

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کاشان  
دانشکده مهندسی  
گروه مهندسی شیمی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی شیمی

## **ساخت و ارزیابی غشای بستر آمیخته پلی یورتان - نانوذرات X به منظور جداسازی سولفید هیدروژن - متان**

اساتید راهنما:

دکتر مرتضی اصغری

دکتر محمود همتمی

استاد مشاور:

دکتر قادر خان بابایی

توسط:

الهام قبادی

آبان ماه ۱۳۹۲

تقدیم بہ پدر و مادر مہربان و خدا کا رم

کہ جو دشمن تاج افتخاری ست بر سرم

و تقدیم بہ ہمسر عزیزم

کہ نشاۃ لطف الہی در زندگی من است۔

مَشْکُورِ قَدْر دانی:

سپاس خداوند مهربان را که سایه لطفش در تمام مراحل زندگی بر سرم بود. خدایی که نعمت خانواده‌ای ستودنی و سلامت عقل و جان به من داد و راه کسب علم و دانش را بر

من به‌نور نمود. بر خود لازم می‌دانم که زحمات اساتید بزرگوارم آقایان دکتر مرتضی اصغری، دکتر محمود همتی و دکتر قادر خان‌بابایی مَشْکُور کنم. همچنین از آقای دکتر اکبری که

زحمت داری این پایان نامه و آقای دکتر مزویان فرد که زحمت داری پایان نامه و نظارت بر جلد را متقبل شدند کمال مَشْکُور دارم.

در انتها از زحمات جناب آقای دکتر باغ‌بندی و آقای مهندس شجاعی و سرکار خانم سعیدی که در انجام این پروژه کمال مساعدت و به‌کاری را داشتند قدر دانی می‌کنم.

## چکیده

گاز طبیعی به طور معمول شامل سولفید هیدروژن و دی‌اکسید کربن است که باید قبل از مصرف از گاز جدا شوند. در این پژوهش از غشاهای خالص و بستر آمیخته پلی‌یورتان به منظور جداسازی سولفید هیدروژن از متان استفاده شده است. بدین منظور از دو نوع پلی‌یورتان بر پایه اتر و استر و همچنین از زئولیت NaX به عنوان ذرات پرکن استفاده شده است. غشاها با روش ریخته‌گری محلول پلیمری ساخته شدند. ساختار غشاهای ساخته شده توسط آزمون‌های SEM، AFM، FTIR، پایداری گرمایی آنها توسط آزمون TGA و خواص جداسازی گاز آنها توسط آزمون‌های تراوایی گاز بررسی شد. نتایج آزمون SEM پراکندگی مناسب ذرات را در بستر پلیمری نشان داد. آزمون تراوایی گازهای خالص  $\text{CO}_2$  و  $\text{CH}_4$  برای غشاهای خالص و بستر آمیخته در فشارهای ۶-۱۲ بار انجام شد. مشاهده شد که تراوایی گازها و گزینش‌پذیری  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  در غشاهای پلی‌استریورتان بالاتر است. با افزایش میزان بارگذاری زئولیت، تراوایی گازها افزایش و گزینش‌پذیری  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  کاهش یافت. در انتها برای غشای پلی‌استریورتان با ۱۰٪ نانو زئولیت X، گزینش‌پذیری  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  ۲۳/۰۳ بدست آمد. آزمون مخلوط گازهای  $\text{CO}_2$  و  $\text{CH}_4$  و مخلوط گازهای  $\text{CH}_4$  و  $\text{H}_2\text{S}$  برای غشاهایی با بهترین نتایج انجام شد. نتایج نشان داد که غشاهای خالص برای جداسازی  $\text{H}_2\text{S}$  از مخلوط گازی شامل متان بازدهی بالاتری از غشاهای پلی‌استریورتان/نانوزئولیت NaX دارند که این به علت میزان اندک سولفید هیدروژن در مخلوط گازی و همچنین کاهش تراوایی با افزایش ذرات زئولیت NaX در غشاهای بستر آمیخته است. همچنین غشاهای پلی‌یورتان برای جداسازی  $\text{H}_2\text{S}$  از مخلوط گازی حاوی متان نتیجه بهتری از جداسازی  $\text{CO}_2$  از متان نشان می‌دهند. در انتها برای غشای پلی‌استریورتان گزینش‌پذیری  $\text{H}_2\text{S}/\text{CH}_4$  ۵/۷ بدست آمد.

کلمات کلیدی: غشاهای بستر آمیخته، پلی‌یورتان، نانو زئولیت X، مخلوط گازی،

گزینش‌پذیری.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲	پیش گفتار:
۶	۱- مطالعات کتابخانه‌ای
۶	۱-۱- مقدمه
۷	۱-۱-۱- سازوکار تراوش گاز
۱۰	۲-۱- شیرین سازی گاز طبیعی توسط غشاهای پلیمری
۱۰	۱-۲-۱- غشاهای پلیمری جداسازی CO <sub>2</sub> از گاز طبیعی
۱۲	۲-۲-۱- غشاهای پلیمری جداسازی H <sub>2</sub> S از گاز طبیعی
۱۵	۳-۱- پلی‌یورتان و غشاهای تهیه شده از آن
۱۷	۱-۳-۱- مواد اولیه تشکیل دهنده پلی‌یورتان
۱۸	۲-۳-۱- سنتز پلیمر
۱۹	۳-۳-۱- تاثیر عوامل سازنده پلی‌یورتانها بر ساختار و خواص جداسازی گاز
۲۶	۴-۱- غشاهای بستر آمیخته پلی‌یورتان در جداسازی گازها
۲۶	۱-۴-۱- مقدمه‌ای بر غشاهای بستر آمیخته
۲۸	۲-۴-۱- اثرات انواع ذرات پراکنده بر روی غشا
۳۰	۳-۴-۱- زئولیت به عنوان فاز پراکنده در غشاهای پلیمری
۳۲	۴-۴-۱- مدل ماکسول برای پیش بینی تراوش در غشاهای بستر آمیخته
۳۳	۵-۴-۱- مورفولوژی مرز مشترک
۳۶	۶-۴-۱- غشاهای بستر آمیخته پلی‌یورتان در جداسازی گازها

۳۷ .....	۵-۱-غشاهای خالص و بستر آمیخته پلی‌یورتان در جداسازی $H_2S$
۴۱	<b>۲-کارهای تجربی</b>
۴۱	۱-۲- مواد
۴۲ .....	۱-۱-۲- زئولیت NaX به عنوان فاز پراکنده .....
۴۳ .....	۲-۲- روش ساخت غشاهای خالص و بستر آمیخته
۴۴	۳-۲-آزمون های شناسایی غشاهای ساخته شده
۴۴ .....	۱-۳-۲-آزمون طیف سنجی انتقال فوریه زیر قرمز (FT-IR) .....
۴۵ .....	۲-۳-۲-آزمون میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) .....
۴۵ .....	۳-۳-۲-آزمون تجزیه گرما وزنی (TGA) .....
۴۵ .....	۴-۳-۲-میکروسکوپ الکترونی اتمی (AFM) .....
۴۵ .....	۵-۳-۲- طیف سنج پراش اشعه ایکس (XRD) .....
۴۶.....	۴-۲-روش اندازه گیری تراوایی گازها در غشا
۵۱ .....	۳-نتایج و بحث .....
۵۱	۱-۳-نتایج آزمون FTIR
۵۳ .....	۱-۱-۳-مقایسه طیف FTIR پلی‌استریورتان خالص و مرکب .....
۵۵ .....	۲-۲-نتایج آنالیز XRD
۵۶	۳-۳-نتایج آزمون تجزیه گرما وزنی (TGA)
۵۸	۴-۳-ریخت شناسی غشاها توسط آنالیز AFM
۶۰.....	۵-۳-شکل شناسی غشاها با استفاده از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) .....
۶۲	۶-۳-آزمون های جداسازی گاز
۶۳ .....	۱-۶-۳- آزمون های گاز خالص .....
۷۷ .....	۲-۶-۳- آزمون مخلوط گازهای $CH_4$ و $CO_2$ در غشاهای پلی‌استریورتان/ زئولیت X .....
۷۹ .....	۳-۶-۳-آزمون مخلوط گازهای $CH_4$ و $H_2S$ در غشاهای پلی‌استریورتان/ زئولیت X .....
۸۳ .....	۴-نتیجه گیری و پیشنهادات .....

۸۳

۸۶

۸۸

۴-۱- نتیجه گیری

۴-۲- پیشنهادات

مراجع



## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- سازوکار عبور گاز از غشاهای جداسازی گاز چگال و متخلخل	۸
شکل ۲-۱- انتخاب روش مناسب برای جداسازی CO <sub>2</sub> از گاز طبیعی با توجه به غلظت CO <sub>2</sub> و شدت جریان گاز	۱۱
شکل ۳-۱- ساختار کلی پلی‌یورتانها، پلی‌ال‌ها و ایزوسیانات‌ها	۱۶
شکل ۴-۱- ساختار کلی پلی‌یورتان اوره	۱۶
شکل ۵-۱- ساختار گروه عاملی ایزوسیانات	۱۸
شکل ۶-۱- نحوه سنتز پلی‌یورتان با روش دو مرحله‌ای	۱۹
شکل ۷-۱- منحنی رابسون- رابطه بین تراوش و گزینش‌پذیری در گازها	۲۷
شکل ۸-۱- شماتیکی از غشاهای بستر آمیخته	۲۸
شکل ۹-۱- نمای شماتیکی از حالت‌های مختلف مورفولوژی مرز مشترک در غشای بستر آمیخته	۳۴
شکل ۱۰-۱- پدیده غربال در قفس	۳۴
شکل ۱۱-۱- حالت‌های غیر ایده‌ال در ساخت غشاهای بستر آمیخته	۳۵
شکل ۱-۲- ساختار شبکه‌ای ژئولیت X	۴۳
شکل ۲-۲- شمای کلی مجموعه آزمون تراوایی گازها	۴۹
شکل ۱-۳- طیف FTIR پلی‌استریورتان مورد استفاده در ساخت غشا	۵۲
شکل ۲-۳- طیف FTIR پلی‌اتریورتان مورد استفاده در ساخت غشاها	۵۳
شکل ۳-۳- طیف FTIR غشاهای پلی‌استریورتان و پلی‌استریورتان/ژئولیت X	۵۴
شکل ۴-۳- طیف FTIR غشاهای پلی‌اتریورتان و پلی‌اتریورتان/ژئولیت X	۵۵
شکل ۵-۳- آنالیز XRD ژئولیت NaX مورد استفاده	۵۶
شکل ۶-۳- آنالیز TGA برای غشاهای پلی‌استریورتان خالص و پلی‌استریورتان/نانوزئولیت X	۵۷
شکل ۷-۳- آنالیز TGA برای غشاهای پلی‌اتریورتان خالص و پلی‌اتریورتان/نانوزئولیت X	۵۸
شکل ۸-۳- آنالیز AFM غشای پلی‌استریورتان /نانوزئولیت X (۲۰٪ wt)	۵۹
شکل ۹-۳- آنالیز AFM غشای پلی‌اتریورتان /نانوزئولیت X (۲۰٪ wt)	۵۹

- شکل ۳-۱۰- عکس SEM از سطح مقطع نمونه های PU1، PU1-Ze10، PU2-Ze20، ۲۵۰۰ برابر ..... ۶۰
- شکل ۳-۱۱- عکس SEM از سطح مقطع نمونه های PU1، PU1-Ze10، PU2-Ze20، ۲۵۰۰ برابر ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۲- عکس SEM از سطح نمونه های PU1، PU1-Ze10، PU2-Ze20، ۲۵۰۰ برابر ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۳- تغییرات تراوایی گاز متان و دی‌اکسیدکربن با تغییرات فشار در غشای خالص پلی‌استریورتان ۶۳
- شکل ۳-۱۴- تغییرات تراوایی گاز متان و دی‌اکسیدکربن با تغییرات فشار در غشای خالص پلی‌اتریورتان. ۶۴
- شکل ۳-۱۵- تغییرات تراوایی گاز متان و دی‌اکسیدکربن با افزایش فشار در غشاهای پلی‌استریورتان و پلی‌اتریورتان ..... ۶۶
- شکل ۳-۱۶- تغییرات انتخاب‌پذیری CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> با افزایش فشار در غشاهای پلی‌استریورتان و پلی‌اتریورتان ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۷- تغییرات تراوایی گاز متان و دی‌اکسیدکربن با افزایش میزان زئولیت در غشاهای پلی‌استریورتان ..... ۶۸
- شکل ۳-۱۸- تغییرات تراوایی گاز متان و دی‌اکسیدکربن با افزایش میزان زئولیت در غشاهای پلی‌اتریورتان ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۹- تغییرات تراوایی گاز متان و دی‌اکسیدکربن با افزایش میزان زئولیت در غشاهای پلی‌اتریورتان و پلی‌استریورتان ..... ۷۱
- شکل ۳-۲۰- تغییرات انتخاب‌پذیری CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> با افزایش میزان زئولیت در غشاهای پلی‌استریورتان و پلی‌اتریورتان ..... ۷۲
- شکل ۳-۲۱- تغییرات تراوایی دی‌اکسیدکربن با افزایش فشار در غشاهای پلی‌استریورتان / نانوزئولیت X ..... ۷۳
- شکل ۳-۲۲- تغییرات انتخاب‌پذیری CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> با افزایش فشار در غشاهای پلی‌استریورتان / نانوزئولیت X ..... ۷۴
- شکل ۳-۲۳- تغییرات تراوایی CO<sub>2</sub> با افزایش فشار در غشاهای پلی‌اتریورتان / نانوزئولیت X ..... ۷۴
- شکل ۳-۲۴- تغییرات انتخاب‌پذیری CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> با افزایش فشار در غشاهای پلی‌اتریورتان / نانوزئولیت X ..... ۷۵
- شکل ۳-۲۵- مقایسه بازده جداسازی CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> در غشاهای پلی‌یورتان و پلی‌یورتان / نانوزئولیت X با نمودار رابسون ..... ۷۶

- شکل ۳-۲۶- مقایسه تراوایی  $\text{CO}_2$  و گزینش پذیری  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  گازی درغشاهای خالص و بستر آمیخته پلی یورتان ..... ۷۸
- شکل ۳-۲۷- مقایسه تراوایی  $\text{H}_2\text{S}$  و گزینش پذیری  $\text{H}_2\text{S}/\text{CH}_4$  گازی درغشاهای خالص و بستر آمیخته پلی یورتان ..... ۸۰

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- غشاهای مورد استفاده در شیرین سازی گاز ..... ۱۳
- جدول ۲-۱- عوامل ساختاری موثر بر خواص جداسازی گاز در پلی یورتانها ..... ۲۵
- جدول ۱-۲- خواص پلیمرهای تجاری مورد استفاده ..... ۴۱
- جدول ۲-۲- خواص فیزیکی زئولیت NaX ..... ۴۳
- جدول ۱-۳- ترکیب و کد غشاهای مورد استفاده ..... ۵۱
- جدول ۲-۳- قطر سنتیکی، چگالش پذیری و قطبش پذیری گازهای مورد مطالعه ..... ۶۴
- جدول ۳-۳- نتایج آزمون تراوایی با مخلوط گازهای متان و دی اکسید کربن ..... ۷۷
- جدول ۴-۳- نتایج آزمون تراوایی با مخلوط گازهای متان و سولفید هیدروژن ..... ۷۹

# پیش گفتار

---

## پیش گفتار:

از مهم ترین ناخالصی‌های موجود در گاز طبیعی ایران سولفید هیدروژن و دی‌اکسید کربن است که اثرات جبران ناپذیری بر انسان، محیط زیست و تجهیزات عملیاتی دارند. میزان سولفید-هیدروژن در گاز طبیعی ایران از ۶۶/۲ ppm تا ۳۲۷۰۰ ppm متغیر است. اصطلاحاً به جدا کردن این دو گاز از گاز طبیعی، شیرین‌سازی اطلاق می‌شود. این جداسازی باید تا جایی صورت گیرد که غلظت سولفید هیدروژن در خطوط لوله کمتر از ۴ ppm و غلظت دی‌اکسید کربن کمتر از ۲٪ مولی گردد [۱].

جداسازی گازها با استفاده از غشا یکی از شاخه‌های دینامیکی و در حال رشد از جداسازی گازها است. در فرآیندهای جداسازی گازی بر پایه غشا، اجزا به خاطر اختلاف تراوش‌پذیری جدا می‌شوند. فناوری غشائی به دلایلی مثل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و عملکرد کم، مصرف انرژی کم و سادگی عملکرد مورد توجه قرار گرفته است [۲].

قلب هر فرآیند غشائی خود غشا می‌باشد. به منظور بهره‌برداری کامل از غشاها در جداسازی گاز علاقه‌مندی زیادی برای یافتن مواد سازنده غشا که خواسته‌های این جداسازی را اجابت کنند، وجود دارد. ضوابط برای انتخاب ماده مورد استفاده در غشاها پیچیده است. عموماً، پایداری، بی-عیبی مکانیکی در شرایط عملکرد، و بازده جداسازی از مهمترین ضوابط برای انتخاب مواد هستند. گزینش‌پذیری و تراوش‌پذیری پارامترهای بسیار مهمی برای یک غشا هستند. معمولاً در جداسازی

گاز از غشاهای غیرمتخلخل پلیمری استفاده می‌شود که بر پایه سازوکار انحلال نفوذ کار می‌کنند. بدین صورت که ماده‌ای که می‌خواهد در غشا نفوذ کند ابتدا روی سطح غشا جذب می‌شود، سپس در غشا حل شده و در طول آن نفوذ می‌کند (این مرحله کندترین‌ترین مرحله است) و سپس از غشا دفع می‌شود و وارد جریان تراوش شده می‌شود. معمولاً پلیمرها مزیت‌های مورد نظر مکانیکی و توانایی‌های یک فرایند اقتصادی را دارند [۲].

طبق مطالعات انجام شده در بین پلیمرهای موجود عمدتاً از پلیمرهای سلولز استات، پلی‌ایمید، پلی‌یورتان، پلی‌یورتان اوره و PEBAX برای جداسازی  $H_2S$  از مخلوط گازها استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده پلی‌یورتان و پلی‌یورتان اوره بهترین نتایج را برای جداسازی سولفید هیدروژن از خود نشان داده‌اند و بهترین پلیمر برای ساخت غشاهای جداسازی سولفید هیدروژن از مخلوط گازها شناخته شدند [۳].

پلی‌یورتان‌ها گروهی از پلیمرهای لاستیکی هستند که متشکل از قطعات سخت یورتان/ اوره و قطعات نرم پلی‌اتر/ پلی‌استر می‌باشند. قطعات سخت با گسترش یک دی‌ایزوسیانات به وسیله زنجیر گسترده دی‌ال یا دی‌آمین با جرم مولکولی کم تشکیل می‌شود. اگر از زنجیر گسترده دی‌آمینی استفاده کنیم، پلی‌یورتان اوره بدست می‌آید [۳].

به منظور بهبود خواص غشاهای پلیمری مانند گزینش‌پذیری و تراوش‌پذیری ایده غشاهای بستر آمیخته<sup>۱</sup> در فناوری غشایی مطرح شد. در این غشاها ویژگی خوب غشاهای غربال مولکولی در جداسازی گازها با خواص مکانیکی و امکان‌پذیری اقتصادی پلیمرها ترکیب می‌شود. انتظار می‌رود که با اضافه کردن ذرات معدنی به پلیمرها خواص این غشاها بهبود یابد [۴]. در مطالعات گذشته از ذراتی مانند سیلیکا برای بهبود خواص غشاهای پلی‌یورتانی استفاده شده و اثراتی که این ذرات بر ساختار و تراوش‌پذیری و گزینش‌پذیری غشاهای پلی‌یورتانی دارند، بررسی شده است [۵]. در این پژوهش از ذرات زئولیت NaX برای بهبود خواص غشاهای پلی‌استریورتان (پلی‌یورتان بر پایه استر) و پلی‌اتریورتان (پلی‌یورتان بر پایه اتر) در جداسازی  $H_2S$  از مخلوط گاز شامل  $CH_4$

---

<sup>1</sup> Mixed matrix membrane

استفاده شده است. ساخت غشای بستر آمیخته پلی یورتان / نانو زئولیت NaX و همچنین جداسازی H<sub>2</sub>S توسط غشاهای بستر آمیخته پلی یورتان برای اولین بار در این پژوهش انجام شده است. به منظور بررسی ساختار و پایداری گرمایی غشاها، آنالیزهای ساختاری صورت گرفته است. آزمون های تراوایی برای گازهای خالص CO<sub>2</sub> و CH<sub>4</sub>، مخلوط گازهای CO<sub>2</sub> و CH<sub>4</sub> و همچنین مخلوط CH<sub>4</sub> و H<sub>2</sub>S در میزان بارگذاری زئولیت و فشار خوراک متفاوت انجام شده است و تاثیر این پارامترها بر تراوایی و گزینش پذیری غشاها بررسی شده است. همچنین عملکرد غشاهای پلی یورتان بر پایه اتر و استر با یکدیگر مقایسه شده است.

این پایان نامه در چهار گفتار تنظیم شده است. در گفتار نخست غشاهای مورد استفاده برای جداسازی سولفید هیدروژن در پژوهش های گذشته بررسی می شوند و نتایج آنها مورد مقایسه قرار می گیرد. در ادامه غشاهای پلی یورتان و همین طور غشاهای بستر آمیخته پلی یورتان به عنوان بهترین غشاهای پلیمری برای جداسازی سولفید هیدروژن از مخلوط گازها مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

در گفتار دوم مواد و تجهیزات مورد استفاده، روش ساخت و ارزیابی غشاها و آزمایش های تراوش گاز شرح داده خواهند شد .

در گفتار سوم نتایج بدست آمده از آزمون های تراوایی و همچنین ارزیابی های ساختاری مورد بحث و بررسی قرار می گیرند.

در گفتار چهارم نتیجه گیری نهایی مطرح می شود و پیشنهادات برای پژوهش های بیشتر در این زمینه مطرح می شود.



گفتار یکم:

مطالعات کتابخانه‌ای

---

## ۱- مطالعات کتابخانه‌ای

### ۱-۱- مقدمه

گاز طبیعی خام ترکیبی بسیار متغیر دارد که به منبع آن وابسته است اما بطور معمول متشکل از متان (۹۰٪-۳۰٪)، هیدروکربن‌های سبک همچون اتان و پروپان، آب، کربن دی‌اکسید، هیدروژن سولفید، هلیوم و نیتروژن با غلظت‌های مختلف می‌باشد. دی‌اکسید کربن و سولفید هیدروژن از مهم‌ترین ناخالصی‌های موجود در گاز طبیعی هستند. میزان سولفید هیدروژن در گاز طبیعی ایران از ۶۶/۲ ppm تا ۳۲۷۰۰ ppm متغیر است. بطور عمومی منظور از شیرین‌سازی گاز طبیعی، زدایش گازهای اسیدی (دی‌اکسید کربن، سولفید هیدروژن و مرکاپتان‌ها از قبیل متانتیول و اتانتیول) و سایر ترکیبات گوگردی از جریان گاز می‌باشد.

وجود گازهای  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  در گاز طبیعی بویژه در حضور بخار آب، می‌تواند سبب بروز خوردگی در خطوط لوله انتقال گردد. بعلاوه، سولفید هیدروژن یک گاز سمی است و گاز دی‌اکسید کربن نیز ارزش گرمایی ندارد و زدایش آن باعث افزایش ارزش گرمایی گاز طبیعی خواهد شد. همچنین با زدایش این گازها حجم گاز برای انتقال در خطوط لوله کاهش می‌یابد. این جداسازی باید تا جایی صورت گیرد که غلظت سولفید هیدروژن در خطوط لوله کمتر از ۴ ppm و غلظت دی‌اکسید کربن کمتر از ۲٪ مولی گردد [۱ و ۶].

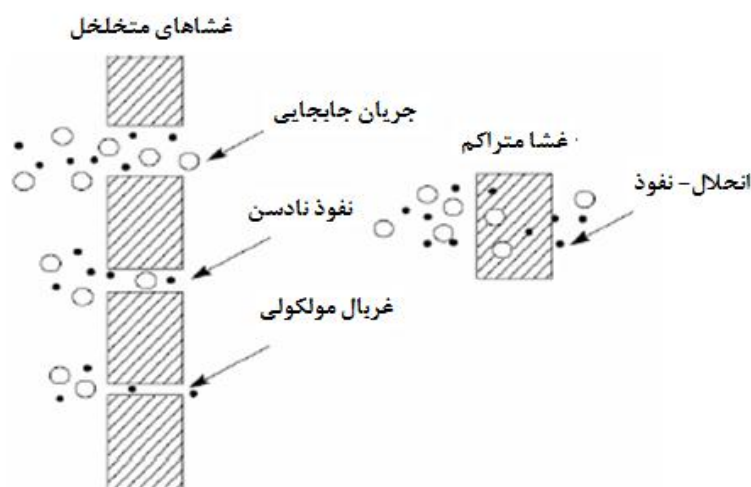
روش‌های گوناگون برای دفع گازهای اسیدی و یا به عبارت دیگر، شیرین‌سازی گاز طبیعی وجود دارد. از مهم‌ترین روش‌ها می‌توان به تبدیل گازهای اسیدی به ترکیبات دیگر، جذب سطحی روی سطح جامد، چگال کردن، روش‌های بیولوژیکی، استفاده از برج‌های جذب و فرآیندهای غشایی اشاره نمود [۷]. جذب توسط حلال، عمدتاً آمین‌ها، رایج‌ترین فرآیند می‌باشد. فرآیندهای غشایی نیز به عنوان فرآیند رقیب جذب توسط حلال و یا در برخی از موارد فرایند برتر در شیرین‌سازی گاز طبیعی به اثبات رسیده‌اند. آنها همچنین می‌توانند به عنوان یک فرآیند تکمیلی (به صورت ترکیبی با واحد جذب) بکار روند.

جداسازی گازها توسط فرایندهای غشایی به سرعت در حال رشد است. مزایای فرایندهای غشایی در جداسازی گازها سرمایه‌گذاری کم، آسانی عملیات، مصرف انرژی اندک، اندازه و وزن مناسب، کوچک بودن تجهیزات، هزینه عملیاتی کم، بازده خوب، سازگاری با محیط زیست و مناسب بودن برای نواحی دورافتاده می‌باشد. یکی دیگر از موضوعاتی که باعث رونق بیشتر این فناوری در عرصه جداسازی گاز شده است، ظهور مواد پلیمری جدید برای ساخت غشاء و عرضه غشاهای تجاری با خواص عالی از این پلیمرها می‌باشد. اما مهم‌ترین اشکال این روش جداسازی رابطه معکوس بین عبوردهی و گزینش‌پذیری بوده که غشاهای مرکب با بهبود همزمان عبوردهی و گزینش‌پذیری تا حد زیادی این مشکل را برطرف کرده‌اند.

غشاهای می‌توانند دارای ساختار همگن یا ناهمگن، متقارن و یا نامتقارن باشند و همچنین مایع و یا جامد باشند. انتقال از میان غشا می‌تواند توسط جابجایی یا نفوذ مولکولی تحت تاثیر غلظت، فشار و یا دما باشد [۸].

## ۱-۱-۱- سازوکار تراوش گاز

هم غشای متراکم و هم غشای متخلخل می‌توانند به عنوان جداساز انتخابگر گاز، مورد استفاده قرار گیرند؛ شکل ۱-۱ مکانیزم جداسازی گاز را برای این دو نوع از غشا نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱- سازوکار عبور گاز از غشاهای جداسازی گاز چگال و متخلخل

سه نوع از غشاهای متخلخل که در اندازه حفره متفاوت هستند، در این شکل نشان داده شده‌اند. اگر اندازه حفره‌ها نسبتاً بزرگ باشد، بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرون، گازها توسط جابجایی از درون حفره‌های غشاء عبور می‌کنند. اگر قطر حفره‌ها کمتر از ۰/۱ میکرون باشد، قطر هر حفره هم اندازه یا کوچکتر از مسیر آزاد مولکولهای گاز می‌باشد و نفوذ از درون حفره‌های این چینی توسط نفوذ نادرین<sup>۱</sup> انجام می‌گیرد و همچنین سرعت انتقال هر گاز با جذر وزن مولکولی آن نسبت معکوس دارد. این رابطه قانون نفوذ گراهام نامیده می‌شود.

بالاخره، اگر حفره‌های غشاء بسیار کوچک باشد (۵-۲۰ آنگستروم) گازها توسط فرآیند غریبال مولکولی از درون غشاء عبور می‌کنند. انتقال از میان این غشاء پیچیده بوده و شامل نفوذ در فاز گاز و نفوذ نمونه‌های جذب شده روی سطح حفره‌ها (نفوذ سطحی) می‌باشد. این غشاهای با حفره‌های بسیار ریز در مقیاس‌های بزرگ مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. غشاهای جداسازی گاز متخلخل بیشتر برای کارهای علمی و تحقیقاتی آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرند اما در حال حاضر جداسازی گاز بر پایه غشاهای پلیمری متراکم صورت می‌گیرد. جداسازی گاز در غشاهای

<sup>1</sup> Knudsen diffusion