

A Review of Reverse Osmosis Membrane Synthesis Methods

M. Esmailpour¹, A.A. Asgharinezhad¹, M. Faghihi^{1*}

1- Assistant Professor, Chemistry and Process Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: mfaghihi@nri.ac.ir)

Received: 05-03-2022

Revised: 01-06-2022

Accepted: 19-06-2022

Available Online: 21-09-2022

مروری بر روش های سنتز غشاهای اسمز معکوس

محسن اسماعیل پور^۱، علی اکبر اصغری نژاد^۱، مرتضی فقیهی^{۱*}

۱- استادیار، گروه شیمی و فرآیند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

(E-Mail: mfaghihi@nri.ac.ir، نویسنده مسئول)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

Abstract

The issue of water consumption in the world has been raised as a vital issue in recent decades. Membrane technology is one of the optimal methods to replace thermal methods for freshwater production. Among the methods of desalination and water production, the reverse osmosis membrane method invented in recent decades has quickly found its place in the industry. Today, about half of the world's freshwater production capacity is provided by reverse osmosis membrane technology. The main part of the reverse osmosis process is the membrane, which is generally made of a polymeric material. The fabrication of these polymer membranes and the optimization of their formulations and properties have attracted the attention of researchers in recent years, and their results have been commercialized in some large companies. Due to the importance of this issue in various industries, including power plants, in this article, a review of reverse osmosis membrane synthesis methods has been done. Also, the optimal synthesis method, which is the interfacial polymerization method, is introduced and some points are provided in this regard. Older methods, including cellulose acetate casting, were first used by researchers. However, due to the challenges of these old methods, researchers developed the interfacial polymerization method by making a thin film composite with polyamide material as the main component of the reverse osmosis membrane.

Keywords: Reverse Osmosis, Membrane, Polyamide, Interfacial Polymerization.

چکیده

بحث مصرف آب در دنیا از دهه های اخیر به عنوان یک مسأله حیاتی مطرح شده است. تکنولوژی غشایی از جمله روش های بهینه جهت جایگزینی با روش های حرارتی برای تولید آب شیرین است. در بین روش های شیرین سازی و تولید آب، روش غشایی اسمز معکوس که در دهه های اخیر ابداع شده به سرعت در صنایع جای خود را باز کرده است. امروزه در حدود نیمی از ظرفیت تولید آب شیرین دنیا از تکنولوژی غشایی اسمز معکوس تأمین می شود. قلب فرآیند اسمز معکوس، غشاء مورد استفاده در آن است که بیشتر از جنس مواد پلیمری می باشد. ساخت این غشاء های پلیمری و بهینه کردن فرمولاسیون و خواص آنها در سال های اخیر مورد توجه محققان واقع شده و نتایج آنها در برخی شرکت های بزرگ نیز تجاری سازی شده است. باتوجه به اهمیت این موضوع در صنایع مختلف از جمله صنایع نیروگاهی، در این مقاله، مروری بر روش های سنتز غشاء اسمز معکوس انجام گرفته است. همچنین روش بهینه سنتز که روش پلیمریزاسیون بین سطحی است معرفی شده و نکاتی در این خصوص ارائه شده است. روش های قدیمی شامل ریخته گری با سلولز استات در ابتدا توسط محققان مورد استفاده قرار گرفت. اما باتوجه به چالش های این روش های قدیمی، محققان روش پلیمریزاسیون بین سطحی را با ساخت کامپوزیت فیلم نازک با ماده پلی آمید به عنوان جزء اصلی غشا اسمز معکوس ابداع نمودند.

واژه های کلیدی: اسمز معکوس، غشاء، پلی آمید، پلیمریزاسیون بین سطحی.

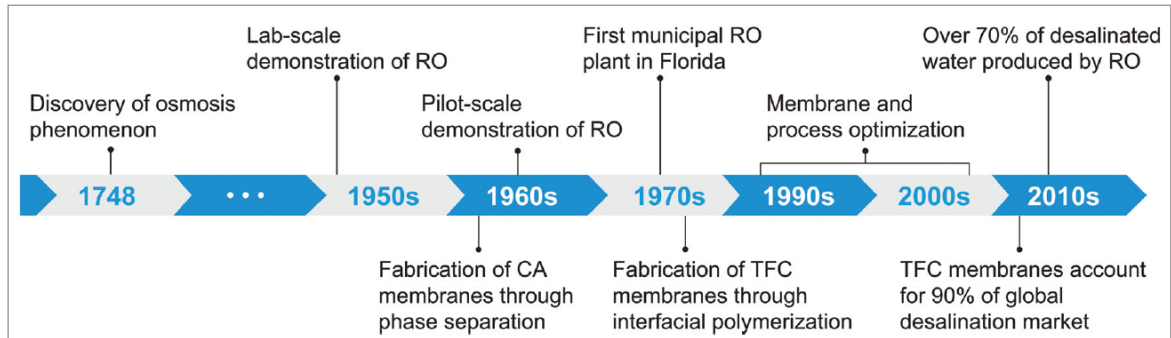
شیرین‌سازی آب می‌تواند شامل روش‌های مختلفی از جمله حرارتی (سوخت فسیلی)، غشایی، الکترودیالیز و خورشیدی (انرژی تجدیدپذیر) باشد.

در روش حرارتی، اعمال انرژی موجب تبخیر آب شده و با سرمایش آب، ناخالصی و املاح آب جداسازی می‌شود. در دهه‌های گذشته از فرآیندهای حرارتی از جمله تبخیر چندمرحله‌ای (MSF)^۱ و تقطیر چند اثری (MED)^۲ زیاد استفاده شده است. چالش‌های موجود در روش‌های حرارتی از جمله مصرف انرژی بالا، آلاینده‌ی بیشتر، هزینه بالا، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و زیست تخریب پذیر بودن باعث شد در دهه‌های اخیر به روش‌های جایگزین پرداخته شود (Diaz و همکاران، ۲۰۲۱). با ظهور فرآیند غشایی برای شیرین‌سازی آب تمایل صنعتگران و محققان به سمت این فرآیند بیشتر شده است. در حال حاضر فرآیند غشایی اسمز معکوس (RO)^۳ بزرگترین سهم در واحدهای بزرگ آب شیرین‌سازی و تصفیه آب در دنیا را دارد. هزینه‌های عملیاتی واحدهای RO به دلایل ذیل کمتر از هزینه‌های فرآیندهای حرارتی هستند: قیمت کمتر (در مواردی نظیر تجهیزات اولیه مورد نیاز، میزان سرمایه‌گذاری اولیه، میزان مصرف انرژی)، جریان بیشتر (میزان جریان محصول)، میزان نمک زدایی بالاتر که می‌تواند در فشارهای اعمالی تاندازه‌ای کم ایجاد شود و استفاده از تجهیزات بازیابی فشار که می‌تواند در کاهش قیمت موثر باشند. از لحاظ آماری نیز مصرف غشاهای اسمز معکوس در بحث شیرین‌سازی در دنیا با شیب تندی در حال افزایش است. در سال ۲۰۱۱ میلادی بیش از ۵۰٪ تاسیسات شیرین‌سازی آب در دنیا از روش اسمز معکوس استفاده شده (Li و همکاران، ۲۰۱۳)، درحالی‌که بقیه آنها بر پایه روش‌های حرارتی شیرین‌سازی آب استوار می‌باشد. سهم ظرفیت تولید آب به روش RO در سال‌های اخیر روند رو به رشدی داشته و در برخی منابع به سهمی بالاتر از ۶۵٪ از تولیدات کل آب شیرین تولیدی دنیا را به فرآیند غشایی RO در سال‌های اخیر تخصیص داده است. Panagopoulos و Haralambous (۲۰۲۰) بیان کردند در سال ۲۰۱۹ واحدهای شیرین‌سازی آب در دنیا در حدود ۱۴۰ میلیون متر مکعب در روز آب تولید می‌کنند بحران کم آبی و روند رو به رشد احداث واحدهای اسمز معکوس به‌ویژه در منطقه خاورمیانه نشان از اهمیت تحقیق بر روی فرآیند اسمز معکوس و به‌ویژه ساخت غشاهای آن دارد که به‌عنوان قلب این فرآیند محسوب می‌شود. ازاین‌رو در این مقاله سعی شده است روش‌های ساخت غشاهای اسمز معکوس بررسی شده و بهترین روش ساخت معرفی شود.

روش‌های مختلفی برای ساخت غشاهای وجود دارد. اغلب روش‌های ساخت بیشتر به مواد تشکیل‌دهنده غشاء وابسته است تا به محدوده کاری غشاء (میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون و ...). فرآیندهای ساخت می‌توانند اندازه حفرات را به‌ویژه در غشاهای کامپوزیتی کنترل کند که منجر به تولید دسته‌های مختلف غشایی از نظر ابعاد حفرات می‌شود. وارونگی فازی^۴ و الکترورسی^۵ از مهمترین روش‌های معمول در ساخت غشاهای به‌ویژه در کاربردهای تصفیه آب هستند. روش‌های جدید وارونگی فازی شامل وارونگی فازی ضد حلالی (NIPS)^۶ و جداسازی فازی القاء حرارتی و وارونگی فازی القاء تبخیری (VIPS)^۷ می‌باشند. روش‌های متنوع و پیچیده‌تر دیگری هم برای ساخت غشاهای کامپوزیتی و اصلاح سطحی غشاهای پیشنهاد شده است. از آن جمله می‌توان به پلیمریزاسیون درجا، ریخته‌گری فیلمی، رسوب به کمک یونی، سنتز هیدروترمال، روکش دهی و جذب سطحی اشاره کرد (Warsinger و همکاران، ۲۰۱۱).

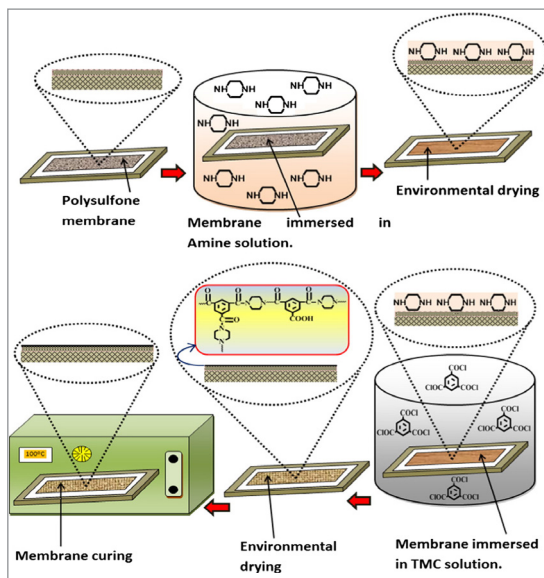
روش‌های سنتز غشاء اسمز معکوس

روش ابداعی اولیه برای سنتز غشاء اسمز معکوس شامل ریخته‌گری^۸ دستی بود که بیش از ۷۰ سال پیش توسط محققان به کار گرفته شد. در این روش از غشاء سلولز استات به‌عنوان ماده اصلی استفاده می‌شد (Abdelrasoul و همکاران، ۲۰۱۷). اما از جمله چالش‌های مهم در این روش بحث تراوایی و نمک زدایی کم این نوع غشاهای بود. از طرفی نیاز به تولید انبوه باعث شد محققان هم به فکر ماده جایگزین با سلولز استات باشند و هم روش سنتز را بهینه کنند (Lim و همکاران، ۲۰۲۱). ازاین‌رو در دهه‌های بعد روش پلیمریزاسیون بین سطحی (IP)^۹ ابداع شد. پلیمریزاسیون بین سطحی مهمترین روش برای تولید تجاری غشاء کامپوزیت فیلم نازک (TFC)^{۱۰} برای RO و NF^{۱۱} می‌باشد. اولین غشاء TFC ساخته شده با روش پلیمریزاسیون بین سطحی توسط Cadotte و همکاران (۱۹۸۰) ابداع شد و یک تحول چشمگیر در ساخت و کاربرد غشاهای اسمز معکوس (RO) ایجاد کرد. در شکل (۱) روند تغییرات روش سنتز غشاهای اسمز معکوس در گذر زمان نشان داده است. با وجود تحقیقات گسترده در سال‌های اخیر، همچنان فرآیند IP صنعتی که در ابتدای دهه ۱۹۸۰ میلادی ابداع شد، به طور عموم در تولید غشاء اسمز معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساخت لایه پلی آمیدی نازک و بدون نقص به‌عنوان لایه اصلی غشاهای RO همچنان در فرآیندهای صنعتی چالشی می‌باشد. باتوجه‌به اهمیت افزایش نمک‌زدایی و کاهش هزینه‌های خرابی و گرفتگی غشاء، پرداختن به روش سنتز و بهبود آن در سال‌های آینده همچنان مد نظر محققان خواهد بود (Li و Elimelech، ۲۰۲۱).



شکل ۱- نمودار زمانی توسعه فرآیندهای نمک زدایی مبتنی بر غشا (Li و Elimelech, ۲۰۲۱).

را تولید می‌کنند. با روش IP می‌توان غشاء فشرده با ضخامت ۱۰۰-۲۰۰ nm تهیه کرد، از این رو این روش در ابعاد صنعتی و آزمایشگاهی مورد توجه و استفاده می‌باشد.



شکل ۲- طرحواره واکنش IP برای ساخت غشاء کامپوزیت فیلم نازک (Ray و Vyas, ۲۰۱۵).

امروزه غشاءهای TFC سهم بیشتری را در بازار غشاءهای RO به خود اختصاص داده‌اند. در غشاء RO از طریق مکانیزم حل شونده-نفوذ^{۱۴} انتقال جرم از لایه پلیمری صورت می‌گیرد. در طی دهه‌های گذشته تلاش‌های متعددی توسط محققان بر روی ساخت لایه جداکننده غشاء RO صورت گرفته است. در این بین از موادی مثل پلی‌آمیدهای آروماتیک و آلیفاتیک، پلی-سولفون‌آمید و پلی‌استر آمید استفاده شد. در میان مواد مختلف، پلی‌آمیدهای مشتق شده از دی‌آمین آلیفاتیک مانند پلی‌اتیلن ایمین (PEI)^{۱۵} و پلی‌پیرازین (PIP)^{۱۶} و دی‌آمین آروماتیک مانند MPD^{۱۷} برای تولید غشاء کامپوزیتی RO بهترین عملکردی را نشان دادند. در نتیجه امروزه پلی‌آمیدها بیشترین کاربرد را در ساخت غشاءهای TFC RO در بازار تجاری غشاء دارند (Ray و Gohil, ۲۰۱۷).

روش اولیه ابداعی به این صورت بود که لایه نگهدارنده پلی سولفون میکرومتخلخل در محلولی از آمین قرار داده شد و سپس غشاء آغشته شده به آمین در محلولی از هگزان دارای دی ایزوسیانات قرار داده شد. با اعمال درجه حرارت ۱۰۰ °C واکنش اتصالات عرضی در غشاء آغاز شد. غشاءهای TFC بر پایه پلی اوره میزان نمک‌زدایی بهتری و جریان آب بیشتری را نسبت به غشاء سلولز استات نشان دادند.

به دلیل مزایای روش پلیمریزاسیون بین سطحی در بهینه کردن خواص لایه نازک غشاء و لایه زمینه میکرومتخلخل، دسته‌های مختلفی از غشاءهای TFC ساخته شده‌اند. عوامل مختلفی مثل غلظت منومر، نوع حلال، زمان واکنش و روش‌های تکمیلی می‌تواند بر مورفولوژی و ترکیب درصد لایه ممانعت‌کننده غشاء تأثیرگذار باشد (Lalia و همکاران, ۲۰۱۳).

اگر چه غشاهای کامپوزیت فیلم نازک (TFC) در صنعت با اقبال زیادی روبه‌رو هستند، اما در بین محققان توجه ویژه‌ای هم برای ساخت غشاءهای نامتقارن از طریق فرآیند ساخت تک مرحله‌ای وجود دارد. جدای از روش پلیمریزاسیون بین سطحی (IP)، تکنیک‌های پوشش‌دهی دیگری مانند پیوندزنی نوری، پوشش‌دهی غوطه‌وری، تابش باریکه الکترونی و پلیمریزاسیون پلاسمایی می‌توانند برای نشان دادن لایه جداکننده فوق نازک بر روی غشاء نگهدارنده استفاده کردند. در این میان روش IP گستردگی بیشتری در ساخت غشاء داشته و تحقیقات بیشتری را به خود اختصاص داده است (Lau و همکاران, ۲۰۱۲).

روش پلیمریزاسیون بین سطحی (IP)

Ray و Vyas (۲۰۱۵) طرحواره‌ای را برای ساخت غشاء TFC از طریق واکنش IP پیشنهاد داده‌اند (شکل ۲). همان طور که در (شکل ۲) مشاهده می‌شود، لایه نگهدارنده که از جنس غشاء MF^{۱۱} یا UF^{۱۲} است در محلولی حاوی منومر آمینی قرار داده می‌شود. سپس اجازه داده می‌شود تا سطح خشک شود و در محلولی از اسید کلریدریک قرار داده می‌شود. این دو منومر در سطح مشترک حلال‌ها با هم واکنش داده و لایه فشرده پلیمری

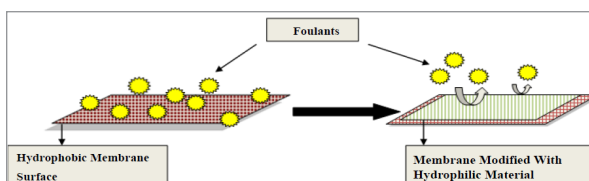
خصوص کنترل واکنش پلیمریزاسیون ماده غشایی است. بهینه سازی واکنش پلیمریزاسیون بین سطحی می‌تواند شامل سینتیک، ضریب نفوذ مواد اولیه، زمان واکنش، قابلیت حل‌کنندگی حلال، ترکیب درصد محلول، سرعت هسته زایی، زمان واکنش پخت، محدوده جرم ملکولی پلیمر و خواص لایه نگهدارنده میکرومتخلخل می‌باشد (Lee و همکاران، ۲۰۱۱).

در کنار فعالیت‌ها جهت شناخت منومرهای جدید در واکنش IP، تلاش‌هایی برای بهبود واکنش IP از طریق افزودن بهبود دهنده‌ها و فعال‌کننده‌های آلی به محلول MPD و TMC صورت گرفته است. بهبود دهنده‌ها می‌توانند در واکنش شرکت کنند و در تماس با گروه‌های عاملی لایه نازک قرار بگیرند و خواص سطحی و مقاومت به رسوب غشاء RO را بهبود بخشند. برای مثال Tarboush و همکاران (۲۰۰۸) به محلول حاوی TMC بهبود دهنده‌های پلی اتیلن گلیکول و متیلن بیس‌فنیل ایزوسیانات^{۲۶} را اضافه نمودند تا آبدوستی سطح را بهبود بخشند. نتایج این گروه بهتر شدن خاصیت آبدوستی و مقاومت به رسوب را در اثر افزودن این بهبوددهنده‌ها را نشان داد.

افزودن پلی‌وینیل الکل (PVA)^{۲۷} به کامپوزیت فیلم نازک جهت غشاء نانوفیلتراسیون نیز یکی دیگر از راه‌های بهبود غشاء TFC است. به این منظور مقادیر مختلف PVA به پیرازین^{۲۸} در حین واکنش IP در کنار TMC به مجموعه اضافه می‌شود تا عملکرد ضد رسوبی غشاء کامپوزیتی را بهبود بخشد. افزودن زنجیرهای آبدوست PVA به لایه فعال پلی‌آمیدی تأثیرات موثری در تولید سطح نرم‌تر و افزایش آبدوستی غشاء دارد که موجب کاهش رسوب پروتئین در سطح غشاء به‌ویژه در بازه‌های کارکرد طولانی می‌گردد. کاربرد افزودنی‌ها مثل بزرگ ملکول‌های آبدوست‌کننده^{۲۹} سطح یک راه موثر در تغییر عملکرد غشاء TFC می‌باشد. در برخی موارد ساخت غشاء از بزرگ ملکول‌های آبدوست‌کننده سطح برای لایه پلی‌آمیدی استفاده شده و مشاهده شده که در حین پلیمریزاسیون درجا بزرگ ملکول‌ها توانسته‌اند به سمت سطح تماسی پلیمر و هوا مهاجرت کنند و سطح غشاء را آبدوست تر کنند و غشاء کامپوزیتی با بهبود عملکرد جریان تولید کنند. یکی دیگر از راه‌های بهبود سطح غشاء TFC استفاده از نانوذرات است. در تحقیق Kim و همکاران (۲۰۰۳) غشاء اسمز معکوس TFC را با نانوذرات TiO_2 از طریق اتصالات هیدروژنی با گروه‌های عاملی COOH لایه فیلم نازک پلی‌آمیدی ایجاد کردند. آنها گزارش نمودند که این بهبود با نانوذرات مقاومت بایوزیستی غشاء را افزایش داده است.

افزودن افزودنی^{۳۰} به محلول می‌تواند نقش مهمی را در تغییر حلالیت منومر، نفوذ^{۳۱}، هیدرولیز و پروتونه‌شدن^{۳۲} داشته باشد. بسیاری از اختراعات در زمینه غشاء اشاره دارد که افزودن الکل‌ها، اثرها، ترکیبات حاوی گوگرد، پلیمرهای قابل حل در آب یا

در سال‌های اخیر محققان سعی کرده‌اند که اصلاح در روش‌های ساخت غشاء را انجام دهند تا به خواص بهتری در عملکرد دست یابند. روش‌های مختلفی برای اصلاح غشاءهای پلیمری مانند اصلاح سطحی^{۱۸} و اصلاح توده‌ای^{۱۹} وجود دارد. اصلاح سطحی از طریق پوشش‌دهی سطحی^{۲۰} و عامل‌دار کردن سطحی^{۲۱} با روش‌هایی مثل اصلاح پلاسمایی یا تابش UV^{۲۲} انجام می‌گیرد. اصلاح توده‌ای شامل پلیمریزاسیون رادیکالی و اختلاط غشاء با افزودنی‌های آبدوست از طریق پلیمریزاسیون بین سطحی می‌باشد. البته اصلاح سطحی در برخی موارد قادر به بهبود درون حفره‌های غشاء نیست و احتمال دارد خاصیت آبدوستی با روش اصلاح سطحی به طور کامل صورت نگیرد. اما با استفاده از روش اختلاط افزودنی با پلیمر و روش پلیمریزاسیون، خاصیت آبدوستی در سراسر غشاء رخ می‌دهد و می‌تواند خواص ضد رسوبی، آبدوستی و جریان یا گذردهی آب را بیشتر سازد. این نوع اصلاح غشاء پلیمری در شکل (۳) نشان داده شده است (Zahid و همکاران، ۲۰۱۸).

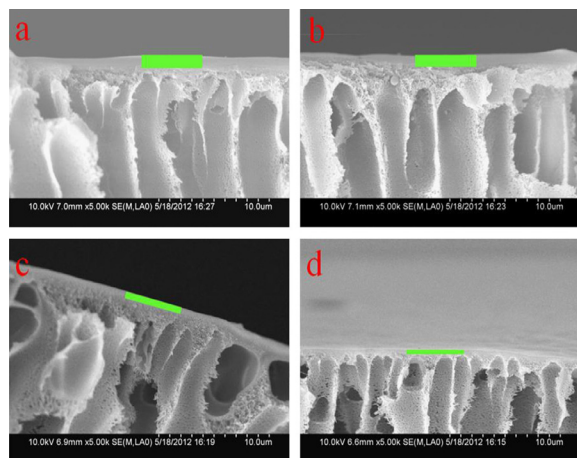


شکل ۳- طرحواره‌ای از رسوب‌گذاری ذرات بر روی غشاء قبل و بعد از اصلاح پلیمر (Zahid و همکاران، ۲۰۱۸).

مهمترین زمینه در اصلاح سطحی غشاء بحث آبدوست‌کردن^{۳۳} غشاء است که به افزایش تراوایی و بهبود مقاومت در برابر کلر منجر خواهد شد. اگر چه تحقیقاتی در زمینه افزودن گروه‌های عاملی آب دوست مثل کربوکسیل وجود دارد، ولی یافتن منومر مناسب به همراه پیچیدگی‌های واکنش همچنان یک مساله چالشی در این زمینه است. از این رو استفاده از گروه‌های عاملی برای اصلاح سطحی غشاء مورد توجه بیشتری واقع شده است. حلال‌های قابل امتزاج با آب مثل اسیدها و الکل‌ها برای اصلاح سطحی غشاء قابل استفاده هستند. از مخلوط الکل (اتانول و ایزوپروپانول) و اسید (هیدروفلوریک و هیدروکلریک اسید) در آب برای بهبود جریان و نمک‌زدایی غشاء به دلیل هیدرولیز جزئی^{۳۴} برای اصلاح سطحی غشاء استفاده شده است. حضور باندهای هیدروژنی می‌تواند بر هم کنش بین اسید و آب را بهبود بخشد که منجر به تولید بارهای سطحی بیشتری شده و آب دوستی و جریان آب را افزایش می‌دهند (Lee و همکاران، ۲۰۱۱).

یکی دیگر از موارد اصلاح غشاءهای اسمز معکوس بحث در

نشان دادند ضخامت لایه سطح^{۳۹} غشاء پلی سولفون (در حدود $10 \mu\text{m}$) با افزودن ترکیب متیل گلوکامین کاهش یافته است و با افزودن ۳۰٪ وزنی متیل گلوکامین ضخامت لایه سطح $3 \mu\text{m}$ شده است.



شکل ۴- عکس FESEM از سطح مقطع غشاء پلی سولفون دارای مقادیر مختلف متیل گلوکامین: (a) ۰٪، (b) ۱۰٪، (c) ۲۰٪ و (d) ۳۰ درصد وزنی (shi و همکاران، ۲۰۱۳).

عملکرد غشاء و انواع رسوب گذاری در آن

بیشتر عملکرد غشاء (جریان، نمک زدایی و رسوب گیری) به طور مشخصی تحت تأثیر خواص پلیمر غشاء، ساختار حفرات و ویژگی های سطحی غشاء است. از مهمترین خواص موثر در عملکرد غشاء می توان به بلورینگی پلیمر غشاء، ساختار حفرات، آبدوستی/آب گریزی، بار غشاء و زبری سطح را نام برد (Lalia و همکاران، ۲۰۱۳).

میزان جریان در غشاء می تواند به تداخل، اندازه حفرات و پیچش^{۴۰} حفرات وابسته باشد. با انتخاب روش ساخت و کنترل در روش ساخت می توان به مورفولوژی مختلف برای حفرات غشاء دست پیدا کرد. یکی دیگر از خواص تأثیرگذار در عملکرد غشاء، بحث آبدوستی و آب گریزی آن است. آبدوستی و آب گریزی غشاء می تواند بر خواص ضد رسوب و جریان محصول^{۴۱} اثر داشته باشد. غشاء با سطح آبدوستی کمتر به رسوب گیری با مواد آلی، میکروارگانیسم ها و ذرات غیرآلی باردار حساس خواهد بود. این مسأله به دلیل کاهش در برهم کنش بین رسوب و سطح غشاء می باشد (Lalia و همکاران، ۲۰۱۳).

میزان بار سطحی غشاء نیز از عواملی است که در نمک زدایی نقش ایفاء می کند. سطح غشاء RO بیشتر دارای بار منفی است تا میزان نمک زدایی نمک های حل شده در آب را افزایش دهد و جذب رسوبات آلی دارای بارهای منفی و میکروارگانیسم ها را کاهش دهد. بار منفی سطح غشاء RO با حضور گروه های سولفونیک و

پلی هیدرید الکل ها به محلول آمینی می تواند تراوایی غشاء حاصله را بهبود دهد، بدون آنکه میزان نمک زدایی را تغییر دهد. به طور مثال امتزاج پذیری آب و هگزان با افزودن دی متیل سولفوکساید^{۳۳} به محلول بهتر شده است. این امر موجب نفوذ بهتر منومر آمین شده و منجر به تشکیل لایه بازدارنده نازک تر و بهبود جریان شده است (Ihm و Kwak، ۱۹۹۹).

مطالعاتی در خصوص استفاده از سورفکتانت ها به عنوان افزودنی در غشاء نامتقارن برای جداسازی گازها و تراوش تبخیری در منابع انجام شده، اما استفاده از سورفکتانت ها در مورد غشاء TFC کمتر در مقالات وجود دارد. سورفکتانت می تواند بازده پلیمریاسیون در شکل گیری لایه پلی آمید را افزایش دهد که این کار از طریق حرکت منومر از فاز آبی به لایه آلی می باشد. سورفکتانت می تواند ترشوندگی سطح بالایی لایه غشاء را افزایش داده و بازده پلیمریاسیون را بیشتر کند.

Jegal و همکاران (۲۰۰۲) از سه نوع سورفکتانت برای سنتز لایه پلی آمیدی استفاده کردند. در بین سورفکتانت های استفاده شده، تنها تری اتیل بنزیل آمونیوم بروماید (TEBAB)^{۳۴} توانست خواص غشاء کامپوزیت حاصل از آن را افزایش دهد و با افزودن ۰/۲٪ وزنی از این ماده، ۴۰٪ افزایش در جریان آب مشاهده شد. استفاده از سورفکتانت های دیگر مانند تری متیل بنزیل آمونیوم بروماید (TMBAB)^{۳۵} و تری اتیل بنزیل آمونیوم کلراید (TEBAC) بهبود قابل توجهی در شرایط سنتز بین سطحی و خواص غشاء ایجاد نکردند.

Mansourpanah و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر سورفکتانت های مختلف را بر روی خواص فیلم نازک غشاء بررسی نمودند. نتایج نشان داد حضور سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات (SDS)^{۳۶} در محلول آلی می تواند منجر به شکل گیری عیوب و شکاف ها در سطح لایه نازک غشاء شود.

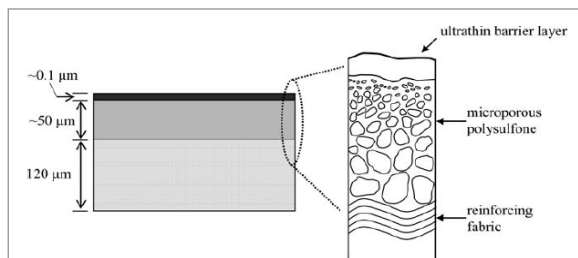
در تحقیق Yang و همکاران (۲۰۲۱) با اصلاح روش سنتز، محصول پلی آمید غشا با یکنواختی بهتر ساخته شد. این گروه با اعمال فشار جریان منومر MPD بر پایه غشاء و گردش جریان منومر TMC سعی داشتند که بهبودی در ساختار لایه جداکننده پلی آمیدی ایجاد کنند. ماژول الیاف توخالی ساخته شده در این تحقیق میزان تراوایی $4/49 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ و نمک زدایی ۹۸/۹٪ در فشار عملکردی ۲۰ bar و محلول خوراک با غلظت NaCl برابر با ۱۰۰۰ ppm نشان داد.

در کار shi و همکاران (۲۰۱۳) از غشاء پلی سولفونی برای جداسازی بور^{۳۷} از آب استفاده کردند. این گروه برای عملکرد بهتر جداسازی بور از یک ترکیب به نام متیل گلوکامین^{۳۸} در ساخت غشاء استفاده کردند. نتایج عکس های مورفولوژی از سطح مقطع غشاء پلی سولفونی و غشاهای پلی سولفونی دارای مقادیر مختلف متیل گلوکامین در شکل (۴) آمده است. نتایج

غشاه کامپوزیت فیلم نازک

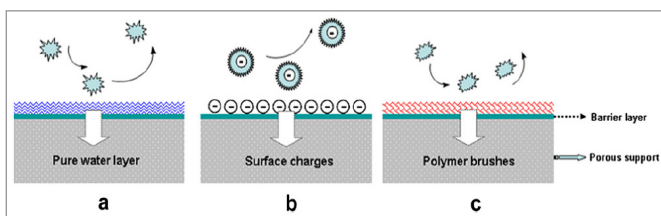
غشاهای فشرده^{۴۶} بیشتر جریان پایین و جدپذیری بالایی دارند، درحالی که غشاهای متخلخل جدپذیری پایین و تراوایی بالایی را نشان می‌دهند. برای افزایش تراوایی غشاهای فشرده، تلاش می‌شود ضخامت غشاء تا جاییکه ممکن است کاهش یابد. این کاهش ضخامت باید طوری باشد که حداقل استحکام مکانیکی لایه فشرده جهت غشاء فراهم آید. از این رو ساخت غشاء کامپوزیت لایه نازک (TFC) مورد توجه محققان قرار گرفت. این غشاهای کامپوزیت فیلم نازک از دو لایه اصلی تشکیل می‌شوند که لایه بالایی به صورت فشرده و نازک بوده و بر روی لایه متخلخل قرار می‌گیرد. وظیفه اصلی لایه متخلخل حفظ استحکام مکانیکی غشاء است، درحالی که لایه فشرده وظیفه جدپذیری را بر عهده دارد. کلیات روش ساخت غشاء کامپوزیت فیلم نازک شامل دو مرحله است که ابتدا لایه متخلخل ضخیم ساخته شود و پس از آن لایه فشرده نازک بر روی آن قرار داده می‌شود. در میان تمام روش‌های ساخت غشاء TFC روش‌های پوشش دهی غوطه‌وری و پلیمریزاسیون بین سطحی (IP) به طور وسیع‌تری مورد استفاده واقع می‌شود. در بین این دو روش نیز روش پلیمریزاسیون بین سطحی توجه بیشتری را به خود جلب کرده و بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است (Madaeni و همکاران، ۲۰۱۵).

در شکل (۶) طرحواره‌ای از غشاء کامپوزیت فیلم نازک نشان داده شده است. لایه بافته شده زیرین بیشتر از جنس پلی استر است و بر روی آن لایه متخلخل قرار دارد که بیشتر از جنس پلی سولفون است. بر روی پلی سولفون لایه نازک و فشرده که لایه اصلی جداکننده است و بیشتر از جنس پلی آمید است قرار دارد (Petersen, ۱۹۹۳). غشاهای کامپوزیت فیلم نازک هزینه ساخت بیشتری از غشاءهای ساده دارند، ولی به دلیل عملکرد بهتر در دهه‌های گذشته مورد توجه قرار گرفته و سهم بیشتری در بازار غشاء اسمز معکوس را به خود اختصاص داده‌اند. عمده غشاهای صنعتی جهت فرآیند RO به صورت TFC ساخته و در صنعت استفاده می‌شوند (Geise و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل ۶- طرحواره‌ای از غشاء کامپوزیت فیلم نازک اسمز معکوس (Geise) (TFC RO) و همکاران، ۲۰۱۰)

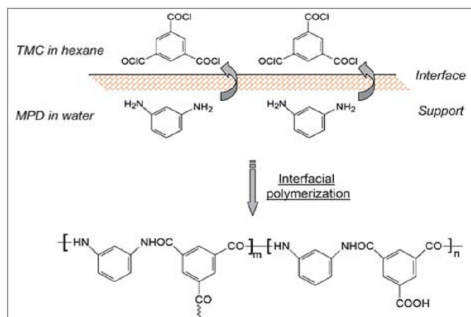
یا گروه‌های کربوکسیلیک اسید در سطح لایه غشاء ایجاد می‌شود. در خصوص رسوب‌گیری غشاء میزان زبری سطح نیز می‌تواند عامل موثر دیگری باشد. برخی نتایج نشان داده‌اند غشاء سلولز استات آبدوست RO با سطح نرم‌تر، کمتر در معرض رسوب کلئیدی نسبت به غشاء آب‌گریز و زبرتر پلی‌آمید می‌باشد. نتایج تحقیقات برای غشاءهای صنعتی هم نشان دادند که با افزایش زبری سطح، میزان جریان آب کاهش یافته است (Lalia و همکاران، ۲۰۱۳). چهار نوع عمده رسوب‌گذاری در غشاءهای RO وجود دارد: غیرآلی (رسوبات نمکی مثل هیدروکسیدهای فلزی و کربنات‌ها)، آلی (مثل مواد ذاتاً آلی نظیر هیومیک اسید^{۴۲}، کلئید (ذرات معلق مانند سیلیکا) و بیولوژیک (مثل باکتری و قارچ). رسوب‌گذاری در غشاء RO به بر هم کنش بین سطح غشاء با رسوب بستگی خواهد داشت. مطالعات نشان می‌دهد خواص فیزیکی شیمیایی سطح غشاء RO مانند آبدوستی، زبری و بار سطحی تأثیرات مهمی در شکل‌گیری رسوب در غشاء دارند. افزایش در آبدوستی می‌تواند منجر به افزایش مقاومت رسوبی غشاء RO شود، زیرا بسیاری از رسوبات مثل پروتئین به طور طبیعی آب‌گریز هستند. یک لایه از آب به راحتی می‌تواند روی سطح آبدوست غشاء قرار گیرد و مانع نشست رسوب روی غشاء شود، این موضوع در شکل (۵-الف) مشاهده می‌شود. همچنین سطوح نرم‌تر میزان رسوب کمتری دارند و رسوب در سطوح زبرتر بیشتر قرار می‌گیرد (Cao و Kang، ۲۰۱۲).



شکل ۵- طرحواره از مکانیزم ضد رسوب: (الف) لایه آب خالص، (ب) دفع الکترواستاتیکی و (ج) دفع فضایی (Cao و Kang، ۲۰۱۲)

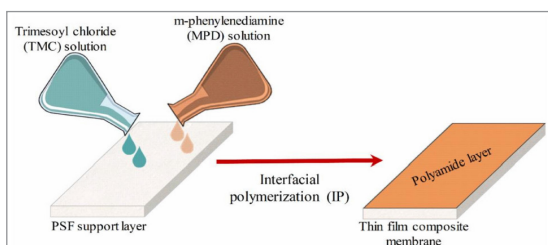
یکی دیگر از راه‌های ضد رسوب کردن غشاء RO بحث دفع الکترواستاتیکی (شکل ۵-ب) است که بار سطحی یا گروه‌های عاملی سطح غشاء موجب دفع رسوب می‌شود. در این حالت دانستن بار سطحی رسوب اهمیت پیدا می‌کند و غشاء دارای بار سطحی برای مقابله با هر نوع رسوبی مناسب نیست. نوع سوم کمک به افزایش مقاومت رسوبی استفاده از ملکول‌های آبدوست با زنجیر بلند (شکل ۵-ج) مثل پلی‌اتیلن گلیکول (PEG)^{۴۳} می‌باشد. این نوع ممانعت در برابر رسوب دفع فضایی^{۴۴} نام دارد که در آن زنجیر آبدوست پلیمر بر روی غشاء پیوند^{۴۵} داده می‌شود و ممانعت فضایی برای رسیدن رسوب به سطح غشاء ایجاد می‌کند. این نوع ممانعت فضایی بیشتر در MF و UF کاربرد دارد و برای RO و NF کمتر استفاده می‌شود (Cao و Kang، ۲۰۱۲).

سولفون و لایه نازک بالایی پلی آمیدی به ضخامت ۲۰۰-۱۰۰ nm. لایه پلی آمیدی از واکنش پلیمریزاسیون بین سطحی (IP) بین یک منومر دی آمین^{۵۷} مانند ام-فنیلن دی آمین (MPD) و منومر اسید کلرید مثل تری میسول کلراید (TMC) بر روی لایه نگهدارنده میانی پلی سولفون ایجاد می شود. در شکل (۸) طرحواره واکنش IP برای تولید لایه پلی آمیدی نشان داده شده است (Wang و Li، ۲۰۱۰).



شکل ۸- طرحواره واکنش IP برای تولید لایه فعال پلی آمیدی غشاء از منومرهای MPD و TMC (Wang و Li، ۲۰۱۰)

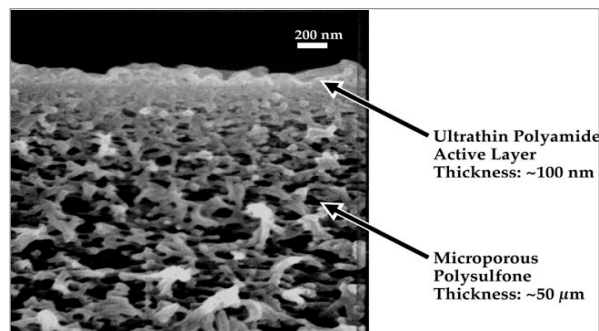
در واکنش IP، محلول امتزاج ناپذیر^{۵۸} آبی MPD و محلول آلی TMC ترکیب شده و لایه نازک PA بلافاصله بین دو فاز و در سطح مشترک^{۵۹} و در سمت محلول آلی TMC تشکیل می شود. این شکل گیری در سمت حلال آبی به دلیل حلال پذیری^{۶۰} کم TMC در آب و حلال پذیری به نسبت خوب MPD در حلال آبی می باشد. لایه نازک PA اجزاء حل شده در آب را جدا می کند، درحالی که لایه نگهدارنده استحکام مکانیکی لازم غشاء را برای مقابله با فشارهای عملیاتی تأمین می کند. طرحواره ای از روش IP برای ساخت لایه نازک PA از منومرهای MPD و TMC بر روی لایه نگهدارنده پلی سولفون در شکل (۹) آمده است (Ali و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۹- طرحواره روش تهیه غشاء PA-TFC بر روی لایه نگهدارنده پلی سولفون (Ali و همکاران، ۲۰۲۰)

واکنش IP بین گروه های آمین و کلرید اسید در بخش آلی سطح مشترک آبی-آبی صورت می گیرد. منومر آمین در حین واکنش باید از لایه های مختلف حلالی و پلیمری عبور کرده و به سمت آلی سطح مشترک برسد. از این رو انتخاب نوع حلال در شکل گیری لایه پلیمری غشاء در حین واکنش IP حائز اهمیت است. انتخاب

لایه بالایی غشاء TFC RO به صورت فشرده و با ابعادی در حدود ۱۰۰ nm است، در شکل (۷) عکس^{۶۱} SEM غشاء نشان داده شده است. لایه میانی از جنس پلی سولفون است که لایه ای نگهدارنده با ساختار میکرومتخلخل^{۶۸} است. لایه پایین نیز پارچه بافته شده یا بافته نشده^{۶۹} است که بیشتر از جنس پلی استر انتخاب می شود. لایه زیرین تقویت بیشتر غشاء و کمک به استحکام مکانیکی را انجام می دهد (Rangarajan و همکاران، ۱۹۹۱).



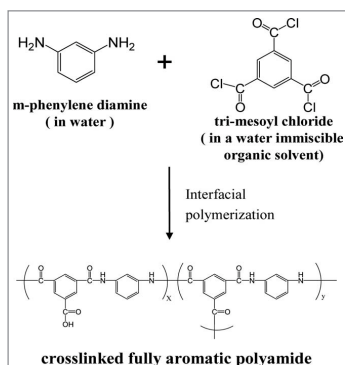
شکل ۷- عکس SEM از غشاء TFC RO پلی آمیدی (Geise و همکاران، ۲۰۱۰)

غشاهای TFC از پلیمرهای مختلفی مثل پلی اوره، پلی آمید، پلی اوره آمید، پلی اتر آمید و پلیمرهای مشابه ساخته شده که نمک زدایی بالا و تراوایی خوبی را در کاربردهای RO نشان داده اند. لایه متخلخل محافظ غشاء TFC می تواند از پلیمرهایی مثل پلی سولفون (PSF)^{۵۰}، پلی اترسولفون (PES)^{۵۱}، پلی سولفون و پلی اترسولفون سولفوناته شده^{۵۲}، پلی اترکتون، پلی وینیلیدن دی فلوراید (PVDF)^{۵۳}، پلی وینیلیدن دی فلوراید سولفوناته شده و پلی آکریلونیتریل (PAN)^{۵۴} از طریق انواع روش های ریخته گری^{۵۵} اشاره کرد. پلی سولفون شناخته شده ترین ماده در ساخت لایه نگهدارنده متخلخل است. افزودنی هایی مثل پلی اتیلن گلیکول و پلی وینیل پیرولیدون (PVP)^{۵۶} به عنوان محلول برای لایه محافظ پلی سولفون استفاده می گردند تا تخلخل^{۵۶} را افزایش داده و منجر به افزایش تراوایی غشاء کامپوزیتی شوند (Theresa و همکاران، ۲۰۱۱).

روش بهینه سنتز غشاء اسمز معکوس

با وجود روش های تحقیقاتی مختلف برای تهیه غشاء اسمز معکوس، در دهه های اخیر روش پلیمریزاسیون بین سطحی (IP) به عنوان روش بهینه سنتز غشاء اسمز معکوس در صنعت استفاده می شود. در این روش غشاء اسمز معکوس با ساختار کامپوزیت فیلم نازک ساخته می شود. همان طور که اشاره شد، ساختار غشاء کامپوزیت فیلم نازک اسمز معکوس (TFC RO) از سه لایه تشکیل می شود: لایه اول از جنس پلی استر بافته نشده متخلخل، لایه میانی پلی

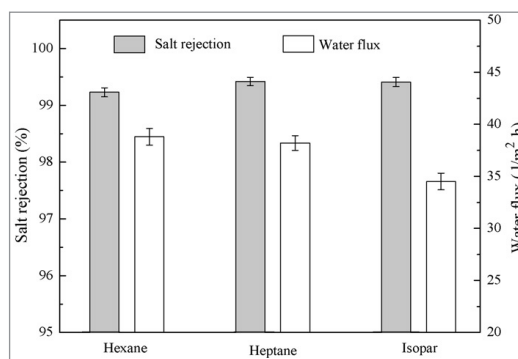
پلی سولفونی به سمت لایه پلی استری نزدیکتر شده، میزان تخلخل افزایش می یابد. پس از تهیه لایه نگهدارنده، لایه فعال و نازک پلی آمیدی با روش IP بر روی لایه میانی تشکیل می شود. تشکیل لایه پلی آمیدی در صنعت از طریق واکنش IP با دو مونومر MPD و TMC صورت می گیرد که واکنش آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است (Geise و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل ۱۱- واکنش IP برای تولید پلی آمید آروماتیکی از مونومرهای MPD و Geise (TMC و همکاران، ۲۰۱۰)

روش IP به عنوان موثرترین روش در ساخت غشاهای TFC می باشد که به دلیل قابلیت تکرارپذیری^{۶۶} و مقیاس پذیری^{۶۷} مورد توجه است. خواص کلی غشاهای TFC وابسته به ترکیب شیمیایی و غلظت مونومرهاست که منجر به تغییر در خواص تخلخل، ضخامت، بار سطحی، دانسیته اتصالات عرضی و مورفولوژی غشاهای خواهد شد. همچنین واکنش IP به رطوبت، دما و میزان خلوص واکنش دهنده حساس بوده و بر روی میزان واکنش پلیمریزاسیون اثرگذار است. پارامترهای دیگری که می تواند در خواص فیزیکی شیمیایی غشاهای پلی آمیدی تأثیر داشته باشد عواملی از قبیل نسبت واکنش دهنده ها، نسبت فعالیت واکنش دهنده ها، میزان حلالیت پلیمر در حلال پس از تشکیل، سینتیک کلی و سرعت نفوذ واکنش دهنده ها، حضور محصول جانبی، هیدرولیز، واکنش اتصال عرضی و واکنش تکمیلی فیلم غشایی می باشد. بیشتر محققان بر روی ساخت و بهینه سازی غشاهای TFC با تغییر در نوع مونومر و ترکیب درصد و غلظت آنها، زمان واکنش و دمای واکنش اتصال عرضی تحقیقات انجام می دهند. Ooi و Ahmad (۲۰۰۵) بر روی اثر مونومر TMC بر روی غشاهای TFC تحقیق کردند و گزارش دادند با افزایش غلظت TMC از ۰/۰۵ به ۰/۱٪ اندازه حفرات کاهش یافته و بعد از میزان ۰/۱٪ از TMC، تأثیر اندازه حفرات کمتر شده و جریان غشاهای در مقادیر بالاتر از TMC (بیش از ۰/۱۵٪) کاهش یافته است. Joshi و Saha (۲۰۰۹) در خصوص تأثیر غلظت مونومر پیرازین (PIP) در میزان ثابت غلظت ۰/۱٪ از TMC را بررسی نمودند. آنها مشاهده کردند بعد از غلظت ۱/۵٪ از PIP دانسیته فیلم نازک افزایش یافته که منجر به افزایش نمک زدایی و کاهش جریان می شود. همچنین

حلال در میزان حلالیت و نفوذ مونومر آمینی در منطقه واکنش^{۶۸} نقش مهمی ایفا می کند. دانسیته، ویسکوزیته و کشش سطحی حلال آلی می تواند روی نفوذ و شرکت مونومر MPD در واکنش موثر باشد. همان طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، انتخاب سه حلال آلی مختلف، در خواص عملکردی غشاهای به ویژه در میزان تراوایی تأثیر داشته است (Yu و همکاران، ۲۰۰۹).



شکل ۱۰- تأثیر انتخاب حلال آلی در واکنش IP در خواص عملکردی غشاهای Yu و همکاران، ۲۰۰۹)

در تهیه غشاهای کامپوزیت فیلم نازک به روش پلیمریزاسیون بین سطحی، غشاهای نگهدارنده متخلخل در محلول آبی شامل مواد واکنش دهنده اولیه (برای مثال مونومر دی آمین) غوطه ور می شود. بستر موجود در تماس با محلول آلی حاوی مواد واکنش دهنده ثانویه (مثل تری آسپیل هالید) قرار داده می شود. حلال آلی طوری انتخاب می شود که غیر قابل امتزاج با محلول آبی باشد و از این رو واکنش در سطح مشترک دو حلال انجام می گیرد. یک لایه فشرده اما بسیار نازک پلیمری بر روی سطح غشاهای نگهدارنده شکل می گیرد که از تشکیل بیشتر پلی آمید جلوگیری کرده و در عمل واکنش را متوقف می کند. لایه جداکننده تشکیل شده بسیار نازک است که می تواند در ایجاد تراوایی بالا موثر باشد و از طرفی فشرده بوده که منجر به نمک زدایی مناسب غشاهای می شود. بیشتر فیلم های نازک غشاهای TFC بر پایه مونومر آمین بوده و از واکنش بین مونومرهای مثل امفنیلن دی آمین (MPD) و تری میسول کلراید (TMC) صورت می گیرد (Theresa و همکاران، ۲۰۱۱)

در مرحله اول ساخت غشاهای TFC RO تجاری، لایه میکرومتخلخل پلی سولفونی بر روی لایه پارچه ای پلی استری با استفاده از وارونگی فازی شکل می گیرد. پلی سولفون در یک حلال قطبی قابل امتزاج با آب مثل دی متیل فرمامید (DMF)^{۶۹} حل شده و بر روی پارچه پلی استری ریخته شده و پارچه در حمام حاوی ضدحلال^{۶۹} پلیمر (بیشتر آب) غوطه ور می شود. وقتی پلی سولفون در معرض ضدحلال قرار می گیرد، پلیمر لخته شده^{۶۹} و میکروحفره ها^{۶۹} در غشاهای شکل می گیرد. سطح لایه میانی غشاهای که در تماس با ضدحلال است ساختاری با حفرات کوچک تشکیل می دهد و هر چه در لایه

زمان واکنش بین منومرها در شکل‌گیری غشاء و عملکرد نمک زدایی و جریان آن موثر است. با تنظیم نسبت منومرهای آمین/کلرید اسید می‌توان عملکرد و خواص غشاء را تغییر داد.

پارامترهای زمان واکنش و نسبت منومرها در واکنش IP جهت تولید غشاء PA می‌تواند به‌عنوان سینتیک واکنش دخیل باشند و به قابلیت حل شونده‌گی و نفوذ آمین‌ها در فاز آلی وابسته می‌باشد. تشکیل لایه فعال PA در واکنش IP می‌تواند شامل سه مرحله رشد فیلم، اتصال عرضی و هیدرولیز باشد (Ray و Gohil، ۲۰۱۷)

تلاش‌های زیادی بر روی بهبود روش پلیمریزاسیون بین سطحی (IP) صورت گرفته تا این روش که از دهه ۱۹۶۰ میلادی ابداع شده را پیشرفت دهند. بیشتر این تحقیقات بر روی اصلاح خواص بین سطحی غشاهای صفحه صاف TFC و یا شکل‌دهی لایه پلی‌آمیدی عاری از عیوب در زمینه الیاف توخالی بوده است. یکی از نگرانی‌هایی که در واکنش IP وجود دارد افزایش منومرهای کلرید اسید چند عامله در سطح لایه فعال است که نفوذ منومرهای آمین را به سوی فاز آلی با محدودیت بیشتری روبه‌رو می‌سازد. برای رفع این مشکل برخی محققان از منومرهای آمینی استفاده کردند تا با گروه‌های واکنش ندادن آسید کلراید در یک محیط آبی واکنش دهند. غشایی که با این روش بهبود یافته IP تهیه شده، میزان بیشتری از گروه‌های عاملی آمین ($-NH_2$) در سطح خود داشته و خواص ضد رسوب بهتری دارد (Lau و همکاران، ۲۰۱۲).

است. اما در این بین و تاکنون بهترین گزینه صنعتی در ساخت لایه جداکننده در غشاءهای TFC پلی‌آمید آروماتیکی بوده که از واکنش پلیمریزاسیون بین سطحی (IP) بین یک منومر پلی‌آمین (که بهترین آن منومر MPD می‌باشد) و یک منومر پلی‌آسید هالید آروماتیکی (که بهترین آن TMC است) برای فرآیند RO تهیه شده است. تا به امروز، بیشترین غشاء TFC RO تجاری بر پایه فیلم نازک پلی‌آمیدی ساخته شده و عملکرد مناسبی در نمک زدایی و تصفیه آب از خود نشان داده است. در سال‌های اخیر بر روی بهبود روش پلیمریزاسیون بین سطحی فعالیت‌هایی صورت گرفته است، اما همچنان روش IP به‌عنوان روش برتر سنتز غشاهای اسمز معکوس می‌باشد. استفاده از مواد نانو در ساخت غشاهای TFC نیز در سال‌های گذشته بررسی شده است، اما همچنان مواد نانو نتوانسته در محصولات صنعتی غشاهای RO وارد شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت‌های معاونت پژوهشی پژوهشگاه نیرو صمیمانه تشکر می‌نمایند. این مطالعه در قالب پروژه امانی در پژوهشگاه نیرو صورت گرفته است.

پی‌نوشت

- 1-Multi Stage Flash
- 2-Multi Effect Distillation
- 3-Reverse osmosis
- 4-Phase inversion
- 5-Electrospinning
- 6-Non Solvent Induced Phase Inversion
- 7-Vapor Induced Phase Inversion
- 8-Casting
- 9-Interfacial Polymerization
- 10-Thin Film Composite
- 11-Nanofiltration
- 12-Microfiltration
- 13-Ultrafiltration
- 14-Solution Diffusion
- 15-Polyethylenimine
- 16-Poly piperazine
- 17-m-Phenylenediamine
- 18-Surface modification
- 19-Bulk modification
- 20-Surface coating

جمع‌بندی

باتوجه به محدودیت منابع آبی در جهان، رشد شهرنشینی و پیشرفت صنایع، بحث تأمین آب شیرین و تصفیه و بازیابی آب‌های مصرفی از جایگاه مهمی در کشور و در جهان برخوردار است. باتوجه به مصرف بالای آب در صنایع کشور و کمبود منابع آبی، بحث بازیابی آب در دهه‌های گذشته مطرح شده و همچنان به‌عنوان یک چالش بررسی می‌شود. استفاده از تکنولوژی غشایی یکی از فرصت‌های فنی و تحقیقاتی پیش‌رو در بازیابی آب است. ساخت غشاء اسمز معکوس به‌عنوان مهم‌ترین تکنولوژی تأمین و بازیابی آب در این پروژه مد نظر قرار گرفته است. استفاده از تکنولوژی غشایی با استفاده از پلیمرها برای فرآیند RO بیش از ۳۰ سال است که در صنعت مورد استفاده واقع شده است. روش‌های قدیمی که در ابتدا برای ساخت غشاهای اسمز معکوس ابداع شد، ریخته‌گری دستی با استفاده از سلولز استات بود. اما به دلیل چالش‌هایی مثل تراوایی و نمک زدایی پایین، پلیمرهای جایگزین و همچنین روش‌های سنتز دیگری مد نظر محققان قرار گرفت. پلیمرهایی مختلفی مثل پلی‌اوره، پلی‌آمیدها و پلی‌اترآمیدها در ساخت غشاء TFC برای فرآیند RO طی سال‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته

63-Non-solvent
64-Coagulate
65-Micropores
66-Reproducibility
67-Scalability

منابع

Abdelrasoul A., Duan H. and Lohi A. 2017. Development of Conventional RO Membranes. Biomimetic and Bioinspired Membranes for New Frontiers in Sustainable Water Treatment Technology. Chapter 5. IntechOpen. London.

Ahmad A.L. and Ooi B.S. 2005. Properties-performance of thin film composites membrane: study on trimesoyl chloride content and polymerization time. *Journal of Membrane Science*, 255: 67-77.

Ali F.A.A., Alam J., Shukla A.K., Alhoshan M., Abdo B.M.A. and Al-Masry W.A. 2020. A novel approach to optimize the fabrication conditions of thin film composite RO membranes using multi-objective genetic algorithm II. *Polymers*, 12: 494.

Cadotte J.E., Petersen R.J., Larson R.E. and Erickson E.E. 1980. New thin-film composite seawater reverse-osmosis membrane. *Desalination*, 32: 25-31.

Diaz J.J.F., Mendez M.C.L., Miranda J.P.R., Herazo L.C.S. and Mahecha F.C. 2021. Commercial Thermal Technologies for Desalination of Water from Renewable Energies: A State of the Art Review. *Processes*, 9: 262-241.

Geise G.M., Lee H.S., Miller D.J., Freeman B.D., McGrath J.E. and Paul D.R. 2010. Water purification by membranes: the role of polymer science. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 48: 1685-1718.

Gohil J.M., Ray P. 2017. A review on semi-aromatic polyamide TFC membranes prepared by interfacial polymerization: Potential for water treatment and desalination. *Separation and Purification Technology*, 181: 159-182.

Jegal J., Min S.G. and Lee K.H. 2002. Factors affecting the interfacial polymerization of polyamide active layers

21-Surface grafting
22-Ultraviolet
23-Hydrophilization
24-Partial hydrolysis
25-Trimesoyl chloride
26-4,4 -methylene bis(phenyl isocyanate)
27-Polyvinyl alcohol
28-Piperazine
29-Hydrophilic macromolecules
30-Additive
31-Diffusivity
32-Protonation
33-Dimethyl sulfoxide
34-Triethyl benzyl ammonium bromide
35-Trimethyl benzyl ammonium bromide
36-Sodium dodecyl sulfate
37-Boron
38-N-methyl-D-glucamine
39-Skin
40-Tortuosity
41-Permeate
42-Humic acid
43-Polyethylene glycol
44-Steric
45-Graft
46-Dense
47-Scanning Electron Microscopy
48-Microporous
49-Nonwoven
50-Polysulfone
51-Polyethersulfone
52-Sulfonated
53-Polyvinylidene difluoride
54-Polyacrylonitrile
55-Polyvinylpyrrolidone
56-Porosity
57-Diamine
58-Immiscible
59-Interface
60-Solubility
61-Reaction zone
62-Dimethylformamide

- es in polymeric membranes for water treatment. *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment*, 1:3-41.
- Mansourpanah Y., Madaeni S.S. and Rahimpour A. 2009. Fabrication and development of interfacial polymerized thin-film composite nanofiltration membrane using different surfactants in organic phase; study of morphology and performance. *Journal of Membrane Science*, 343:219–228.
- Panagopoulos A. and Haralambous K.J. 2020. Environmental impacts of desalination and brine treatment – Challenges and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, 161: 111773.
- Petersen R.J. 1993. Composite reverse osmosis and nanofiltration membranes, *Journal of Membrane Science*, 83: 81-150.
- Rangarajan R., Desai N.V., Mody R.C., Mohan D. and Rao A.V. 1991. Development of fabric reinforced polysulfone membranes. *Desalination*, 85(1): 81-92.
- Saha N.K. and Joshi S.V. 2009. Performance evaluation of thin film composite polyamide nanofiltration membrane with variation in monomer type. *Journal of Membrane Science*, 342: 60–69.
- Shi Q., Meng Q., Xu R.S., Du X.L. and Zhang Y.F. 2013. Synthesis of hydrophilic polysulfone membranes having antifouling and boron adsorption properties via blending with an amphiphilic graft glycopolymer. *Journal of Membrane Science*, 444: 50–59.
- Tarboush B.J.A, Rana D., Matsuura T., Arafat H.A. and Narbaitz R.M. 2008. Preparation of thin-film-composite polyamide membranes for desalination using novel hydrophilic surface modifying macromolecules. *Journal of Membrane Science*, 325: 166–175.
- Theresa M., Pendergast M. and Hoek E.M.V. 2011. A review of water treatment membrane nanotechnologies. *Energy & Environmental Science*, 4: 1946.
- Vyas B.B. and Ray P. 2015. Preparation of nanofiltration membranes and relating surface chemistry with potential and topography: application in separation and desalting of amino acids. *Desalination*, 362: 104–116.
- Warsinger D.M., Chakraborty S., Tow E.W., Plumlee for formation of polyamide composite membranes. *Journal of Applied Polymer Science*, 86: 2781–2787.
- Kang G.D. and Cao Y.M. 2012. Development of antifouling reverse osmosis membranes for water treatment: A review. *Water Research*, 46: 584-600.
- Kim S.H., Kwak S.Y., Sohn B.H. and Park T.H. 2003. Design of TiO₂ nanoparticles selfassembled aromatic polyamide thin-film composite (TFC) membrane as an approach to solve biofouling problem. *Journal of Membrane Science*, 211: 157-165.
- Kwak S.Y. and Ihm D.W. 1999. Use of atomic force microscopy and solid-state NMR spectroscopy to characterize structure-property-performance correlation in high-flux reverse osmosis (RO) membranes. *Journal of Membrane Science*, 158: 143–153.
- Lalia B.S., Kochkodan V., Hashaiekeh R. and Hilal N. 2013. A review on membrane fabrication: Structure, properties and performance relationship. *Desalination*, 326: 77–95.
- Lau W.J., Ismail A.F., Misdan N. and Kassim M.A. 2012. A recent progress in thin film composite membrane: A review. *Desalination*, 287: 190–199.
- Lee K.P., Arnot T.C. and Mattia D. 2011. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential. *Journal of Membrane Science*, 370:1–22.
- Li C., Goswami Y., and Stefanakos E. 2013. Solar assisted sea water desalination: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19: 136-163.
- Li D. and Wang H. 2010. Recent developments in reverse osmosis desalination membranes. *Journal of Materials Chemistry*, 20:4551–4566.
- Li X. and Elimelech M. 2021. Fabrication of desalination membranes by interfacial polymerization: history, current efforts, and future directions. *Chemical Society Reviews*, 50: 6290-6307.
- Lim Y.J., Goh K., Kurihara M. and Wang R. 2021. Sea-water desalination by reverse osmosis: Current development and future challenges in membrane fabrication – A review. *Journal of Membrane Science*, 629: 119292.
- Madaeni S.S., Ghaemi N. and Rajabi H. 2015. Advanc-

- osmosis. *Journal of Membrane Science*, 626: 119187.
- Yu S., Liu M., Liu X. and Gao C. 2009. Performance enhancement in interfacially synthesized thin-film composite polyamide-urethane reverse osmosis membrane for seawater desalination. *Journal of Membrane Science*, 342: 313–320.
- Zahid M., Rashid A., Akram S. and Rehan Z.A. 2018. A comprehensive review on polymeric nano-composite membranes for water treatment. *Journal of Membrane Science & Technology*, 8(1): 1000179.
- M.H., Bellona Ch., Loutatidou S., Karimi L., Mikelonis AM., Achilli A., Ghassemi A., Padhye L.P., Snyder Sh.A. Curcio S., Vecitis Ch., Arafat H.A. and Lienhard V . 2018. A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse. *Progress in Polymer Science*, 81: 209–237.
- Yang T., Wan C.F., Zhang J., Gudipati C. and Chung T.S. 2021. Optimization of interfacial polymerization to fabricate thin-film composite hollow fiber membranes in modules for brackish water reverse