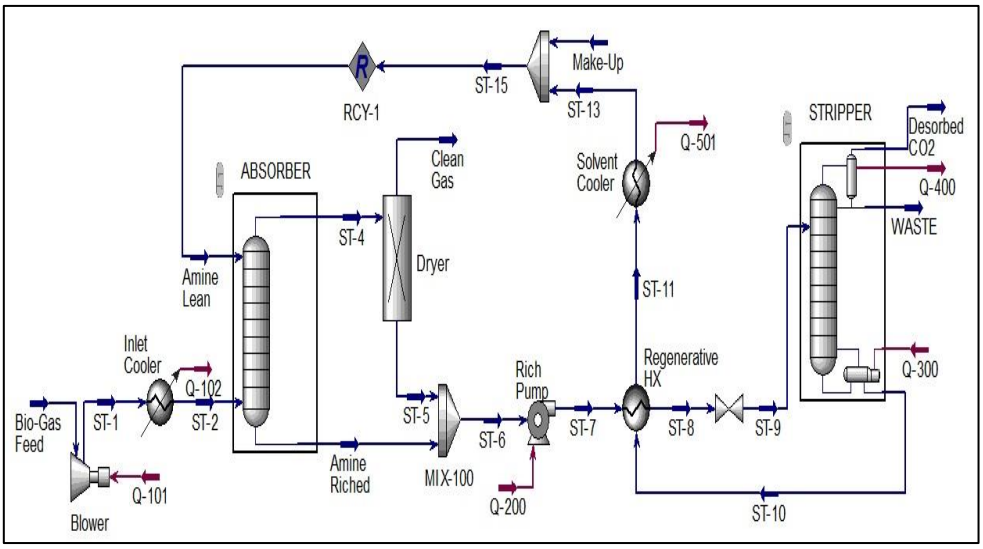
۲۵٪ sum of above	B.۳. *موارد احتمالی*
	(IC) *کل هزینه غیر مستقیم*
	(FCI) = (DC) + (IC) *کل هزینه سرمایه گذاری ثابت*
	II. *سایر هزینه ها*
۱۲٪ FCI	*هزینه های شروع*
۲۰٪ TCI	*سرمایه در گردش*
۱۵٪ FCI	*کمک هزینه برای وجوه مورد استفاده در ساخت و ساز*
	(CAPEX) = (FCI) + (*سایر هزینه ها*) *کل هزینه سرمایه گذاری شده*

به عبارت دیگر هر یک از هزینه‌هایی که در مجموع هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم را تشکیل داده‌اند، بر حسب درصدهایی از هزینه کلی تجهیزات ارائه شده‌اند. کلیه هزینه‌های مربوط به تجهیزات بکار رفته در فرایند تصفیه و بهبود بیوگاز با استفاده از نرم‌افزار اسپن هایسیس بدست آمده‌اند.

۷-شبیه‌سازی فرآیند

۷-۱ شبیه سازی فرآیند بهبود بیوگاز (حالت متداول)

در جداول (۱) و (۲) نتایج مربوط به شبیه‌سازی فرآیند بهبود بیوگاز (متداول) با استفاده از حلال مونواتانول آمین ارائه شده است. طبق نتایج بدست آمده میزان حلال مصرف شده برای تصفیه بیوگاز ۱۴ برابر بیوگاز ورودی است. همچنین درصد بازیابی دی‌اکسید کربن و بیومتان به ترتیب ۹۰ و ۹۹/۹۷ درصد شده است. شکل (۲) شماتیک فرآیند متداول را نشان داده است.



شکل ۲- شماتیک شبیه‌سازی فرآیند بهبود بیوگاز (متداول)

جدول ۱- نتایج موازنه انرژی فرآیند متداول

مقدار	پارامتر
۴/۸۲۲/۰۰۰	نرخ انتقال حرارت در مبدل گرمایی آمین-آمین $(\frac{kJ}{h})$
۵/۵۳۴/۰۰۰	بارحرارتی کولر خنک‌سازی حلال $(\frac{kJ}{h})$
۸/۶۵۳	انرژی مصرفی ریبویلر $(\frac{GJ}{h})$
۲/۸۷۹	بارحرارتی کولر خنک‌سازی حلال $(\frac{GJ}{h})$
۵/۸۴۴	انرژی مصرفی پمپ حلال $(\frac{kJ}{h})$

جدول ۲- نتایج فنی (حلال مونواتانول آمین)

مقدار	موضوع
۱۴	نسبت دبی حلال به بیوگاز $\left(\frac{L}{G}\right)_{Ratio}$
۰/۰۹۹	بارگیری آمین تمیز
۰/۵۰۴۷	بارگیری آمین کثیف

درصد بازیابی دی‌اکسید کربن ($\frac{CO_{۲,capt}}{CO_{۲,in}}$)	۹۰
درصد بازیابی بیومتان ($\frac{CH_{۴,out}}{CH_{۴\ in\ biogas}}$)	۹۹/۹۷
شدت انرژی بازیابی حلال ($\frac{GJ}{t_{CO۲}}$)	۵/۰۸

۷.۲ شبیه سازی حالت بهینه

شماتیک بهینه‌سازی فرآیند انتگراسیون شده ارتقای بیوگاز در شکل (۳) نشان داده شده است. علاوه بر این در جدول‌های (۳) و (۴) نتایج مربوط به شبیه‌سازی ارائه شده است. خوراک ورودی بیوگاز در شرایط عملیاتی محیطی (۲۵ درجه سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر) با دبی استاندارد ۱۰۰ کیلومول بر ساعت (۲۷۶۱ کیلوگرم بر ساعت) با منشأ فرمانتاسیون[۹] ذرت خوشه‌ای می‌باشد که در همه شبیه‌سازی‌ها دبی، ترکیب و شرایط عملیاتی آن یکسان در نظر گرفته شده است تا برای انجام مقایسه شرایط مساعد باشد. در این شبیه‌سازی تعدادی فرضیات لحاظ شده است که در ذیل به آن‌ها اشاره شده است:

۱- تعداد مراحل تعادلی برج جذب ۱۰ و برای برج دفع ۱۱ می‌باشد.

۲- فشار برج دفع ۲۰۰ کیلوپاسکال و افت فشار صفر است.

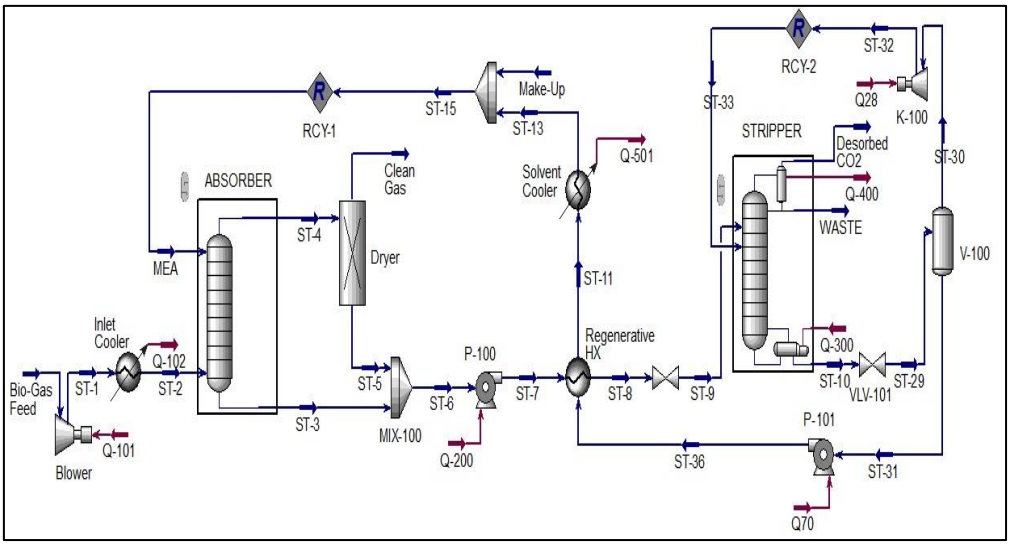
۳- فشار برج جاذب ۱۰۱/۳ کیلوپاسکال و افت فشار صفر است.

۴ -فشار خروجی از پمپ حلال غنی ۲۵۰ کیلوپاسکال است.

۵- اتلاف گرمایی در مبدل‌های حرارتی بسیار ناچیز و قابل صرفه‌نظر کردن است.

۶- مبدل حرارتی آمین-آمین از نوع پوسته-لوله است.

۷- برج‌های جذب و دفع آدیاباتیک هستند.



شکل ۳- شماتیک شبیه‌سازی فرآیند بهبود بیوگاز براساس حلال مونواتانول آمین

جدول ۳- ترکیبات خوراک بیوگاز براساس حلال مونواتانول آمین [۲۹]

ترکیبات	جزء مولی
متان	۰/۵
هیدروژن	۰/۰۵
دی‌اکسید کربن	۰/۴۳
نیتروژن	۰/۰۲

جدول ۴- نتایج موازنه انرژی براساس حلال مونواتانول آمین بهینه

مقدار	پارامتر
۳۶۴۷۰۰۰	نرخ انتقال حرارت در مبدل گرمایی آمین-آمین $(\frac{kj}{h})$
۴۳۰۸۰۰۰	دیوتی کولر خنک‌سازی حلال $(\frac{kj}{h})$
۱۸۳۶۰۰	دیوتی کمپرسور $(\frac{kj}{h})$
۶/۱۸۶	انرژی مصرفی ریبویلر $(\frac{GJ}{h})$
۵۸۴۲	انرژی مصرفی پمپ حلال غنی $(\frac{kj}{h})$
۳۸۸۹	انرژی مصرفی پمپ حلال تمیز $(\frac{kj}{h})$

جدول ۵- نتایج فنی (مونواتانول آمین بهینه)

مقدار	موضوع
۱۴	نسبت دبی حلال به بیوگاز $\left(\frac{L}{G}\right)_{Ratio}$
۰/۰۹۹	بارگیری آمین تمیز
۰/۵۰۴۷	بارگیری آمین کثیف
۹۰	درصد بازیابی دی‌اکسید کربن $(\frac{CO_{۲,capt}}{CO_{۲,in}})$
۹۹/۹۷	درصد بازیابی بیومتان $(\frac{CH_{۴,out}}{CH_{۴\ in\ biogas}})$
۳/۶۲	شدت انرژی بازیابی حلال $(\frac{GJ}{t_{CO_۲}})$

۷.۳ تحلیل و بررسی نتایج شبیه سازی

نتایج به دست آمده برای شبیه سازی فرآیند در دو حالت متداول و بهینه و بر اساس حلال ۳۰ درصد وزنی مونو اتانول آمین حاکی از بازیابی بالای ۹۹ درصد بیومتان برای هر دو فرآیند صورت بوده است. همچنین دبی حلال در گردش با بارگیری ۰/۰۹۹ ، ۱۴ برابر دبی بیوگاز بود. نتایج بدست آمده حاکی از تفاوت عمده در مقدار انرژی بازیابی حلال بود؛ در روش بهینه با ارسال بخار متراکم شده در شرایط عملیاتی ^{o}C ۱۹۰/۴ و فشار kPa ۲۰۰، مصرف انرژی ریبویلر برج دفع به مقدار $\frac{GJ}{t_{CO۲}}$ ۳/۶۲ رسید که در مقایسه با فرآیند مبنا ۲۸/۷۴ درصدکاهش داشته است. استفاده از حلال MEA علی‌رغم اینکه دارای هزینه تولید کمتری است، ولی از مصرف انرژی بالایی برای بازیابی حلال در مقایسه با دیگر گزینه‌ها برخوردار است. ساختار بهینه LVC با هدف کاهش پارامتر شدت انرژی بازیابی حلال MEA در این مقاله مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. با توجه به بررسی انجام شده روش LVC توانسته تا حد زیادی به کاهش مصرف انرژی برای بازیابی حلال MEA کمک نموده و این حلال را از نظر انرژی نیز در جایگاه بسیار مناسبی قرار دهد. نتایج ارائه شده در جدول ۵ حاکی از این هستند که مقدار پارامتر E_{regen} (شدت انرژی بازیابی حلال) برای فرایند بهینه برابر با ۳/۶۲ شده است که در مقایسه با فرایند متداول با حلال MEA یک کاهش ۲۸/۷۴ درصدی را نشان داده است. بنابراین زمانی که از ساختار LVC استفاده می‌شود مصرف انرژی کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. ولی به دلیل استفاده از تجهیزات اضافی نظیر کمپرسور، پمپ و جداکننده، اولاً قیمت تجهیزات، ثانیاً هزینه یوتیلیتی و در آخر هزینه عملیاتی سیستم بیشتر شده و در نهایت هزینه تولید کلی بیومتان نسبت به فرایند متداول MEA افزایش ۱۳/۳۸ درصدی را نشان داده است. تخت روانچی و همکاران در مقاله ای جداسازی دی اکسید کربن در صنعت پتروشیمی با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانهای را بررسی کردند که نتایجی مشابه با این شبیه سازی را بدست آوردند [۳۰].

به منظور شناسایی بیشتر تاثیرات حلال برای بهبود بیوگاز ترکیبی از پیپرازین با مونواتانول آمین-دی اتانول آمین و همچنین حلال پیپرازین -دی‌اتانول آمین به عنوان سیال خوراک استفاده شد و نتایج به دست آمده در جداول ۶ تا۹ لحاظ شد. نتایج حاکی از افزایش درصد بازیابی دی اکسید کربن از ۹۰ به ۹۴/۵۸ درصد بوده است که نشان از میل بالای این حلال برای جذب گاز دی اکسید کربن می باشد. نتایج نشان دادند که در صورت استفاده از این

حلال انرژی مورد نیاز برای دفع هر تن دی‌اکسید کربن در برج دفع برابر با ۳/۹۵ گیگاژول است. همچنین مشاهده شد که بار حرارتی ریبویلر و انرژی مصرفی پمپ نیز نسبت به حالت های قبل کاهش یافته است. این کاهش به طور مستقیم به دبی سیال در گردش مربوط بوده که تاثیر مستقیم بر بخار مصرفی و دیوتی پمپ دارد. به منظور بررسی بیشتراین موضوع نسبت دبی حلال به بیوگاز برای حلال های استفاده شده در نمودار ۱ نشان داده شده است.

جدول ۶- نتایج موازنه انرژی (مونواتانول آمین با پیپرازین)

مقدار	پارامتر
۲۱۴۵۰۰۰	نرخ انتقال حرارت در مبدل گرمایی آمین-آمین $(\frac{kJ}{h})$
۱۳۶۶۰۰۰	بارحرارتی کولر خنک‌سازی حلال $(\frac{kJ}{h})$
۶/۲۹۹	انرژی مصرفی ریبویلر $(\frac{GJ}{h})$
۳۴۶	انرژی مصرفی پمپ حلال $(\frac{kJ}{h})$

جدول ۷- نتایج فنی (مونواتانول آمین با پیپرازین)

مقدار	موضوع
۳/۹	نسبت دبی حلال به بیوگاز $\left(\frac{L}{G}\right)_{Ratio}$
۰/۱۷۳۹	بارگیری آمین تمیز
۰/۶۶۵۸	بارگیری آمین کثیف
۸۸/۸۶	درصد بازیابی دی‌اکسید کربن $(\frac{CO_{۲,capt}}{CO_{۲,in}})$
۹۹/۹۸	درصد بازیابی بیومتان $(\frac{CH_{۴,out}}{CH_{۴\ in\ biogas}})$
۳/۵۷	شدت انرژی بازیابی حلال $(\frac{GJ}{t_{CO۲}})$

جدول ۸- نتایج موازنه انرژی (حلال دی اتانول آمین)

مقدار	پارامتر
۶۱۰۸۰۰۰	نرخ انتقال حرارت در مبدل گرمایی آمین-آمین $(\frac{kJ}{h})$
۵۸۲۳۰۰۰	بارحرارتی کولر خنک‌سازی حلال $(\frac{kJ}{h})$
۱۱/۲۷	انرژی مصرفی ریبویلر $(\frac{GJ}{h})$
۶۷۶۰	انرژی مصرفی پمپ حلال $(\frac{kJ}{h})$

جدول ۹- نتایج فنی (حلال دی اتانول آمین)

مقدار	موضوع
۱۳	نسبت دبی حلال به بیوگاز $\left(\frac{L}{G}\right)_{Ratio}$
۰/۰۱۴	بارگیری آمین تمیز
۰/۲۷۱۴	بارگیری آمین کثیف
۸۰	درصد بازیابی دی‌اکسید کربن $(\frac{CO_{۲,capt}}{CO_{۲,in}})$
۹۹/۹۶	درصد بازیابی بیومتان $(\frac{CH_{۴,out}}{CH_{۴\ in\ biogas}})$
۷/۴۶	شدت انرژی بازیابی حلال $(\frac{GJ}{t_{CO_۲}})$

جدول ۱۰- نتایج موازنه انرژی (دی‌اتانول آمین با پیپرازین)

مقدار	پارامتر
۲۴۵۰۰۰۰	نرخ انتقال حرارت در مبدل گرمایی آمین-آمین $(\frac{kJ}{h})$
۳۱۶۶۰۰۰	بارحرارتی کولر خنک‌سازی حلال $(\frac{kJ}{h})$
۷/۰۷	انرژی مصرفی ریبویلر $(\frac{GJ}{h})$
۳۴۷۱	انرژی مصرفی پمپ حلال $(\frac{kJ}{h})$

جدول ۱۱- نتایج فنی (دی‌اتانول آمین با پیپرازین)

مقدار	موضوع
۶	نسبت دبی حلال به بیوگاز $\left(\frac{L}{G}\right)_{Ratio}$
۰/۲۲۲	بارگیری آمین تمیز
۰/۶۵	بارگیری آمین کثیف
۹۴/۵۸	درصد بازیابی دی‌اکسید کربن $(\frac{CO_{۲,capt}}{CO_{۲,in}})$
۹۹/۹۸	درصد بازیابی بیومتان $(\frac{CH_{۴,out}}{CH_{۴\ in\ biogas}})$
۳/۹۵	شدت انرژی بازیابی حلال $(\frac{GJ}{t_{CO۲}})$

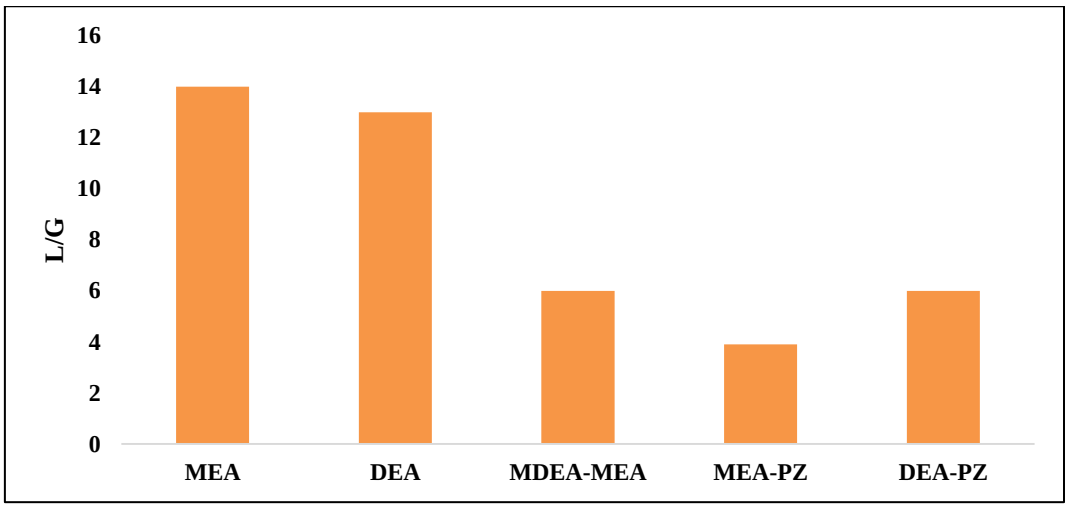
با توجه به نمودار، نسبت حلال به گاز، زمانی که از حلال MEA استفاده شده است، نسبت به سایر حلال‌ها مقدار بیشتری را به خود اختصاص داده است. این در حالی است که حلال مخلوط MEA-PZ دارای کمترین مقدار برای نسبت حلال به گاز شده و در مقایسه با حلال MEA از یک کاهش ۷۲/۱۴ درصدی برخوردار شده است. این کاهش دبی حلال به جهت استفاده از پپرازین و مونواتانول آمین است که هر دو میل ترکیبی بالایی برای جذب دی‌اکسید کربن دارند. پیپرازین یک زنجیره حلقوی با دو عامل آمین میباشد و آن را در دسته آلکانول آمینهای نوع دوم دسته بندی میکنند. پیپرازین به عنوان یکی از مهم ترین جاذب ها برای حذف گازهای اسیدی یا ترش و همچنین به عنوان یک افزودنی با غلظت پایین به جاذبهای متداول مطرح شده و مورد توجه فراوان قرار گرفته است . پیپرازین از یک سو ظرفیت بالایی در جذب گازهای اسیدی دارد و از سویی دیگر سرعت واکنش بالایی از خود نشان میدهد. پیپرازین واکنش پذیری بسیار بالایی با کربن دی اکسید داشته و ظرفیت بسیار بالایی برای جذب آن دارد. این ویژگی های پیپرازین بدین خاطر است که این ماده یک آمین نوع دوم حلقهای۱ محسوب میشود. بدین معنی که دی آمین بوده، یعنی دو گروه آمینی در هر مولکول خود دارد [۱۰] . بنابراین با دبی کمتری از حلال MEA-PZ می‌توان برای ارتقای بیوگاز استفاده نمود. شدت انرژی بازیابی برای حلال بهینه نسبت به مونواتیلن آمین کاهش محسوسی داشته است و کمترین مقدار بدست آمده برای حلال MEA-PZ است که علت این امر کاهش دبی حلال در گردش می باشد. همچنین با کاهش حلال چرخشی در سیکل بار حرارتی ریبویلر نیز کاهش می یابد

بدین معنی که انرژی مورد نیاز برای احیاء سیال کمتر خواهد شد که با نتایج بدست آمده مطابقت دارد. از طرفی درصد بازیابی گاز دی اکسید کربن با محلول دی اتانول آمین کاهش و شدت انرژی بازیابی آفزایش یافته است. مکانیزم های مختلفی توسط محققین [۳۳-۳۲]در مورد واکنش محلول آمین با گازهای اسیدی ارائه شده است. واکنش آمین با CO۲ که در آمین های نوع اول و دوم عموما مشاهده می شود و منجر به تشکیل نمک کربامات می شود به شرح ذیل است.

$$RNH_2+CO_2 \longleftrightarrow RNHCO_3+H^+ \quad (۷)$$

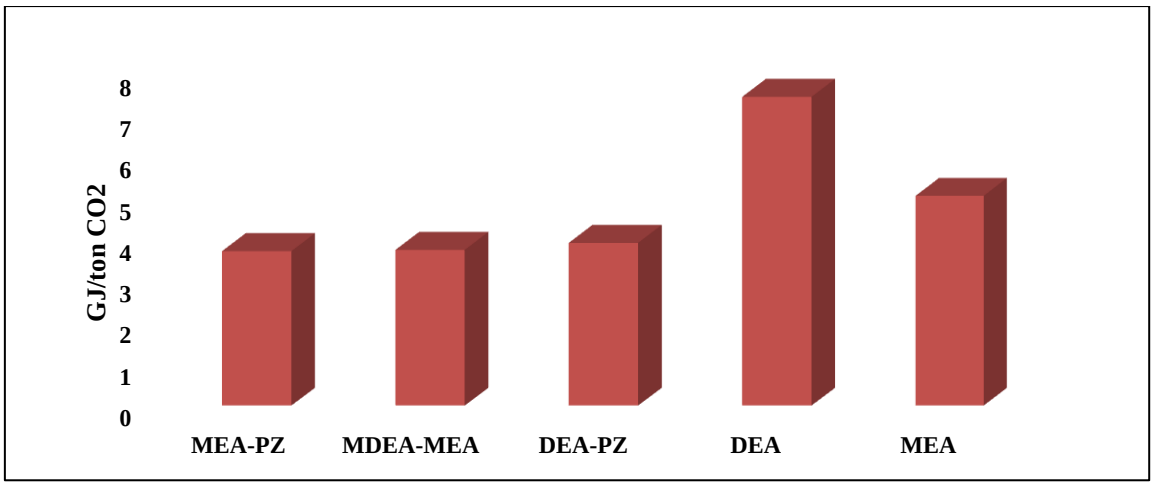
$$RNH_2+H^+ \longleftrightarrow RNH_3 \quad (۸)$$

این واکنش گرمازا می باشد. حال هرچه گرمای واکنش بالاتر باشد، احیای آمین گرمای کمتری نیاز خواهد داشت. به طور کلی خاصیت جذب انتخابی در آمین ها عامل بسیاری مهمی در انتخاب نوع آمین برای فرآیند می باشد. آمین های نوع اول و دوم دارای خاصیت جذب انتخابی نیستند که ضعف این نوع از آمین ها محسوب می شود. جذب انتخابی باعث کاهش مقدار آمین در گردش و در نتیجه کاهش هزینه بازیابی آن خواهد شد [۳۳]. با مقایسه داده های جدول ۹ و ۱۱ می توان مشاهده نمود که میزان بازیابی دی اکسید کربن کبا استفاده از پپرازین نسبت یه آمین خالص افزایش و از طرف دیگه شدت بازیافت حلال کاهش یافته است. همچنین بار حرارتی اعمال شده بر ریبویلر هنگام استفاده از فعال کننده پپرازین نیز کاهش یافته است. با مقایسه بار حرارتی ریبویلر و دیوتی پمپ در جداول ۶ و ۱۰ افزایش بار حرارتی ریبویلر هنگام استفاده از محلول دی اتیلن آمین فعال شده نسبت به مونواتیلن آمین فعال شده و از طرفی افزایش دیوتی پمپ برای محلول پپرازین-دی اتیلن آمین مشاهده می شود. این به دلیل ظرفیت پایین جذب گاز اسیدی آمین نوع دوم می باشد که منجر به دبی در گردش بیشتر نسبت به آمین نوع اول می شود.



نمودار ۱- مقایسه نسبت حلال به گاز

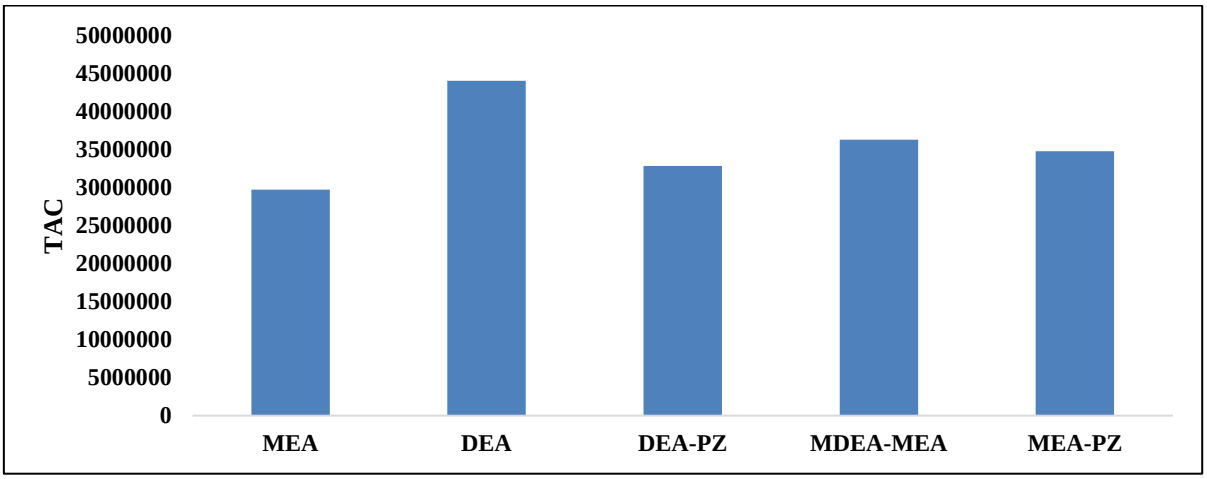
نمودار (۲) شدت انرژی بازیابی برای حلال های مصرفی را نشان می دهد. با توجه به نمودار، زمانی که حلال DEA با پیرازین ترکیبی شده است شدت انرژی بازیابی حلال در مقایسه با حلال DEA از یک کاهش ۴۷/۰۵ درصدی برخوردار است که نشان دهنده اهمیت استفاده از فعال کننده‌ها در کاهش مصرف انرژی است.



نمودار ۲- مقایسه شدت انرژی بازیابی حلال

برآورد هزینه و صرفه اقتصادی یکی از مهم ترین پارامترها در بحث بهبود بیوگاز می‌باشد. با توجه به نمودار ۳، حلال MEA در مقایسه با دیگر موارد هزینه سالانه کلی (TAC) کمتری دارد. طبق مقایسه صورت گرفته هزینه

سالانه کلی برای حلال MEA در مقایسه با حلال‌های DEA، DEA-PZ، MEA-PZ و MDEA-MEA بترتیب ۳۲/۵۳، ۹/۵۳، ۱۴/۴۷ و ۱۸/۱۲ درصد کاهش را نشان می دهد . این در حالی است که کاهش هزینه سالانه به نوعی در هزینه تمام شده کلی نیز مؤثر است، کما اینکه این را می توان از مقادیر به دست آمده برای هزینه کلی تولید یا TPC نیز دریافت نمود. براساس ارزیابی های اقتصادی انجام شده، هزینه کلی تولید هر کیلوگرم بیومتان از طرح ارتقای بیوگاز با استفاده از حلال MEA برابر با ۳/۴۳ دلار بوده که این مقدار در مقایسه با حلالهای DEA، MEA-PZ، MEA-MDEA و DEA-PZ بترتیب کاهش ۲۳/۹۵، ۱۳/۳۸، ۲۳/۶۱ و ۱۷/۳۵ درصدی را نشان داده است، لذا با توجه به این که استفاده از حلال MEA دارای هزینه تولید کلی کمتری در مقایسه با دیگر حلال‌های بررسی شده بوده و از طرفی از لحاظ زیست محیطی نیز عملکرد همه حلال‌ها مشابه است و میزان بازیابی اجزا بیوگاز نیز به صورت میانگین در یک رده قرار دارند، می‌توان گفت که فرایند بهبود بیوگاز به روش جذب شیمیایی با حلال MEA مناسب‌تر می‌باشد. هزینه سالانه کلی طرح ارتقای بیوگاز در صورت استفاده از حلال DEA دارای بیشترین مقدار میباشد و همین امر موجب شده تا هزینه کلی تولید هر کیلوگرم از بیومتان برای این حلال بالا باشد در نتیجه استفاده از حلال DEA برای تصفیه شیمیایی بیوگاز مقرون بصرفه نیست (جدول پیوست).



نمودار ۳- مقایسه هزینه سالانه کلی

به منظور مقایسه عملکرد حلال های استفاده شده در بهبود فرآیند بیوگاز، تحقیقات انجام شده در زمینه شبیه سازی با حلال های آمین با استفاده از روش جذب شیمیایی با دو حلال آمین فعال استفاده شده در کار حاضر در جدول ۱۱ نشان داده شده اند. با توجه به نتایج می توان مشاهده نمود که تمامی حلال های استفاده شده در کاهش بار حرارتی ریبویلر موثر بوده اند. حلال های آمین فعال شده نسبت به بقیه حلال ها تاثیر بیشتری داشته که نشان دهنده بهبود خاصیت جذب انتخابی آن ها نسبت به آمین خالص می باشد. همچنین تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی میزان آمین درگردش و در نتیجه دیوتی پمپ سیرکولاسیون داشته اند. از نتایج فوق می توان نتیجه گرفت اضافه نمودن ماده فعال ساز پیرازین به حلال آمین با حفظ مزایای سیال پایه، باعث تقویت خاصیت جذب انتخابی آن می شود.

جدول ۱۱- مقایسه کارهای انجام شده با تحقیق حاضر

نام	سال	فناوری	نوع حلال	نتیجه
لیو و همکاران	۲۰۱۵	جذب شیمیایی	MEA	کاهش ۳۲ درصدی بار حرارتی ریبویلر
پلگرینی و همکاران	۲۰۱۷	جذب شیمیایی	MEA	کاهش ۴۴ درصدی بار حرارتی ریبویلر
وو و همکاران	۲۰۱۸	جذب شیمیایی	MEA	کاهش ۲۶ درصدی بار حرارتی ریبویلر
نجات و همکاران	۲۰۱۸	جذب شیمیایی	MDEA و سولفولان	کاهش ۴۷ درصدی بار حرارتی ریبویلر
تحقیق حاضر	۲۰۲۲	جذب شیمیایی	MEA-PZ	کاهش ۶۲ درصدی بار حرارتی ریبویلر
تحقیق حاضر	۲۰۲۲	جذب شیمیایی	DEA-PZ	کاهش ۷۲ درصدی بار حرارتی ریبویلر

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله ارتقای بیوگاز براساس حلال مونواتانول آمین در دو حالت متداول و بهینه به روش جذب شیمیایی با حلال‌های آلکانول آمین مورد شبیه‌سازی و بررسی قرار گرفته است. از آزمایشات انجام شده برای حلال های آمین

خالص با آمین فعال شده با پپرازین، نتایج حاکی از افزایش درصد بازیابی دی اکسید کربن از ۹۰ به ۹۴/۵۸ درصد هنگام استفاده از حلال دی اتانول آمین فعال شده بوده است که نشان از میل بالای این حلال برای جذب گاز دی اکسید کربن و بهبود خاصیت جذب انتخابی حلال پایه می باشد. بررسی‌ها نشان داد که فعال کننده پپرازین در ترکیب با دیگر حلال‌ها تأثیر بسیار زیادی در کاهش شدت انرژی بازیابی حلال و همچنین کاهش بار حرارتی ریبویلر تا $\frac{GJ}{h}$ ۶/۳ و ۷/۱ و به ترتیب برای آمین نوع اول و دوم فعال شده داشت که مستقیماً بر بخار مصرفی و دیوتی پمپ تاثیرگذار بود. با توجه به بررسی انجام شده روش LVC توانسته تا حد زیادی به کاهش مصرف انرژی برای بازیابی حلال MEA کمک نموده و این حلال را از نظر انرژی نیز در جایگاه بسیار مناسبی قرار دهد. نتایج ارائه شده برای مونواتیلن آمین بهینه حاکی از این هستند که شدت انرژی بازیابی حلال برای فرایند بهینه برابر با ۳/۶۲ شده است که در مقایسه با فرایند متداول با حلال MEA یک کاهش ۲۸/۷۴ درصدی را نشان داده است.

منابع و مراجع

.

.

Simulation of Biogas Improvement Integration Process using Monoethanolamine Solvent

[۱] Master of Chemical Engineering, Sistan and Baluchestan State University, Zahedan, Iran

[۲] The Chemical Engineering Faculty Member, Sistan and Balouchestan University, Zahedan, Iran

[۳] The Chemical Engineering Faculty Member, Sistan and Balouchestan University, Zahedan, Iran

ABSTRACT

Biogas is a sustainable energy source produced by the anaerobic digestion of organic waste. Raw biogas can be used for combustion in a furnace or for electricity generation, but since the energy content of biogas is directly proportional to the methane concentration, the biogas must be upgraded and freed from carbon dioxide and other impurities for injection into the gas grid or consumption as fuel for automobiles. This paper presents a biogas upgrading process based on low-pressure vapor compression, which is optimized together with the expansion of clean solvent output from the solvent recovery tower reboiler and the supply of dense superheated steam to the reboiler. Two common and optimal modes were simulated using Aspenhysys software based on pure amine and activated amine solvents. The results showed an increase in carbon dioxide recovery and a reduction in the heat load of the disposal tower reboiler to ۳.۶۲ GJ/t CO۲, a reduction of ۲۸.۷۴٪ compared to the baseline process, as well as a reduction in pump power to ۳۴۶kj/h for the solution. The economic estimates have shown that MEA is a suitable solvent for the biogas process in terms of cost savings, but in terms of performance and impact on the activation energy parameters of piperazine in combination with other solvents, has a great effect in reducing the intensity of energy recovery.

Keyword: Biogas, Simulation, Biomethane, Environment, Mono ethylene amine

پیوست:

شرایط عملیاتی برای جریان‌های فرآیند متداول

جریان	T(□)	P(kPa)	F($\frac{kmole}{h}$)	جریان	T(□)	P(kPa)	F($\frac{kmole}{h}$)
ST-۲	۲۵	۱۰۱/۳	۱۰۰	ST-۱۵	۳۰/۰۳	۱۰۱/۳	۱۴۰۰
ST-۴	۳۱/۴	۱۰۱/۳	۶۴/۰۳	ST-۵	۳۲/۰۲	۱۰۱/۳	۲/۶۸۲
ST-۶	۵۸/۴	۱۰۱/۳	۱۴۳۹	ST-۷	۵۸/۴۳	۲۵۰	۱۴۳۹
ST-۱۱	۸۰/۸۸	۱۵۰	۱۳۶۰	ST-۸	۱۰۰	۲۵۰	۱۴۳۹
ST-۹	۹۸/۵۷	۲۰۰	۱۴۳۹	ST-۱۰	۱۲۱/۹	۲۰۰	۱۳۶۰
Desorbed CO۲	۴۵	۲۰۰	۴۰/۶۶	WASTE	۴۵	۲۰۰	۳۷/۹۶

نتایج موازنه جرم برای جریان‌های فرآیند متداول

	دی‌اکسید کربن	آمین کثیف	آمین ضعیف	گاز تصفیه
ترکیبات	جزء مولی			
متان	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۱
دی‌اکسید کربن	۰/۹۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۷
هیدروژن	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۸
ازت	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳
مونواتانول آمین	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۰
سولفید هیدروژن	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
آب	۰/۰۵	۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۰۰

نتایج محاسبات اقتصادی (مونواتانول آمین)

پارامتر	مقدار

۷۷۴/۵۶۳	هزینه یوتیلیتی (دلار در سال)
۱/۶۳۴/۹۱۵	هزینه سرمایه‌گذاری ثابت (دلار)
۲/۵۹۵/۴۲۸	هزینه کلی سرمایه‌گذاری (دلار)
۱/۷۷۲/۷۸۰	هزینه عملیاتی (دلار در سال)
۲۹/۶۸۰/۶۰۸	هزینه کلی سالانه (دلار در سال)
۲۳۱/۸۰۰	هزینه کلی تجهیزات (دلار)
۳/۴۳	هزینه کلی تولید (دلار بر کیلوگرم)

شرایط عملیاتی برای جریان‌های فرآیندی بهبود بیوگاز براساس حلال مونواتانول آمین

جریان	T(□)	P(kPa)	F($\frac{kmole}{h}$)	جریان	T(□)	P(kPa)	F($\frac{kmole}{h}$)
ST-۲	۲۵	۱۰۱/۳	۱۰۰	ST-۱۵	۳۰/۰۳	۱۰۱/۳	۱۴۰۰
ST-۴	۳۱/۸۳	۱۰۱/۳	۶۳/۹۲	ST-۵	۳۲/۰۲	۱۰۱/۳	۲/۷۴۹
ST-۶	۵۸	۱۰۱/۳	۱۴۳۸	ST-۷	۵۸/۰۳	۲۵۰	۱۴۳۸
ST-۱۱	۶۹/۹۷	۱۵۰	۱۴۰۰	ST-۸	۹۰	۲۵۰	۱۴۰۰
ST-۹	۹۰/۰۱	۲۰۰	۱۴۳۸	ST-۱۰	۱۲۱/۸	۲۰۰	۱۴۲۰
Desorbed CO۲	۴۵/۰۷	۲۰۰	۴۰/۸۶	ST-۳۰	۱۰۱/۸	۱۰۱/۳	۶۰/۳
ST-۳۳	۱۹۰/۴	۲۰۰	۶۰/۲۸	ST-۳۱	۱۰۱/۸	۱۰۱/۳	۱۳۵۹

نتایج موازنه جرم بهبود بیوگاز براساس حلال مونواتانول آمین

گاز تصفیه	آمین ضعیف	آمین کثیف	دی‌اکسید کربن	
	جزء مولی			ترکیبات
۰.۸۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	متان
۰.۰۷	۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۹۵	دی‌اکسید کربن
۰.۰۸	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	هیدروژن
۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	ازت
۰.۰۰	۰.۰۷	۰.۰۷	۰.۰۰	مونواتانول آمین
۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	سولفید هیدروژن
۰.۰۰	۰.۹۳	۰.۹۰	۰.۰۵	آب

نتایج محاسبات اقتصادی (مونواتانول آمین)

مقدار	پارامتر
۷۷۴/۵۶۳	هزینه یوتیلیتی (دلار در سال)
۱/۶۳۴/۹۱۵	هزینه سرمایه‌گذاری ثابت (دلار)
۲/۵۹۵/۴۲۸	هزینه کلی سرمایه‌گذاری (دلار)
۱/۷۷۲/۷۸۰	هزینه عملیاتی (دلار در سال)
۲۹/۶۸۰/۶۰۸	هزینه کلی سالانه (دلار در سال)
۲۳۱/۸۰۰	هزینه کلی تجهیزات (دلار)
۳/۴۳	هزینه کلی تولید (دلار بر کیلوگرم)

شرایط عملیاتی برای جریان‌های فرایندی (دی‌اتانول آمین با پیپرازین)

جریان	T(□)	P(kPa)	F($\frac{kmole}{h}$)	جریان	T(□)	P(kPa)	F($\frac{kmole}{h}$)
ST-۲	۲۵	۱۰۱/۳	۱۰۰	ST-۱۵	۳۰/۱۹	۱۰۱/۳	۶۰۰
ST-۴	۷۸/۶۳	۱۰۱/۳	۹۴/۱	ST-۵	۸۰/۴۷	۱۰۱/۳	۳۴/۸۳
ST-۶	۵۵/۹	۱۰۱/۳	۶۴۰/۷	ST-۷	۵۶/۹۴	۲۵۰	۳۴۰/۷
ST-۱۱	۹۸/۵۸	۱۵۰	۵۶۰	ST-۸	۱۰۰	۲۵۰	۶۴۰/۷
ST-۹	۹۸/۵۴	۲۰۰	۶۴۰/۷	ST-۱۰	۱۲۴/۶	۲۰۰	۵۶۰
Desorbed CO۲	۴۵	۲۰۰	۴۲/۷۶	WASTE	۴۵	۲۰۰	۳۸

نتایج موازنه جرم (حلال دی‌اتانول آمین با پیپرازین)

	دی‌اکسید کربن	آمین کثیف	آمین ضعیف	گاز تصفیه
ترکیبات	جزء مولی			
متان	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۴
دی‌اکسید کربن	۰/۹۵	۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۰۴
هیدروژن	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۸
ازت	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳
سولفید هیدروژن	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
آب	۰/۰۵	۰/۷۴	۰/۸۱	۰/۰۰
پیپرازین	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۰
دی اتانول آمین	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۰

نتایج محاسبات اقتصادی (دی‌اتانول آمین با پیپرازین)

مقدار	پارامتر
۶۳۵/۵۴۵	هزینه یوتیلیتی (دلار در سال)
۴/۴۸۲/۵۸۲	هزینه سرمایه‌گذاری ثابت (دلار)
۷/۱۱۶/۰۹۹	هزینه کلی سرمایه‌گذاری (دلار)
۱/۶۳۴/۱۸۰	هزینه عملیاتی (دلار در سال)
۳۲/۸۰۷/۹۱۴	هزینه کلی سالانه (دلار در سال)
۲۷۲/۵۰۰	هزینه کلی تجهیزات (دلار)
۴/۱۵	هزینه کلی تولید (دلار بر کیلوگرم)