

کاهش آلاینده های سولفور و دی اکسید کربن از گاز طبیعی با استفاده از غشا

حامد عبدالمهدی

صادق صدیقی

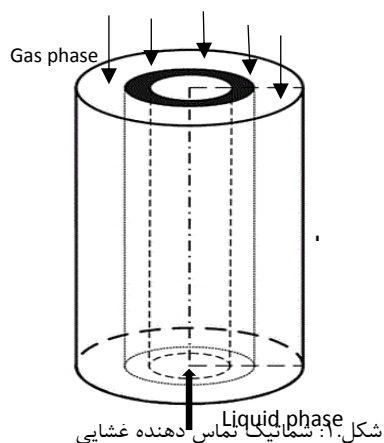
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

Sadegh.seddighi@kntu.ac.ir

چکیده

نزدیک به ۸۰ درصد گازهای گلخانه ای را کربن دی اکسید تشکیل می دهد. بر پایه گزارش ها نزدیک به نیمی از کربن دی اکسید آزاد شده در جو کره زمین، از صنایعی است که از سوخت های فسیلی به عنوان خوراک خود استفاده می کنند [۱]. گاز سمی دیگری که اثرات مخرب زیادی دارد هیدروژن سولفید می باشد که علاوه بر سمی بودن، خوردنده قوی می باشد. این گاز مهمترین عامل ایجاد باران های اسیدی و همچنین خوردنی تجهیزات استفاده شده در صنایع با سوخت های گازی ناخالص است. با توجه به اینکه عمده ناخالصی موجود در گاز خوراک پالایشگاه ها، کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید می باشد، به منظور استفاده بهینه تر از منابع موجود سوخت های گازی، باید این دو جز از سوخت جدا شوند. موارد ذکر شده در بالا و همچنین حساسیت رو به افزایش نهاد های مربوط به محیط زیست، نیاز به تکنولوژی های موثر برای حذف و جذب آلاینده از سوخت های فسیلی را نشان می دهد. یکی از تکنولوژی های با حضور جاذب شیمیایی، فرایند جذب ذراتی نظیر کربن دی اکسید، هیدروژن سولفید و جداسازی گازهایی چون متان و هوا را انجام می دهد تماس دهنده های غشایی فیبری توخالی^۱ هستند (شکل ۱). که محققین مطالعاتی را بر روی آن انجام داده اند.



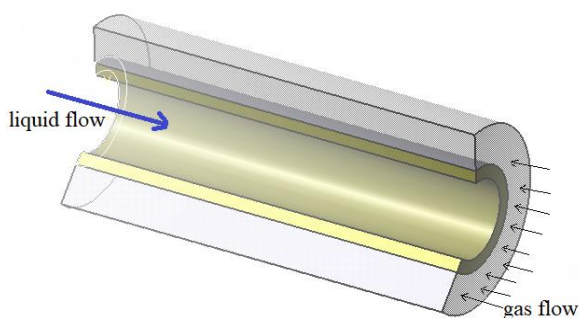
کلمات کلیدی: گاز طبیعی، سولفورزدایی، غشا

۱. مقدمه

با توجه به رشد مصرف جهانی انرژی در سده گذشته در صنعت، بهره گیری از سوخت های فسیلی، به عنوان منبعی سرشار از انرژی، اجتناب ناپذیر می باشد. از جمله سوخت های فسیلی مورد استفاده می توان به منابع گازی اشاره کرد که با توجه به وجود منابعی عظیم از ذخایر گاز در مناطقی نظیر روسیه، خاورمیانه، آمریکای شمالی، استفاده از این منبع انرژی رو به افزایش است. علاوه بر تجدید ناپذیر بودن که ویژگی اصلی سوخت های فسیلی است، تغییرات آب و هوایی و گرم شدن جهانی یکی دیگر از مشکلاتی است که استفاده از سوخت های فسیلی ایجاد کرده است. تحقیقات نشان می دهد

¹Hollow fiber membrane contactor

سمت پوسته در جریان می باشد و غشا، لوله و پوسته را از هم جدا کرده است.



شکل ۲- شماتیک ۳ بعدی تماس دهنده غشایی

۴. معادلات

سمت پوسته:

از ترکیب قانون فیک با معادله پیوستگی، موازنه جرم کلی به دست می آید.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (-D_i \nabla C_i + C_i V_z) + R_i \quad (1)$$

معادله پایستگی جرم پایا برای اجزا شامل کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید در سمت پوسته که مخلوط گازی در جریان است و هیچ گونه واکنشی در سمت پوسته رخ نمی دهد. از رابطه های ۳ و ۲ به دست می آید.

$$D_{CO_2-shell} \left[\frac{\partial^2 C_{CO_2-shell}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{CO_2-shell}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{CO_2-shell}}{\partial z^2} \right] = V_{z-shell} \frac{\partial C_{CO_2-shell}}{\partial z} \quad (2)$$

$$D_{H_2S-shell} \left[\frac{\partial^2 C_{H_2S-shell}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{H_2S-shell}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{H_2S-shell}}{\partial z^2} \right] = V_{z-shell} \frac{\partial C_{H_2S-shell}}{\partial z} \quad (3)$$

شرایط مرزی در سمت پوسته به ترتیب زیر می باشد:

$$z = L \quad C_{i-shell} = C_{initial} \quad i = CO_2 \text{ and } H_2S \quad (4)$$

$$r = R_2 \quad C_{i-shell} = C_{i-membrane} \quad (5)$$

طراحی اصلی این سیستم به گونه ای می باشد که به کمک غشا، یک تماس مستقیم بدون پخش شدگی، به منظور انتقال جرم بین گاز و مایع جاذب برقرار می شود. در تماس دهنده غشایی، گاز در یک طرف غشا و مایع جاذب در طرف دیگر غشا در جریانند. سطح تماس به منظور انتقال جرم در حفارت غشا بین گاز و مایع ایجاد می شود. گاز با نفوذ به محیط متخلخل در سطح تماس با جاذب، جذب می شود. کنترل دبی جریان های ورودی گاز و مایع به سیستم، سطح تماس ویژه بالا بین گاز و مایع به دلیل حضور غشا به طوری که با تغییر سرعت های ورودی گاز و مایع جاذب، سطح تماس بین دو فاز ثابت می ماند [۲]، از جمله ویژگی هایی است که استفاده از این تکنولوژی را سبب شده است. می توان پارامترهایی چون خیس شدگی غشا، نوع غشا، نوع مایع جاذب و پارامترهای عملیاتی نظیر دما و فشار را مهمترین عوامل تاثیر گذار بر عملکرد سیستم دانست. تحقیقات بسیار به منظور بهبود عملکرد غشاهای فیبر توخالی انجام پذیرفته است، از جمله مندال و همکارانش [۳] جداسازی هیدروژن سولفید از یک مخلوط گازی حاوی دی اکسید کربن و هیدروژن سولفید با استفاده از محلول های آبی MDEA و AMP در یک ستون مرطوب را بررسی کرده اند. تحقیقاتی که در سال ۲۰۰۴ توسط دیندور [۴] انجام گرفت نشان داد در کنار جاذب های مختلف غشاهای PP و PVDF انجام سازگاری بهتری نسبت به سایر غشاها دارند. از دیگر تحقیقات صورت گرفته در زمینه عملکرد غشاها می توان به تحقیقات کیزری [۵] اشاره کرد. او عملکرد سه غشا آبریز پر کاربرد PP, PVDF, PTEF را به منظور جذب CO₂ به کمک غشای MEA مورد مطالعه قرار داد که نشان داد عملکرد جذب کربن دی اکسید در برای غشای PTFE از دو غشای دیگر بالاتر است و این غشا پایداری بهتری در طول فرایند دارد. در این مقاله سعی شده است عملکرد یک غشای فیبر توخالی را به منظور حذف همزمان کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید از گاز طبیعی بررسی شود و تاثیر پارامترهای مختلف را مورد مطالعه قرار دهیم.

۲. شرح مدل

مدل دو بعدی از تماس دهنده غشایی به منظور حذف کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید مورد بررسی قرار گرفت. نفوذ محوری و شعاعی در داخل غشا، سمت گاز درون پوسته و مایع درون لوله مورد توجه قرار گرفت. با توجه به اینکه مقاومت نفوذ از میان فاز گاز کمتر از مقاومت نفوذ در فاز مایع است، لذا بهتر است حفارت غشا از فاز گاز پر شوند و غشا هیچ گونه خیس شدگی نداشته باشد، لذا معادلات مدل را براساس غشای خشک [6] توسعه دادیم تا بازده عملکردی مدل بالاتر باشد. جاذب مورد استفاده در مدل را محلول MEA انتخاب کردیم. همانطور که در مدل سه بعدی نشان داده شده (شکل ۲)، کنتاکتور غشایی مورد بررسی از سه قسمت پوسته، غشا و لوله تشکیل شده است که حلال از سمت لوله در خلاف جهت مخلوط گازی وارد شده از

در معادلات ۸ الی ۱۳ منظور از i اجزا گازی هیدروژن سولفید و کربن دی اسید می باشد.

$$r = R_3 \quad \frac{\partial C_{i-shell}}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

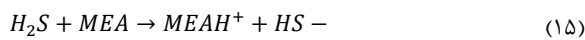
معادلات قسمت غشا :

۳-۱- سینیتیک واکنش ها

معادله واکنش CO_2 با جاذب MEA به صورت زیر می باشد [۷].



همچنین معادله واکنشی جاذب MEA با هیدروژن سولفید به صورت زیر می باشد [۸].



۳-۲- حل عددی

خصوصیت تماس دهنده غشایی مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. یک مدل ریاضی 2D جهت پیشبینی حذف ذرات CO_2 و H_2S از گاز متان با استفاده از یک روش CFD بر اساس روش المان محدود (FEM) شبیه سازی شد. معادلات مدل با شرایط مرزی مناسب و معادلات سرعت واکنش اعمال شد. فرضیات اصلی مدل برای شبیه سازی را می توان اینگونه نام برد.

۱. فرض آرام بودن جریان در پوسته و لوله

۲. غشا کاملا خشک باقی بماند.

۳. فشار سمت لوله ثابت در نظر گرفته شده است.

۴. شرایط فیزیکی سیال ثابت در نظر گرفته شد

با توجه به اینکه به منظور افزایش بازده سیستم غشا را بدون خیس شدگی در نظر گرفتیم لذا تنها مخلوط گاز در درون غشا حضور دارد. بنابراین، معادله پایستگی جرم پایا برای انتقال CO_2 و H_2S در داخل غشا شامل ترم نفوذ بوده و به فرم زیر است

$$D_{i-membrane} \left[\frac{\partial^2 C_{i-m}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{i-m}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{i-m}}{\partial z^2} \right] = 0 \quad (7)$$

در این رابطه $D_{i-membrane}$ ضریب نفوذ کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید در غشا می باشند که وابسته به تخلخل می باشد.

شرایط مرزی مربوط به غشا :

$$r = R_1 \quad C_{i-membrane} = \frac{C_{i-tube}}{m_i} \quad (8)$$

$$r = R_2 \quad C_{i-shell} = C_{i-membrane} \quad (9)$$

ضریب m برای هر جز گازی بر مبنای قانون هنری محاسبه می شود [۷].

سمت تیوب :

معادله پایستگی جرم پایا برای انتقال CO_2 و H_2S ، در حالی که با MEA در داخل تیوب واکنش می دهد، به همراه گونه های جدید تشکیل شده از واکنش شامل ترم نفوذ، کنوکسیون و واکنش بوده و به فرم زیر است:

$$D_{i-tube} \left[\frac{\partial^2 C_{i-tube}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{i-tube}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{i-tube}}{\partial z^2} \right] \quad (10)$$

$$+ R_i = V_{z-tube} \frac{\partial C_{i-tube}}{\partial z}$$

شرایط مرزی سمت تیوب به صورت زیر می باشد.

$$z = 0, \quad C_{i-tube} = 0, \quad C_{MEA-tube} = C_{initial} \quad (11)$$

$$r = 0, \quad \frac{\partial C_{i-tube}}{\partial r} = 0 \quad (symmetry) \quad (12)$$

$$r = R_1, \quad C_{i-tube} = C_{i-membrane} \times m_i \quad (13)$$

جدول ۱- مشخصات فیزیکی غشاهای مورد استفاده در مدل [۹، ۱۰]			
نوع غشا	PP	PVDF	$\frac{CaCO_3}{PVDF} = 20\%$
Porosity	۰,۴	۰,۷۷	۰,۸۱
Number of Fiber	۳۶۰۰	۵	۵
Tortuosity	۲	۱,۷۵	۱,۹۲

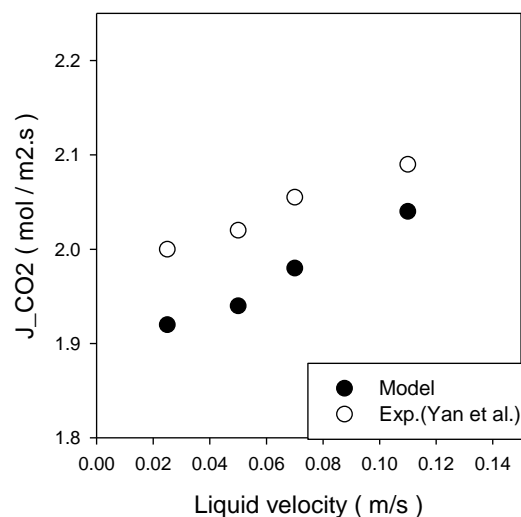
هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

نتایج نشان می دهد زمانی که سرعت مایع درون لوله افزایش می یابد ، به دلیل کاهش ضخامت لایه مرزی در مجاورت غشا ، مقاومت نفوذ کاهش می یابد و شار بیشتری از گاز به درون مایع نفوذ پیدا می کند. این پدیده در مطالعات تعداد دیگر از محققین نیز ارایه گشت.

۴. اعتبار سنجی

برای صحت سنجی این کار ، با توجه به اینکه جذب همزمان کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید مقالات زیادی در دسترس نیست ، از مقاله Shui-ping Yan و همکاران [۱۱] استفاده شد در این مقاله به صورت آزمایشگاهی حذف کربن دی اکسید در یک سیستم تماس دهنده غشایی بررسی گشت است. نتایج با دقت مناسب حاصل شد به گونه ای که ماکزیمم خطا نزدیک به ۲ درصد بود. شکل (۳).



شکل ۳- تاثیر سرعت مایع جاذب عبوری در لوله بر شار جرمی عبوری کربن دی اکسید ($V_{gas}: 2.11 \text{ m/s}$; $T_g: 298 \text{ K}$)

شار عبوری محاسبه شده از رابطه ۱۶ بدست می آید [۱۲].

$$J_{CO_2} = (Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}) \quad (16)$$

$$\times 273.15 \times \frac{1000}{22.4 \times T_g \times S}$$

در این رابطه J_{CO_2} نرخ انتقال جرم مربوط به ذره CO_2 ، Q_{in} و Q_{out} نرخ جریان گاز در خروجی و در ورودی ، C_{in} و C_{out} غلظت حجمی CO_2 در فاز گاز در خروجی و در ورودی ، T_g دمای جریان گاز و S سطح تماس گاز-مایع می باشد.

نتایج شبیه سازی و بحث:

جداسازی همزمان کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید از مخلوط گازی شامل ۸۰٪ متان ، ۱۰٪ هیدروژن سولفید و ۱۰٪ کربن دی اکسید مورد بررسی قرار گرفت. معادلات مدل و شرایط مرزی در غلظت های مختلف جاذب ، در سرعت های مختلف جاذب و گاز ، و همچنین با تغییر نوع غشای به کار رفته حل شد. در جدول شماره ۲ ویژگی های شیمیایی که در حل مدل به کار رفته است، آورده ایم.

جدول ۲- ویژگی های شیمیایی مدل		
$D_{CO_2-shell} (m^2 S^{-1})$	1.8×10^{-5}	[۱۳]
$D_{CO_2-membrane} (m^2 S)$	$D_{CO_2-shell} (\epsilon/\tau)$	
$D_{CO_2-Tube} (m^2 S^{-1})$	1.51×10^{-9}	[۱۴]
$D_{H_2S-shell} (m^2 S^{-1})$	2×10^{-5}	[۱۳]
$D_{H_2S-membrane} (m^2 S)$	$D_{H_2S-shell} (\epsilon/\tau)$	
$D_{H_2S-Tube} (m^2 S^{-1})$	D_{CO_2-Tube}	تقریب
$D_{MEA-tube} (m^2 S^{-1})$	9.3×10^{-10}	[۱۴]
$m_{CO_2} (mol. mol^{-1})$	0.8	[۱۴]
$m_{H_2S} (mol. mol^{-1})$	2.3	تقریب

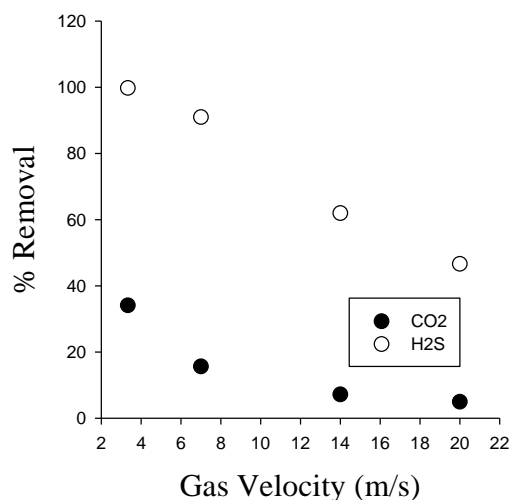
تاثیر افزودن نانو ذرات به غشا، بر عملکرد تماس دهنده غشایی

شکل ۴ نشان می دهد، درصد حذف کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید با افزایش درصد نانو ذرات موجود در غشا افزایش یافته است. بیشترین میزان حذف ذرات کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید از جریان در غشا با مشخصات فیزیکی $\frac{CaCO_3}{PVDF} = 20\%$ اتفاق افتاده است که این میزان برای

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

بالا برود. مطالعات نشان می‌دهد، می‌توان با افزودن درصدی از نانو ذرات به این غشا خواص عبور دهی را بهبود بخشید.

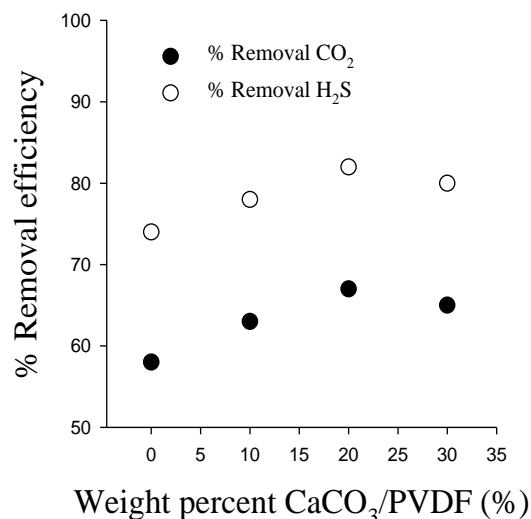
شکل شماره ۶ تاثیر افزودن نانو ذره CaCO_3 به غشای PVDF را نشان می‌دهد که به دنبال آن بهبود چشم گیری در شیرین سازی سوخت متان داریم.



شکل ۵- تاثیر سرعت گاز بر روند حذف ذرات. غشای مورد استفاده PP.

$$V_{liq}=0.65 \text{ m s}^{-1}, C_{MEA}=1000 \text{ mol m}^{-3}$$

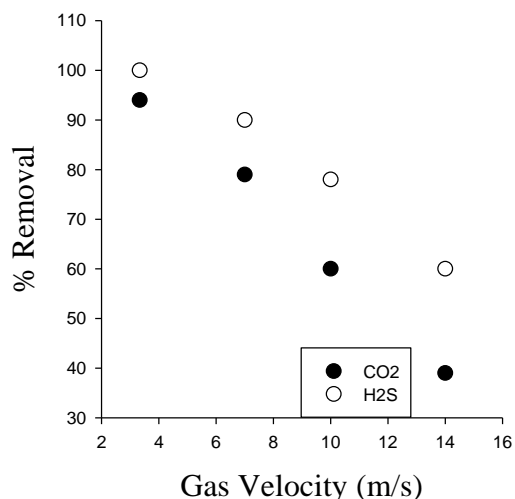
هیدروژن سولفید ۸۳٪ و برای کربن دی‌اکسید ۶۷٪ می‌باشد. درصد حذف این جزءهای گازی از خروجی پوسته متناسب با شار عبوری هر کدام از این گازها از غشا می‌باشد. از آنجاکه با افزایش درصد وزنی $\frac{\text{CaCO}_3}{\text{PVDF}}$ تا میزان ۲۰٪، تخلخل غشا و سطح تماس بین گاز و مایع افزایش می‌یابد لذا در طول جریان گاز درون پوسته، مقدار بیشتری از کربن دی‌اکسید و هیدروژن سولفید از غشا عبور کرده (شکل ۲۷) که نتیجه آن کاهش میزان این گازها در خروجی پوسته و در نتیجه افزایش درصد حذف آن دو جز گازی می‌باشد



شکل ۴. درصد حذف ذرات کربن دی‌اکسید و هیدروژن سولفید از خروجی پوسته در درصد های جرمی متفاوت از CaCO_3 موجود در غشا

تاثیر سرعت گاز ورودی بر عملکرد تماس دهنده غشایی:

شکل شماره ۵ تاثیر افزایش سرعت گاز ورودی به پوسته در کنتاکتور غشایی با حضور غشای PP را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت گاز درصد حذف اجزا گازی کربن دی‌اکسید و هیدروژن سولفید کاهش می‌یابد که دلیل این اتفاق را می‌توان به دلیل کاهش زمان استقرار گاز در مجاورت غشا دانست. این امر سبب می‌شود نفوذ گاز به درون غشا کاهش و در نتیجه درصد کمتری از ذرات آلاینده حذف شود.

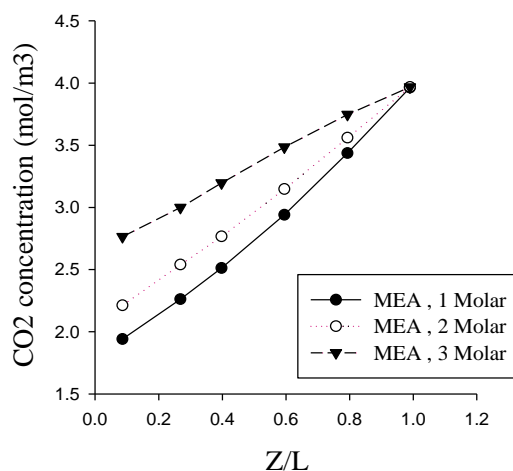


شکل ۶- تاثیر سرعت گاز ورودی بر عملکرد تماس دهنده غشایی، غشا

$$V_{liquid}=0.65 \text{ m s}^{-1} \cdot \left(\frac{\text{CaCO}_3}{\text{PVDF}} = 20\%\right)$$

با توجه به درصد کم حذف کربن دی‌اکسید در زمانی که از غشای PP استفاده کردیم باید به دنبال راه های جایگزین بود. یکی از این راه ها استفاده از غشاهای سطح تماس بالاتر و همچنین آب گریز تر می‌باشد. غشای PVDF از جمله غشاهای صنعتی، با صرفه اقتصادی بالاست که آب گریزی قابل قبولی دارد و همچنین به دلیل سطح تماس بالاتری که بین گاز و جاذب ایجاد می‌کند، می‌توان درصد حذف ذرات آلاینده نظیر کربن دی‌اکسید را

شکل ۸ تغییرات غلظت کربن دی اکسید در مرز پوسته و غشا را نشان می دهد.

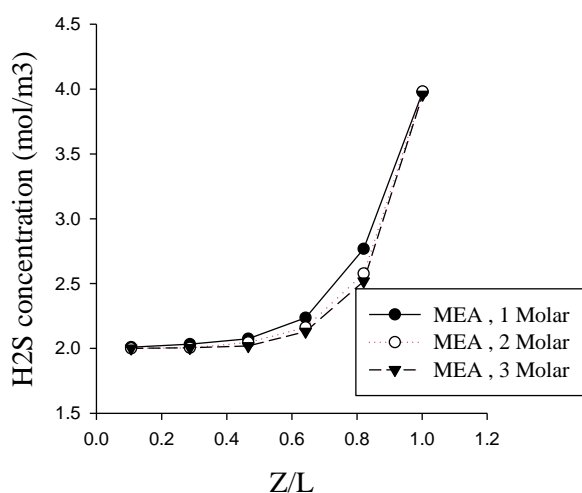


شکل ۸-تاثیر تغییرات غلظت جاذب بر تغییرات غلظت کربن دی اکسید

$$V_{\text{gas}} = 3.2 \text{ m/s}^{-1}, V_{\text{liquid}} = 0.65 \text{ m/s}^{-1}$$

همچنین شکل ۹ تغییرات غلظت هیدروژن سولفید را در مرز پوسته و غشا نمایش می دهد.

، با توجه به جهت جریان گاز که عکس جهت جریان سیال در مدل می باشد انتظار داریم که هر چه از ورودی گاز دور تر و به سمت ورودی جاذب نزدیک تر شویم غلظت جز گازی کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید کاهش یابد یا به عبارتی در Z/L های کوچک تر غلظت آلاینده ها کمتر باشد.

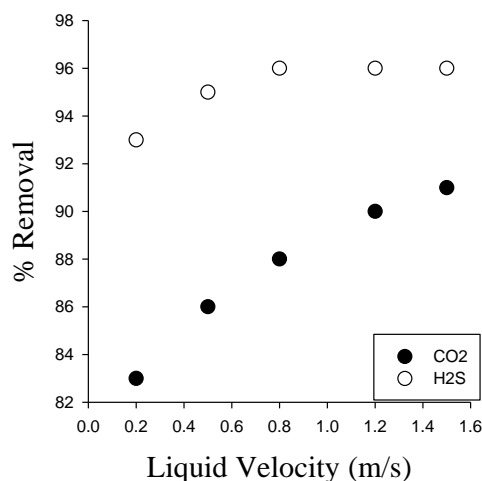


شکل ۹-تاثیر تغییرات غلظت جاذب بر تغییرات غلظت هیدروژن سولفید

$$V_{\text{gas}} = 3.2 \text{ m/s}^{-1}, V_{\text{liquid}} = 0.65 \text{ m/s}^{-1}$$

تاثیر سرعت مایع جاذب ورودی بر عملکرد تماس دهنده غشایی:

شکل شماره ۷ تاثیر افزایش سرعت جاذب ورودی به لوله در کنتاکتور غشایی با حضور غشای PVDF را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش سرعت جاذب درصد حذف اجزا گازی کربن دی اکسید و هیدروژن سولفید افزایش می یابد که دلیل این امر را می توان این گونه توجیه کرد که با افزایش سرعت مایع جاذب، مایع مجاور غشا که با هیدروژن سولفید و کربن دی اکسید واکنش داده سریع تر از مازول خارج شده و مایعی جدید و تمیز با ظرفیت پذیرش بالاتر در مجاورت غشا قرار گرفته و در نتیجه درصد بیشتری از هیدروژن سولفید و کربن دی اکسید در این فرایند جذب می شوند. همانگونه که در شکل می بینیم، در سرعت ۰.۲ m/s در صد جذب هیدروژن سولفید و کربن دی اکسید به ترتیب برابر با ۹۳ و ۸۳ درصد می باشد در حالی که در سرعت نزدیک به ۱.۴ m/s در صد حذف این دو به ترتیب ۹۶ و ۹۰ می باشد.



شکل ۷. تاثیر سرعت مایع ورودی بر عملکرد تماس دهنده غشایی ،

$$\frac{\text{CaCO}_3}{\text{PVDF}} = 20\%, v_{\text{gas}} = 5 \text{ m/s}^{-1}$$

تاثیر غلظت جاذب:

با توجه به اینکه یکی از ویژگی های تماس دهنده های غشایی کنترلی است که ما بر این سیستم ها داریم و میتوانیم شرایط آزمایش یا فرایند را به راحتی تغییر دهیم ، اکنون به بررسی اثر تغییر غلظت جاذب میپردازیم. به این منظور جریانی حاوی ۳۲ مول سوخت متان به همراه ۴ مول سوخت کربن دی اکسید و ۴ مول هیدروژن سولفید را وارد قسمت پوسته کردیم.

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

نمودار ۹ و ۸ نشان می دهند که هر چه غلظت جاذب ورودی بیشتر باشد در ارتفاع مشخص درصد بیشتری از آلاینده ها در تماس دهنده غشایی جذب شده است.

نتیجه گیری:

مراجع:

- مشاهده کردیم که فرایند جذب و جداسازی در یک سیستم غشایی به صورت همزمان صورت گرفت که از مزایای اصلی این تکنولوژی است.
 - توانایی کنترل کردن فرایند ، مانند توانایی تغییر سرعت گاز ، تغییر غلظت جاذب ، تغییر نوع جاذب و... به راحتی در این تکنولوژی قابل دسترس است که این مورد نیز یکی از برتری های این روش شیرین سازی سوخت می باشد.
 - جاذب های آب گریز نظیر PVDF عملکرد بهتری نسبت به غشاهایی دارند که توسط جاذب خیس می شوند. زیرا خیس شدگی سبب ایجاد مقاومت در برابر نفوذ می گردد که این اتفاق سبب کاهش بازده سیستم می شود.
 - به منظور افزایش بازده غشای به کار رفته در مدل خورد را با افزودن نانو ذرات اصلاح کردیم. مشاهده شد با افزودن نانو ذرات به غشا به دلیل افزایش تخلخل غشا ، افزایش زاویه تماس سطح گاز و جاذب و همچنین افزایش سطح تماس مابین گاز و جاذب ، درصد حذف هیدروژن سولفید و کربن دی اکسید از مخلوط گازی افزایش می یابد.
 - با افزایش غلظت جاذب ، می توان بازده جذب سیستم را بالا برد ، در غلظت های بالاتر تغییرات درصد جذب کم می شود. این موضوع نشان میدهد انتخاب غلظت جاذب حد بهینه دارد.
- جدول شماره ۳-علائم و نشانه ها**
- | | |
|-----------|---|
| S | سطح تماس ایجاد شده توسط غشا بین جاذب و گاز |
| C_i | غلظت جز i ($mol m^{-3}$) |
| $C_{i,0}$ | غلظت آغازین هر یک از اجزا در شروع فرایند ($mol m^{-3}$) |
| D_i | ضریب نفوذ هر یک از اجزا می باشد ($m^2 S^{-1}$) |
| m_i | ضریب حلالیت فاز گاز در فاز مایع ($mol mol^{-1}$) |
| R_i | سرعت واکنشی هر یک از اجزا ($mol S^{-1}$) |

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

- Engineering Science*, vol. 57, no. 21, pp. 4569-4582, 2002.
- [8] A. Cornelissen, "Simulation of absorption of H₂S and CO₂ into aqueous alkanolamines in tray and packed columns," *Trans. Inst. Chem. Eng.*, vol. 58, pp. 242-250, 1980.
- [9] J.-G. Lu, Y.-F. Zheng, and M.-D. Cheng, "Wetting mechanism in mass transfer process of hydrophobic membrane gas absorption," *Journal of Membrane Science*, vol. 308, no. 1, pp. 180-190, 2008.
- [10] M. Fosi-Kofal, A. Mustafa, A. Ismail, M. Rezaei-DashtArzhandi, and T. Matsuura, "PVDF/CaCO₃ composite hollow fiber membrane for CO₂ absorption in gas-liquid membrane contactor," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 31, pp. 428-436, 2016.
- [11] S.-p. Yan, M.-X. Fang, W.-F. Zhang, S.-Y. Wang, Z.-K. Xu, Z.-Y. Luo, and K.-F. Cen, "Experimental study on the separation of CO₂ from flue gas using hollow fiber membrane contactors without wetting," *Fuel Processing Technology*, vol. 88, no. 5, pp. 501-511, 2007.
- [12] S.-H. Yeon, B. Sea, Y.-I. Park, and K.-H. Lee, "Determination of mass transfer rates in PVDF and PTFE hollow fiber membranes for CO₂ absorption," *Separation science and technology*, vol. 38, no. 2, pp. 271-293, 2003.
- [13] E. L. Cussler, *Diffusion: mass transfer in fluid systems*: Cambridge university press, 2009.
- [14] S. Paul, A. K. Ghoshal, and B. Mandal, "Removal of CO₂ by single and blended aqueous alkanolamine solvents in hollow-fiber membrane contactor: modeling and simulation," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 46, no. 8, pp. 2576-2588, 2007.