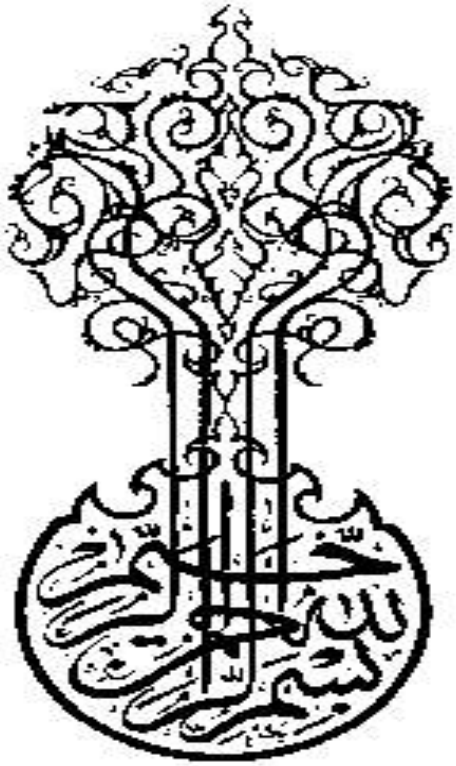
بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و

نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه رازی است.

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی گرایش طراحی فرایندها

عنوان پایان نامه

ساخت غشاء پلیمری جهت جداسازی اکسیژن از نیتروژن

استاد راهنما:

دکتر سید سیاوش مدائنی

نگارش:

مهر ماه ۱۳۸۸

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی شیمی گرایش طراحی فرایندها

نام دانشجو عنایت عنایتی

تحت عنوان

ساخت غشاء جهت جداسازی اکسیژن از هوا

در تاریخ توسط هیات داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

۱-استاد راهنمای گروه مهندسی شیمی دکتر سید سیاوش مدائنی با مرتبه علمی استاد امضاء

۲-استاد داخل گروه مهندسی شیمی دکتر مسعود رحیمی با مرتبه علمی استاد امضاء

۳--استاد خارج از گروه شیمی دکتر کیومرث بهرامی با مرتبه علمی استادیار امضاء

تقدیم به روان پاک پدر و مادرم که عاشقانه دوستشان دارم

چکیده

اکسیژن به عنوان عنصری حیاتی که در مصارف پزشکی و صنعتی نقش ویژه‌ای را ایفا می‌کند، جهت جداسازی و افزایش خلوص از منبع اصلی تامین کننده‌اش هوا توجه پژوهشگران فراوانی را به خودجلب نموده است که در این بین جداسازی آن توسط غشاء بدلیل هزینه عملیاتی کمتر و بهینه بودن، ذهن همگان را به خود معطوف نموده است، لذا این مهم ما را بر این داشت که در این زمینه تحقیقات ویژه‌ای انجام داده شاید بتوانیم در این مقوله حرکت مثمر ثمری انجام دهیم.

غشاء های صفحه ای غیرمتقارن پلی اترسولفون که از روش تغییر فاز بوجود آمده اند به عنوان غشاء زیرساختار بکار می روند. غشاء های غیرمتقارن پلی اترسولفون–سیلیکون رابر بوسیله روکش کردن غشاء زیرساختار توسط سیلیکون رابر بدست می آید. اثرات مختلف عوامل مختلف در ساخت غشاء مورد بررسی قرار گرفت که از آن جمله می توان به اثر غلظت پلی اترسولفون و سیلیکون رابر و اثر حلالهایی چون NMP و DMF و DMS روی زیرساختار و ضخامت آن و همچنین دماهای متفاوت حمام انعقاد مورد بررسی قرار گرفت و عملکرد غشاء جهت جداسازی اکسیژن از نیتروژن مورد توجه قرار گرفت تا بهترین زیرساختار غشاء مرکب جهت این کار معین گردد. سپس جهت افزایش شار در این غشاء ها ما از اضافه کننده های پلیمری چون PVDF و PVP و همچنین اضافه کنده های الکلی چون اتانول و متانول به محلول پلیمری و در مورد اضافه کننده های الکلی به حمام انعقاد استفاده نمودیم تا بدین وسیله خواص غشاء تولیدی را بهبود ببخشیم.

هدف در سری آزمایشات بالا رسیدن به بهترین زیرساختار ممکن جهت روکش کشی توسط رابرها در جهت جداسازی اکسیژن از نیتروژن بود که بهترین نتیجه ممکن حاصل گردید و آن رسیدن به بالاترین درصد خالص سازی ممکن بود که توسط زیرساختار انگشت مانند پلی اترسولفون که از سمت پروس آن روکش شده بود بدست آمد. این زیرساختار با افزودن میزانی ادیتیو الکلی به محلول پلیمری حاصل گردید.

غشاء ساخته شده از پلی‌اترسولفون – متانول که در قسمتهای قبل به عنوان بهترین غشاء در جداسازی اکسیژن از نیتروژن شناخته شد به عنوان زیر ساختار غشاء مغناطیسی قرار گرفت و پلیمرمغناطیسی fluidMAG-PAD بر روی آن روکش شد تا با اضافه کردن سطح موثر غشاء به عنوان یک سطح پوشان اثر اضافه شدن سطح موثر مورد توجه قرار گیرد و سپس تحت میدان مغناطیسی خارجی با تبدیل ذرات پارامغناطیس به ذرات مغناطیسی از اثر کمکی دو میدان خارجی و داخلی جهت جداسازی اکسیژن از هوا استفاده نمود که نتایج قابل توجهی مشاهده گردید. با افزودن میدان مغناطیسی خارجی و پی آمد آن افزوده شدن مغناطیس پذیری ذرات پارامغناطیس میزان جداسازی اکسیژن با افزایش شار این عنصر بهبود حاصل شد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول:	
۱-۱- مکانیزم های انتقال گاز در پلیمرها	۲
۱-۱-۱- مدلهای ماکروسکوپیک	۲
۱-۱-۲- مدلهای میکروسکوپیک	۳
۱-۱-۳- مدلهای ملکولی	۴
۱-۲- پلیمرهای قابل استفاده	۵
۱-۲-۱- پلیمرهای لاستیکی	۶
۱-۲-۲- پلیمرهای شیشه‌ای	۶
۱-۲-۲-۱- پلی‌استیلن‌ها	۷
۱-۲-۲-۲- پلی‌وینیل‌تری‌متیل‌سیلان	۸
۱-۲-۲-۳- پلی‌ایمیدها	۹
۱-۲-۲-۴- پلی‌کربناتهای آروماتیک	۱۰
۱-۲-۳- پلیمرهای مقاومت حرارتی	۱۱
۱-۲-۳-۱- پلیمرهای کاردوتایپ	۱۱
۱-۲-۳-۲- پلیکسودایازول‌ها و پلی‌ترایازولسندها	۱۲
۱-۲-۳-۳- پلی‌فسفازنها	۱۲
فصل دوم:	
۲-۱- مقدمه	۱۵
۲-۲- ساختار غشاءها	۱۷
۲-۲-۱- ساختار غشاءها از نقطه نظر وجود یا عدم وجود حفره	۱۷
۲-۲-۱-۱- غشاءهای متخلخل	۱۸
۲-۲-۱-۲- غشاءهای غیرمتخلخل	۱۹
۲-۲-۱-۳- غشاءهای حامل	۱۹
۲-۲-۲- ساختار متفاوت غشاءها از دیدگاه تقارن ساختاری	۲۰
۲-۲-۲-۱- غشاءهای متراکم متقارن	۲۳
۲-۲-۲-۱-۱- محلول ریخته‌گری (خمیرمانند)	۲۳
۲-۲-۲-۱-۲- تحت فشار قراردادن ماده‌مذاب	۲۴
۲-۲-۲-۱-۳- غشاهای متقارن ریزحفره	۲۶
۲-۲-۲-۱-۳-۱- پرتوافکنی	۲۶
۲-۲-۲-۱-۳-۲- کششی	۲۷
۲-۲-۲-۱-۳-۳- از صافی گذراندن	۲۸
۲-۲-۲-۲- غشاءهای باردار الکتریکی	۲۸
۲-۲-۲-۳- غشاهای نامتقارن	۲۸
۲-۲-۲-۴- غشاءهای مرکب	۴۱

۲-۲-۳- روشهای متنوعی از ساخت غشاهای الیافی ۵۱
۲-۲-۴- حلال وغیرحلالهای مطلوب در ساخت غشاء ۵۹

فصل سوم:

۳-۱- فرآیندهای جداسازی گاز ۷۱
۳-۱-۱- ساختار غشاء ۷۱
۳-۱-۲- غشاءمرکب ۷۳
۳-۱-۳- سازگاری غشاء با مواد شیمیایی ۷۷
۳-۱-۴- نمودارهای جاری فنی در زمینه جداسازی گاز ۷۸
۳-۱-۴-۱- مواد غشاءهای پلیمری ۷۸
۳-۱-۴-۲- اثر پلاستیزاسیون (نرم شدن ۸۰
۳-۱-۵- اثرات دما و فشار روی ساختار غشاء ۸۱
۳-۳-۶- طراحی فرآیند جداسازی غشائی ۸۲

فصل چهارم:

۴-۱- مقدمه ۸۹
۴-۲- بکارگیری روش تغییر فاز در ساخت غشاءهای تخت ۸۹
۴-۳- تئوری جدایش فازی و تشکیل غشاء ۹۲
۴-۳-۱- مکانیسم جدایش فازی در روش غوطه‌وری ۹۲
۴-۳-۲- مکانیسم جدایش فازی هنگام رسوب سازی حرارتی ۹۸
۴-۴- تاثیرپذیری ساختار غشاء از پارامترهای مهم فرآیند تغییر فاز ۱۰۰
۴-۴-۱- انتخاب سیستم حلال - غیرحلال ۱۰۱
۴-۴-۲- نوع پلیمر ۱۰۹
۴-۴-۳- غلظت پلیمر ۱۱۱
۴-۴-۴- ترکیب حمام انعقاد ۱۱۳
۴-۴-۵- ترکیب محلول قالبگیری ۱۱۵
۴-۴-۶- نحوه بکارگیری عوامل جهت ساخت غشاءهای متخلخل ۱۱۷

فصل پنجم:

۵-۱- جداسازی هوا توسط غشاهای پلیمری ۱۲۴
۵-۱-۱- استفاده از غشاءهای الیافی در جداسازی هوا ۱۲۹
۵-۱-۲- استفاده از نیتروژن غنی شده به عنوان یک گاز پوشش دهنده ۱۳۲
۵-۱-۳- کار برد غشاءها در تولید اکسیژن ۱۳۳

فصل ششم:

۶-۱- مراحل انجام پروژه ۱۴۳
۶-۲- مواد شیمیایی و دستگاههای لازم ۱۴۴
۶-۲-۱ پلی‌اترسولفون ۱۴۵
۶-۲-۲- سیلیکون‌رابر ۱۴۶
۶-۲-۳- پلی‌آکریل‌آمید مغناطیسی ۱۴۹

۶-۲-۴- پلی‌وینیلیدن‌فلوراید ۱۵۱
۶-۲-۵- پلی‌وینیل‌پیرولیدن ۱۵۱
۶-۲-۶- حلالها ۱۵۲
۶-۲-۶-۱- نرمال هگزان ۱۵۳
۶-۲-۶-۲- ۱-متیل ۲-پیرولیدن ۱۵۳
۶-۲-۶-۳- دی متیل سولفوکساید ۱۵۴
۶-۲-۶-۴- دی متیل فرمامید ۱۵۵
۶-۲-۷- ضد حلال ۱۵۶
۶-۲-۸- اضافه کننده‌ها ۱۵۶
۶-۲-۸-۱- اتانول ۱۵۷
۶-۲-۸-۲- متانول ۱۵۸
۶-۲-۹- گازهای مورد نیاز جهت تست غشاء ۱۵۹
۶-۲-۹-۱- اکسیژن ۱۵۹
۶-۲-۹-۲- نیتروژن ۱۶۰
۶-۲-۱۰- فیلم کش ۱۶۰
۶-۲-۱۱- سل تراوش پذیری گازی ۱۶۲
۶-۳- ساخت غشاءهای پلی اتر سولفون ۱۶۵
۶-۳-۱- تهیه محلول پلیمری جهت ساخت غشاء پلی اترسولفون ۱۶۵
۶-۴- ساخت پوشش ۱۶۷
۶-۴-۱- پوشش دهی ۱۶۷
۶-۵- ساخت غشاء با تغییر ترکیب درصد لایه جداکننده ۱۶۹
۶-۶- ساخت غشاءها با حلالهای متفاوت ۱۶۹
۶-۷- ساخت غشاءهایی با محلول پلیمری مخلوط ۱۷۰
۶-۸- ساخت غشاءهایی با محلول پلیمری حاوی الکل به عنوان اضافه‌کننده ۱۷۱
۶-۹- ساخت غشاءها درحمام انعقاد حاوی الکل به عنوان اضافه‌کننده ۱۷۲
۶-۱۰- ساخت غشاءها در دماهای متفاوتی از حمام انعقاد ۱۷۳
۶-۱۱- ساخت انواع مختلف غشاءهای مغناطیسی ۱۷۴
۶-۱۲- خطاهای موجود در اندازه‌گیری شار جریان عبوری از غشاء ۱۷۴

فصل هفتم:

۷-۱- نتایج عملکرد غشاءهای پلی‌اترسولفون به عنوان زیرلایه ۱۸۱
۷-۱-۱- آزمایش غلظت پلی‌اترسولفون به عنوان زیر ساختار غشاء مرکب ۱۸۴
۷-۱-۲- آزمایش ساختار غشاء پلی‌اترسولفون ۱۸۶
۷-۱-۳- آزمایش غلظت سیلیکون رابر به عنوان روکش غشاء مرکب ۱۸۷
۷-۱-۴- آزمایش ضخامت پلی‌اترسولفون به عنوان زیر ساختار غشاء مرکب ۱۸۹
۷-۱-۵- تغییر حلال پلی‌اترسولفون به عنوان زیر ساختار غشاء مرکب ۱۹۰
۷-۲- افزایش پلی‌وینیل‌پیرولیدن به محلول پلی‌اترسولفون ۱۹۴

۷-۳- افزایش پلی‌وینیلیدن فلوراید به محلول پلی‌اترسولفون ۱۹۵
۷-۴- پارامتر حلالیت و تفاوت پارامتر حلالیت ۱۹۹
۷-۴-۱- افزایش اتانول به محلول پلی‌اترسولفون ۲۰۱
۷-۴-۲- افزایش اتانول و متانول به محلول حمام آب جهت انعقاد پلی‌اترسولفون ۲۰۹
۷-۵- آزمایش تغییر دمای حمام انعقاد پلی‌اترسولفون ۲۱۶
۷-۶- آزمایش غشاء مغناطیسی ساخته شده به روشهای مختلف ۲۲۱
فصل هشتم:
۸-۱- نتیجه گیریهای کلی پروژه ۲۴۸
۸-۲- پیشنهادات و کارهای آینده ۲۴۸

فهرست جداول

جدول۱-۱- ضرایب عبوردهی گازهای مختلف در پلی استیلن ها ۷

جدول۱-۲- مقادیر ضرایب عبوردهی برای He و CH_4 و CO_2 و N_2 و O_2 در شش پلی ایمید ۱۰

جدول۱-۳- ضرایب عبوردهی CH_2 و CO_2 گزینش‌پذیری آنها برای سیستم CO_2/CH_4 برای این پلی‌کربنات ۱۱

جدول۲-۱- تکنیکهای روش تغییر فاز ۳۰

جدول۲-۲- بعضی مشخصات زیرلایه های استفاده شده در فرآیند تغییر فاز ۳۹

جدول۲-۲- فاکتور جداسازی برای پلیمرهای محلول ۴۷

جدول۲-۳- خواص فیزیک و شیمیایی و قیمت PES(sumikaexcel),PI(Mutrimid 5218) ۵۲

جدول۲-۴- درصد جرمی اجزاء در نمونه‌های پلیمری مختلف ۶۰

جدول۳-۱- بهینه کردن خواص پلی‌ایمیدها و پلی‌کربناتها برای بهبود گزینش‌پذیری و عبوردهی ۷۰

جدول۴-۱- حلالهای پلی سولفون و سلولز استات با امتزاج پذیری خوب با آب ۹۲

جدول۴-۲- معادلات Van Laar، Margules و Wilson جهت محاسبه ضریب فعالیت ۹۵

جدول۴-۳- دسته بندی تعدادی از سیستمهای حلال/غیرحلال ۹۸

جدول۴-۴- پلیمرهای مورد استفاده در فرآیند آلترافیلتراسیون ۹۹

جدول۴-۵- شار تراوش پذیری آب خالص در غشاء آلترافیلتراسیون پلی‌سولفون ۱۰۲

جدول۵-۱– تراوش پذیری و انتخابگری پلیمرهای مناسب برای جداسازی هوا ۱۰۸

جدول۵-۲- مقایسه فرایند یک،دو و سه مرحله ای ۱۱۳

جدول۵-۴- نمونه های غشاء های الیافی تهیه شده ۱۲۱

جدول۶-۱- هدف‌های پیگیری شده در طول پروژه ۱۲۵

جدول۶-۲- مشخصات پلی اترسولفون استفاده شده در آزمایش جهت ساخت غشاء مرکب ۱۲۶

جدول۶-۳- طول عمر سیلیکون رابر نسبت به دما ۱۲۸

جدول۶-۴- مشخصات پلی دی‌متیل‌سیلوکسان استفاده شده در آزمایش جهت ساخت غشاء مرکب ۱۳۰

جدول ۶-۵- مشخصات پلی‌آکریل‌آمید مغناطیسی استفاده شده در آزمایش جهت ساخت غشاء مرکب ۱۳۱

جدول۶-۶- مشخصات پلی‌وینیلیدن‌فلوراید استفاده شده در آزمایش جهت ساخت غشاء مرکب ۱۳۲
جدول۶-۷- مشخصات پلی‌وینیل‌پیرولیدن استفاده شده در آزمایش جهت ساخت غشاء مرکب ۱۳۳
جدول۶-۸- مشخصات NHexane استفاده شده در آزمایش جهت ساخت ۱۳۴
جدول۶-۹- مشخصات NMP استفاده شده در آزمایش جهت ساخت ۱۳۵
جدول۶-۱۰- مشخصات دی متیل سولفوکساید استفاده شده در آزمایش جهت ساخت غشاء مرکب ۱۳۶
جدول۶-۱۱- مشخصات دی متیل سولفوکساید استفاده شده در آزمایش جهت ساخت غشاء مرکب ۱۳۷
جدول۶-۱۲- مشخصات حلال اتانول ۱۳۸
جدول۶-۱۳- مشخصات حلال متانول ۱۳۹
جدول۶-۱۵- مشخصات اکسیژن استفاده شده در آزمایش جهت تست غشاء مرکب ۱۴۰
جدول۶-۱۶- مشخصات اکسیژن استفاده شده در آزمایش جهت تست غشاء ۱۴۱
جدول۶-۱۷- شرایط آزمایش ۱ مربوط به ساخت غشاءها با غلظتهای مختلف ۱۴۹
جدول۶-۱۸- مشخصات ساخت غشاءها با حلالهای متفاوت در محلول پلیمری ۱۵۰
جدول۶-۱۹- مشخصات ساخت غشاءها با اضافه‌کننده‌های پلیمری متفاوت در محلول پلیمری ۱۵۱
جدول۶-۲۰- مشخصات ساخت غشاءها با اضافه‌کننده الکلهای متفاوت در محلول پلیمری ۱۵۲
جدول۶-۲۱- مشخصات ساخت غشاءها با اضافه‌کننده الکلهای متفاوت در حمام انعقاد ۱۵۳
جدول۷-۱- الف) شار ب) گزینش پذیری غشاءهای مرکب با ۲۰و ۲۵و ۳۰ درصد وزنی PESدر NMP به عنوان زیر لایه و ۱۰ درصد وزنی PDMS به عنوان لایه فعال ۱۶۰
جدول۷-۲- الف) شار عبوری ب) گزینش پذیری حاصل از پوشش دهی پلی‌اترسولفون از دو سمت ۱۶۱
جدول۷-۳- تست دو غلظت متفاوت سیلیکون جهت روکش ۱۶۳
الف) شار عبوری ب) گزینش‌پذیری ۱۶۳
جدول۷-۴- تست ضخامت پلی‌اترسولفون به عنوان زیر ساختار غشاء مرکب الف) شار ب) گزینش‌پذیری ۱۶۴
جدول۷-۵- الف) شار و ب) گزینش‌پذیری غشاءمرکب با تغییر حلال زیر ساختار ۱۶۶
جدول۷-۶- پارامتر حلالیت و قطبیت سه حلال DMSO و DMF و DMF ۱۶۷
جدول۷-۷- الف) شار و ب)گزینش پذیری از غشاء مرکب با زیر ساختار پلی‌اترسولفون-پلی‌وینیل‌پیرولیدن ۱۶۹

جدول۷-۸- الف) شار ب) گزینش پذیری از غشاء مرکب با زیر ساختار پلی‌اترسولفون و ۱ و ۳ و ۵ درصد وزنی پلی‌وینیلیدن فلوراید ۱۷۱

جدول۷-۹- پارامتر حلالیت مخلوط NMP/Non-Solvents و تفاوت پارامتر حلالیت میان PES و مخلوط NMP/Non-Solvent ۱۷۵

جدول۷-۹- پارامتر حلالیت مخلوط H_2O/Non-Solvents و تفاوت پارامتر حلالیت میان NMP و مخلوط H_2O/Non-Solven ۱۷۶

جدول۷-۱۱- الف) شار و ب) گزینش پذیری غشاءهای حاصل از محلول پلیمری حاوی ۲۰ درصد وزنی پلی‌اترسولفون و درصدهای متنوع از اتانول ۱۷۷

جدول۷-۱۲- الف) شار و ب) گزینش پذیری غشاء های حاصل از محلول پلیمری حاوی ۲۰ درصد وزنی پلی‌اترسولفون و درصدهای متنوع از متانول ۱۸۱

جدول۷-۱۳- الف) شار عبوری ب) گزینش پذیری از غشاء مرکب با زیر ساختار پلی‌اترسولفون در حمام آب - اتانول ۱۸۸

جدول۷-۱۳- الف) شار عبوری ب) گزینش پذیری از غشاء مرکب با زیر ساختار پلی‌اترسولفون در حمام آب- متانول ۱۹۱

جدول۷-۱۴- شار عبوری الف) غشاء با ضخامت ۹۰ میکرون و ب) با ضخامت ۷۵ میکرون وگزینش پذیری غشاءهای مربوطه به ترتیب (ج و د) در دماهای متفاوت حمام غیرحلال ۱۹۳

جدول۷-۱۵- گزینش پذیری حاصل از پوشش دهی غشاء۲۰ درصد وزنی پلی‌اترسولفون ۱۵ درصد وزنی متانول از دو سمت ۱۹۸

جدول۷-۱۶- گزینش پذیری غشاء پلی اترسولفون روکش شده با ماده پارا مغناطیس fluidMAG-PAD از دو سمت ۲۰۱

جدول۷-۱۷- شار و گزینش‌پذیری دو عنصر گازی از غشاء ساخته شده از ۲۰ درصد وزنی پلی‌اترسولفون ۱۵ درصد وزنی متانول به عنوان زیرساختار و پوشش داده شده با سیلیکون از سمت زیرین و پلیمر پارامغناطیس از سمت رویین ۲۱۱

فهرست جداول

شکل۱-۲- شکل یک نوع پلی ایمید تجارتی ۹

شکل۲-۱- شماتیک فرآیند جداسازی غشائی ۱۵

شکل۲–۲- شماتیک سه نوع اصلی غشاءها ۱۸

شکل۲-۳- تقسیم بندی غشاءها بر اساس تقارن ساختاری (غشاءهای متقارن و نامتقارن) ۲۲

شکل۲-۴- روش الیاف سازی از محلول کاستینگ Kaeble ۲۳

شکل۲-۵- شماتیک فرآیند سخت شدن حرارتی ۲۴

شکل۲-۶- ساخت غشاهای فیلمی نازک، روش تحت فشار آزاد آزمایشگاهی ۲۵

شکل۲-۷- غشاهای شیار هسته ای شرکت Nuclepore ۲۶

شکل۲-۸- یک غشاء پلی کربنات تولید شده با روش حک اثر ۲۷

شکل۲-۹- عکس میکروسکوپ الکترونی از پلی پروپیلن ساخته شده به روش کششی ۲۷

شکل۲-۱۰- عکس SEM از قسمت زیر غشاءهای سلولز استات ساخته شده با زمانهای تبخیر متفاوت قبل از فروبردن در حمام غیرحلال ۳۲

شکل۲-۱۱- شماتیک فرآیند ساخت غشاءهای متخلخل با استفاده از روش جذب بخار آب ۳۴

شکل۲-۱۲- عکس SEM از ساختار یک غشاء تشکیل شده با فرآیند تبخیر حلال و جذب بخار آب ۳۵

شکل۲-۱۳- شماتیک فرآیند ساخت غشاءهای متخلخل با حفره‌های بسیار ریز با استفاده از روش سرد سازی حرارتی ۳۶

شکل۲-۱۴: شماتیک فرآیند تغییر فاز با تکنیک غوطه وری در مقیاس صنعتی ۳۷

شکل۲-۱۵- بارآوری غشاء پلی آمید(محلول ۱۵٪) قالبگیری شده بر روی ۷ بستر متفاوت موجود در جدول بالا بر حسب انرژی آزاد سطح ۴۰

شکل۲-۱۶- شماتیک یک غشاء مرکب ۴۱

شکل۲-۱۷- غشاهای تهیه شده توسط Loeb-sourirajan و Monsanto ۴۲

شکل۲-۱۸- پلیمریزاسیون در فصل مشترک ۴۳

شکل۲-۱۹- دستگاهی صنعتی تهیه غشاء در فصل مشترک ۴۴

شکل۲-۲۰- نمونه ای از دستگاه تهیه غشاء ریخته گری شده درآب ۴۵

شکل۲-۲۱- نمایی از غشاء مرکب چند لایه ۴۶

شکل۲-۲۲- دو نمونه دستگاه پلیمریزاسیون پلاسما ۴۹

شکل۲-۲۳- نمونه ای از دستگاه الیاف ساز ۵۲

شکل۲-۲۴- اثر مسافت نازل تا حمام روی عبوردهی ۵۳

شکل۲-۲۵- دستگاه ریسندگی خشک-مرطوب اصلاح شده ۵۶

شکل۲-۲۶-الف- غشاء تشکیل شده از روشی ریسنده معمولی ۵۷

شکل۲-۲۶-ب- غشاهای تشکیل شده از روشی‌ریسنده اصلاح شده ۵۸

شکل۳-۱- شکل غشاءمرکب Monsanto و شبیه سازی مقاومت آن با مقاومت الکتریکی ۶۶

شکل۳-۲- اثر تخلخل سطح روی فاکتور جداسازی H_2/CO در غشاءمرکب Monsanto ۶۹

شکل۳–۳- مواد پلیمری مختلف جهت جداسازی گازها ۷۱

شکل۳-۴- تاثیر نرم شدن روی عبوردهی غشاهای مختلف ۷۳

شکل۳-۵- اثر فشار بر روی عبوردهی ۷۷

شکل۴-۱- شماتیک فرآیند تولید صنعتی یا نیمه صنعتی غشاءهای تخت ۸۰

شکل۴-۲- شماتیک یک نوع دستگاه knife blade در مقیاس آزمایشگاهی ۸۱

شکل۴-۳- شماتیک دیاگرام فازی سه جزئی جهت بررسی تغییر رفتار محلول پلیمری تا تشکیل غشاء ۸۳

شکل۴-۴- مسیر تغییر ترکیب محلول قالبگیری تا لحظه تشکیل غشاء در دیاگرام فازی ۸۵

شکل۴-۵- تغییر ترکیب درصد لایه های مختلف فیلم قالبگیری شده جهت بهتر نشان دادن شدتهای متفاوت رسوب دادن در لایه های فیلم ۸۷

شکل۴-۶- دیاگرام فازی فرآیند تغییر فاز با تکنیک تغییر دما ۸۸

شکل۴-۷- عکس SEM از سطح یک غشاء با حفره های مجزا تهیه شده با فرآیند انعقاد حرارتی و با شدت سرد کردن کم ۸۹

شکل۴-۷- عکس SEM از قسمتی از مقطع یک غشاء الیافی با حفره های بسیار ریز تهیه شده با فرآیند انعقاد حرارتی و با شدت سرد کردن زیاد ۹۰

شکل۴-۱۰- زمان تاخیر در جدایش فازی یک محلول پلیمری شامل سلولزاستات در حلالهای مختلف ۹۷

شکل۴-۱۱- وجود یک نوع پیوند هیدروژنی در ساختار نوعی پلیمر ۱۰۱

شکل۴-۱۲- مسیر تغییرات ترکیب در سیستم سلولز استات Water/Dioxane/CA ۱۰۲

شکل۴-۱۳- تغییرات ایجاد شده در مسیر تغییر ترکیب محلول قالبگیری در نتیجه تغییر در کسر حجمی حلال موجود در حمام ۱۰۳

شکل۴-۱۴- تغییر مسیر محاسبه شده برای سیستم سلولز استات/استون/آب در سه حالت مختلف با محتوای آب موجود در محلول (۰، ۱۲/۵ و ٪۲۰) ۱۰۵

شکل۴-۱۵- نتایج آزمایش انتقال نور در سیستم سلولز استات/استون/آب با محتوای متفاوتی از آب در محلول قالبگیری ۱۰۶

شکل۵-۱- گزینش پذیری O_2/N_2 به صورت تابعی از شار اکسیژن در غشاء ۱۰۹

شکل۵-۲- فرآیند جداسازی هوا ۱۱۰

شکل۵-۳- نمودار بازیابی نیتروژن برای ۵ غشاء جداسازی مختلف در فرایند جداسازی هوا ۱۱۱

شکل۵-۴- طراحی سیستم هایی با یک ،دو و سه مرحله جداسازی برای تولید نیتروژن از هوا ۱۱۲

شکل۵-۵- نمونه ای از مدول غشائی جهت جداسازی هوا ۱۱۴

شکل۵-۶- تراوش پذیری اکسیژن و نیتروژن خالص در فشارهای مختلف ۱۱۵

شکل۵-۷- اثر دما روی عملکرد غشائی برای جداسازی اکسیژن و نیتروژن ۱۱۶

شکل۵-۸- ماکزیمم غلظت اکسیژن در جریان عبوری یک سیستم تک مرحله ای جداسازی هوا ۱۱۸

شکل۵-۹- نمایی از غشاء ساخته شده با ذرات پلاتین قرار گرفته در سطح آن (a) سطح خارجی (b) سطح داخلی ۱۲۱

شکل۵-۱۰- اثر دمای عملیاتی بر شار الکتریکی برای سه نوع غشاء الیافی تهیه شده I و II و III در دمای ساخت ۱۱۰۰،۱۱۰۰ و ۱۱۷۵ درجه سانتیگراد ۱۲۲

شکل۶-۱- پولکهای پلی اترسولفون ۱۲۷

شکل۶-۳- شماتیک فیلم کش چهار لبه ۱۴۱

شکل۶-۴- نحوه قالبگیری یک فیلم پلیمری از محلول قالبگیری با استفاده از فیلم کش ۱۴۲

شکل۶-۵- نمای کلی سل تراوش پذیری استفاده شده در جداسازی گازی با جریان از نوع ۱۴۳

شکل۶-۶- بخش ورودی جریان گاز ۱۴۳

شکل۶-۷- بخش خروجی جریان عبوری از غشاء ۱۴۴

شکل۶-۸- شماتیک نحوه حرکت جریانات در سل تراوش پذیری گاز ۱۴۵

شکل۷-۱- نمایی از دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری شار عبوری از غشاء ۱۵۷

شکل۷-۲- عکس SEM از مقطع غشاء نامتقارن پلی‌اترسولفون با غلظت پلیمر ۲۰٪ ۱۶۲

شکل۷-۳- عکس SEM از مقطع غشاء شامل ۲۰ وزنی پلی اترسولفون در حلالهای متفاوت الف) DMSO ب) DMF ج) NMP پوشش داده شده با محلول ۳ درصد وزنی PDMS ۱۶۹

شکل۷-۴- عکس SEM از مقطع غشاء شامل ۲۰ درصد وزنی پلی اترسولفون و به ترتیب الف) ۱ درصد وزنی ب) ۳ درصد وزنی ج) ۵ درصد وزنی PVDF پوشش داده شده با ۵ درصد وزنی PDMS ۱۷۴

شکل۷-۵- عکس SEM از مقطع غشاءهای حاوی ۲۰ درصد وزنی پلی‌اترسولفون و بترتیب الف) ۰ درصد وزنی ب) ۱۰ درصد وزنی ج) ۱۵ درصد وزنی د) ۲۰ درصد وزنی اتانول پوشش داده شده با ۳ درصد وزنی ۱۸۱

شکل۷-۵- عکس SEM از مقطع غشاءهای حاوی ۲۰ درصد وزنی پلی‌اترسولفون و بترتیب الف) ۰ درصد وزنی ب) ۱۰ درصد وزنی ج) ۱۵ درصد وزنی د) ۲۰ درصد وزنی متانول پوشش داده شده با ۳ درصد وزنی ۱۸۵

شکل۷-۶- عکس SEM از مقطع غشاءهای حاوی ۲۰ درصد وزنی پلی‌اترسولفون تشکیل شده در حمام حاوی بترتیب الف) ۰ درصد وزنی ب) ۱۰ درصد وزنی ج) ۱۵ درصد وزنی د) ۲۰ درصد وزنی اتانول، پوشش داده شده با ۳ درصد وزنی PDMS ۱۸۸

شکل۷-۷- عکس SEM از مقطع غشاءهای حاوی ۲۰ درصد وزنی پلی‌اترسولفون تشکیل شده در حمام حاوی بترتیب الف) ۰ درصد وزنی ب) ۱۰ درصد وزنی ج) ۱۵ درصد وزنی د) ۲۰ درصد وزنی متانول، پوشش داده شده با ۳ درصد وزنی PDMS ۱۹۱

شکل۷-۸- عکس SEM از مقطع ۲۰ درصد وزنی PES در دماهای متفاوت حمام غیرحلال الف) $7^{\circ}C$ ب) $12^{\circ}C$ ج) $25^{\circ}C$ د) $50^{\circ}C$ ح) $8^{\circ}C$ ۱۹۶

شکل۷-۹- شار عبوری از غشاء۲۰ درصد وزنی پلی‌اترسولفون-۱۵ درصد وزنی متانول از دو سمت ۱۹۸

شکل ۷-۱۰- عکس SEM از غشاء۲۰ درصد وزنی پلی‌اترسولفون-۱۵ درصد وزنی متانول بترتیب الف) مقطع کلی ب) سمت رویین ج) سمت زیرین ۲۰۰

شکل۷-۱۱- شار عبوری از غشاء پلی‌اترسولفون روکش شده با fluidMAG-PAD از دو سمت ۲۰۱

شکل۷-۱۲- عکس SEM ازسطح ومقطع دو طرف غشاء پارامغناطیس ۲۰۵

شکل۷-۱۳- شار عبوری از غشاء پلی‌اترسولفون-سیلیکون‌رابر روکش شده با ماده پارامغناطیس fluidMAG-PAD از دو سمت و بین دو لایه ۲۰۶

شکل۷-۱۴- عکس SEM از غشاء پلی اترسولفون- سیلیکون رابر روکش شده با fluidMAG-PAD روی لایه سیلیکونی ۲۰۷

شکل۷-۱۵- عکس SEM از غشاء پلی‌اترسولفون روکش شده با سیلیکون رابر و fluidMAG-PAD ۲۰۹
شکل۷-۱۶- اثر میدان مغناطیسی خارجی روی ذرات پارامغناطیس ۲۱۰
شکل۷-۱۷- شکل مدول تست گازی غشاء مغناطیسی ۲۱۱

فصل اول

پلیمرهای مورد استفاده در ساخت غشاء گازی