

ساخت غشای پلی دی متیل سیلوکسان و اصلاح خواص آن توسط نانوذرات TiO₂ جهت جداسازی آب و اتانول در فرایند تراوش تبخیری

حسن پهلوان زاده*، زهرا انور

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

حذف ترکیبات آلی فرار مانند اتانول، یکی از چالش برانگیزترین و اساسی ترین دغدغه های امروزه بر طبق سیاست های جدید زیست محیطی می باشد. با توجه به مضرات این ترکیبات و تاثیرات مهمی که بر محیط زیست و حیات موجودات دارند، تصفیه مناسب آنها و جلوگیری از ورود این ترکیبات به محیط، امری مهم تلقی می شود. در این تحقیق، جداسازی اتانول به عنوان یک ترکیب آلی فرار با استفاده از غشای خالص PDMS و غشای نانوکامپوزیت PDMS/TiO₂ با درصدهای متفاوت نانوذره طی فرایند تراوش تبخیری مورد بررسی و پارامترهای عملیاتی نظیر تاثیر دما، تاثیر غلظت اتانول و همچنین تاثیر افزایش درصد نانوذره بر عملکرد تراوش تبخیری مورد مطالعه قرار گرفت. از آنالیز SEM (میکروسکوپ الکترونی روبشی) جهت بررسی ساختار و مورفولوژی غشاها، آنالیز CA (زاویه تماس) جهت سنجش میزان آبگریزی غشاها، آنالیز TGA جهت بررسی مقاومت دمایی غشاها و همچنین از آنالیز FTIR جهت مشاهده ی گروه های پیوندی موجود در غشاها استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده، افزایش دما سبب افزایش جنبش و تحرک مولکولی و به دنبال آن افزایش شار کل را به دنبال دارد. با افزایش میزان شار عبوری آب، فاکتور جداسازی به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. به طوری که با افزایش دما از ۳۰ به ۶۰ درجه سانتی گراد، فلاکس با افزایش دو برابری و ضریب جداسازی از ۱۱/۲ به ۴/۲ (Kg/m².h) کاهش می یابد. با افزودن نانوذره به غشا، در ابتدا افزایش میزان گزینش پذیری غشا و سپس کاهش آن مشاهده شد. این امر می تواند به دلیل کلوخه شدن نانوذره در غلظت های بالای آن باشد. به طور کلی غشای نانوکامپوزیت حاوی درصد ۰/۱٪ نانوذره با داشتن گزینش پذیری ۱۱/۲ و شار ۱۲۳۰ Kg/m².h بهترین گزینش گری را از خود نشان داده است. حقوق ناشر محفوظ است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۴ مهر ۱۴۰۲

دریافت پس از اصلاح: ۲۱ اسفند ۱۴۰۲

پذیرش نهایی: ۲۸ اسفند ۱۴۰۲

کلمات کلیدی:

تراوش تبخیری

نانوذرات تیتانیوم دی اکسید

اتانول

جداسازی

غشا

پلی دی متیل سیلوکسان

* عهده دار مکاتبات

pahlavzh@modares.ac.ir

مقدمه

(OF)^۴ میکروفیلتراسیون (MF)^۵ و ... از جمله فرایندهای فیلتراسیون غشایی می‌باشند. میکروفیلتراسیون از قدیمی‌ترین این فرایندها می‌باشد.

رسوب شیمیایی، احتراق و فن‌آوری پلاسما برای حذف ترکیبات آلی فرار استفاده می‌شوند، اما پسماندهای حاصل از آن ممکن است موجب اثرات منفی زیست‌محیطی شود [۱۳].

تراوش تبخیری می‌تواند برای حذف مواد آلی فرار از آب و تغلیظ آنها برای بازیافت اقتصادی استفاده شود. با توجه به اینکه در این روش با مقادیر کم ترکیبات آلی سروکار داریم، غشاهای مورد استفاده باید از نوع آبگریز باشند. غشاهای کاربردی در این زمینه پلیمرهای لاستیکی مانند لاستیک سیلیکون، پلی‌بوتادین، کاپلیمرهای پلی‌اتر و پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان می‌باشند [۳].

فرایند تراوش تبخیری یک فناوری جداسازی مبتنی بر غشا می‌باشد که می‌توان گفت مزایای آن نسبت به سایر روش‌های جداسازی نظیر تقطیر در جذب مواد آروتروپیک حساس به دما، جداسازی ترکیبات آلی و تصفیه آب کاملاً مشهود است. دلیل نامگذاری این فرایند تغییر فاز اجزا پس از تراوش در غشا می‌باشد. در این روش مخلوطی که حاوی دو یا چند جزء با فراریت و میل ترکیبی متفاوت هستند از غشا که بعنوان یک حائل هوشمند عمل کرده جدا می‌شوند. در این فرایند، در حین نفوذ، مخلوط خوراک در تماس مستقیم با یک طرف غشاء قرار گرفته و در همین حین، در سمت دیگر غشاء تراوش صورت می‌گیرد [۱۱].

مکانیزم انتقال جرم در فرایند تراوش تبخیری، مکانیزم انحلال نفوذ از طریق غشاهای غیر متخلخل می‌باشد. در این مکانیزم جزء مورد نظر از توده مایع به لایه مرزی مایع و غشا نفوذ کرده و درون اجزای غشا حل می‌شوند. پس از آن جز گزینشی در شبکه غشایی حل شده و به فاز بخار رفته و تراوش می‌یابد.

جداسازی مخلوط‌های مایعات با استفاده از تبخیر جزئی هر کدام از اجزاء از طریق غشاء (متخلخل یا غیر متخلخل) مورد اصلی مبحث تراوش می‌باشد. این امر سبب جمع‌آوری جزء نفوذی (بخار) می‌شود که ممکن است با ایجاد جریان و یا اعمال فشار از بین برود. نیروی محرکه برای فرایند تراوش اختلاف پتانسیل شیمیایی می‌باشد که

امروزه با افزایش جمعیت و به تبع، افزایش اجتناب‌ناپذیر پساب‌های صنعتی و آلودگی‌های ناشی از آن، تصفیه و بازیابی این مواد، بیش از پیش مورد توجه محققین قرار گرفته است. فناوری‌های جداسازی مرسوم نظیر تقطیر، تصفیه بیولوژیکی، استخراج مایع-مایع و جذب سطحی به وسیله کربن، روش‌هایی هستند که قبلاً در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما با توجه به هزینه‌های بالای عملیاتی و نیازمند بودن این فرایندها به جداسازی ثانویه و بازیابی جاذب‌ها، از نظر اقتصادی مقرون بصره نمی‌باشند. از سوی دیگر، روش‌های بیولوژیکی، علی‌رغم داشتن هزینه‌های جداسازی پایین‌تر، به شدت زمان‌بر بوده و احتمال عدم موفقیت آنها به دلیل کارکرد نامناسب در اثر از بین رفتن میکروارگانیسم‌های حساسیت به مواد آلی در آنها وجود دارد [۱].

یکی از جدیدترین و خطرناک‌ترین این آلاینده‌ها، ترکیبات آلی فرار (VOC)^۱ می‌باشند که به دلیل این که مقدار آنها در آب و پساب‌ها بسیار ناچیز می‌باشد، تصفیه آنها از روش‌های مرسوم نظیر تقطیر می‌تواند بار اقتصادی زیادی را دارا باشد. با وجود زیان‌بار بودن ترکیبات آلی فرار، این مواد جزو ترکیبات بسیار ارزشمند در صنعت بوده و بازیابی و آزدایی آنها نیز امری بسیار مهم تلقی می‌شود. تصفیه این مواد به دو روش تقطیر غشایی و تراوش تبخیری صورت می‌گیرد که روش تراوش تبخیری به دلیل مصرف انرژی حرارتی کم‌تر و سادگی فرایند، بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱ و ۲].

ترکیبات فرار، به ویژه هیدروکربن‌های آروماتیک، به شدت سمی بوده و باعث خطرات زیست‌محیطی زیان‌آوری می‌شوند. علاوه بر این، شدت ترکیبات فرار معمولاً در هوا، آب و خاک برای سال‌ها با هم باقی می‌ماند، مگر اینکه به طور کامل حذف شوند. با وجود زیان‌بار بودن ترکیبات آلی فرار، این مواد جزو ترکیبات بسیار ارزشمند در صنعت بوده و بازیابی و آزدایی آنها نیز امری بسیار مهم تلقی می‌شود. امروزه فناوری جداسازی غشایی به سرعت در حال رشد و توسعه است. بسیاری از این فرایندها در نیم قرن اخیر کاملاً توسعه یافته‌اند و علاوه بر مصارف آزمایشگاهی و آکادمیک، در واحدهای بزرگ صنعتی نیز به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. اسمز معکوس (RO)^۲، نانوفیلتراسیون (NF)^۳، اولترافیلتراسیون

^۴ Ultrafiltration^۵ Microfiltration^۱ Volatile organic compounds^۲ Reverse Osmosis^۳ Nanofiltration

متناظر با گرادیان غلظت بین فازها در سمت مخالف غشاء است [۱۲].

در سال ۲۰۰۴، لی لای^۱ و همکارانش، به منظور جداسازی ترکیبات متانول، اتانول، n-پروپانول و استون از آب، غشای کامپوزیتی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان-سلولزاستات را تهیه کردند. آزمایش‌ها به منظور بررسی تاثیر شرایط عملیاتی نظیر دما، غلظت و ... بر عملکرد تراوش تبخیری انجام شد و نتایج نشان داد که غشا دارای شار کل بالایی می‌باشد. برای تحلیل رفتار سیستم از مدل مقاومت سری استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب انتقال جرم در لایه مرزی، متناسب با Re₀ می‌باشد و با دما بصورت نمایی افزایش می‌یابد. ضریب انتقال جرم در غشا با رابطه آرنیوس مطابقت داشته و مستقل از وضعیت جریان بود [۴].

در سال ۲۰۱۱، پینگ پنگ^۲ و همکارانش، به منظور جداسازی اتانول از آب، تاثیر افزودن نانوذرات سیلیکا به غشاهای کامپوزیت پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان-سلولزاستات را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات سیلیکای اصلاح شده، عملکرد تراوش تبخیری را به طور قابل توجهی بهبود بخشید. بعنوان مثال با افزودن مقدار ۵ درصد وزنی نانوذره به غشا جهت جداسازی ترکیب ۵ درصد وزنی اتانول-آب در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، شار تراوایی به ۲۰۰ Kg/m².h و ضریب جداسازی به حداکثر میزان خود یعنی ۱۹ رسید [۵].

دی سان^۳ در سال ۲۰۱۳، غشای نانوکامپوزیتی نانوسیلیکای اصلاح شده (ONS) به همراه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان را جهت جداسازی ترکیب آب/اتانول مورد بررسی قرار داد. با توجه به نتایج موجود، افزایش درصد ONS از صفر به ۱۰ درصد وزنی، گزینش‌پذیری را از میزان ۲۱/۸۷ به ۳۸/۸۵ افزایش داد. همچنین با افزایش دما از ۳۰ به ۷۰ درجه سانتی‌گراد، گزینش‌پذیری افزایش و سپس به میزان اندکی کاهش یافت. در ۵ درصد وزنی نانوذره، غشا با داشتن فلاکس ۲۱۰ Kg/m².h و ضریب جداسازی ۴۲/۳ بهترین عملکرد خود را داشته است [۶].

با گذشت زمان، در سال ۲۰۱۸، هونگ گنگ ژن^۴، با آماده سازی غشای شبکه آمیخته PDMS/MOF و همراه با نانوذره ZIF-8 اقدام به جداسازی ترکیب آب-اتانول به وسیله فرایند تراوش

تبخیری کرد. نانوذرات ZIF-8، غشا را با افزایش تمایل به اتانول آبریزتر کرده و پایداری حرارتی آن را نیز بهبود بخشید. در این پژوهش، غشای نانوکامپوزیت با ۵ درصد وزنی نانوذره، عملکرد بهتری را با داشتن شار تراوایی ۱۷۷۸ Kg/m².h در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد [۷].

سیکدار و دوتا^۵ در سال ۱۹۹۹، غشاهای کوپلیمر SBS را جهت جداسازی و بازیابی VOC از محلول‌های آبی با استفاده از فرایند تراوش تبخیری مورد بررسی قرار دادند و ضریب جداسازی برای VOC شامل تری‌کلرواتان و تولوئن را بالاتر از ۵۰۰۰ بدست آوردند. نتایج نشان داد که مقدار شار برای تری‌کلرواتان و تولوئن به ترتیب ۵۵/۷ و ۹g/m².h می‌باشد [۸].

بونومنا^۶ و همکارانش در سال ۲۰۰۱، کوپلیمر SBS با درصدهای متفاوت PS، ۲۱ و ۲۸ درصد وزنی در حلال‌های تولوئن، کلروفرم، تتراهیدروفوران و سیکلوهگزان حل کردند. آنها طی این پژوهش دریافتند که جداسازی اتانول از آب بعنوان یک VOC در غشاهای SBS تحت تاثیر غشاهای نانساختاری می‌باشد که می‌تواند با تغییر حلال مورد نظر برای ساخت غشا تنظیم شود.

در سال ۲۰۲۲، جان هروین برمودز جیمز^۷ و همکاران، غشای کامپوزیتی PDMS/PTFE را جهت جداسازی ترکیب آب/اتانول مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که غشای کامپوزیتی با ساختار آمورف و با خاصیت آبریزی بالایی نسبت به غشای خالص PDMS، با حفظ فاکتور جداسازی (۸/۶) در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، قابلیت افزایش شار به میزان چشم‌گیری را دارا هستند. در این تحقیق، غشاهای کامپوزیتی با ضخامت زیر میکرون (۷۰۰ نانومتر) با استفاده از روش پوشش‌دهی ساخته شده‌اند. ساختار آمورف لایه انتخابی PDMS با ضخامت تغییری نکرده و ثابت باقی ماند [۹].

در این مقاله برای نخستین بار، به ساخت و بررسی غشای پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان جهت جداسازی اتانول به عنوان یکی از ترکیبات آلی فرار پرداخته شده است. در ادامه تاثیر افزودن نانوذرات تیتانیوم‌دی‌اکسید و ساخت غشای نانوکامپوزیت جهت جداسازی بررسی شده است. در انتها شرایط عملیاتی متفاوت مانند

^۵ Dutta

^۶ Bounomena

^۷ John Herwin Bermudes Jaimes

^۱ Lei li

^۲ Ping peng

^۳ De sun

^۴ Hong Gang Zhen

از خشک شدن با توجه به سایز نگه دارنده‌ی غشایی برش می‌خورد و آماده‌ی استفاده می‌گردد.

تاثیرات دما، درصد وزنی اتانول و میزان نانوذره در ماتریس پلیمری مورد بحث قرار گرفته است [۹].

سنتز غشاهای نانوکامپوزیت PDMS/TiO₂

به منظور ساخت غشاهای نانوکامپوزیت PDMS/TiO₂ با درصد وزنی‌های ۰/۱٪ و ۰/۵٪ و ۱٪، در ابتدا مقدار معینی از پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با همان نسبت ۱۰:۱ وزن شده و پس از آن مقدار مشخصی از نانوذره با درصد وزنی‌های ذکر شده توسط ترازو توزین شده و به همراه حلال به ترکیب پلیمری اضافه می‌شود. محلول حاوی نانوذره به مدت نیم ساعت توسط همزن مغناطیسی با سرعت ۶۰۰ rpm هم زده می‌شود و سپس به مدت یک ساعت در دستگاه التراسونیک قرار داده می‌شود. محلول پلیمری درون پتری دیش ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و در حالت سکون جهت حباب‌زدایی قرار داده می‌شود. پس از آن به مدت ۳۰ دقیقه در آون خلاء با فشار ۰/۸ bar و سپس در آن اتمسفری با دمای ۷۰ °C به مدت ۸ ساعت گرم می‌شود. با گذشت این زمان، غشا توسط کاتر از پتری دیش جدا شده و آماده استفاده می‌باشد.

بخش تجربی

مواد آزمایشگاهی

در این پژوهش پلیمر PDMS با فرمول شیمیایی (C₂ H₆ OSi)_n به منظور سنتز غشا بکار گرفته شد. به همین منظور از پلیمر سیلگارد ۱۸۴ (sylgard 184) تهیه شده از شرکت Dow Corning آمریکا، شامل sylgard 184A (base) و sylgard 184B (curing agent) استفاده شد. همچنین از نانوذرات TiO₂ از تولیدات شرکت دگوسا آلمان استفاده شده است. این نانوذره به صورت ترکیبی از ۸۰٪ آنتاز و ۲۰٪ درصد روتایل می‌باشد. حلال مورد استفاده برای ساخت غشا در این پژوهش تولوئن و خوراک فرایند جداسازی مخلوط آب و اتانول، در غلظت‌های مختلف اتانول بوده است. اتانول از شرکت دکتر مجلی و تولوئن از شرکت مرک آلمان خریداری گردیده است.

سنتز غشاهای PDMS خالص

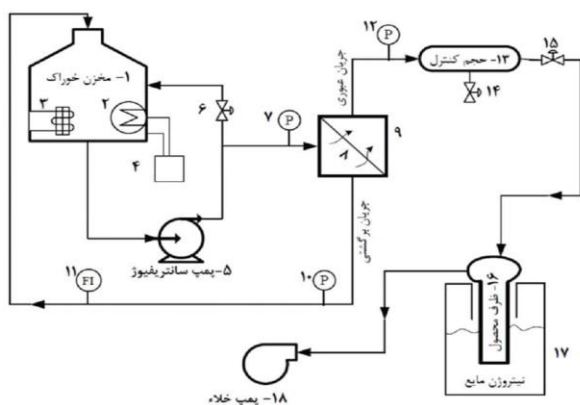
به منظور آماده سازی محلول غشاها، sylgard 184A به عنوان محلول پایه و sylgard 184B با نسبت وزنی 10:1 مخلوط می‌شوند. ۲۰ گرم تولوئن به عنوان حلال برای حل کردن ۱۰ گرم از PDMS به پلیمر اضافه شده و مخلوط روی مخلوط کننده‌ی اوربیتالی با سرعت ۶۰۰ rpm برای مدت ۱۵ تا ۳۰ دقیقه به شدت هم زده می‌شود. سپس ۱۰ میلی‌لیتر از محلول درون ظروف بشقابی مانند شیشه‌ای که به آنها اصطلاحاً پتریدیش گفته می‌شود، به آرامی ریخته شده و به منظور جلوگیری از چسبیدن غشا به ظروف شیشه‌ای از ورق تفلون استفاده می‌گردد. (به منظور حباب‌زدایی از محلول، این ترکیب به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و کاملاً بدون حرکت، در یک سطح صاف و هموار قرار داده شد). پس از آن، پتری دیش‌ها درون آون خلا قرار داده می‌شوند، فشار خلا ۰/۸ bar برای مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق بکار گرفته و سپس به داخل آون اتمسفری با دما ۷۰ °C منتقل شده و برای مدت ۸ ساعت گرم می‌شوند. غشای ساخته شده با شست و شوی با آب و با استفاده از کاتر، از پتریدیش‌های پیرکس کنده شده و بعد

دستگاه آزمایشی تراوش تبخیری

این پژوهش با استفاده از دستگاه تراوش تبخیری ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است. مهم‌ترین بخش‌های این دستگاه در شکل (۱) نشان داده شده است. مخزن خوراک به ابعاد ۲۰*۲۰*۳۰ cm از جنس استیل ۳۱۶ ساخته شده است. در این مخزن یک گرمکن برای افزایش دمای خوراک و یک کویل آب سرد برای کاهش دمای خوراک در مواقع لازم، تعبیه شده است. در داخل این مخزن همچنین، یک حسگر جهت نشان دادن دمای محلول نصب شده است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، برای کنترل فشار در سمت خوراک و نیز تنظیم دمای مخزن از یک مسیر بازگشتی برای پمپ و مخزن استفاده شده است. این کار باعث می‌شود که دمای محلول به خوبی با بازگشت به داخل مخزن تنظیم شود. در غیر اینصورت، دمای محلول تا حد زیادی گرم شده و آزمایش مربوطه در شرایط غیرمدمای انجام می‌شود. پس از این قسمت، جریان به سمت محفظه‌ی غشایی حرکت می‌کند و پس از برخورد با غشا به دو قسمت تقسیم می‌شود، یکی جریان عبور نکرده یا بازگشتی که به داخل مخزن خوراک

- ۱۵- شیر کنترلی؛ به منظور برقراری شرایط خلاء در سیستم در مواقع نمونه‌گیری محصول
- ۱۶- تله شیشه‌ای؛ برای جمع‌آوری محصول مایع شده‌ی نهایی
- ۱۷- مخزن نیتروژن مایع
- ۱۸- پمپ خلاء؛ برای ایجاد نیروی محرکه انتقال جرم به صورت بخار از غشا

غشاها پس از آماده‌سازی در شرایط دمایی (۳۰ الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد) و غلظت‌های گوناگون (۲ و ۵ و ۱۰ درصد وزنی اتانول) در فرایند تراوش تبخیری مورد بررسی قرار گرفتند. قبل از شروع فرایند، ابتدا با روشن کردن پمپ سانتریفیوژ و تنظیم دمای عملیاتی بر روی کنترلر، فرصتی تقریباً یک ساعته برای چرخش مایع خوراک در سراسر دستگاه به منظور رسیدن به وضعیت یکنواخت دمایی و در تعادل قرار گرفتن مایع خوراک با سطح غشا داده می‌شد. سپس فرایند تراوش تبخیری با روشن کردن پمپ خلاء و باز کردن شیر نصب شده در خروجی از حجم کنترل (شیر شماره ۱۵)، آغاز می‌شد. در تمامی آزمایش‌ها فشار نسبی برای خوراک ۲ atm و فشار خلاء ایجاد شده در سیستم ۵ mmHg بود و دبی رواتمتر نصب شده بر سر راه جریان برگشتی نیز ثابت و برابر ۱ L/h تنظیم شد. مدت زمان فرایند تراوش تبخیری برای تمامی آزمایش‌ها در محدوده بین ۲ الی ۳ ساعت بود. پس از آن محصول جمع‌آوری شده در ظرف واقع در مخزن نیتروژن مایع، توزین شده و برای تعیین میزان درصد اتانول جدا شده مورد آنالیز قرار می‌گرفت.



شکل ۱- شماتیک رسم شده از دستگاه تراوش تبخیری مورد استفاده در این پژوهش

برگردانده می‌شود و دیگری جریان عبوری از غشا که می‌بایست در سمت دیگر غشا جمع‌آوری شود. از آنجایی که جریان عبوری از غشا به صورت بخار است، لازم است برای اندازه‌گیری شار و گزینش‌پذیری غشا، این بخارها به صورت مایع درآمده و جمع‌آوری شود. برای این منظور از یک تله‌ی سرماساز استفاده می‌شود که شامل یک تله‌ی شیشه‌ای در یک مخزن نیتروژن مایع است. بخار ورودی به این شیشه در تماس غیرمستقیم با نیتروژن مایع، به صورت مایع در می‌آید. در انتهای مسیر برای ایجاد نیروی محرکه‌ی لازم جهت عبور بخارها از غشا از یک پمپ خلاء استفاده می‌شود که موجب می‌شود بخار ایجاد شده بلافاصله پس از عبور از غشا به داخل تله منتقل شود. همچنین در این دستگاه برای جلوگیری از به هم خوردن شرایط خلاء در سیستم در هنگام جدا کردن ظرف تله و اندازه‌گیری جرم نمونه، از یک حجم کنترل در سیستم استفاده شده است که با بستن شیر متصل به آن شرایط خروجی غشا به حالت قبل باقی می‌ماند و شرایط یکنواخت قبلی به هم نمی‌خورد. بعد از هر بار جمع‌آوری نمونه، ظرف تله مجدداً در سیستم نصب می‌شود و پس از اعمال مجدد خلاء در سیستم، این شیر دوباره باز می‌شود و نمونه‌گیری جدید آغاز می‌گردد.

اشکال و علائم شماره‌گذاری شده در شکل ۱ به صورت زیر می‌باشد:

- ۱- مخزن خوراک
- ۲- گرمکن
- ۳- کویل آب سرد
- ۴- کنترلر
- ۵- پمپ سانتریفیوژ؛ به منظور به گردش درآوردن خوراک مایع در سراسر سیستم
- ۶- شیر کنترل جریان برگشتی به مخزن خوراک
- ۷- فشارسنج سمت خوراک
- ۸- غشا
- ۹- محفظه غشا
- ۱۰- فشارسنج سمت جریان برگشتی
- ۱۱- دبی‌سنج؛ برای کنترل جریان مایع در گردش در سراسر سیستم
- ۱۲- فشارسنج سمت جریان عبوری؛ برای نشان دادن میزان خلاء ایجاد شده در سمت جریان برگشتی یا پایین دست غشا
- ۱۳- حجم کنترل؛ به منظور برقراری شرایط خلاء در سیستم
- ۱۴- شیر تخلیه اضطراری؛ در مواقع ایجاد نقص و پاره شدن غشا و عبور مایع به سمت جریان پایین دست غشا

در ادامه کارکرد غشاهای تراوش تبخیری با استفاده از دو پارامتر شار عبوری از غشا و گزینش پذیری تعیین می‌شود. شار عبوری غشاها (J) با واحد $\text{Kg/m}^2\text{h}$ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۳].

$$J = \frac{m}{A.t} \quad (1)$$

در این رابطه، $m(\text{kg})$ جرم تراوش یافته ($A(\text{m}^2)$ سطح موثر غشا و $t(\text{h})$ زمان آزمایش می‌باشد. گزینش‌گری (α)، دیگر پارامتر تعیین کننده کارکرد غشا است که با استفاده از رابطه (۲) تعیین می‌شود [۱].

$$\alpha_i = \frac{Y_i/Y_j}{X_i/X_j} \quad (2)$$

در این رابطه Y_i و Y_j به ترتیب غلظت اجزای i و j در ماده تراوش یافته و X_i و X_j بیان‌گر غلظت اجزای i و j در خوراک می‌باشد.

با توجه به اینکه رابطه‌ی بین شار و فاکتور جداسازی عموماً معکوس می‌باشد، برای بررسی هر چه بهتر عملکرد فرایند تراوش تبخیری، از پارامتر دیگری به نام شاخص جداسازی تراوش تبخیری (PSI) استفاده می‌شود. شاخص جداسازی تراوش تبخیری که از حاصل ضرب شار تراوه در ضریب جداسازی بدست می‌آید از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۱]:

$$\text{PSI} = J \cdot \alpha \quad (3)$$

تعیین مشخصات ماده‌ی خروجی

دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC)

به منظور محاسبه‌ی ترکیب درصد اجزای موجود در نمونه‌ی محصول (ماده‌ی عبوری از غشا)، در این پژوهش از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) ساخت شرکت طیف گستر فراز

در این پژوهش از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. در این دستگاه به ازای تشخیص هر نوع ماده‌ی مختلف موجود در نمونه، یک نمودار قله مانند یا اصطلاحاً پیک بر روی نمایشگر متصل به دستگاه نشان داده می‌شود. با محاسبه‌ی سطح زیر نمودار پیک ترسیم شده برای هر ماده به مجموع سطوح ایجاد شده برای تمامی پیک‌ها، میزان درصد وزنی آن ماده در مخلوط مشخص می‌شود. این دستگاه از هیدروژن به عنوان گاز حامل با دبی 1 ml. min^{-1} و نسبت جداسازی 1^3 به 10 استفاده شد. دماهای ستون تزریق کننده و آشکارساز به ترتیب 120°C و 250°C در نظر گرفته شد. دبی هیدروژن و هوای استفاده شده برای آشکارساز به ترتیب 35 و 280 میلی‌لیتر بر دقیقه بود و همچنین از یک سرنگ گازی به حجم کل $2/5$ میلی‌لیتر (همیلتون، سوئیس) با حجم تزریق $0/5$ میلی‌لیتر استفاده شد.

ارزیابی مورفولوژی غشاها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

به منظور بررسی مورفولوژی و ساختار غشاهای ساخته شده در این پژوهش از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. در این دستگاه جهت عکس برداری، پرتو الکترونی با انرژی بالا به نمونه‌ها تابیده شده و سیگنال‌هایی از سطح آنها دریافت می‌کنند. این سیگنال‌ها که از برهم کنش بین الکترون و نمونه بدست می‌آید، اطلاعاتی از مورفولوژی سطح نمونه آشکار می‌کند. اطلاعات جمع شده از مناطق مختلف سطح نمونه به شکل یک تصویر دوبعدی نمایان می‌شود. همچنین، به منظور بررسی ساختار عرضی غشاها بایستی غشاها برش داده شوند. جهت برش دادن نمونه‌ها از نیتروژن مایع استفاده می‌شود، به این ترتیب که با فرورودن نمونه‌ی غشایی درون نیتروژن مایع نمونه مورد نظر ترد شده و پس از آن به آسانی برش می‌خورند. در این پژوهش از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. سطح غشای خالص PDMS، مسطح و فاقد هر گونه ناخالصی است که نشان دهنده‌ی سنتز مناسب غشا و استحکام بالای آن می‌باشد.

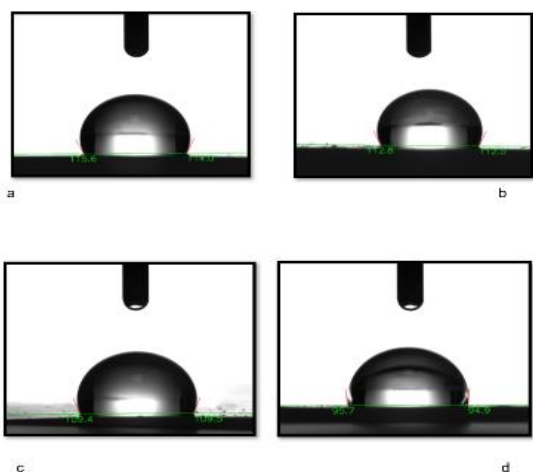
در غشاهای نانوکامپوزیت، با افزایش درصد نانوذره، شاهد اندکی کلوخه شدن نانوذرات و توزیع نامناسب آن‌ها در سطح غشا می‌باشیم. به طوری که غشای نانوکامپوزیت PDMS/TiO₂ (0.1%) مناسب‌ترین غشا از نظر پراکندگی نانوذرات می‌باشد.

^۱ Scanning Electron Microscope

جهت سنجش میزان آبدوست و یا آبگریز بودن غشاهای ساخته شده، از آنالیز CA استفاده شد. به منظور بررسی اندازه‌ی زاویه تماس آب با سطح غشا، در ابتدا چند قطره آب بر روی نقاط مختلف غشا چکانده شد و عکس‌برداری آغاز گردید و میانگین داده‌ها به عنوان نتیجه نهایی ارائه شد. افزایش میزان زاویه آب با سطح غشا، به معنی کاهش میزان آبگریزی آن می‌باشد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، غشای نانوکامپوزیت PDMS/TiO₂ با درصد نانوذره ۰/۱٪ و با میانگین زاویه تماس ۱۱۵، بیشترین میزان آبگریزی را دارا می‌باشد. غشاهای زیر به ترتیب میزان آبگریزی بر اساس سنجش زاویه تماس ارائه شده اند:

PDMS/TiO₂ (0.1%) > PDMS/TiO₂ (0.5%) > PDMS/TiO₂ (1%) > PDMS

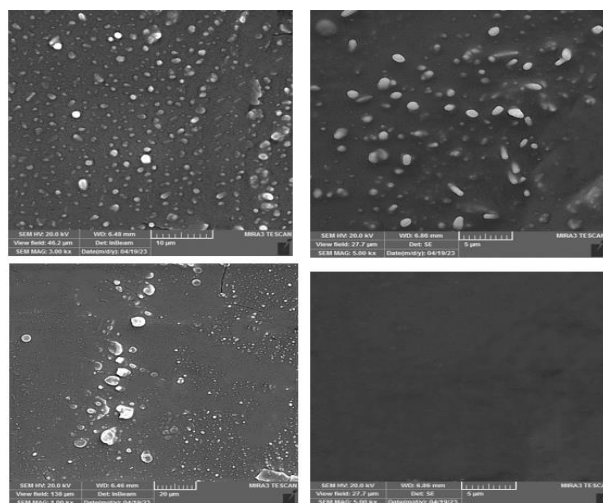
همانطور که مشاهده می‌شود، زاویه تماس غشای PDMS با افزودن نانوذرات TiO₂ افزایش می‌یابد که این نشان دهنده‌ی افزایش میزان آبگریزی غشاها می‌باشد. اما از جایی به بعد این فرایند معکوس می‌شود. در نتیجه هر چقدر میزان افزودن نانوذره به غشا کمتر باشد و نانوذره در مقادیر کمتری به غشا اضافه گردد، کلوخه شونده‌ی نانوذرات کمتر بوده و منافذ بیشتری از سطح غشا را پوشش می‌دهند و به طور یکنواخت‌تری در سطح غشا پراکنده می‌شوند و آبگریزی بیشتری را نیز از خود نشان می‌دهند.



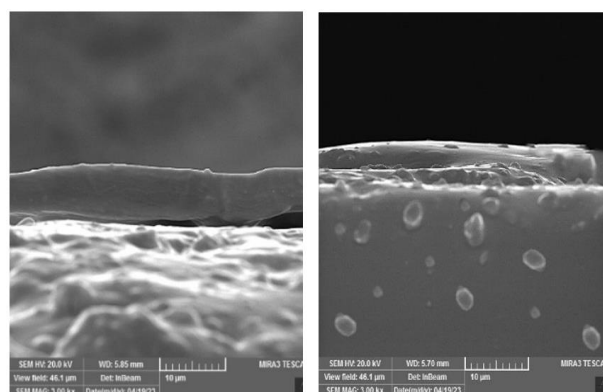
شکل ۴- تصاویر اندازه‌گیری زاویه تماس (a) غشا نانوکامپوزیت PDMS/TiO₂ (0.1%) (b) غشا نانوکامپوزیت PDMS/TiO₂ (0.5%) (c) غشا نانوکامپوزیت PDMS/TiO₂ (1%) (d) غشای خالص PDMS

کلوخه شدن نانوذرات در درصد وزنی‌های بالای آن را می‌توان کم بودن میزان زمان قرار گرفتن آن در التراسونیک توجیه کرد که با بالاتر بردن این زمان، پدیده‌ی کلوخه شدن می‌تواند تا حدی جبران شود.

با حرکت از سطح غشا به سمت پایین، حضور نانوذرات کاهش می‌یابد و بیشتر نانوذرات در سطح غشا پراکنده هستند. این امر می‌تواند به دلیل غلیظ بودن محلول سازنده‌ی غشا و کم بودن زمان توزیع غشا در التراسونیک باشد.



شکل ۲- تصاویر SEM از غشاهای سنتز شده به ترتیب بالا از چپ: غشای نانو کامپوزیت ۰/۵٪، غشای نانوکامپوزیت ۰/۱٪، غشای نانو کامپوزیت ۱٪ و غشای خالص PDMS



شکل ۳- تصاویر SEM از سطح مقطع عرضی غشاهای خالص و نانوکامپوزیت ۰/۱٪

اندازه‌گیری زاویه تماس (CA)

عملیات گرمادهی به نمونه‌ها تا تخریب کامل غشاها ادامه یافت. با مقایسه نقطه عطف منحنی TGA که همان نقطه اوج تجزیه در مرحله کاهش وزن می‌باشد، مشاهده می‌شود که حداکثر نرخ کاهش وزن اتفاق افتاده است. در زمان ابتدایی آنالیز، با توجه به نمودار، کاهش وزن بسیار ناچیز بوده است که این کاهش وزن می‌تواند به تبخیر حلال باقی مانده در غشا مربوط باشد. در مرحله ی بعدی، با توجه به کاهش شدید شیب نمودار، وزن نمونه به دلیل تجزیه حرارتی زنجیره‌های پلیمری به مقدار محسوسی کاهش یافته است. همان طور که انتظار می‌رفت، پایداری حرارتی غشاهای نانوکامپوزیت، با افزایش درصد نانوذره، در مقایسه با غشای خالص PDMS افزایش یافته است. این پایداری می‌تواند به دلیل پر کردن حفرات موجود در غشا و در نتیجه افزایش مقاومت غشا در برابر عبور حرارت باشد.

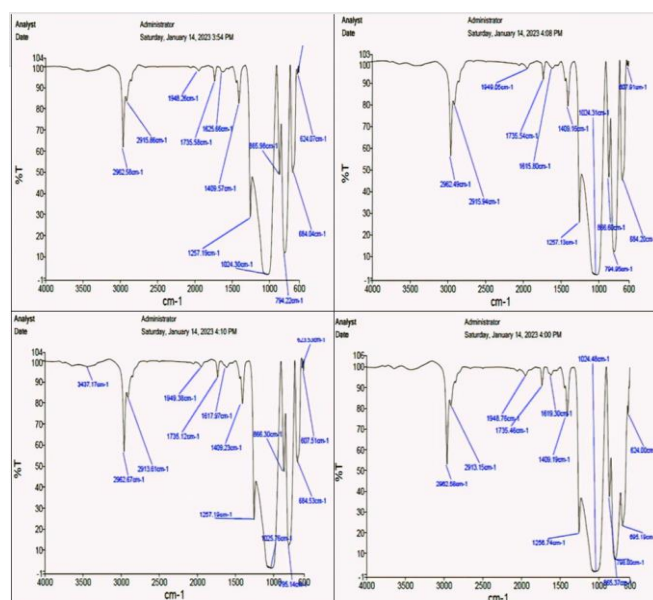
بررسی تاثیر دمای خوراک بر عملکرد فرایند تراوش تبخیری و کارکرد جداسازی

در این پژوهش، جهت بررسی اثر دما بر کارکرد جداسازی توسط فرایند تراوش تبخیری، آزمایش‌ها در دماهای ۳۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد و نتایج در شکل ۶ و ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مویده است، افزایش دما سبب افزایش شار عبوری از غشا می‌شود. این افزایش را می‌توان به وسیله سه فاکتور توصیف کرد: الف) افزایش دما سبب افزایش جنبش و تحرک مولکولی و به تبع سبب افزایش نفوذ مولکول‌های نفوذ کننده و زنجیره‌های پلیمری می‌شود. ب) افزایش دما سبب افزایش فشار جزیی آب و اتانول از سمت خوراک شده، در حالی که در سمت تراوش، با وجود فشار خلاء، این افزایش فشار ممکن نبوده و در کل سبب افزایش نیرو محرکه می‌شود. ج) بالا رفتن مقاومت جذب مولکول‌ها توسط غشا در دماهای بالاتر و کم شدن اثر همبستگی میان آب و اتانول.

فاکتور سوم به دلیل تاثیر منفی بر روی نفوذ اتانول در مقابل آب، منجر به افزایش میزان شار عبوری آب در مقابل اتانول شده و به تبع، ضریب جداسازی اتانول را تحت تاثیر قرار می‌دهد. پس در حالت کلی می‌توان گفت افزایش دما سبب افزایش شار عبوری از سیستم و کاهش ضریب جداسازی آن می‌شود.

آزمون طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR-ATR)

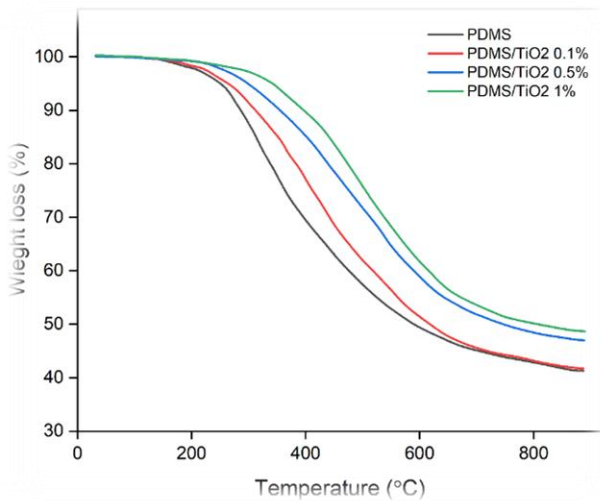
همان‌طور که مشاهده می‌شود، بر اساس مراجع، پیک‌های ظاهر شده در ۶۲۴/۰۷، ۶۸۴/۰۴، ۸۶۵/۹۸، ۱۴۰۹/۵۷، ۱۴۰۹/۵۷، ۱۲۵۷/۱۹، ۱۲۵۷/۱۹، ۱۴۰۹/۵۷ به ترتیب مربوط به نیروی کششی Si-C، پیوند کششی متقارن Si-O-Si و نیروی کششی نامتقارن Si-O-Si می‌باشد. پیک‌های ظاهر شده در ۱۲۵۷ و ۱۴۰۹ به ترتیب مربوط به ارتعاشات گروه متیل متیل متقارن CH₃ متصل Si و ارتعاشات گروه متیل نامتقارن CH₃ متصل به Si می‌باشد. همچنین پیک‌های موجود در ۲۹۱۵/۸۶ و ۲۹۶۲/۵۸ به ترتیب مربوط به پیوند کششی متقارن و نامتقارن C-H گروه متیل CH₃ بوده و ارتعاش کششی نامتقارن Si-O در محدوده ۱۱۰۰ قرار می‌گیرد.



شکل ۵- آنالیز FTIR جهت بررسی غشاهای خالص و نانوکامپوزیت

بررسی پایداری حرارتی غشاها با استفاده از روش گرمایی-وزنی (TGA):

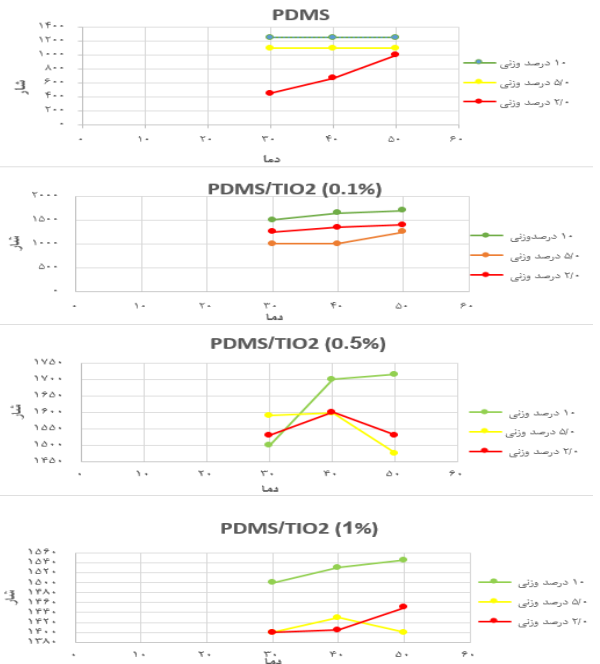
نتایج حاصل از این آزمون در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد. بدیهی است که غشاهایی با پایداری حرارتی و مکانیکی بالا جهت استفاده در فرایند تراوش تبخیری، ترجیح داده می‌شوند. در این آنالیز، به نمونه‌ی غشایی با نرخ 10°C/min در اتمسفر نیتروژن انجام می‌شود. در محدوده دمایی ۳۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های غشایی، درون دستگاه قرار گرفتند. دستگاه شروع به کار کرده و



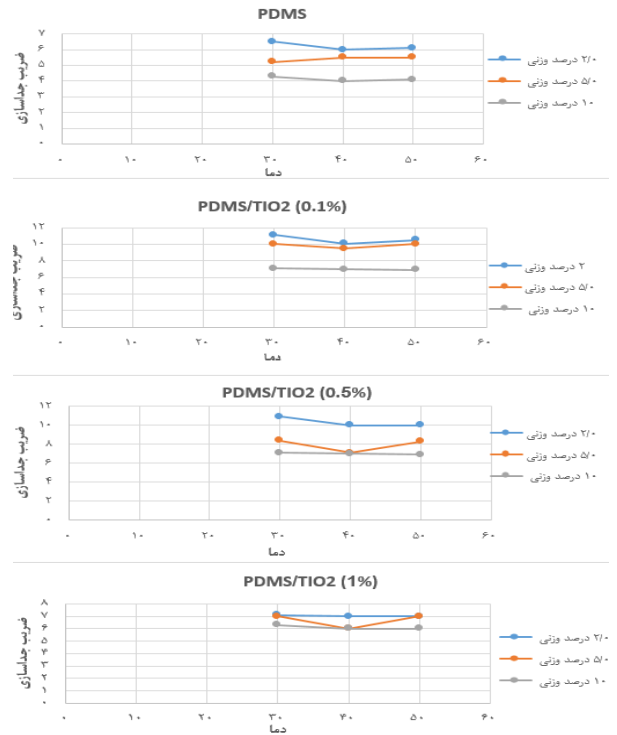
شکل ۸- نتایج حاصل از آزمون گرمایی-وزنی (TGA)

تأثیر غلظت اتانول در فرایند جداسازی

شار اتانول و شار آب با افزایش غلظت اتانول، افزایش می‌یابد. افزایش دامنه و بسامد زنجیره‌های پلیمری در پی افزایش غلظت امری بدیهی است و پس از آن تاثیرپذیری شار اتانول با افزایش غلظت بعنوان یک ماده آلی فرار که منجر به تورم غشا می‌شود نیز قابل پیش‌بینی می‌باشد. همچنین در زمان افزایش غلظت اتانول در خوراک، شاهد اشباع و تورم در غشا هستیم که این امر منجر به کاهش ضریب جداسازی می‌شود. بنابراین در حالت کلی، افزایش غلظت اتانول در خوراک منجر به افزایش فلاکس و در پی افزایش فلاکس، به دلیل نفوذ بیشتر مولکول‌های آب منجر به کاهش ضریب جداسازی می‌شود.

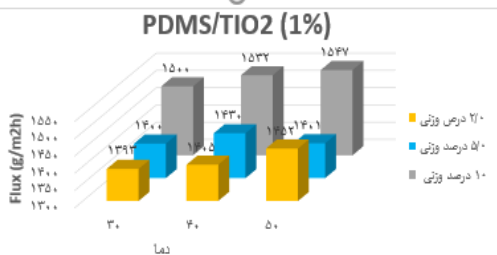
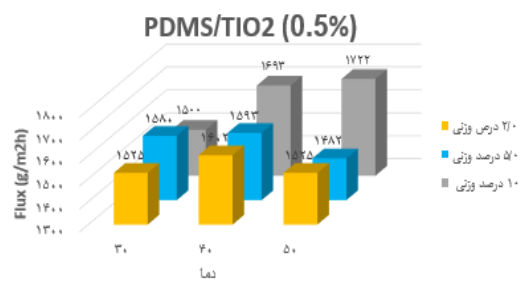
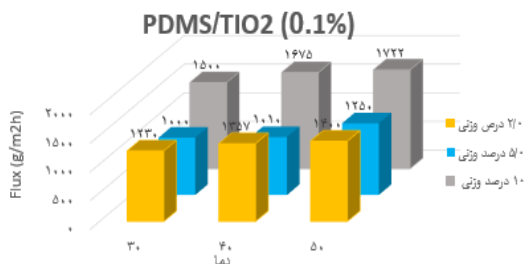
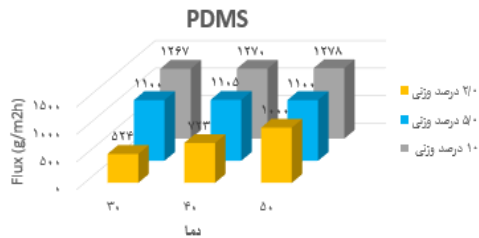


شکل ۶- نمودار تغییرات فلاکس با تغییرات دما (درجه سانتیگراد) با غشای نانوکامپوزیت

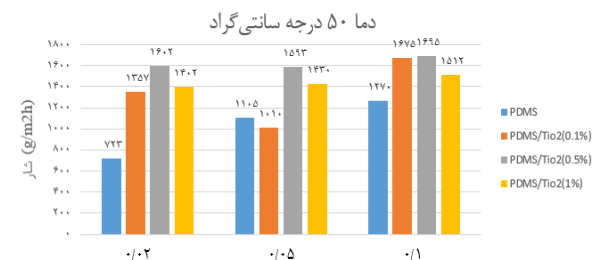
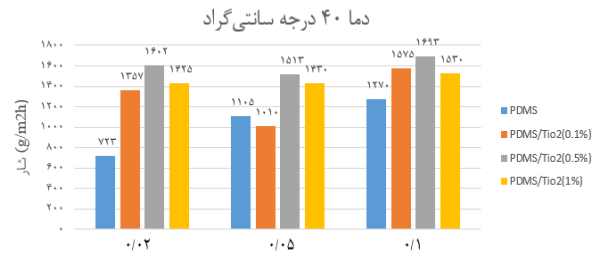
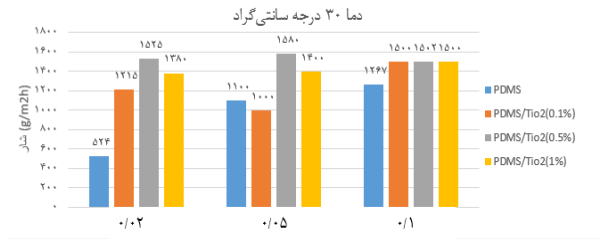


شکل ۷- نمودار تغییرات ضریب جداسازی با تغییرات دما (درجه سانتی‌گراد) با غشای نانوکامپوزیت

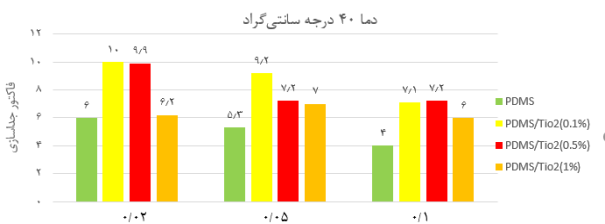
طبق نتایج، افزودن نانوذره، به میزان چشم‌گیری عملکرد تراوش تبخیری را بهبود بخشید است. با افزودن نانوذره به میزان ۰/۱ درصد، شاهد افزایش چشم‌گیری در میزان شار و گزینش‌پذیری نسبت به غشای خالص PDMS هستیم. اما با افزایش میزان نانوذره، شدت تغییرات در عملکرد غشا و همچنین میزان گزینش‌پذیری افزایش می‌یابد. همچنین با وجود خاصیت آبدوستی نانوذره TiO_2 و افزایش شار کلی، مولکول‌های اتانول هم به شدت قطبی بوده و هم نسبت به مولکول‌های آب واکنش‌پذیرتر هستند و به راحتی جذب نانوذرات TiO_2 می‌شوند که این امر باعث افزایش شار جزیی اتانول نسبت به آب و کاهش گزینش‌پذیری آن با افزایش نانوذره می‌شود.



شکل ۱۱- تاثیر افزودن نانوذره بر فلاکس غشاهای خالص و نانوکامپوزیت در دماهای مختلف (درجه سانتی‌گراد)



شکل ۹- تاثیر افزایش غلظت اتانول خوراک بر فلاکس در دماهای: از بالا سمت چپ ۳۰ درجه سانتی‌گراد، ۴۰ درجه سانتی‌گراد و ۵۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۰- تاثیر غلظت اتانول بر فاکتور جداسازی در دمای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌گراد

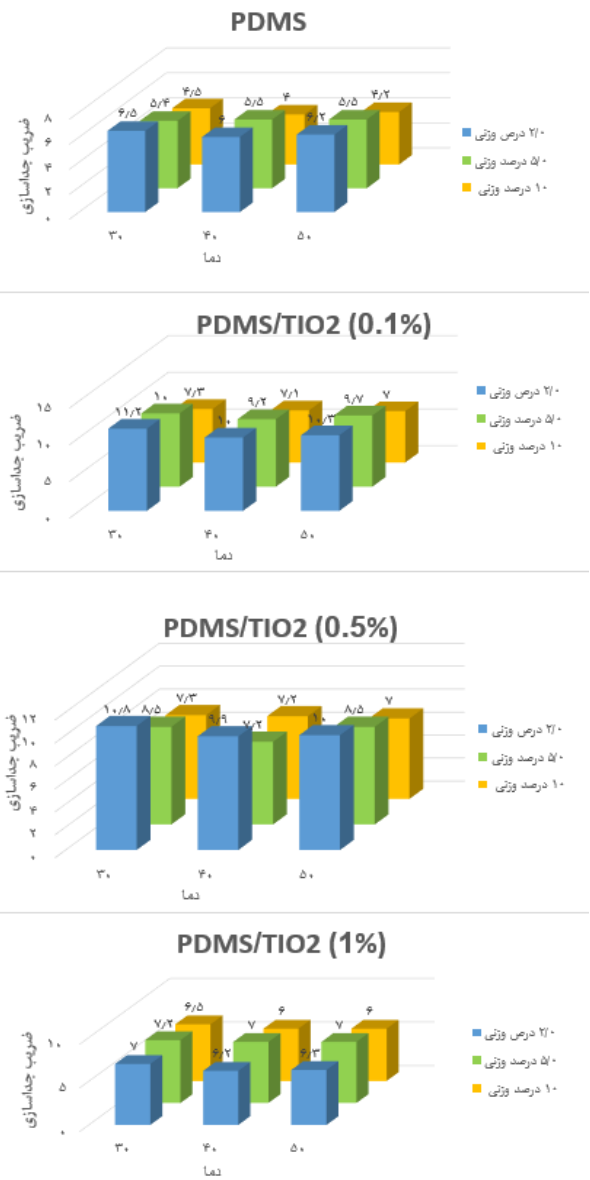
ساخت غشای پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان و اصلاح خواص آن توسط نانوذرات TiO_2 جهت جداسازی آب و اتانول در فرایند تراوش تبخیری

و به دنبال آن، افت محسوس گزینش‌پذیری را شاهد بودیم. با بررسی تاثیر افزودن نانوذره بر عملکرد سیستم، شاهد بهبود بسیار زیاد عملکرد تراوش تبخیری بودیم. با افزودن میزان 0.1% نانوذره TiO_2 ، گزینش‌پذیری به حداکثر میزان خود، یعنی ۱۱/۲ رسید. اما با افزایش میزان نانوذره، شدت تغییرات در عملکرد غشا و همچنین گزینش‌پذیری کاهش یافت. این رخداد را می‌توان با کلوخه شدن نانوذرات و در نتیجه توزیع نامناسب آنها در مقادیر بالاتر توجیه کرد. همچنین در این مقاله اهمیت گزینش‌پذیری اتانول را با افزودن نانوذرات تیتانیا به دلیل وجود پیوندهای آبریز می‌توان توجیه کرد.

در این پژوهش، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دادند که غشای PDMS، کاملاً متراکم بوده و همچنین حضور نانوذرات در ماتریس پلیمری تایید شدند. همچنین با توجه به داده‌های آزمایش تراوش تبخیری و آنالیز CA، با افزودن نانوذره، زاویه تماس افزایش و سطح غشا آب‌گریزتر گزارش شد. طبق نتایج مربوط به آنالیز TGA، غشای نانوکامپوزیت ۱٪ وزنی استحکام بهتری نسبت به سایر غشاها داشته است.

جدول ۱- نتایج حاصل از آزمایش‌های تراوش تبخیری (دما بر حسب درجه سانتی‌گراد و فلاکس بر حسب $Kg/m^2.h$) می‌باشد.

غشا	درصد نانوذره	غلظت اتانول	دما	فلاکس	ضریب جداسازی	PSI
PDMS	-	۲٪	۳۰	۵۲۴	۶/۵	۳۴۰۶
PDMS	-	۲٪	۴۰	۷۲۳	۶	۴۳۳۸
PDMS	-	۲٪	۵۰	۱۰۰۰	۶/۲	۶۲۰۰
PDMS	-	۵٪	۳۰	۱۱۰۰	۵/۴	۵۹۴۰
PDMS	-	۵٪	۴۰	۱۱۰۵	۵/۵	۴۷۹۷۱
PDMS	-	۵٪	۵۰	۱۱۰۰	۵/۵	۶۰۵۰
PDMS	-	۱۰٪	۳۰	۱۲۶۷	۴/۵	۵۷۰۱
PDMS	-	۱۰٪	۴۰	۱۲۷۰	۴	۵۰۸۰
PDMS	-	۱۰٪	۵۰	۱۲۷۸	۴/۲	۵۳۶۷
PDMS/ TiO_2 (0.1%)		۲٪	۳۰	۱۲۳۰	۱۱/۲	۱۳۷۷۶
PDMS/ TiO_2 (0.1%)		۲٪	۴۰	۱۳۵۷	۱۰	۱۳۵۷۰
PDMS/ TiO_2 (0.1%)		۲٪	۵۰	۱۴۰۰	۱۰/۳	۱۴۴۲۰
PDMS/ TiO_2 (0.1%)		۵٪	۳۰	۱۰۰۰	۱۰	۱۰۰۰۰
PDMS/ TiO_2 (0.1%)		۵٪	۴۰	۱۰۱۰	۹/۲	۹۲۹۲
PDMS/ TiO_2 (0.1%)		۵٪	۵۰	۱۲۵۰	۹/۷	۱۲۱۲۵



شکل ۱۲- تاثیر افزودن نانوذره بر فاکتور جداسازی در غشاهای خالص و کامپوزیت در دماهای مختلف (درجه سانتی‌گراد)

در این پژوهش، از غشاهای پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان و ماتریس آمیخته آن با نانوذره تیتانیم‌دی‌اکسید جهت جداسازی ترکیب آب- اتانول (۲ و ۵ و ۱۰ درصد وزنی) استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها توسط دستگاه تراوش تبخیری انجام گرفت. اثر پارامترهای غلظت اتانول در خوراک، درصد نانوذره در غشا و دما، مورد بررسی و به تفصیل مورد بحث قرار گرفت.

همان‌طور که از قبل قابل پیش‌بینی بود، شار اتانول و شار آب با افزایش غلظت اتانول، افزایش می‌یابد. با افزایش شار عبوری از غشا و به دنبال آن، تورم غشا، می‌تواند سبب کاهش ضریب جداسازی شود. از طرف دیگر با بررسی تاثیر شرایط دمایی بر عملکرد تراوش تبخیری، افزایش شار، به دلیل بالا رفتن انرژی جنبشی مولکول‌ها

[6] Sun D, Li BB, Xu ZL. Pervaporation of ethanol/water mixture by organophilic nano-silica filled PDMS composite membranes. *Desalination*. 2013 Aug 1; 322:159-66.

[7] Mao H, Zhen HG, Ahmad A, Zhang AS, Zhao ZP. In situ fabrication of MOF nanoparticles in PDMS membrane via interfacial synthesis for enhanced ethanol permselective pervaporation. *Journal of Membrane Science*. 2019 Mar 1; 573:344-58.

[8] Dutta BK, Sikdar SK. Separation of volatile organic compounds from aqueous solutions by pervaporation using S- B- S block copolymer membranes. *Environmental science & technology*. 1999 May 15;33 (10):1709-16.

[9] Zong C, Yang X, Chen D, Chen Y, Zhou H, Jin W. Rational tuning of the viscosity of membrane solution for the preparation of sub-micron thick PDMS composite membrane for pervaporation of ethanol-water solution. *Separation and Purification Technology*. 2021 Jan 15; 255:117729.

[10] Qian W, Hu X, He W, Zhan R, Liu M, Zhou D, Huang Y, Hu X, Wang Z, Fei G, Wu J. Polydimethylsiloxane incorporated with reduced graphene oxide (rGO) sheets for wound dressing application: Preparation and characterization. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2018 Jun 1; 166:61-71.

[11] Chapman PD, Oliveira T, Livingston AG, Li K. Membranes for the dehydration of solvents by pervaporation. *Journal of Membrane Science*. 2008 Jun 20; 318(1-2):5-37.

[12] Liu G, Jin W. Pervaporation membrane materials: Recent trends and perspectives. *Journal of Membrane Science*. 2021 Oct 15; 636:119557.

[13] Wee SL, Tye CT, Bhatia S. Membrane separation process-Pervaporation through zeolite membrane. *Separation and Purification Technology*. 2008 Nov 3; 63(3):500-16.

۱۰۲۲۰	۱۰/۲	۱۵۰۰	۳۰	۱۰٪	TiO2 (0.1%)	PDMS/TiO2
۱۱۸۹۲	۷/۱	۱۶۷۵	۴۰	۱۰٪	TiO2 (0.1%)	PDMS/TiO2
۱۵۲۹۸	۱۰/۵	۱۷۲۲	۵۰	۱۰٪	TiO2 (0.1%)	PDMS/TiO2
۱۶۴۷۰	۱۰/۸	۱۵۲۵	۳۰	۲٪	TiO2 (0.5%)	PDMS/TiO2
۱۵۸۵۹	۹/۹	۱۶۰۲	۴۰	۲٪	TiO2 (0.5%)	PDMS/TiO2
۱۵۲۵۰	۱۰	۱۵۲۵	۵۰	۲٪	TiO2 (0.5%)	PDMS/TiO2
۱۳۴۳۰	۸/۵	۱۵۸۰	۳۰	۵٪	TiO2 (0.5%)	PDMS/TiO2
۱۱۴۶۹	۷/۲	۱۵۹۳	۴۰	۵٪	TiO2 (0.5%)	PDMS/TiO2
۱۰۹۵۰	۷/۳	۱۵۰۰	۳۰	۱۰٪	TiO2 (0.5%)	PDMS/TiO2
۱۲۰۲۰	۷/۱	۱۶۹۳	۴۰	۱۰٪	TiO2 (0.5%)	PDMS/TiO2
۱۲۰۵۴	۷	۱۷۲۲	۵۰	۱۰٪	TiO2 (0.5%)	PDMS/TiO2
۹۷۸۶	۷	۱۳۹۸	۳۰	۲٪	TiO2 (1%)	PDMS/TiO2
۸۷۱۱	۶/۲	۱۴۰۵	۴۰	۲٪	TiO2 (1%)	PDMS/TiO2
۹۸۷۳	۶/۸	۱۴۵۲	۵۰	۲٪	TiO2 (1%)	PDMS/TiO2
۱۰۰۸۰	۷/۲	۱۴۰۰	۳۰	۵٪	TiO2 (1%)	PDMS/TiO2
۱۰۰۱۰	۷	۱۴۳۰	۴۰	۵٪	TiO2 (1%)	PDMS/TiO2
۹۸۰۷	۷	۱۴۰۱	۵۰	۵٪	TiO2 (1%)	PDMS/TiO2
۹۷۵۰	۶/۵	۱۵۰۰	۳۰	۱۰٪	TiO2 (1%)	PDMS/TiO2
۹۱۹۲	۶	۱۵۳۲	۴۰	۱۰٪	TiO2 (1%)	PDMS/TiO2
۹۲۸۲	۶	۱۵۴۷	۵۰	۱۰٪	TiO2 (1%)	PDMS/TiO2

مراجع:

[1] Jahandideh S, Shirazi MJ, Tavakoli M. Mechanical and thermal properties of octadecylamine-functionalized graphene oxide reinforced epoxy nanocomposites. *Fibers and Polymers*. 2017 Oct; 18:1995-2004.

[2] Du C, Du JR, Feng X, Wang J. Green extraction of perilla volatile organic compounds by pervaporation. *Separation and Purification Technology*. 2021 Apr 15; 261:118281.

[3] Zhang Y, Yu Y. Adsorptive removal of Cr³⁺, Cu²⁺, and Ni²⁺ ions by magnetic Fe₃O₄@ alkali-treated coal fly ash. *Desalination and Water Treatment*. 2018; 123:277-87.

[4] Li L, Xiao Z, Tan S, Pu L, Zhang Z. Composite PDMS membrane with high flux for the separation of organics from water by pervaporation. *Journal of Membrane Science*. 2004 Nov 1; 243(1-2):177-87.

[5] Peng P, Shi B, Lan Y. Preparation of PDMS-silica nanocomposite membranes with silane coupling for recovering ethanol by pervaporation. *Separation Science and Technology*. 2011 Feb 21; 46(3):420-7.

Fabrication of polydimethylsiloxane membrane and modification of its properties by TiO_2 nanoparticles for water and ethanol separation in pervaporation process

Hassan Pahlavanzadeh*, Zahra Anvar

Chemical Engineering Faculty of Tarbiat Modares University, Teheran, Iran

ABSTRACT

Removal of volatile organic compounds is one of the most challenging issues today according to the new environmental policies. Considering the disadvantages of these compounds and the important effects on the environment and life of organisms, proper treatment and prevention of these compounds to the environment is important. In this research, separation of ethanol as a volatile organic compound using PDMS pure membrane and PDMS/ TiO_2 nanocomposite membranes with different percentages of nanoparticles during pervaporation permeation was investigated. The effect of temperature, ethanol concentration and the effect of increasing the percentage of nanoparticles on pervaporation performance was studied. Scanning electron microscopy (SEM) was used to study the structure and morphology of membranes, CA analysis (contact angle) to evaluate the membrane hydrophobicity, TGA analysis to investigate the thermal resistance of membranes and FTIR analysis to observe the membranes' and chemical bonds. According to the results, increasing the temperature leads to increase in the movement and molecular mobility followed by increase in total flux. By increasing the flux of water, the separation factor is reduced. On the other hand, separation factor is a function of feed concentration and the separation factor decreases considerably by increasing the amount of ethanol in feed. By adding nanoparticles to the membrane, at first, we see increase in membrane selectivity and then decrease it. This can be due to agglomeration of nanoparticles at high concentration. In general, nanocomposite membranes containing 0.1% of nanoparticles with selectivity of 11.2% and permeate flux 1230Kg/m².h showed the best selectivity.

All right reserved.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: October 16, 2023

Received in revised form: March 11, 2024

Accepted: March 18, 2024

Key words:

Pervaporation

TiO_2

Ethanol

Separation

Membranes

PDMS

* Corresponding author
pahlavzh@modares.ac.ir