

# مطالعه‌ای بر فرایندهای غشایی

## نازلی عسگری

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی سهند

### چکیده

با توسعه صنایع مختلف و لزوم افزایش بازده فرایندی و کاهش مصرف انرژی، فرایندهای جداسازی مواد مختلف در این صنایع، اهمیت چشمگیری یافته‌اند. لذا می‌توان با در نظر گرفتن عوامل مختلف مانند دسترسی به تجهیزات، هزینه‌های ساخت و انرژی و همچنین اهداف جداسازی در فرایند مربوطه، روش مناسبی را برای جداسازی انتخاب کرد. در این راستا، فرایندهای غشایی با دارا بودن مزایایی مانند کاهش مصرف انرژی، انتقال جرم و راندمان بالا و سهولت کاربرد، از اهمیت بسزایی برخوردارند. با این دیدگاه در این مقاله، ابتدا به مطالعه کلی غشاها و تقسیم‌بندی‌های مختلف آنها از لحاظ مکانیسم‌های حاکم بر جداسازی، جنس، شکل هندسی و ساختار آنها پرداخته شده و خصوصیات و کاربردهای عمده آنها مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، بررسی فرایندهای غشایی مختلف و کاربردهای آنها در صنایع مختلف انجام شده است.

### کلمات کلیدی: غشا، جداسازی

### ۱- مقدمه

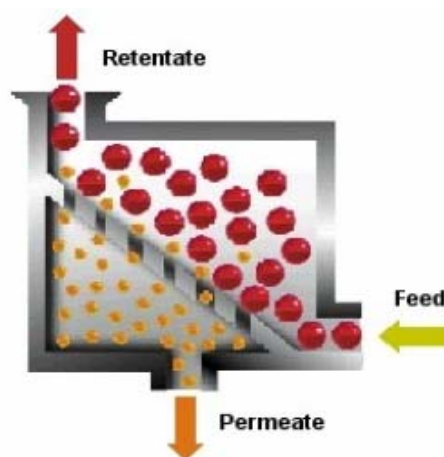
پیشرفت‌های کنونی در صنایع شیمیایی و صنایع مشابه، به سمت افزایش سرعت انجام فرایندها و کاهش مصرف انرژی در طول فرایند معطوف شده است. یکی از فرایندهای مهم و پرکاربرد در چنین صنایعی، جداسازی مواد مختلف می‌باشد. برای انجام فرایندهای صنعتی اغلب باید اجزای ماده خام اولیه از هم جدا شده و محصول به دست آمده از این فرایندها نیز تفکیک و تخلیص شود. از طرفی در اکثر صنایع، با در نظر گرفتن قوانین محیط‌زیستی، لزوم انجام فرایندهای جداسازی بیش از پیش به چشم می‌خورد. در حقیقت، اهمیت فرایندهای جداسازی و دستگاه‌ها و تجهیزات مربوطه، به اندازه‌ای است که در بسیاری از صنایع، بخش اعظم قیمت تمام شده یک محصول، مربوط به هزینه‌های جداسازی و خالص سازی آن محصول است. به همین دلیل یافتن یک روش جداسازی ساده‌تر و با هزینه کمتر، می‌تواند قابل تأمل باشد. در انتخاب یک روش جداسازی مناسب، باید بازده آن

روش‌ها، دسترسی به تجهیزات، هزینه‌های جداسازی، هزینه ساخت و هزینه‌های انرژی، با در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی و مسائل سیاسی مورد ارزیابی کامل قرار بگیرد. همچنین باید اهداف جداسازی در فرایند مشخص شود؛ در یک فرایند جداسازی، اهداف متفاوتی مانند تغلیظ، تخلیص، تفکیک و جابه‌جایی تعادل واکنش می‌تواند مدنظر باشد.

در این راستا، غشاها برای جداسازی گونه‌های مختلفی از مواد در حالات جامد، مایع و گاز توسعه یافته‌اند. با اینکه روش جداسازی با غشاها نسبت به روش‌های دیگری چون تقطیر، جذب سطحی، کریستالیزاسیون و استخراج مایع-مایع جدیدتر است ولی با توجه به کارایی و سهولت استفاده طی دو دهه اخیر، گسترش چشمگیری در استفاده از آن مشاهده شده است [۱]. با در نظر گرفتن اهمیت این روش، در این مقاله به بررسی ساختارهای غشایی و فرایندهای جداسازی غشایی پرداخته شده است.

## ۲- غشا

غشا به عنوان یک فاز که اجزای خوراک به صورت انتخابی از آن عبور می‌کنند، تعریف می‌گردد. به عبارت بهتر، غشا به صورت فازی که اجزای جداسازنده خوراک با سرعت‌های متفاوت از آن عبور می‌کنند، عمل می‌کند. در این روش، معمولاً تغییر فازی صورت نمی‌گیرد و محصولات نیز در همدیگر قابل امتزاج هستند [۱].



شکل ۱- شمای یک واحد غشایی

در فرایندهای غشایی، جزئی از خوراک که از غشا عبور می‌کند به نام تراوش کرده<sup>۱</sup> و بخشی که نتواند از غشا عبور

<sup>۱</sup> Permeate

کند، نگه‌داشته شده<sup>۲</sup> نامیده می‌شود که بر اساس هدف جداسازی، هرکدام از آنها می‌توانند به عنوان محصول در نظر گرفته شوند. در حالت کلی، روشهای غشایی در مواقعی که غلظت مواد کم باشد، کارایی بسیار زیادی دارند [۲].

نیروی محرکه لازم در فرایندهای غشایی می‌تواند به صورت اختلاف غلظت، فشار، دما و پتانسیل الکتریکی باشد. ساده‌ترین نوع غشاها بر اساس اختلاف اندازه ذرات عمل می‌کنند که از این نظر مشابه فیلترها هستند ولی غشاها از لحاظ اندازه منافذ و توزیع اندازه آنها و نیز نحوه جریان، با فیلترها تفاوت دارند. کارایی غشاها با دو پارامتر تعیین می‌گردند که شامل دبی عبور کرده از غشا و گزینش‌پذیری غشاها است.

فرایندهای غشایی با داشتن مزایایی چون کاهش مصرف انرژی به دلیل عدم تغییر فاز، حجم کم و عدم نیاز به فضای زیاد، تنوع در شکل و اندازه، افت فشار کم و انتقال جرم زیاد، بالا بودن راندمان جداسازی برای محلول‌های رقیق، نیاز کم به مواد افزودنی و حلال‌ها، ساده بودن طراحی غشاها و سهولت کاربرد آنها در مقیاس‌های صنعتی و همچنین به دلیل اینکه دوست‌دار محیط زیست هستند، از سایر روشهای جداسازی متمایز شده‌اند. با این حال این روش معایبی از قبیل قطبش<sup>۳</sup> غلظتی و گرفتگی غشاها، طول عمر کوتاه غشا، انتخاب‌پذیری و دبی کم عبوری از غشاها و هزینه بالای ساخت را دارد [۱].

## ۱-۲ تقسیم‌بندی غشاها

به دلیل کاربردهای وسیع و جهت سهولت شناخت و استفاده از غشاها، تقسیم‌بندی آنها ضروری به نظر می‌رسد که در این بخش تقسیم‌بندی غشاها بر اساس معیارهای مختلف آورده شده است.

### ۱-۱-۲ تقسیم‌بندی بر اساس مکانیسم حاکم بر جداسازی

اگر جداسازی بر اساس اختلاف فشار باشد، به کمک روش‌هایی مانند میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس می‌توان جداسازی را انجام داد. روشهایی که بر پایه اختلاف غلظت هستند، شامل جداسازی گازی، غشای مایع و دیالیز می‌باشد. در الکترودیالیز، اختلاف ولتاژ و در روش تقطیر غشایی نیز اختلاف دما به عنوان عامل جداسازی عمل می‌کند.

<sup>۲</sup> Retentate

<sup>۳</sup> Polarization

## ۲-۱-۲ تقسیم‌بندی بر اساس جنس غشا

غشاها به دو صورت عمده غشاهای بیولوژیکی (طبیعی) و غشاهای سنتزی هستند که غشاهای سنتزی شامل غشاهای پلیمری، سرامیکی، فلزی و مایع می‌باشند [۳] که در ادامه هر کدام از موارد به اختصار توضیح داده شده‌اند.

### ۲-۱-۲-۱ غشاهای پلیمری

از جمله غشاهای پلیمری می‌توان به غشاهای ساخته شده از جنس پلی‌پروپیلن، تفلون، پلی‌آمید، پلی‌ایمید و پلی‌سولفون اشاره کرد [۴]. هر کدام از این مواد بر اساس ساختار شیمیایی خود، دما و pH محیط، حلالیت مواد و مقاومت آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند. تخلخل بالا یکی از ویژگی‌های مهم در غشاهای پلیمری است [۵].

غشاهای پلیمری در بازیافت هیدروکربن‌ها و گازهایی به کار می‌روند که در فرایندهای مربوطه وارد اتمسفر شده و یا سوزانده می‌شوند، بنابراین از نظر کاهش آلاینده‌های محیطی می‌توانند بسیار با ارزش باشند. غشاهای پلیمری که قابلیت عبور ذرات بزرگتر مانند هیدروکربن‌های سنگین گازی را در مقایسه با ذرات کوچکتر مانند متان و ازت دارند، به صورت پیوسته تهیه می‌شوند. قابلیت انتخاب‌پذیری معکوس و عبوردهی بالای این غشاها، مزیت بسیار مهمی است که در کاربردهایی مانند خالص سازی گاز طبیعی که بخش عمده آن را متان تشکیل می‌دهد، نیاز به تقویت فشار مجدد گاز خالص‌شده را برطرف می‌کند [۵].



شکل ۲- غشای پلیمری

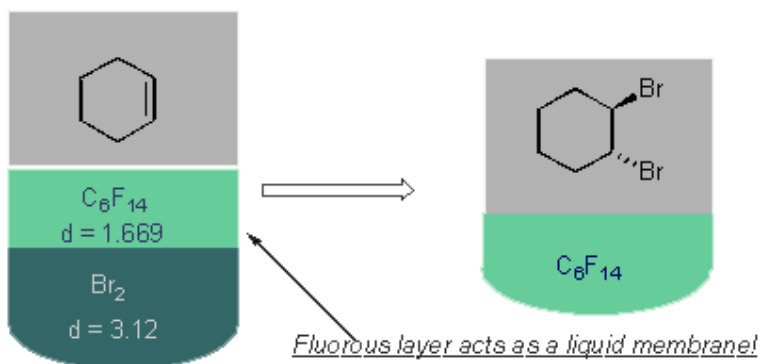
از غشاهای تهیه شده می‌توان در کاربردهای دیگر مانند خالص سازی هیدروژن در پالایشگاه‌ها، بازیافت مونومر در واحدهای پلی‌اولفین، بازیافت بخارات بنزین در انبارها و جایگاه‌های سوخت رسانی و بسیاری از کاربردهای دیگر با ارزش افزوده بالا استفاده کرد [۵].

نیاز به غشاهایی با مجموعه خواص مطلوب شامل شار عبوری بالا، انتخاب پذیری بالا و پایداری شیمیایی، مکانیکی و حرارتی مناسب، محققین را به سمت توسعه غشاهای هیبریدی نانوکامپوزیتی (شامل مواد معدنی پخش شده در ماتریس پلیمری) سوق داده است [۵].

## ۲-۲-۱-۲ غشاهای مایع

غشای فازی است بین دو فاز دیگر که انتقال جرم بین آنها را کنترل می‌کند. اگر این فاز میانی یک مایع امتزاج‌ناپذیر با دو فاز دیگر باشد، نقش یک غشای مایع را خواهد داشت.

غشاهای مایع به سه صورت غشاهای امولسیون<sup>۴</sup>، پایه‌ای<sup>۵</sup> و جریانی<sup>۶</sup> هستند. در غشاهای امولسیونی از عوامل فعال‌کننده سطحی<sup>۷</sup> برای تولید امولسیون استفاده می‌کنند. در غشاء نوع دوم از مایعی در داخل یک جامد متخلخل با حفراتی در حد میکرون استفاده می‌کنند. در غشای جریانی هم، جریان مایع-مایع به صورت پیوسته برقرار بوده و حفرات را همواره پر نگه می‌دارد [۱].



شکل ۳- عملکرد غشای مایع

<sup>3</sup> Emulsion Liquid Membrane (ELM)

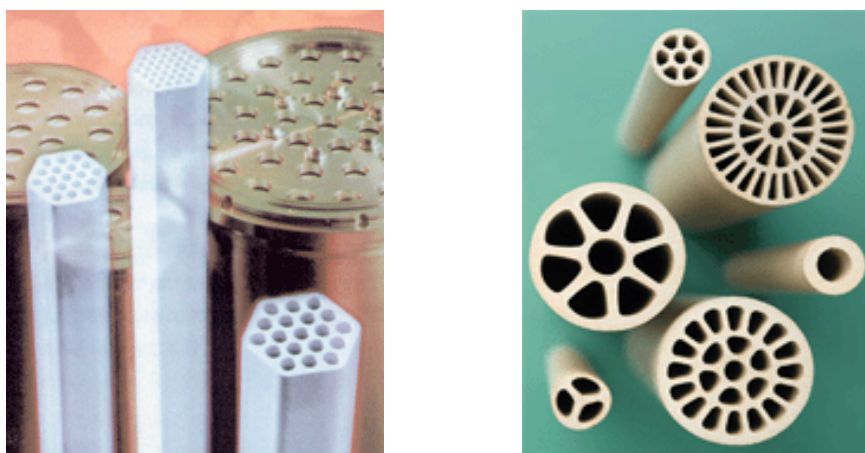
<sup>5</sup> Supported Liquid Membrane (SLM)

<sup>6</sup> Flowing Liquid Membrane (FLM)

<sup>7</sup> Surfactants

## ۲-۱-۲-۳ غشاهای سرامیکی

این غشاها که شامل اکسیدهای آلومینیوم، زیرکونیوم، تیتانیوم و سیلیسیم می‌باشند، دارای مزایایی مانند مقاومت حرارتی، مکانیکی و شیمیایی بالا، طول عمر زیاد، مقاومت خوردگی و باکتریایی بالا، امکان احیا، امکان تمیزکردن و کنترل مطلوب اندازه حفرات هستند. در این غشاها، هیچ افزودنی موردنیاز نبوده و محدودیتی در دمای فرآیند وجود ندارد. فیلتراسیون به کمک سرامیک، یک فرایند با انتخاب پذیری بالاست که بدون تبدیلات فازی است. ولی در کنار این مزایا، معایبی مانند هزینه ساخت بالا و مشکل بودن انجام اصلاحات بعدی بر روی غشا نیز وجود دارد [۶].



شکل ۴- نمونه‌هایی از غشاهای سرامیکی

در غشاهای سرامیکی جریان یا محیطی که باید تصفیه شود، از داخل کانال‌های حامل غشا عبور داده می‌شود. ذرات در صورتی که بزرگتر از شعاع حفرات غشا باشند، باقی مانده و نشست می‌کنند و ماده تغلیظ شده‌ای را ایجاد می‌کنند. ماده صاف شده از درون حفرات نفوذ کرده و وارد مراحل مختلف فرآیند می‌شود [۶].

پایه غشاهای سرامیکی، متشکل از اکسید آلومینیوم یا کریید سیلیکون با حفرات باز است. این ماده نه تنها می‌تواند نفوذپذیری را بالا ببرد، بلکه نیازهای مربوط به پایداری مکانیکی را نیز مرتفع می‌سازد. در ابتدا غشاهای سرامیکی در تکنولوژی تصفیه فاضلاب به کار می‌رفت. اما امروزه، کاربردهای آنها، تمامی صنایع را پوشش می‌دهد که این صنایع می‌تواند صنایع شیمیایی مانند جداسازی پاک‌کننده‌ها و کاتالیست‌ها، صنایع فلزی مانند بازیافت فلزات سنگین، صنایع نساجی و صنایع کاغذ و خمیر چوب مانند جداسازی، تغلیظ و آب‌زدایی بیومس و خزها،

صنایع غذایی و آشامیدنی مانند تغلیظ آب میوه، استریلیزاسیون شیر و آب پنیر و صنایع بازیافتی و محیط زیستی مانند کاهش BOD/COD، بازیابی آب از استخرهای شنا و بازیافت داروها و آفت کشها را در بر بگیرد [۶].

## ۲-۱-۲-۴ غشاهای فلزی

این غشاها که در حال حاضر بیشتر در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً از جنس فولاد ضدزنگ، سیلیس، آلومینیوم، نقره، نیکل و برخی از آلیاژها هستند. خصوصیت برجسته‌ای که در رابطه با این غشاها مطرح است، مقاومت آنها در برابر خوردگی است.

در زمینه جداسازی گاز که بیشتر به تخلیص گاز هیدروژن برای پیل‌های سوختی مربوط می‌شود، دسته‌ای از غشاهای فلزی توسعه یافته‌اند. البته در تصفیه آب آشامیدنی و حذف مواد آلی طبیعی به روش لخته‌سازی و میکروفیلتراسیون نیز از غشاهای فلزی همراه با هوادهی یا تزریق گاز اوزون به عنوان یک روش جدید برای حذف آلودگی‌های آب باران استفاده شده و ثابت شده است که غشای فلزی برای کاهش میکروبها و ذرات آلوده‌کننده از آب باران کافی است. برای حصول غشای فلزی با خواص ویژه، جنس پایه و روش ساخت و پوشش‌دهی آن اهمیت بسیاری دارد. تقریباً اکثر روشهای ساخت، شامل ایجاد شرایط خاص دما و فشار و همچنین انجام برخی عملیات اصلاحی، بر روی پایه یا غشای ساخته شده، است. در این راستا خواص غشاها نظیر نفوذپذیری، ظرفیت عبور سیال، مقاومت شیمیایی، مقاومت مکانیکی و حرارتی باید مد نظر قرار بگیرد [۷].



شکل ۵- غشای فلزی

در رابطه با عملکرد این غشاها، مطالعات اخیر بر روی ساخت غشاهای فلزی متراکم مرکب، با ضخامت حدود زیر میکرون تا چند ده میکرون و ویژگی‌ها و کاربردهای آنها متمرکز شده است. توسعه غشاهای فلزی پایه‌دار یا

مرکب بیشتر به دلیل کاهش هزینه‌های مواد، بهبود استحکام مکانیکی و امکان نفوذ بیشتر مواد می‌باشد. غشاهای مرکب فلزی دارای پایه‌هایی از جنس فلز، سرامیک یا پلیمر هستند. البته در اکثر موارد استفاده از فولاد ضدزنگ به عنوان پایه غشای فلزی پیشنهاد شده است. ساخت غشا با این فلز هزینه کم و استحکام مکانیکی بالایی داشته و در اکثر فرایندهای صنعتی تولید و خالص سازی هیدروژن، از لحاظ شیمیایی بی اثر است [۷].

از جمله روش‌های متداول در ساخت غشاهای فلزی، روش ترسیب شیمیایی، ترسیب الکتروشیمیایی، ترسیب شیمیایی و فیزیکی بخار، روش پاشش پودر خیس و غلطک‌کاری می باشد [۷].

## ۲-۳-۲ تقسیم‌بندی بر اساس شکل هندسی غشا

غشاها را می‌توان بر اساس شکلشان به انواع غشاهای صفحه‌ای<sup>۸</sup>، لوله‌ای<sup>۹</sup>، مارپیچی<sup>۱۰</sup> و الیاف میان تهی<sup>۱۱</sup> تقسیم کرد. غشاهای مارپیچی را می‌توان بر حسب نیاز، در دماها و فشارهای بالا مورد استفاده قرار داد. غشاهای لوله‌ای در غلظت‌های بالایی از جامد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فرایند فیلتراسیون جریان متقاطع نیز، الیاف میان تهی را می‌توان تحت عملیات شستشوی معکوس قرار داد [۲].

جدول ۱- مقایسه انواع مختلفی از غشاها

	Plate/Frame	Spiral	Tubular	Hollow Fiber
<b>Packing Density (<math>m^2/m^3</math>)</b>	300-500	200-800	30-200	500 -9000
<b>Fouling Resistance</b>	Good	Moderate	Very Good	Poor
<b>Ease of Cleaning</b>	Good	Fair	Excellent	Poor
<b>Relative Costs</b>	High	Low	High	Low

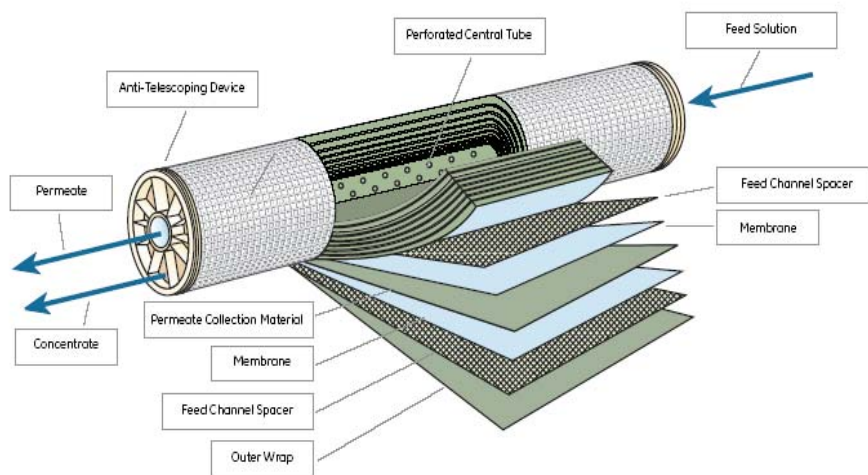
<sup>۸</sup>Plate

<sup>۹</sup>Tubular

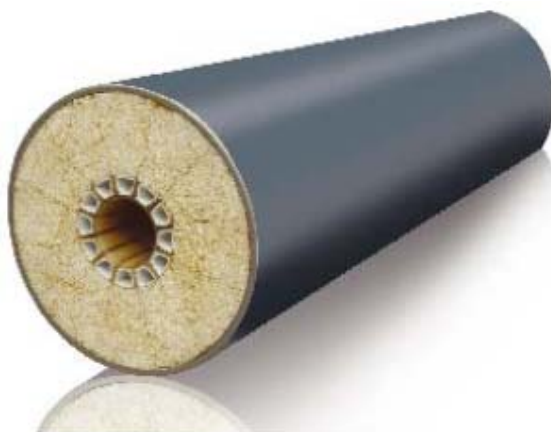
<sup>۱۰</sup>Spiral

<sup>۱۱</sup>Hollow-Fiber





(a)



(b)

شکل ۶- نمونه‌های از غشاهای مارپیچی (a) و الیاف میان تهی (b)

غشاها در داخل محفظه‌ای قرار می‌گیرند که تحت عنوان مدول اطلاق می‌شود. نوع جریان در سطح غشا و نیز نحوه حرکت سیال بستگی به نوع مدول انتخابی دارد. در واقع مدول به منظور نگهداری غشا، کنترل حرکت سیال و افزایش نسبت سطح به حجم به کار می‌رود. در هر مدول، غشاها به همراه نگهدارنده‌ها و پایه‌های خود در یک شکل هندسی خاص قرار می‌گیرند که دارای مجراهایی برای ورود خوراک، توزیع خوراک و همچنین جمع‌آوری

مواد می‌باشد. انواع مدول‌هایی که به کار می‌رود شامل مدول‌های لوله‌ای، صفحه و قاب، مارپیچی و موئینه‌ای است که بر اساس ویژگی‌ها و مزایای که دارند می‌توانند کاربردهای متفاوتی داشته باشند [۲].



شکل ۷- مدول غشا

## ۴-۲-۲ تقسیم‌بندی بر اساس ساختار غشا

بر اساس ساختمان غشاها می‌توان آنها را به دو دسته متقارن و نامتقارن تقسیم کرد. در دو سمت غشاهای متقارن، ابعاد حفرات و توزیع آنها یکسان می‌باشد. ضخامت این نوع غشاها بین ۲۰۰-۱۰۰ میکرون است. هر قدر ضخامت غشاها زیادتر باشد، مقاومت در برابر انتقال جرم زیاد بوده و از طرف دیگر با کاهش ضخامت، مقاومت مکانیکی آن کاهش می‌یابد که برای حل این مشکلات، از غشاهای نامتقارن که در آنها ابعاد حفرات و توزیع آنها یکسان نیست استفاده می‌کنند. این غشاها از دولایه تشکیل یافته‌اند در آن یک لایه فعال با ضخامت کمتر و متراکم‌تر وجود دارد که در آن جداسازی صورت می‌گیرد. لایه دیگر که به صورت پایه عمل می‌کند و حفرات بزرگتری دارد، بر مقاومت مکانیکی لایه اول می‌افزاید. البته در این نوع غشاها هر دو لایه از یک ماده تشکیل می‌شوند. یکی دیگر از انواع غشاهای نامتقارن که تحت عنوان غشاهای مرکب یا کامپوزیتی هستند، دو لایه از دو جنس متفاوت بوده و روش ساخت و اتصال آنها نیز تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند. علاوه بر این موارد، غشاها را از لحاظ تخلخل می‌توان به دو دسته متخلخل و غیر متخلخل تقسیم کرد. کارایی سیستم موفق تا حدود زیادی به تخلخل محیط بستگی دارد. بنابراین تخلخل انواع غشاها بر حسب محیط کاربرد، شامل فیلترهای لیفی، غشاهای متخلخل پلیمری، مواد متخلخل سرامیکی، مواد موئینه و... می‌باشد [۲].

## ۳-۲ ویژگی‌های غشاها

به منظور پیش‌بینی چگونگی انجام فرایندهای جداسازی باید ویژگی‌های مختلف غشاها را مورد بررسی قرار داد. خواص غشاها را می‌توان به دو دسته فیزیکی و شیمیایی تقسیم‌بندی نمود. خواص فیزیکی غشا شامل اندازه حفرات، تعداد حفرات، شکل حفرات، ضخامت، تخلخل و چروک خوردگی غشا می‌باشد. خواص شیمیایی غشا نیز شامل بار سطحی، هدایت الکتریکی، قابلیت جذب، واکنش‌پذیری و آب‌دوستی آنها است که با توجه به نوع فرایند باید تاثیر این عوامل را مورد بررسی قرار داد [۸].

## ۴-۲ کاربردهای غشا

امروزه جداسازی غشایی در بسیاری از صنایع مانند صنایع دارویی، بیوتکنولوژی، صنایع غذایی، پتروشیمی، پالایش، نساجی، کاغذسازی، اتومبیل‌سازی، تصفیه آب و فاضلاب و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه به اینکه بالا بودن ریسک سرمایه‌گذاری، یکی از موانع اصلی برای صنعتی کردن و تولید انبوه غشاها در ایران است، سرمایه‌گذاری برای این امر منوط به وجود بازارهای داخلی است. استفاده از غشاها در بعضی از فرایندهای جداسازی مانند شیرین‌سازی آب که در سطح وسیعی انجام می‌شود ممکن است توجیه اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در این حوزه داشته باشد. این تکنولوژی در برخی از حوزه‌ها در دنیا هنوز در مقیاس آزمایشگاهی است و به مرحله صنعتی نرسیده است، در این زمینه دستیابی به تکنولوژی فرایند نیز در زمینه‌های تصفیه پساب- های صنعت نفت، شیرین‌سازی گازهای ترش و ارتقای کیفیت حلال‌ها و برشهای نفتی با استفاده از غشاها در حال انجام است [۱].

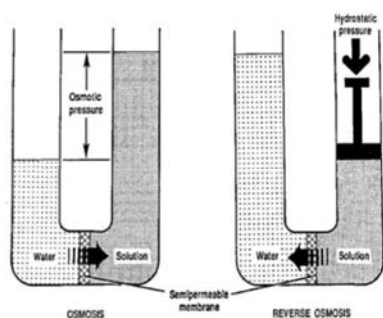
## ۳- فرایندهای غشایی

غشاهای سنتزی با داشتن بازارهای در حال رشد و فراهم کردن قابلیت‌های جداسازی بالا در بسیاری از صنایع، توانسته‌اند پیشرفت‌های زیادی داشته باشند. صنایع و کارخانجات، سرمایه‌گذاری خود را در فرایندهای جداسازی بر روی غشاها متمرکز کرده‌اند تا معایب سایر روش‌ها مانند تبخیر، تقطیر و یا استخراج را مرتفع سازند. هفت فرایند جداسازی عمده شامل میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس، الکترودیالیز، جداسازی گازی و تراوش تبخیری در بسیاری از زمینه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که توجه و تمایل بیشتر به

حفاظت از محیط زیست، تقاضا برای آب تمیز و بازده انرژی بالا استفاده از این فرایندهای غشایی را افزایش داده است [۹].

### ۳-۱ اسمز معکوس<sup>۱۲</sup> (RO)

فرایند اسمز معکوس، قادر به حذف جامدات حل شده، باکتری، ویروس و سایر مواد میکروبی داخل آب می‌باشد. اسمز معکوس اساساً یک فرایند غشایی نفوذی است که براساس نیروی محرکه فشاری عمل می‌کند. این فرایند عمدتاً برای شیرین سازی آب دریا مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویژگی برجسته روش اسمز معکوس، این است که هیچ تغییری در آن وجود نداشته و مصرف انرژی نسبتاً پایینی دارد. تقریباً تمامی غشاهای اسمز معکوس، از جنس پلیمرهایی با ترکیبات پلی‌آمیدی و استات سلولز می‌باشند. غشاهای فرایند اسمز معکوس معمولاً در دو نوع غشاهای نامتقارن و غشاهای کامپوزیتی نازک فیلمی هستند.



شکل ۸- فرایند جداسازی اسمز معکوس

این غشاها، کوچکترین ساختار حفرات را با اندازه قطر حفرات در محدوده ۰/۵-۱/۵ نانومتر را دارا هستند. در این غشاها بیشتر از ۹۵-۹۹٪ از نمک‌های معدنی و ترکیبات آلی باردار شده به دلیل دافعه بار الکتریکی سطح غشا، دفع می‌شوند. کاربرد این روش در صنایع آب آشامیدنی، صنایع غذایی، صنایع الکترونیکی، کاغذسازی و بسیاری از موارد دیگر است [۱].

<sup>12</sup> Reverse Osmosis

۲-۳ نانوفیلتراسیون<sup>۱۳</sup> (NF)

نانوفیلتراسیون شکلی از فیلتراسیون است که غشاها را به منظور جداسازی سیالات یا یون‌های گوناگون به کار می‌گیرد. نانوفیلتراسیون به صورت اسمز معکوس ملایم‌تری عنوان می‌گردد، چرا که حفرات غشایی بزرگتری در مقایسه با غشاهای اسمز معکوس دارد. به دلیل اینکه این غشاها در فشارهای بسیار پایین‌تری کار کرده و برخی از مواد معدنی را از خود عبور می‌دهند، NF می‌تواند در مواردی که حذف بالای مواد آلی مورد نیاز است و همچنین در حذف متوسط مواد معدنی کاربرد داشته باشد. این روش قادر به تغلیظ شکر، نمک‌های دوظرفیتی و پروتئین‌ها می‌باشد. مزیت این روش بر اسمز معکوس این است که نانوفیلتراسیون معمولاً در بازافت‌های بالاتری کار می‌کند در نتیجه، در آب کل مصرفی، صرفه جویی خواهد شد که ناشی از سرعت جریان با غلظت پایین‌تر است. ولی این روش در مورد ترکیبات آلی با جرم مولکولی پایین مانند متانول، مؤثر نیست. نانوفیلتراسیون از نظر هزینه انرژی و دفع یون و ابعاد حفرات، در بین روشهای دیگر شرایط بهینه‌ای را ایجاد کرده است. با یک نانوفیلتر می‌توان میزان غلظت یک باکتری را در یک محصول غذایی محلول به صفر رساند [۱].



شکل ۹- فرایند جداسازی نانوفیلتراسیون

۳-۳ اولترافیلتراسیون<sup>۱۴</sup> (UF)

اولترافیلتراسیون بیشتر در جداسازی محلولی که به صورت مخلوطی از مواد مطلوب و نامطلوب است، به کار می‌رود. اولترافیلتراسیون تاحدی بستگی به عواملی چون بار و اندازه ذره دارد. انواع گونه‌هایی که از این غشاها

<sup>13</sup> Nanofiltration<sup>14</sup> Ultra filtration

برگشت داده می‌شوند، شامل بیومولکول‌ها، پلیمرها و ذرات کلوئیدی است. نیروی محرکه برای انتقال از غشا، اختلاف فشار می‌باشد. فرایندهای اولترافیلتراسیون در ۱۰-۲۰ bar کار می‌کنند که البته در بعضی از موارد امکان کار در فشارهای بالای ۳۰-۲۵ bar نیز وجود دارد. در این فرایند، زلال‌سازی خوراک، تغلیظ حل‌شونده برگشت داده شده و جزیه‌جز کردن<sup>۱۵</sup> حل‌شونده، انجام می‌شود. این روش در جداسازی جریان‌های آلی روش چندان موثری نیست. غشاهای UF قادر به نگهداری گونه‌هایی هستند که دارای وزن مولکولی در محدوده ۵۰۰۰۰۰-۳۰۰ دالتون و اندازه حفرات از ۱۰۰-۱۰ آنگستروم باشد. این روش معمولاً در جداسازی ماکرومولکول‌هایی نظیر پروتئین‌ها، از حلال‌های با جرم مولکولی پایین کاربرد دارند. حفرات لایه پایینی غشا به طور نسبی بزرگتر از لایه سطحی بوده و هنگامی که حلال درون غشا جریان می‌یابد، گونه‌های باقی مانده بر روی سطح غشا متمرکز شده و مقاومتی در برابر جریان ایجاد می‌کنند. در فرایند سوسپانسیونی نیز به صورت لایه متخلخل بر روی سطح غشا جمع می‌شوند. فرایند UF بستگی به خواص فیزیکی غشا، مانند نفوذپذیری، ضخامت، متغیرهای فرایندی مانند مصرف خوراک، غلظت خوراک، فشار سیستم، سرعت و دما دارد. محدوده کاربردی این روش، در تصفیه زایدات امولسیونی نفت، تغلیظ ماکرومولکول‌های بیولوژیکی و تغلیظ پروتئین‌های حساس به حرارت برای افزودنیهای غذایی است [۱].



شکل ۱۰- فرایند جداسازی اولترافیلتراسیون

### ۳-۴ میکروفیلتراسیون<sup>۱۶</sup> (MF)

میکروفیلتراسیون فرایندی است که در آن اندازه حفرات بین ۱۰-۰٫۱ میکرون بوده و میکروارگانیسم‌ها

<sup>۱۵</sup> Fractionation

<sup>۱۶</sup> Micro filtration



نمی‌توانند از آن عبور کنند. این فرایند برای جداسازی موادی با سایز کلوئیدی می‌باشد که از مکانیسم غربالی برای یاقی‌ماندن ذرات بزرگتر از اندازه قطر حفرات استفاده می‌کند. در این فرایند از پلیمرهای طبیعی و سنتزی مانند نیترات یا استات سلولز، پلی‌آمیدها و پلی‌سولفونها استفاده می‌شود. علاوه بر آن مواد معدنی مانند اکسیدهای فلزی، شیشه و کربن با پوشش زیرکونیا نیز برای تولید این غشاها به کار می‌روند. این غشاها در صنایع دارویی و غذایی کاربرد وسیعی دارند.

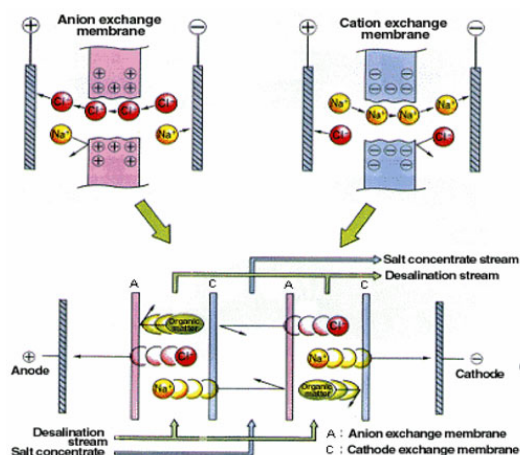


شکل ۱۱- فرایند جداسازی میکروفیلتراسیون

### ۳-۵ الکترودیالیز<sup>۱۷</sup> (ED)

الکترودیالیز که در آن، یونها از طریق غشا از یک محلول به محلول دیگر تحت اختلاف پتانسیل الکتریکی عبور داده می‌شوند، برای انواع زیادی از فرایندها نظیر تغلیظ نمک‌ها، جداسازی اسیدها و بازها از محلول‌های آبی و جداسازی ترکیبات یونی از مولکولهای غیر باردار به کار می‌رود. این غشاها معمولاً از پلی استایرن با اتصالات عرضی سولفات تشکیل شده‌اند. این سیستم متشکل از دو نوع غشای آنیونی و کاتیونی است که در یک میدان الکتریکی قرار داده شده است. غشاء انتخاب‌پذیر کاتیونی برای عبوردهی کاتیون‌ها و غشاء آنیونی برای عبوردهی آنیون‌ها می‌باشد. انتقال یونها در طول غشا، منجر به رسوب یونی در برخی از سلولها و تغلیظ یونی در برخی دیگر می‌شود. این فرایند برای تولید آب با خلوص بالا به کار می‌رود [۱].

<sup>17</sup> Electro dialysis



شکل ۱۲- فرایند جداسازی الکترودیالیز

### ۳-۶ جداسازی گازی<sup>۱۸</sup>

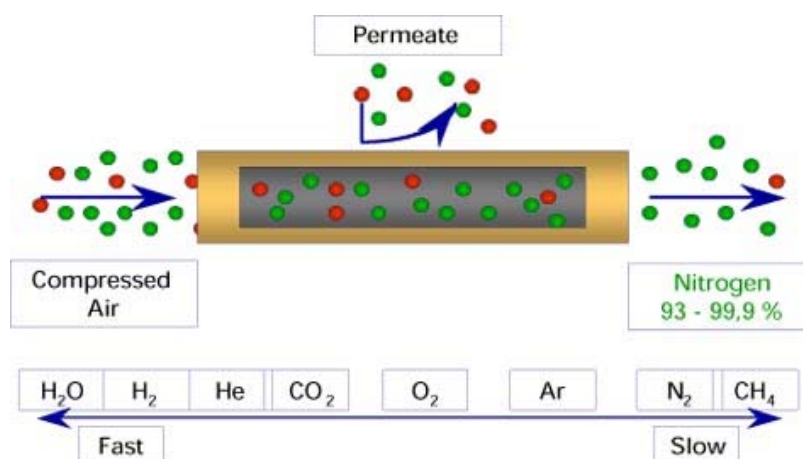
تکنولوژی جداسازی گازی، در حدود ده سال است که توسعه چشمگیری یافته و به یکی از عملیات واحد مهم تبدیل شده است. این فرایند به عنوان مکملی برای جذب سطحی و تقطیر دما پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. عمر غشاها در فرایند جداسازی گازها در صورت عبور خوراک تمیز بیش از ۱۰ سال بوده و مصرف کم انرژی برای جداسازی، سادگی فرایند و حجم و وزن کم تجهیزات از مزایای این تکنولوژی است که در مناطق دور افتاده که امکان حضور تمام وقت نیروی انسانی وجود ندارد، می‌توان با استفاده از این تکنولوژی بدون نیاز به حضور انسان و یا با حداقل نیروی انسانی بر عملکرد فرایند نظارت کرد. غشاهای متشکل از پلیمرها و کوپلیمرها، به شکل فیلم‌های مسطح و یا الیاف میان تهی در جداسازی گازی استفاده می‌شوند. گازهای متفاوت در طول غشا یا نرخ‌های مختلف عبور داده می‌شوند. نرخ نفوذ، با اختلاف فشار نسبت مستقیم و با ضخامت غشا نسبت معکوس دارد. همچنین با حلالیت گاز در غشا و نفوذپذیری آن متناسب است. این فرایند تحت تاثیر سه شاخص عملکرد کلیدی مربوط به غشا است که عبارتند از انتخاب‌پذیری نسبت به گازهای جداسازی شده، شار غشایی یا نفوذپذیری و طول عمر غشا و هزینه‌های نگهداری و جابجایی [۱].

عمده‌ترین متقاضیان تحقیقات در زمینه جداسازی غشایی گازها در کشور، صنایع نفت، گاز و پتروشیمی هستند. این صنایع فناوری جداسازی غشایی گازها را برای بازیافت هیدروژن و هیدروکربن‌ها در پالایشگاه‌ها،

<sup>18</sup> Gas Separation



شیرین‌سازی گازهای ترش، بازیافت مونومر در واحدهای پلی اولفین، بازیافت بخارات بنزین در انبارها و جایگاه‌های سوخت رسانی، خالص‌سازی و استفاده مجدد از گازهای تزریقی به چاه در ازدیاد برداشت از چاهای نفت و گاز، جداسازی هوا و تولید نیتروژن، نم زدایی و جداسازی هلیوم مورد استفاده قرار می دهند [۱۰].

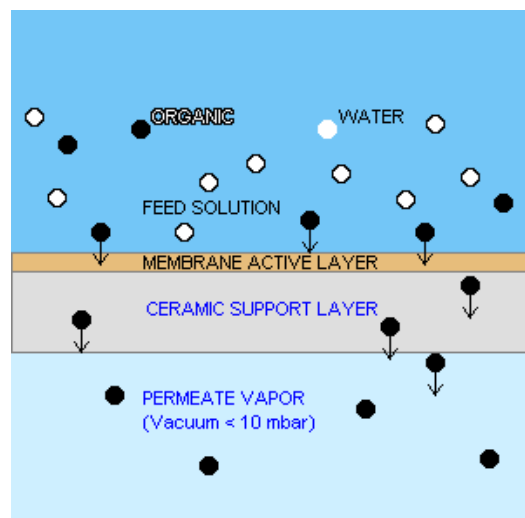


شکل ۱۳- فرایند جداسازی گازی

### ۳-۷ تراوش تبخیری<sup>۱۹</sup>

تراوش تبخیری برای جداسازی مایعات امتزاج‌پذیر به کار می‌رود. در این فرایند، جذب یکی از اجزا مایع، توسط غشا انجام می‌شود که در آن، نفوذ این جز در غشا و تبخیر آن، به صورت یک بخار قابل نفوذ در خلاء جزئی به کار رفته در بخش زیرین غشا انجام می‌شود. این روش به دلیل تغییر فاز جداکننده از سایر فرایندها متمایز شده است. انتقال جرم در طول غشا متأثر از گرادیان فشار بخار در طول غشا می‌باشد. کاربرد این غشا در جداسازی مخلوط آب و اتانول، بازیافت حلال و غنی‌سازی آلاینده‌های آلی است. مزایای این روش صرفه اقتصادی آن برای مخلوط موادی است که تفاوت کمی در نقطه جوش آنها وجود داشته و یا آزنوتروپی هستند [۱].

<sup>۱۹</sup> Pervaporation



شکل ۱۴- فرایند جداسازی تراوش تبخیری

علاوه بر روش‌های گفته شده، بسیاری از تکنولوژی‌های جدید مانند غشاهای تبادل یونی، پیل‌های سوختی، استخراج غشایی مایع، غشاهای کپسولی، راکتورهای غشایی، تقطیر غشایی، غشاهای شبه مایع الکتروستاتیکی و بسیاری از موارد نیز در حال توسعه و ورود به صنایع هستند. نکته حائز اهمیت در این رابطه این است که با توجه به ویژگی‌های فرایندی، می‌توان فرایندهای غشایی را به صورت‌های ناپیوسته و پیوسته و همچنین چند مرحله‌ای انجام داد [۱].

#### ۴- نتیجه‌گیری

فرایندهای جداسازی غشایی با توجه به مزایای مختلفی که دارند، می‌توانند به عنوان یک جایگزین برای روش‌های فیلتراسیون، سیستم‌های تصفیه شیمیایی و بسیاری از موارد دیگر عمل کنند. ویژگی‌های ساختاری و هندسی و نیز جنس غشاها، موجب انعطاف‌پذیری آنها در کاربردهای متفاوت مانند فرایندهای اسمز معکوس، اولترافیلتراسیون، میکروفیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و ... شده است. جایگزینی فرایندهای غشایی منجر به بهبود کیفیت محصولات و افزایش بازده فرایندی شده و امکان گسترش این فرایندها را در شرایط فرایندی اعم از دما، فشار و pH متفاوت را فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها، فرایند جداسازی غشایی را به یک تکنولوژی موفق در صنایع مختلف تبدیل کرده است.

## ۵- مراجع

- [1] G. Srikanth, "Membrane Separation Processes" Technology and Business Opportunities, Water Conditioning & Purification, pp1- 4, 2008
- [2] R. Sharma, "Membrane Filtration", pp1-95, 2008, Available from: <http://www.OzScientific.com>
- [3] "Synthesis and catalytic membranes", Institute of Polymer Research, Center for Membranes and Structured Materials, 2008, Available from: <http://www.gkss.de>
- [4] "Synthetic polymeric membranes that are used with the four filtration technologies", pp1-2, 2008
- [5] T. dev Naylor, "Polymer Membranes", Rapra Technology Limited, Volume8, No.5, 1996
- [6] "Ceramic membranes", Lenntech Water treatment & air purification, 2008  
Available from: <http://www.lenntech.com>
- [۷] سرمد حیدری، "غشاهای فلزی"، باشگاه مهندسان ایران، مقاله‌های مهندسی شیمی، ۲۰۰۸.
- [8] J. Baggote, E. Dennis, "Membranes", pp1-10, 1995
- [9] J. Bomben, "Membrane Separation", SRI Consulting Business Intelligence, 2008
- [۱۰] سیدحسن سراجیان، "جداسازی گاز توسط تکنولوژی غشایی"، ماهنامه علمی، آموزشی، پژوهشی نفت پارس، ۲۰۰۸.