

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی شیمی

جداسازی دی اکسید کربن از متان توسط غشای پلی یورتانی و نانوکامپوزیت پلی یورتان/سیلیکا

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر - صنایع پلیمر
محمد مهدی طلاکش

استاد راهنما
دکتر مرتضی صادقی



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی پلیمر - صنایع پلیمر آقای محمد مهدی طلاکش
تحت عنوان

جداسازی دی اکسید کربن از متان توسط غشای پلی یورتانی و نانوکامپوزیت پلی یورتان/سیلیکا

در تاریخ ۹۰/۱/۳۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|-------------------------------|----------------------------|
| ۱- استاد راهنمای پایان نامه | دکتر مرتضی صادقی |
| ۲- استاد مشاور پایان نامه | دکتر مهدی پورافشاری چنار |
| ۳- استاد داور | دکتر احمد محب |
| ۴- استاد داور | دکتر سید سعید نوری خراسانی |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر حمید زیلویی |

تشکر و قدردانی:

پس از شکر و سپاس خدای متعال، بر خود لازم می‌دانم که از استاد ارجمند جناب آقای دکتر صادقی که صبورانه و با راهنمایی‌ها و حمایت‌های بی دریغ و ارزنده خود، من را در پیشبرد این پژوهش یاری نمودند، تشکر نمایم و برایشان آرزوی توفیق روزافزون دارم.

از جناب آقای دکتر پورافشاری چنار، مشاور این پژوهش که از نظرات و راهنمایی‌های ارزنده‌شان بهره‌مند شدم، بسیار متشکرم.

همچنین از جناب آقای دکتر احمد محب و جناب آقای دکتر سعید نوری خراسانی که زحمت داوری این پایان‌نامه را تقبل نمودند و در جلسه دفاع از پایان‌نامه، نکات مفیدی را یادآور شدند، صمیمانه سپاسگزارم.

از دوستان عزیزم، آقایان مهدی نقش، محمد محققیان و مهدی پورقاسمی که من را در انجام این پژوهش یاری نمودند صمیمانه سپاسگزارم.

سرانجام نهایت قدردانی و تشکر و همچنین عذر تقصیر و شرمندگی را نثار می‌کنم به پدر و مادر گرانقدرم که صبورانه و فداکارانه سالیان متمادی زحمات بسیاری کشیدند و مشوق و راهنمایم در عرصه‌های مختلف زندگی بودند.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این
پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان
است.

تقدیم به

پدرم که وجودش تکیه‌گاه مطمئن و پشتوانه فرا راه تحصیل و زندگی می‌باشد.

مادرم که مظهر مهر و محبت و چشمه ایمان و اخلاق است.

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده
۲	فصل اول : مقدمه
۲	۱-۱ جداسازی دی اکسید کربن از متان
۴	۲-۱ فرایند غشایی
۵	۳-۱ انتخاب پلیمر برای ساخت غشا
۶	۴-۱ غشاهای نانو کامپوزیت
۷	۵-۱ پیکربندی پایان نامه
۸	فصل دوم : مطالعات کتابخانه‌ای
۸	۱-۲ جداسازی گاز
۱۰	۲-۲ روش‌های مرسوم حذف گازهای اسیدی
۱۱	۳-۲ تعریف غشا
۱۲	۱-۳-۲ جنس غشا
۱۳	۲-۳-۲ ساختار غشاهای پلیمری
۱۴	۴-۲ سازوکار عبور در غشاهای پلیمری
۱۶	۱-۴-۲ انتقال از میان غشاهای لاستیکی
۱۷	۲-۴-۲ انتقال از میان غشاهای شیشه‌ای
۱۸	۵-۲ غشاهای پلیمری مورد استفاده در جداسازی گازها
۲۲	۶-۲ پلی یورتان
۲۴	۱-۶-۲ مواد خام مورد استفاده در سنتز پلی یورتان
۲۶	۲-۶-۲ انتخاب پلی یورتان به عنوان غشا
۲۷	۷-۲ روش‌های ساخت غشا
۲۸	۱-۷-۲ روش جدایش فازی
۲۹	۸-۲ اصلاح پلیمرها به منظور خواص غشایی
۳۰	۹-۲ غشاهای نانو کامپوزیت
۳۰	۱-۹-۲ ساختمان غشاهای نانو کامپوزیت
۳۰	۲-۹-۲ روش‌های ساخت غشای نانو کامپوزیت
۳۱	۱۰-۲ مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه جداسازی گاز
۳۲	۱-۱۰-۲ پژوهش‌های انجام شده بر روی غشاهای پلی یورتانی
۵۸	۲-۱۰-۲ پژوهش‌های انجام شده در زمینه غشاهای نانو کامپوزیتی
۶۵	۳-۱۰-۲ نتیجه‌گیری

۶۶	هدف از پژوهش حاضر.....	۴-۱۰-۲
۶۸	فصل سوم : مواد و آزمایش‌ها	
۶۸	۱-۳ مواد اولیه سنتز و ساخت غشا از پلی یورتان.....	
۶۸	۱-۱-۳ پلی‌ال.....	
۶۹	۲-۱-۳ دی ایزوسیانات.....	
۶۹	۳-۱-۳ زنجیر گسترنده.....	
۶۹	۴-۱-۳ کاتالیست.....	
۶۹	۵-۱-۳ حلال.....	
۷۰	۲-۳ مواد اولیه سنتز نانوذرات سیلیکا.....	
۷۰	۳-۳ روش انجام کار.....	
۷۰	۱-۳-۳ تجهیزات و امکانات مورد نیاز برای سنتز پلی یورتان.....	
۷۱	۲-۳-۳ واکنش سنتز پلی یورتان.....	
۷۳	۳-۳-۳ ساخت نانوذرات سیلیکا.....	
۷۳	۴-۳-۳ ساخت غشای چگال از پلی یورتان خالص.....	
۷۴	۵-۳-۳ ساخت غشای نانو کامپوزیتی پلی یورتان/سیلیکا.....	
۷۴	۴-۳ ارزیابی پلیمرهای سنتزی و غشاهای ساخته شده.....	
۷۴	۱-۴-۳ طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR-ATR).....	
۷۵	۲-۴-۳ پراکنش اشعه ایکس زاویه باز (WAXD).....	
۷۵	۳-۴-۳ روش گرماسنجی روبشی دیفرانسیلی (DSC).....	
۷۵	۴-۴-۳ تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).....	
۷۵	۵-۳ آزمون عبوردهی گازهای خالص.....	
۷۹	فصل چهارم : تحلیل نتایج	
۷۹	۱-۴ ارزیابی غشاهای خالص و چگال پلی یورتان.....	
۸۰	۲-۴ بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی پلی یورتان سنتز شده.....	
۸۰	۱-۲-۴ مطالعه طیف‌سنجی انتقال فوریه مادون قرمز.....	
۸۴	۲-۲-۴ مطالعه رفتار گرمایی با استفاده از آزمون DSC.....	
۸۵	۳-۲-۴ مطالعه ساختار غشا توسط روش پراکنش اشعه ایکس زاویه باز.....	
۸۶	۳-۴ تراوایی گازهای خالص از میان غشای پلی یورتان.....	
۸۶	۱-۳-۴ اثر فشار بر تراوایی گازهای خالص در غشاهای پلی یورتان.....	
۹۱	۲-۳-۴ اثر دما بر تراوایی گازهای خالص در غشاهای پلی یورتان.....	
۹۳	۳-۳-۴ انتخاب بهترین ساختار و غشای پلی یورتانی.....	
۹۵	۴-۴ ارزیابی غشاهای نانو کامپوزیت پلی یورتان/سیلیکا.....	
۹۵	۵-۴ اثر نانوذرات سیلیکا بر خواص شیمیایی پلی یورتان.....	
۹۵	۱-۵-۴ مطالعه طیف‌سنجی انتقال فوریه مادون قرمز.....	
۹۹	۲-۵-۴ مطالعه شکل‌شناسی غشا با روش میکروسکوپ الکترونی روبشی.....	

۶-۴	تراوایی گازهای خالص از میان غشای نانو کامپوزیت پلی یورتان/سیلیکا	۱۰۲
	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۱۱۱
۱-۵	جمع‌بندی کلی نتایج	۱۱۱
۲-۵	پیشنهادات	۱۱۲
	مراجع	۱۱۳

فهرست شکل‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۷.....	شکل ۱-۱: منحنی رابسون برای غشاهای مختلف برای جداسازی CO ₂ از CH ₄
۱۲.....	شکل ۱-۲: طرح شماتیکی از چگونگی عملکرد غشا
۱۴.....	شکل ۲-۲: تصویر شماتیک از سه نوع متفاوت از ریخت‌شناسی غشا، (a) غشا متقارن همگن، (b) غشا نامتقارن و (c) غشا کامپوزیتی
۱۵.....	شکل ۳-۲: مراحل مختلف سازوکار انحلال-نفوذ
۱۵.....	شکل ۴-۲: اندازه و میعان‌پذیری (نقطه جوش) نسبی اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده گاز طبیعی
۱۷.....	شکل ۵-۲: شکل‌های ایزوترم معمول جذب گاز برای پلیمرها
۱۸.....	شکل ۶-۲: نمودار حجم ویژه بر حسب دما
۲۳.....	شکل ۷-۲: واکنش تک مرحله‌ای در سنتز پلی‌یورتان
۲۴.....	شکل ۸-۲: سنتز پلی‌یورتان از طریق واکنش دو مرحله‌ای
۲۵.....	شکل ۹-۲: ساختار دی‌ایزوسیانات‌های آلیفاتیک و آروماتیک مورد استفاده در سنتز پلی‌یورتان
۳۰.....	شکل ۱۰-۲: انواع مختلف غشاهای نانو کامپوزیت، (a) گروه اول و (b) گروه دوم
۳۲.....	شکل ۱۱-۲: روند افزایشی کارهای صورت گرفته در زمینه جداسازی CO ₂ /CH ₄ از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۴
۳۲.....	شکل ۱۲-۲: (a) رشته‌های مختلف توسعه یافته و (b) جداسازی گازهای مختلف همانطور که اختراعات نشان داده است
۳۳.....	شکل ۱۳-۲: تغییرات شعاع متوسط حجم آزاد با نوع پلی‌ال و مقدار قطعه سخت در پلی‌یورتان
۳۴.....	شکل ۱۴-۲: تغییرات جزء حجم آزاد با نوع پلی‌ال و مقدار قطعه سخت در پلی‌یورتان
۳۵.....	شکل ۱۵-۲: شعاع حجم آزاد به صورت تابعی از دما
۳۶.....	شکل ۱۶-۲: تغییرات شعاع حجم آزاد، R، (a) و حجم آزاد جزئی، FFV، نرمال شده با پلی‌یورتان خالص (b)، با افزایش درصد PBDO
۳۷.....	شکل ۱۷-۲: تغییرات تراوایی CO ₂ با افزایش درصد PBDO
۳۸.....	شکل ۱۸-۲: اثر روش پلیمریزاسیون بر روی عبوردهی گاز اکسیژن در غشاهای پلی‌یورتان بر پایه MDI، (o) سنتز تک‌مرحله‌ای و (●) سنتز دو مرحله‌ای
۴۱.....	شکل ۱۹-۲: رابطه میان درصد بلورینگی و مقدار قطعه سخت در غشاهای پلی‌یورتانی
۴۱.....	شکل ۲۰-۲: تأثیر مقدار قطعه سخت بر تراوایی بخار آب غشاهای پلی‌یورتانی در دمای ۴۵ °C
۴۲.....	شکل ۲۱-۲: تراوایی گازهای N ₂ ، CH ₄ ، O ₂ و CO ₂ از میان غشاهای PU1 تا PU4
۴۳.....	شکل ۲۲-۲: گزینش‌پذیری CO ₂ /N ₂ ، CO ₂ /CH ₄ و O ₂ /N ₂ از میان غشاهای PU1 تا PU4
۴۵.....	شکل ۲۳-۲: طیف انتقال فوری مادون قرمز گروه‌های کربونیل در محدوده ۱۶۰۰ تا ۱۸۰۰ cm ⁻¹ برای پلی‌یورتان‌های بر پایه پلی‌ترامتیلن‌گلاکول (a) ۱۰۰۰ و (b) ۲۰۰۰
۴۶.....	شکل ۲۴-۲: گزینش‌پذیری CO ₂ /N ₂ ، CO ₂ /CH ₄ و O ₂ /N ₂ بر حسب طول زنجیر گسترده در پلی‌یورتان‌های بر پایه PTMG1000 و PTMG2000
۴۷.....	شکل ۲۵-۲: تراوایی CO ₂ در دماهای زیر Tg به صورت تابعی از فشار بالادست برای (a) MPU6، (b) MTPUU6 و (c) TPUU6
۴۹.....	شکل ۲۶-۲: طیف انتقال فوری مادون قرمز در محدوده ۱۶۰۰-۱۸۰۰ cm ⁻¹ برای پلی‌یورتان-اوره‌های سنتز شده

- شکل ۲-۲۷: تراوایی گازهای N_2 ، O_2 ، CH_4 و CO_2 بر حسب مقدار اتصالات اوره از میان غشا پلی (یورتان-اوره) ۵۰
- شکل ۲-۲۸: گزینش پذیری CO_2/N_2 ، CO_2/CH_4 و O_2/N_2 بر حسب میزان اتصال اوره در پلی (یورتان-اوره)ها ۵۰
- شکل ۲-۲۹: تصاویر TEM پلی یورتان و پلی یورتان اوره سنتز شده ۵۲
- شکل ۲-۳۰: تراوایی گازهای CO_2 و CH_4 در غشاهای پلی یورتانی به صورت تابعی از مقدار قطعه نرم پلی سیلوکسان در فشار ۱۰۰ Torr و دمای $30^\circ C$ ۵۳
- شکل ۲-۳۱: تراوایی گاز N_2 در دمای $35^\circ C$ به صورت تابعی از فشار برای غشای پلی (دی متیل سیلوکسان-یورتان) بر پایه TDI ۵۴
- شکل ۲-۳۲: تراوایی گاز O_2 در دمای $35^\circ C$ به صورت تابعی از فشار برای غشای پلی (دی متیل سیلوکسان-یورتان) بر پایه TDI ۵۴
- شکل ۲-۳۳: تراوایی گاز CO_2 در دمای $35^\circ C$ به صورت تابعی از فشار برای غشای پلی (دی متیل سیلوکسان-یورتان) بر پایه TDI .. ۵۵
- شکل ۲-۳۴: ساختار شیمیایی پلی دی متیل سیلوکسان و الیگومرهای بر پایه پلی (پروپیلن اکساید) استفاده شده در سنتز ۵۶
- شکل ۲-۳۵: اثر مقدار PDMS بر روی گزینش پذیری CO_2/N_2 و O_2/N_2 غشاهای پلی یورتان اوره با دو قطعه نرم در فشار ۵ bar ۵۷
- شکل ۲-۳۶: تراوایی N_2 ، CH_4 و CO_2 در غشاهای PBI خالص و نانو کامپوزیتی PBI/SiO₂ بر حسب درصد وزنی سیلیکا در پلیمر ۵۹
- شکل ۲-۳۷: گزینش پذیری CO_2/N_2 و CO_2/CH_4 در غشاهای PBI خالص و نانو کامپوزیتی PBI/SiO₂ بر حسب درصد وزنی سیلیکا در پلیمر ۵۹
- شکل ۲-۳۸: رابطه بین تراوایی CO_2 و گزینش پذیری CO_2/CH_4 برای غشاهای خالص پلی سولفون و نانو کامپوزیتی پلی سولفون/سیلیکا نسبت به خط رابسون ۶۱
- شکل ۲-۳۹: منحنی های DSC غشاهای TSPU خالص و نانو کامپوزیتی TSPU/SiO₂: TSPU0 (A)، TSPU1 (B)، TSPU2 (C) و TSPU3 (D) ۶۴
- شکل ۲-۴۰: طیف های XRD غشاهای TSPU خالص و نانو کامپوزیتی TSPU/SiO₂ در دمای اتاق، TSPU0 (A)، TSPU1 (B)، TSPU2 (C) و TSPU3 (D) ۶۴
- شکل ۲-۴۱: تراوایی بخار آب در غشاهای نانو کامپوزیتی TSPU0 و TSPU/SiO₂ به صورت تابعی از دما ۶۵
- شکل ۳-۱: تصویری از سامانه خشک کردن حلال DMF ۶۹
- شکل ۳-۲: ساختار شیمیایی الف) تترا اتوکسی سیلان (TEOS) ب) ۳-گلیسیدیل اکسی پروپیل تری متوکسی سیلان (GOTMS) ۷۰
- شکل ۳-۳: تصویری از سامانه مورد استفاده در سنتز پلی یورتان ۷۱
- شکل ۳-۴: سنتز پلی یورتان از طریق واکنش دو مرحله ای ۷۲
- شکل ۳-۵: تصویری از سامانه سنتز پلی یورتان و پلی یورتان تشکیل شده درون راکتور شیشه ای ۷۳
- شکل ۳-۶: نمایی از محفظه ارزیابی غشا ۷۶
- شکل ۳-۷: منحنی نتایج عبوردهی گاز از یک غشا پلیمری طبق روش زمان تأخیر ۷۷
- شکل ۳-۸: تصویری از سامانه فشار ثابت (با سامانه کنترل دما) استفاده شده در این پروژه ۷۸
- شکل ۴-۱: طیف انتقال فوریه مادون قرمز برای پلی یورتان های پایه اتری سنتز شده ۸۱
- شکل ۴-۲: محدوده جذب گروه های کربونیل در پلی یورتان های سنتز شده ۸۲
- شکل ۴-۳: رفتار گرمایی پلی یورتان های سنتز شده بر پایه پلی ال های متفاوت توسط روش DSC ۸۵
- شکل ۴-۴: طیف اشعه ایکس مربوط به پلیمرهای سنتز شده ۸۶
- شکل ۴-۵: تراوایی پلی یورتان های سنتز شده بر حسب درصد پلی اتیلن گلایکول در قطعه نرم ۹۰
- شکل ۴-۶: گزینش پذیری پلی یورتان های سنتز شده بر حسب درصد پلی اتیلن گلایکول در قطعه نرم ۹۱

- شکل ۷-۴: عملکرد جداسازی CO₂/CH₄ غشاهای پلی یورتان پایه اتری در مقایسه با خط رابسون ۹۴
- شکل ۸-۴: عملکرد جداسازی CO₂/N₂ غشاهای پلی یورتان پایه اتری در مقایسه با خط رابسون ۹۵
- شکل ۹-۴: طیف انتقال فوریه مادون قرمز در نانوذرات سیلیکا سنتز شده در این پژوهش ۹۶
- شکل ۱۰-۴: طیف انتقال فوریه مادون قرمز در پلی یورتان PU0 با حضور نانوذرات سیلیکا ۹۶
- شکل ۱۱-۴: طیف انتقال فوریه مادون قرمز در پلی یورتان PU75 با حضور نانوذرات سیلیکا ۹۷
- شکل ۱۲-۴: طیف انتقال فوریه مادون قرمز در پلی یورتان PU100 با حضور نانوذرات سیلیکا ۹۷
- شکل ۱۳-۴: طیف انتقال فوریه مادون قرمز جذب گروه‌های کربونیل در غشا پلی یورتان PU0 / سیلیکا ۹۸
- شکل ۱۴-۴: طیف انتقال فوریه مادون قرمز جذب گروه‌های کربونیل در غشا پلی یورتان PU75 / سیلیکا ۹۹
- شکل ۱۵-۴: طیف انتقال فوریه مادون قرمز جذب گروه‌های کربونیل در غشا پلی یورتان PU100 / سیلیکا ۹۹
- شکل ۱۶-۴: عکس‌های SEM نمونه‌های پلی یورتان/سیلیکا بر پایه PU0، (الف) PU0-S30، (ب) PU0-S20، (ج) PU0-S10 و (د) PU0-S5 ۱۰۰
- شکل ۱۷-۴: عکس‌های SEM نمونه‌های پلی یورتان/سیلیکا بر پایه PU75، (الف) PU75-S30، (ب) PU75-S20، (ج) PU75-S10 و (د) PU75-S5 ۱۰۱
- شکل ۱۸-۴: عکس‌های SEM نمونه‌های پلی یورتان/سیلیکا بر پایه PU100، (الف) PU100-S30، (ب) PU100-S20، (ج) PU100-S10 و (د) PU100-S5 ۱۰۲
- شکل ۱۹-۴: تغییر تراوایی گازها در غشا نانو کامپوزیتی بر پایه PU0 با مقدار سیلیکا ۱۰۳
- شکل ۲۰-۴: تغییر تراوایی گازها در غشا نانو کامپوزیتی بر پایه PU75 با مقدار سیلیکا ۱۰۴
- شکل ۲۱-۴: تغییر تراوایی گازها در غشا نانو کامپوزیتی بر پایه PU100 با مقدار سیلیکا ۱۰۴
- شکل ۲۲-۴: گزینش پذیری جفت گازهای O₂/N₂، CO₂/CH₄، CO₂/N₂ در غشا نانو کامپوزیتی بر پایه PU0 ۱۰۷
- شکل ۲۳-۴: گزینش پذیری جفت گازهای O₂/N₂، CO₂/CH₄، CO₂/N₂ در غشا نانو کامپوزیتی بر پایه PU75 ۱۰۷
- شکل ۲۴-۴: گزینش پذیری جفت گازهای O₂/N₂، CO₂/CH₄، CO₂/N₂ در غشا نانو کامپوزیتی بر پایه PU100 ۱۰۸
- شکل ۲۵-۴: مقایسه عملکرد غشاهای نانو کامپوزیت پلی یورتان/سیلیکا تهیه شده در این پروژه در جداسازی CO₂/CH₄ ۱۱۰
- شکل ۲۶-۴: مقایسه عملکرد غشاهای نانو کامپوزیت پلی یورتان/سیلیکا تهیه شده در این پروژه در جداسازی CO₂/N₂ ۱۱۰

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲: مقایسه سامانه‌های حذف CO ₂ غشایی و آمینی	۱۱
جدول ۲-۲: تراوایی‌ها و گزینش‌پذیری‌های ایده‌آل گازهای خالص پلیمرهای سیلیکونی (فشار خوراک (g/cm ² kg ۱۰ می‌باشد)....	۱۹
جدول ۳-۲: اثر وزن مولکولی بالا و پایین (M _w) بر خواص برخی از پلیمرها	۲۱
جدول ۴-۲: گروه‌های قطبی مسئول در جاذبه بین مولکولی	۲۲
جدول ۵-۲: گروه‌های دهنده و پذیرنده پیوند هیدروژنی	۲۲
جدول ۶-۲: ساختار و ترکیب پلی یورتان‌های سنتز شده	۳۵
جدول ۷-۲: عبوردهی گاز پلی یورتان بر پایه پلی‌ال‌های مختلف تهیه شده از پلیمریزاسیون دو مرحله‌ای	۳۹
جدول ۸-۲: ترکیب و خواص فیزیکی پلی یورتان‌های سنتز شده توسط ولینسکا و همکارش	۳۹
جدول ۹-۲: تراوایی و گزینش‌پذیری ایده‌آل اکسیژن و نیتروژن در غشاهای پلی یورتانی در دمای ۳۰°C	۴۰
جدول ۱۰-۲: ترکیب غشاهای پلی یورتانی سنتز شده	۴۰
جدول ۱۱-۲: ترکیب و خواص فیزیکی پلی یورتان‌های سنتز شده	۴۲
جدول ۱۲-۲: مقایسه خواص جداسازی گاز غشاهای PU4 و PU11	۴۳
جدول ۱۳-۲: ترکیب‌ها و خواص گرمایی پلی یورتان‌های سنتز شده	۴۴
جدول ۱۴-۲: ضرایب تراوایی برای گازها در غشاهای پلی یورتانی متفاوت در فشار ۱۰ bar	۴۵
جدول ۱۵-۲: ساختار و مشخصات غشاهای تهیه شده	۴۷
جدول ۱۶-۲: تراوایی و گزینش‌پذیری گازهای مورد مطالعه در غشاهای پلی یورتانی در ۳۵°C و فشار ۱۰ اتمسفر	۴۸
جدول ۱۷-۲: ترکیب و خواص گرمایی پلی (یورتان-اوره)های سنتز شده	۴۸
جدول ۱۸-۲: ساختار و خواص فیزیکی پلی یورتان و پلی یورتان اوره‌ها	۵۱
جدول ۱۹-۲: ترکیب شیمیایی و ساختار پلی (دی‌متیل سیلوکسان-یورتان) سنتز شده	۵۴
جدول ۲۰-۲: تراوایی و گزینش‌پذیری ایده‌آل غشاهای نانو کامپوزیتی پلی ایمید پرشاخه/سیلیکا در ۷۶ cmHg و ۲۵°C	۶۰
جدول ۲۱-۲: گزینش‌پذیری ایده‌آل غشاهای پلی سولفون و نانو کامپوزیتی بر پایه MCM-41 اصلاح شده با TMCS و APTES	۶۲
جدول ۲۲-۲: ساختار و ترکیب درصد نانو سیلیکا در ساختار غشاهای نانو کامپوزیتی TSPU/SiO ₂	۶۳
جدول ۱-۴: نام و دمای انتقال شیشه‌ای پلی یورتان‌های سنتز شده	۸۰
جدول ۲-۴: تغییر فرکانس و شدت جذب گروه‌های کربونیل آزاد و پیوندی در پلی یورتان‌های سنتز شده	۸۳
جدول ۳-۴: خواص تراوایی و گزینش‌پذیری گازهای خالص برای پلیمرهای سنتز شده در دمای ۲۵°C	۸۷
جدول ۴-۴: میعان‌پذیری و قطر سینتیکی گازهای مورد مطالعه	۸۸
جدول ۵-۴: خواص تراوایی و گزینش‌پذیری گازهای خالص برای پلیمرهای سنتز شده در دماهای مختلف و فشار ۱۰ bar	۹۲
جدول ۶-۴: قله‌های جذب نمایان شده در آزمون انتقال فوریه مادون قرمز نانوذرات سیلیکا	۹۵
جدول ۷-۴: خواص تراوایی و گزینش‌پذیری گازهای خالص برای غشاهای نانو کامپوزیتی در دمای ۲۵°C	۱۰۳

چکیده

فناوری غشایی یکی از روش‌هایی است که در سال‌های اخیر به دلیل مصرف انرژی کمتر و اطمینان عملکردی بالاتر و همچنین نیاز به فضا و هزینه اولیه کمتر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و در این میان غشاهای پلیمری گزینش‌پذیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از کاربردهای مهم و رو به رشد این فرایند، جداسازی دی‌اکسید کربن از گاز طبیعی می‌باشد. بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته مشخص شد که پلیمرهای لاستیکی نظیر پلی‌یورتان‌ها در جداسازی گاز اسیدی دی‌اکسید کربن از متان می‌توانند کارایی بالایی داشته باشند. در این پژوهش، یک گروه پلی‌یورتان با قطعه سخت متشکل از هگزامتیلن دی‌ایزوسیانات (HDI) و ۴و۱ بوتان دی‌ال (BDO) و قطعه‌های نرم متفاوت شامل پلی‌تترامتیلن گلایکول (PTMG)، پلی‌اتیلن گلایکول (PEG) با وزن مولکولی ۲۰۰۰ گرم بر مول و نسبت‌هایی از PTMG:PEG سنتز شدند. نسبت مولی همه پلی‌یورتان‌های سنتز شده از دی‌ایزوسیانات:زنجیر گسترده:پلی‌ال، ۱:۲:۳ می‌باشد. خواص فیزیکی پلی‌یورتان‌ها توسط آزمون‌های DSC، FT-IR و XRD مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمون‌های XRD، DSC و FT-IR نشان داد که بلورینگی و جدایش فازی قطعه نرم و سخت، با افزایش مقدار PEG در قطعه نرم، کاهش می‌یابد که ناشی از محدود شدن تحرک زنجیره به علت برهمکنش بیشتر قطعه‌های نرم و سخت می‌باشد. به منظور شناسایی و انتخاب بهترین ساختار پلی‌یورتان برای جداسازی دی‌اکسید کربن از متان، غشاهای چگال از این پلیمرها به روش جدایش فازی گرمایی تهیه گردید و مورد ارزیابی تراوایی گازهای خالص نیتروژن، اکسیژن، متان و دی‌اکسید کربن در فشارها و دماهای مختلف قرار گرفتند. نتایج تراوایی نشان می‌دهد که با افزایش مقدار گروه اتری در ساختار (مقدار PEG در قطعه نرم)، تراوایی گازها کاهش و گزینش‌پذیری افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار گروه اتری در ساختار، پلیمر در برابر افزایش فشار از خود رفتار شیشه‌ای نشان می‌دهد و با کاهش تراوایی در فشارهای بالاتر همراه می‌شود. تراوایی دی‌اکسید کربن و متان از ۱۳۲/۵۲ و ۱۶/۲۴ در پلی‌یورتان حاوی نسبت ۱۰۰:۰ از PTMG:PEG به ۲۰/۲۶ و ۰/۶۴ بار در پلی‌یورتان حاوی نسبت ۱۰۰:۰ از PTMG:PEG (به عنوان قطعه نرم) کاهش می‌یابد و در نتیجه گزینش‌پذیری CO_2/CH_4 از ۸/۱۶ به ۳۱/۶۶ افزایش می‌یابد. پس از انتخاب پلیمر مناسب، به منظور بررسی اثر نانوذرات سیلیکا بر خواص تراوایی پلی‌یورتان و بهبود آن، نانوذرات سیلیکا به روش سل-ژل ساخته شد و غشاهای نانو کامپوزیتی پلی‌یورتان/سیلیکا بر پایه پلی‌یورتان‌هایی حاوی نسبت‌های ۱۰۰:۰، ۲۵:۷۵ و ۱۰:۱۰۰ از PTMG:PEG تهیه شد. اثر نانوذرات بر ساختار و نحوه توزیع آن در پلی‌یورتان‌ها توسط آزمون‌های FT-IR و SEM مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بیانگر توزیع مناسب ذرات در بستر پلیمر بود. افزایش نانوذرات سیلیکا (از ۰ تا ۳۰ درصد وزنی) در پلی‌یورتان حاوی نسبت‌های ۱۰۰:۰ و ۲۵:۷۵ از PTMG:PEG، منجر به کاهش تراوایی و افزایش گزینش‌پذیری CO_2/CH_4 به ترتیب از ۸/۱۶ به ۱۰/۳۴ و ۱۴/۲۱ به ۲۱/۸۵ شدند. در حالی که نانوذرات سیلیکا در پلی‌یورتان حاوی نسبت ۱۰:۱۰۰ از PTMG:PEG، منجر به افزایش تراوایی دی‌اکسید کربن و متان به ترتیب از ۲۰/۲۶ و ۰/۶۴ به ۵۰/۱۰ و ۱/۸۱ بار و کاهش گزینش‌پذیری CO_2/CH_4 از ۳۱/۶۶ به ۲۷/۶۸ شدند. بر اساس این نتایج و منحنی‌های رابسون، پلی‌یورتان حاوی نسبت ۱۰:۱۰۰ از PTMG:PEG بهترین گزینه برای جداسازی دی‌اکسید کربن از متان است.

کلمات کلیدی: غشای چگال، غشای نانو کامپوزیت، پلی‌یورتان، نانو سیلیکا، جداسازی گاز

فصل اول

مقدمه

۱-۱ جداسازی دی اکسید کربن از متان

دی اکسید کربن از گازهای اسیدی می باشد و در صورتی که با آب ترکیب شود خاصیت خوردندگی شدیدی از خود نشان می دهد و به خطوط لوله و تجهیزات آسیب می رساند. وجود دی اکسید کربن در گاز طبیعی باعث کاهش ارزش گرمایی آن و در نتیجه اتلاف ظرفیت خطوط لوله می شود.

در حال حاضر روش های زیادی برای حذف گاز دی اکسید کربن وجود دارد. از جمله این روش ها می توان به فرایندهای جذب مانند بنفیلد^۱، فرایندهای دما پایین، جذب سطحی مانند PSA^۲ و TSA^۳ و روش های غشایی اشاره نمود. هر یک از فرایندهای یاد شده دارای مزایا و معایبی می باشند اما روش غشایی خصوصاً در مواردی که دبی جریان و میزان دی اکسید کربن موجود در آن زیاد باشد، نسبت به روش های دیگر دارای برتری های فنی و اقتصادی است. فرایندهای غشایی برای حذف دی اکسید کربن در سه مورد اصلی و مهم استفاده می شوند که در زیر به آنها اشاره شده است.

- شیرین سازی گاز طبیعی
- ازدیاد برداشت از مخازن نفتی^۴ (EOR) که جریان گاز بدون دی اکسید کربن به چاه های نفت تزریق می شود.
- بازیابی دی اکسید کربن حاصل از دفن زباله ها در زمین

^۱ Benfield

^۲ Pressure Swing Adsorbtion

^۳ Thermal Swing Adsorbtion

^۴ Enhanced Oil Recovery

روش غشایی یک روش قابل قبول و دارای مزیت‌های زیاد برای تصفیه گاز طبیعی (حذف دی‌اکسید کربن) می‌باشد. اولین بار در سال ۱۹۸۱ از سامانه^۱ غشایی برای حذف دی‌اکسید کربن استفاده شده است. با توجه به مزایای سامانه غشایی و افزایش شرکت‌های دارای فناوری غشا، تعداد واحدهای غشایی حذف دی‌اکسید کربن بسیار زیاد شده است. سامانه‌های غشایی مزیت‌های عمده‌ای نسبت به روش‌های مرسوم حذف CO₂ دارند که عبارتند از:

- هزینه سرمایه‌گذاری پایین
- به عنوان مثال واحدهای غشایی به تأسیسات و امکانات اضافی نظیر ذخیره حلال و تصفیه آب که برای سایر فرایندها لازم است، نیازی ندارد.
- هزینه عملیاتی پایین‌تر
- تنها هزینه عملیاتی عمده برای سامانه‌های غشایی تک مرحله، تعویض غشا می‌باشد که از هزینه تعویض حلال یا هزینه انرژی مربوط به فناوری‌های مرسوم پایین‌تر است. حتی در سامانه‌های چند مرحله‌ای که نیازمند کمپرسورهای بزرگ می‌باشد، هزینه‌های عملیاتی نسبت به این هزینه‌ها در سایر روش‌های حذف دی‌اکسید کربن پایین‌تر می‌باشد.
- سادگی عملیاتی و قابلیت اطمینان بالا
- وزن و اشغال فضای کمتر نسبت به سامانه‌های جذب آمینی
- سازگاری و انطباق‌پذیری
- بازده طراحی
- سامانه‌های پیش‌تصفیه و غشایی تعدادی از عملیات‌ها نظیر هیدروژن‌زدایی، حذف CO₂ و H₂S، کنترل نقطه شبنم و حذف جیوه را مجتمع می‌کنند. روش‌های حذف دی‌اکسید کربن مرسوم به همه این عملیات‌ها به عنوان فرایندهای جداسازی نیازمند هستند و همچنین ممکن است به هیدروژن‌زدایی اضافی نیازمند باشند.
- تولید انرژی
- گاز تراوش کرده از سامانه‌های غشایی می‌تواند برای تولید گازهای سوختی برای تولید انرژی استفاده شود.
- دوست‌دار محیط زیست
- ایده‌آل برای مناطق دور دست
- با پیشرفت صنایع و فرایندهای غشایی، لزوم بهینه‌سازی به طوری که باعث بهبود هزینه‌های عملیاتی و محصولات شود، شدت گرفت. در سامانه‌های غشایی بهینه‌سازی در سطوح مختلفی صورت می‌گیرد:

(۱) غشا

(۲) بسته‌بندی غشا (ماژول)

(۳) سامانه

(۴) فرایند

¹ System

امروزه، بیشتر تلاش‌های صورت گرفته در زمینه بهینه‌سازی غشا بوده است [۱].

۲-۱ فرایند غشایی

گراهام^۱ اولین فردی بود که در سال ۱۸۵۰ این فرایند را با غنی‌سازی اکسیژن هوا به وسیله عبور هوا از یک غشا پلیمری (از جنس لاستیک طبیعی) نشان داد. این کشف موجب کاربردهای فراوان این روش جداسازی در قرن بعدی گردید. اولین مورد کاربرد غشا در مقیاس صنعتی جداسازی گازها در فرایند نفوذ گاز برای جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیم بود. این فرایند در ایالات متحده آمریکا و در دهه ۱۹۴۰ انجام پذیرفت. توسعه غشاهای نامتقارن^۲ با توانایی عبوردهی بالا و غشاهای پلیمری کامپوزیتی برای تصفیه آب توسط لئوب^۳ و سوریراجان^۴ در دهه ۱۹۶۰ و دیگر پژوهشگران در سال‌های بعد، حضور این غشاها را در صنعت جداسازی ممکن ساخت. توسعه و کاهش قیمت جداسازی گازها توسط غشا ادامه یافت تا اینکه در انتهای دهه ۱۹۷۰ این گروه غشایی به صورت تجاری وارد بازار شدند. اولین واحد صنعتی جداسازی از طریق غشا در مقیاس صنعتی توسط شرکت مونسانتو^۵ در سال ۱۹۷۷ برای بازیافت هیدروژن از گاز طبیعی نصب شد [۲].

غشا مانع نازک و نیمه تراوایی است که بین دو فاز (مخلوطی از اجزاء) قرار می‌گیرد و گونه‌ها را به واسطه تفاوت در نیروی محرکه (اختلاف پتانسیل شیمیایی) آنها، از یکدیگر جدا می‌کند. از مشخصه‌های عملکردی یک غشا تراوایی و گزینش‌پذیری^۶ آن است. غشاها از مواد مختلفی مانند پلیمری، فلزی و سرامیکی ساخته می‌شود [۲ و ۳]. به طور کلی، پلیمرهای مورد استفاده در غشاهای جداسازی گاز، به دو دسته پلیمرهای شیشه‌ای و لاستیکی تقسیم‌بندی می‌شوند که سازوکار انحلال-نفوذ^۷ برای عبور گازها در آنها حاکم است. این سازوکار شامل سه مرحله جذب مولکول عبوری در یک وجه غشا، نفوذ ماده عبوری از عرض غشا و واجذب (دفع) ماده عبوری از وجه دیگر غشا می‌باشد. توانایی غشا در عبور یک جزء از میان غشا را با ضریب تراوایی^۸ (P) بیان می‌کنند که حاصلضرب ضریب حلالیت^۹ (S) در ضریب نفوذ^{۱۰} (D) می‌باشد. میزان انحلال گاز (ضریب حلالیت) در پلیمر تحت تأثیر برهمکنش‌های ترمودینامیکی پلیمر-ماده نفوذی می‌باشد در صورتی که مشخصه سینتیکی ضریب نفوذ با دینامیک‌های برخورد پلیمر-ماده نفوذی تعیین می‌شود. عوامل زیادی بر ضریب حلالیت و نفوذ تأثیر گذارند. به طور کلی برای یک پلیمر مشخص، با افزایش اندازه مولکول‌های تراوش‌کننده، ضریب نفوذ کاهش می‌یابد، در صورتی که قابلیت میعان‌پذیری^{۱۱} و ضریب حلالیت افزایش می‌یابد [۲-۶].

¹ Graham

² Asymmetric

³ Loeb

⁴ Sourirajan

⁵ Monsanto

⁶ Selectivity

⁷ Solution-Diffusion Mechanism

⁸ Permeability Coefficient

⁹ Solubility Coefficient

¹⁰ Diffusion Coefficient

¹¹ Condensibility

در پلیمرهای شیشه‌ای به علت اینکه تحرک مولکولی وجود ندارد و زنجیرهای مولکولی ثابت هستند، اندازه حفرات و حجم آزاد تغییری نمی‌کند و در نتیجه اندازه اجزاء تعیین‌کننده انتقال خواهد بود و سازوکار نفوذ عامل مؤثر در جداسازی می‌باشد، در صورتی که در پلیمرهای لاستیکی به علت تحرک و انعطاف‌پذیری زنجیرهای مولکولی، اندازه حفرات و حجم آزاد ثابت نیست و اندازه اجزاء در عبور مولکول‌ها مؤثر و تعیین‌کننده نمی‌باشد، ولیکن در این گروه پلیمرها سازوکار انحلال، سازوکار غالب در عبور گاز است.

گزینش‌پذیری (α) به معنی توانایی غشا در جداسازی ماده تراوش‌یافته از ماده باقیمانده است که از نسبت ضریب تراوایی دو جزء مورد جداسازی حاصل می‌گردد. هرچه گزینش‌پذیری پلیمر بیشتر باشد غشای کمتری جهت جداسازی مورد نیاز است و بنابراین سرمایه اولیه کمتری جهت نصب سامانه جداسازی صرف خواهد شد و از سویی دیگر هرچه تراوایی پلیمر بیشتر باشد قدرت پمپ مورد نیاز جهت پمپاژ خوراک به غشا کمتر می‌شود و در نتیجه توان مصرفی سامانه جداسازی کاهش پیدا خواهد کرد و منجر به کاهش هزینه‌های جاری سامانه خواهد شد.

برای غشاها، چندین ساختار فیزیکی مثل متخلخل^۱، چگال^۲، نامتقارن و کامپوزیتی وجود دارد. اساساً، غشاهای استفاده شده برای جداسازی مخلوط‌های گازی در مقیاس آزمایشگاهی، همیشه همگن^۳، چگال و متقارن^۴ هستند زیرا آنها به آسانی ریخته‌گری^۵ می‌شوند و مستقیماً خواص جداسازی ذاتی پلیمر را ارائه می‌دهد.

روش‌های متعددی برای ساخت غشا وجود دارد اما یکی از روش‌های رایج در ساخت غشاهای چگال در مقیاس آزمایشگاهی، روش جدایی فازی^۶ می‌باشد. جدایی فازی فرایندی است که پلیمر از یک طریق کنترل‌شده از حالت مایع به جامد تغییر می‌یابد. روش جدایی فازی نیز به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که با توجه به پژوهش‌های گزارش شده بر روی پلیمرهای مختلف در حوزه جداسازی گازها، غشاهای لازم از روش جدایی فازی از طریق تبخیر حلال^۷ و جدایی فازی گرمایی ساخته شده و تحت آزمون عبوردهی گازها قرار گرفته‌اند [۶-۲].

۱-۳ انتخاب پلیمر برای ساخت غشا

در پژوهش‌های متنوعی که در زمینه جداسازی دی‌اکسید کربن از متان انجام گرفته گروه زیادی از مواد پلیمری نظیر پلی‌سولفون‌ها، پلی‌کربنات‌ها، پلی‌ایمیدها، پلی‌آمیدها، پلی‌سیلوکسان‌ها، پلی‌یورتان‌ها و همچنین آمیزه پلی‌اتر با پلیمرهای مختلف و نیز ترکیب مواد معدنی نظیر سیلیکا و زئولیت در پلیمرهای مذکور، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. اصولاً پلیمرهای شیشه‌ای تراوایی پایین و گزینش‌پذیری بالایی را از خود نشان می‌دهند در صورتی که پلیمرهای لاستیکی تراوایی بالا و گزینش‌پذیری پایینی را در جداسازی گازها به ویژه دی‌اکسید کربن ارائه می‌دهند. برای استفاده تجاری از غشاهای پلیمری در فرایندهای جداسازی، پلیمرهایی بیشتر مورد توجه می‌باشند که دارای

¹ Microporous

² Dense

³ Homogeneous

⁴ Symmetric

⁵ Casting

⁶ Phase Inversion

⁷ Solvent Evaporation

تراوایی و گزینش پذیری بالایی برای ماده مورد نظر جهت جداسازی، باشند. علاوه بر این، یک ماده غشایی باید از دوام، مقاومت شیمیایی، پایداری گرمایی و مکانیکی خوب در برابر شرایط عملیاتی برخوردار باشد و بتواند خواص جداسازی خود را در محیط و شرایط سخت و پیچیده حفظ کند و همچنین از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد [۲].

بر همین اساس و طبق پژوهش‌های صورت گرفته، پلیمرهای لاستیکی برای جداسازی گازهای میعان‌پذیرتر، قطبی و اسیدی نظیر CO_2 و H_2S ، از گازهای غیرمیعان‌پذیر، نسبت به پلیمرهای شیشه‌ای مناسب‌تر هستند [۷-۸].

از میان پلیمرهای لاستیکی، پلی یورتان‌ها با مشخصات شیمیایی مطلوب و میکروساختارهای متفاوت گزینه مناسبی هستند. پلی یورتان‌ها موادی هستند که از قطعه‌های^۱ سخت یورتان / اوره و قطعه‌های نرم پلی‌اتر / پلی‌استر تشکیل شده‌اند. قطعه‌های سخت آن از واکنش دی‌ایزوسیانات‌ها با دی‌ال / دی‌آمین و قطعه‌های نرم آن شامل یک ماکرومولکول اتری یا استری با وزن مولکولی بالا می‌باشد. تنوع در مواد اولیه پلی یورتان ساختارهای متنوع با خواص متفاوتی را فراهم می‌کند. وجود گروه‌های قطبی و بازی یورتانی و قطعه‌های نرم و قطبی اتری در ساختار باعث شده که گزینه‌ای مناسب برای جداسازی گازهای قطبی و اسیدی نظیر CO_2 محسوب شود [۹ و ۲].

۱-۴ غشاهای نانوکامپوزیت

با توجه به تعریف یک غشا، مهمترین مشخصه‌ها در انتخاب یک پلیمر به عنوان غشا، خواص تراوایی و گزینش‌پذیری آنها می‌باشد که تابعی از ساختار شیمیایی و خواص سطحی پلیمر می‌باشد. پلیمرهای آلی مورد استفاده در فرایند غشایی همیشه دارای ساختار شیمیایی و خواص سطحی مطلوب و ایده‌آل متناسب با کاربرد نهایی آنها در فرایندهای جداسازی نیستند. از آنجایی که لازمه تجاری شدن یک غشا تراوایی و گزینش‌پذیری بالا می‌باشد لذا اصلاح^۲ ساختار شیمیایی پلیمر مورد استفاده در ساخت غشا یا اصلاح سطحی غشا و پلیمر ضرورت پیدا می‌کند.

در اکثر پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه پیدا کردن رابطه میان ساختار پلی یورتان و خواص انتقالی آن مشخص شده است که با افزایش تراوایی، گزینش‌پذیری کاهش می‌یابد. از اینرو استفاده از غشا پلی یورتانی برای جداسازی گاز، به واسطه گزینش‌پذیری نسبتاً پایین آن محدود می‌شود. علاوه بر اصلاح ساختار شیمیایی پلی یورتان، روش‌های دیگری نیز برای بهبود عملکرد غشا پلی یورتانی مورد بررسی قرار گرفته است.

یکی از مهمترین روش‌های عملی برای بهبود عملکرد غشاهای پلیمری مورد استفاده در جداسازی گاز به ویژه جداسازی دی‌اکسید کربن، ترکیب مواد غیرآلی با غشا پلیمری است. نتیجه آن ظهور غشاهای بستر مختلط^۳ و نانوکامپوزیتی است که دستیابی به مشخصه‌های عملیاتی بهتر را، با نزدیک شدن و یا عبور از خط رابسون^۴ (شکل ۱-۱)، فراهم می‌نمایند.

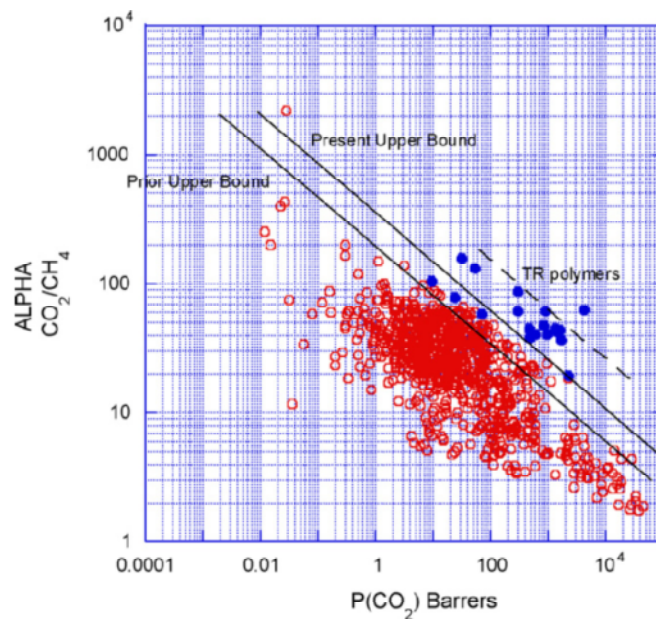
ذرات سیلیکا نمونه‌ای از این ذرات غیرآلی است که با یک توزیع مناسب به ارتقای استحکام مکانیکی و پایداری گرمایی بستر پلیمری و همچنین بهبود خواص غشایی (تراوایی و گزینش‌پذیری) کمک می‌کند [۱۰ و ۱۱].

¹ Segments

² Modification

³ Mixed Matrix

⁴ Robeson



شکل ۱-۱: منحنی رابسون برای غشاهای مختلف برای جداسازی CO₂ از CH₄ [۱۰]

اولین بار در دهه ۱۹۷۰ پول و کمپ^۱ اولین غشا بستر مختلط را ساختند که برای اولین بار زئولیت ۵Å را به پلیمر لاستیکی پلی دی متیل سیلوکسان^۲ (PDMS) اضافه کردند و بهبود در زمان نفوذ CO₂ نسبت به CH₄ را مشاهده کردند، البته به مقدار کمی تراوایی کاهش یافت [۱۲].

۵-۱ پیکربندی پایان نامه

در این پژوهش، به منظور دستیابی به ساختاری از پلی یورتان با خواص غشایی مطلوب در زمینه جداسازی CO₂ از CH₄، پنج ساختار جدید از پلی یورتان سنتز گردید و خواص غشایی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با تهیه نانو کامپوزیت پلی یورتان/سیلیکا، به بررسی تأثیر حضور سیلیکا در این غشا و بهبود خواص غشایی پلی یورتان پرداخته شد. این پژوهش در ۵ فصل تنظیم شده است. پس از مرور کلی بر این پژوهش در فصل اول، در فصل دوم به مطالعات کتابخانه‌ای شامل معرفی روش‌های جداسازی CO₂، تعریف غشا و مفاهیم آن، معرفی پلی یورتان و علل انتخاب آن برای ساخت غشا به منظور جداسازی CO₂ از CH₄ و پژوهش‌های صورت گرفته در همین زمینه بر روی پلی یورتان و همچنین اثر نانوذرات بر خواص تراوایی پلیمرها پرداخته می‌شود. فصل سوم به معرفی مواد و تجهیزات مورد نیاز برای سنتز پلی یورتان و نانوذرات سیلیکا و همچنین آزمون‌های صورت گرفته بر پلیمرهای سنتز شده و غشاهای خالص و نانو کامپوزیتی می‌پردازد. نتایج به دست آمده از آزمون‌های صورت گرفته و تحلیل آنها در فصل چهارم ارائه خواهد شد. در فصل پنجم نیز نتیجه پژوهش و پیشنهادات قابل ارائه به عنوان موضوعات پژوهشی جدید بیان خواهد شد.

¹ Paul and Kemp

² polydimethyl siloxane