



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله مرور ساختاریافته

مروری بر مطالعات انجام شده در خصوص بازیافت مستقیم غشا اسمز معکوس: ارزیابی فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی

سیده الهه مهدویان^۱، سیده معصومه قاسمی نژاد^{۲*}

۱- گروه مهندسی محیط‌زیست، پژوهشکده محیط‌زیست، جهاد دانشگاهی، رشت، ایران
۲- گروه بیوتکنولوژی صنعتی، پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی ایران، جهاد دانشگاهی، کرج، ایران

| اطلاعات مقاله: | چکیده |
|--|---|
| تاریخ دریافت: | زمینه و هدف: رشد روزافزون بازار جهانی غشا اسمز معکوس (RO) باعث افزایش دفع |
| تاریخ ویرایش: | سالانه پسماندهای غشائی شده است. از این رو ارزیابی استراتژی‌های مدیریت پسماندهای |
| تاریخ پذیرش: | غشائی به‌منظور کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی آنها بسیار حائز اهمیت است. با توجه |
| تاریخ انتشار: | به سهم گسترده بازار داخلی فیلترهای غشائی در تصفیه آب و فاضلاب و ملاحظات |
| | اقتصادی مربوط به آن، در این مقاله بازیافت مستقیم غشا RO با هدف گسترش چرخه |
| | عمر آن بررسی شده است. |
| | روش بررسی: پایگاه‌های اطلاعات علمی معتبری چون Scopus، PubMed با |
| | کلیدواژه‌هایی مانند RO recycling جستجو شدند. مطالب برگزیده در قالب سه بخش |
| واژگان کلیدی: پسماند غشائی، بازیافت، اسمز معکوس، اولترافیلتر | «مقایسه فنی»، «مقایسه اقتصادی» و «مقایسه محیط‌زیستی» طبقه‌بندی و تحلیل شدند. |
| | یافته‌ها: بازیافت مستقیم غشا RO با حذف رسوبات و تخریب لایه پلی‌آمیدی (PA) با |
| | استفاده از عامل اکسنده، به‌ویژه $KMnO_4$ و $NaOCl$ ، انجام می‌شود. نرخ تخریب لایه |
| | PA با بهینه‌سازی پارامتر غلظت ماده اکسنده در مدت زمان فرایند اکسیداسیون کنترل |
| | می‌شود. عواملی مانند نوع غشا مستعمل، شرایط نگهداری آن، واحدهای عملیاتی پیش |
| | از واحد اکسیداسیون و محصول مورد نظر، تعیین‌کننده پارامتر غلظت-زمان خواهد بود. |
| | به حداقل رساندن این پارامتر از نظر اقتصادی و محیط‌زیستی بسیار حائز اهمیت است. |
| | کاهش غلظت ماده اکسنده منجر به کاهش میزان ترکیبات کلردار و هالوژنه خروجی |
| | از فرایند اکسیداسیون شده و متعاقباً باعث کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی و انرژی |
| | مصرفی مورد نیاز تصفیه، خواهد شد. |
| | نتیجه‌گیری: تبدیل غشا RO به فیلترهای متخلخل با بهینه‌سازی شرایط از نظر فنی |
| | امکان‌پذیر است. به‌علاوه، انتخاب درست نوع غشا RO و نوع محصول نهایی، سبب |
| | بهره‌وری اقتصادی و محیط‌زیستی می‌گردد. |

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

masume.ghasemi@gmail.com

مقدمه

در سال‌های اخیر، به دلیل کمبود رو به رشد آب و استانداردهای سختگیرانه‌ای که برای فاضلاب‌های تصفیه شده در نظر گرفته شده است، استفاده از غشاهای اسمز معکوس ((Reverse Osmosis (RO)) برای تصفیه آب و فاضلاب به سرعت گسترش یافته است. هم‌اکنون در حدود ۸۰ درصد ظرفیت شیرین‌سازی آب در جهان به تکنولوژی RO اختصاص دارد (۱) که بیش از ۹۵ درصد این غشاها از نوع کامپوزیت با پایه پلی‌امید آروماتیک هستند (۲). این غشاها عمر محدودی دارند که به تولیدکننده غشا و شرایط بهره‌برداری از آن بستگی دارد. علی‌رغم تمام استراتژی‌هایی که برای جلوگیری از گرفتگی غشا انجام می‌شود، این پدیده اجتناب‌ناپذیر باقیمانده (۳) و عامل اصلی دفع سالانه هزاران تن غشا شده است (۴). به عنوان یک قاعده کلی، زمانی که میزان دفع نمک از طریق جریان دفعی به زیر ۹۹ درصد کاهش یابد، غشاهای RO دور ریخته می‌شوند (۵). حتی در شرایط بهره‌برداری مطلوب، عمر مفید این غشاها کوتاه است (۱۰-۵ سال برای شیرین‌سازی آب دریا ((Sea Water (SW)) (۶) و پس از اتمام آن باید با غشاهای جدید جایگزین شوند. جایگزینی سالانه غشاها، در کنار رشد پیوسته تکنولوژی RO موجب انباشتگی بی‌وقفه مدول‌های مستعمل شده است (۷). در شیرین‌سازی، درصد جایگزینی سالانه غشا در حدود ۲۰-۵ درصد از غشاهای نصب شده است (۱)، هرچند این عدد بسته به ماهیت جریان ورودی به مدول‌های RO (به عنوان مثال، SW، آب لب‌شور ((Brackish Water (BW)) یا فاضلاب) تغییر می‌کند (۸). سناریوهای مختلفی مانند دفن، پردازش حرارتی، بازیافت اجزاء مدول، استفاده مجدد و بازیافت مستقیم جهت مدیریت پسماندهای غشاهای RO وجود دارد. دفن، رایج‌ترین گزینه مورد استفاده در واحدهای شیرین‌سازی آب در سراسر دنیا و همچنین مدیریت

پسماندهای صنعتی در داخل کشور است (۹). زمانی که تصمیم گرفته می‌شود تا یک غشا مستعمل دور ریخته شود، چالش جدیدی آغاز می‌شود. زیرا علی‌رغم اینکه پسماند حاصل از این غشاها جزو مواد غیرسمی و بی‌اثر است، سایر آسیب‌های وارده به محیط‌زیست و معضلات مربوط به حمل‌ونقل و اشغال زمین را به عنوان یک مسئله جدی به‌دنبال دارد (۲).

یکی از مسیرهای مهم و کاربردی که می‌تواند در مدیریت پسماند غشاهای RO و گسترش چرخه عمرشان مورد استفاده قرار گیرد، تبدیل این غشاها به فیلترهای متخلخل است. به دلیل سرعت رو به رشد دور ریختن غشاهای مستعمل RO و ویژگی‌های ارزشمند آنها، در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی درخصوص بررسی پتانسیل استفاده مجدد از آنها در شکل‌های دیگر غشا انجام شده است. توجه به این نکته ضروریست که به دلیل وجود مواد ارزشمند در غشاهای مستعمل RO، می‌توان پس از بازسازی در سایر فرایندهای تصفیه‌خانه از آنها استفاده کرد که برای تصفیه‌خانه‌ها نیز مزایای اقتصادی به‌دنبال خواهد داشت. در بازیافت مستقیم، پیکربندی پیچشی غشاهای RO تغییری نمی‌کند و عیناً مشابه غشاهای دور ریخته شده است (۱۰). حاصل این شیوه بازیافت مستقیم، دستیابی به غشاهایی با مشخصات نانوفیلتر ((Nanofiltration (NF))، اولترافیلتر ((Ultrafiltration (UF)) یا میکروفیلتر ((Microfiltration (MF)) است که در معرض دز مشخصی از ماده اکسیدکننده قرار گرفته است (۱۱)، لازم به ذکر است بازیافت حداکثری پسماندهای صنعتی، از ارکان اصلی الگوی مدیریت یکپارچه مواد زائد جامد نیز است (۱۳).

باتوجه به سهم قابل توجه بازار داخلی فیلترهای غشائی در حوزه تصفیه آب و فاضلاب و ملاحظات اقتصادی مربوط به آن، در این مقاله فاکتورهای کلیدی فنی، محیط‌زیستی و اقتصادی این فرایند با هدف گسترش

حذف شده و به مقالات آنها بسنده شد. از میان مقالات نیز، مواردی که هدف از بازیابی RO کاربردهایی غیر از NF، UF و MF بودند، همچون غشاهای تبادل یونی، مواردی که در ارتباط با بازسازی سایر غشاها به جز RO بودند، مواردی که صرفاً به بررسی اثر شرایط جریان مورد تصفیه ورودی بر تخریب لایه پلی آمیدی ((Polyamide (PA) پرداخته بودند و سایر اسنادی که فاقد جزئیات مورد نیاز این پژوهش بودند، از بررسی‌های عمیق‌تر کنار گذاشته شدند یا در قسمت مقدمه این مقاله به برخی از آنها اشاره گردید. سایر اسناد دارای ارتباط موضوعی با این مقاله که بر روی تبدیل ورق‌های RO به فرم فیلترهای متخلخل مذکور کار کرده بودند، به صورت دقیق‌تر بررسی شده و مطالب منتخب در قالب سه دسته‌بندی کلی "مقایسه فنی"، "مقایسه محیط‌زیستی" و "مقایسه اقتصادی" طبقه‌بندی شدند. ملاک استفاده از مقالات برگزیده، ارتباط موضوعی و انتشار در پایگاه‌های اطلاعات علمی معتبر ذکر شده در بالا، بود.

یافته‌ها

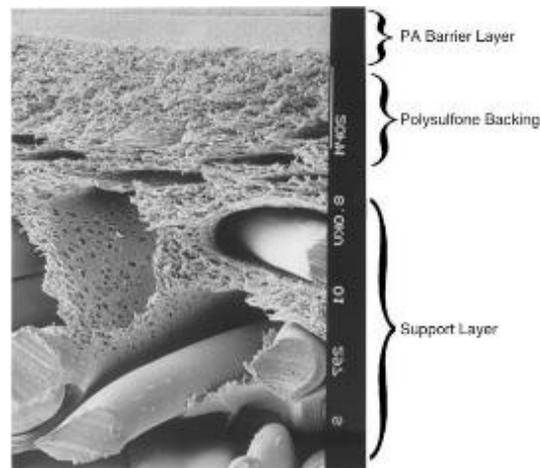
- مقایسه فنی

طبق بررسی‌های انجام شده در پژوهش‌ها، بازیافت مستقیم غشاهای مستعمل RO به فرم فیلترهای متخلخل از طریق تخریب لایه PA بیرونی ورق، با هدف تولید غشائی جهت حذف جامدات معلق با میزان دفع بسیار کمتر نمک‌ها انجام می‌شود (۱۴، ۱۵). غشاهای مورد استفاده از نوع غشا فیلم نازک کامپوزیتی پلی‌آمیدی (Polyamide-thin film composite) ((PA-TFC) بودند که سالانه تعداد زیادی از آن دورریز می‌شود. مطابق شکل ۱ این غشاها از ساختاری سه لایه تشکیل شده‌اند: پایه الیافی بافته نشده، زیر لایه متخلخل پلی‌سولفونی ((Polysulfone (PSF) و سطح متراکم فوق نازک پلی‌آمیدی (۱۶).

چرخه عمر غشاهای RO مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هدف از این مقاله، بررسی روش‌های مختلف بازسازی غشاهای مستعمل RO به فرم فیلترهای متخلخل است تا محققین و صنعتگران بتوانند پس از کسب دیدی جامع از منظر فنی، محیط‌زیستی و اقتصادی، نسبت به انتخاب بهترین تکنیک برای پژوهش یا صنعت خود اقدام کنند. بنابراین داده‌های ارائه شده در این مقاله می‌تواند راهنمایی برای عملیاتی کردن تولید اقتصادی فیلترهای متخلخل از تبدیل شیمیایی RO دورریخته شده از صنایع داخلی کشور باشد. این کار موجب کاهش اثرات منفی تکنولوژی RO بر محیط‌زیست و در نتیجه افزایش پایداری تکنولوژی و کاهش رد پای کربن آن می‌گردد (۴).

مواد و روش‌ها

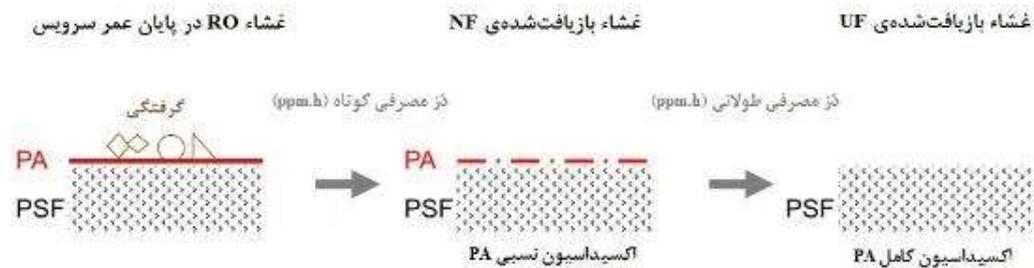
جهت بررسی روش‌ها و اقدامات علمی انجام شده در خصوص بازیافت مستقیم غشاهای RO به فرم غشاهای NF، UF یا MF پایگاه‌های اطلاعات علمی Scopus، PubMed، ScienceDirect و Google scholar و موتور جستجوی Google با کلیدواژه‌های RO reverse osmosis recycle، reverse osmosis reuse، osmosis reuse، reuse of reverse osmosis، قسمت عنوان، چکیده و واژگان کلیدی جستجو شدند. همچنین جهت بررسی مقالات فارسی، کلیدواژه‌های بازیافت غشا اسمز معکوس، بازیافت RO، استفاده مجدد از RO و استفاده مجدد اسمز معکوس در پایگاه‌های SID و Magiran جستجو شدند. متون علمی گردآوری شده شامل مقاله، پایان‌نامه و صفحه وب به منظور بررسی بیشتر و ذکر در این پژوهش انتخاب شدند. صفحات وب به دلیل عدم امکان سنجش اعتبار علمی و کلی بودن مطالب از بررسی‌های بیشتر حذف شدند. همچنین پایان‌نامه‌هایی که از نتایجشان مقالات علمی منتشر شده بود نیز از بررسی‌های بیشتر



شکل ۱- سطح مقطع غشا کامپوزیت RO (۱۷)

آلی، توسط ماده اکسند تخریب می شود (۱۸). مقایسه‌ای بین شرایط بهینه‌سازی پژوهش‌های مختلف با توجه به نوع غشا مورد بازیافت، در ادامه آورده شده است.

با توجه به شکل ۲، غشا قدیمی از طریق اکسیداسیون شیمیایی تحت شرایط کنترل شده‌ای به غشا NF، UF یا MF تبدیل می‌شود. در این مرحله لایه PA و گرفتگی‌های



شکل ۲- طرح مفهومی تخریب کنترل شده لایه فعال PA در غشا RO (۱۹)

تمیز کردن شیمیایی و یا مجموعه‌ای از این روش‌ها صورت گیرد. جدول ۱ برخی از فرایندهای رایج استفاده شده در پژوهش‌های پیشین را نشان می‌دهد. پیش‌خیساندن غشا در آب مقطر در مقایسه با نگهداری آن در شرایط خشک، تاثیر چشمگیری در بهبود عملکرد غشا بازیافت شده دارد (۱۰-۱۲، ۱۶، ۲۰). نگهداری غشاهای مستعمل در شرایط خشک باعث کاهش برهم‌کنش بین آب و پلیمر یا چسبندگی حفرات به دلیل نیروی موئینگی و تبخیر آب می‌گردد که در نتیجه آن، غشا بازیافت شده با عملکرد ضعیفی تولید

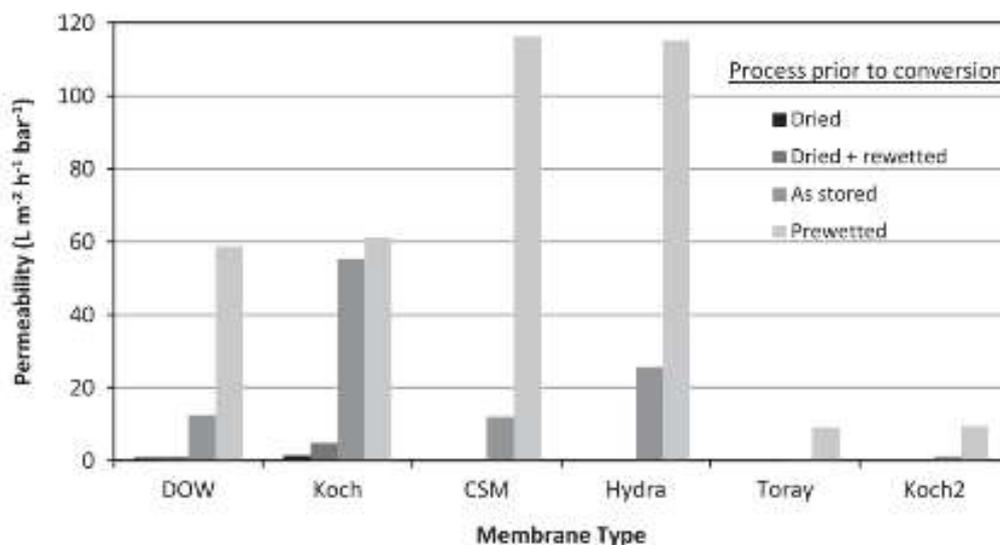
- آماده‌سازی برای اکسیداسیون

آماده‌سازی اولیه غشا شامل شرایطی است که قبل از اکسیداسیون لایه PA و تبدیل غشا RO به NF، UF یا MF باید فراهم شود. به‌طور طبیعی آماده‌سازی از زمانی آغاز می‌شود که غشا RO به پایان عمر سرویس خود می‌رسد و به‌منظور انجام بازیافت باید در شرایط مطلوبی نگهداری شده و برای اکسیداسیون آماده شود.

آماده‌سازی غشا برای اکسیداسیون می‌تواند با پیش‌خیساندن غشا مستعمل، نگهداری آن در شرایط تر،

جدول ۱- فرایندهای رایج استفاده شده جهت آماده سازی غشا برای اکسیداسیون

| منبع | توضیحات | روش های آماده سازی برای اکسیداسیون |
|----------|--|--|
| (۲۰، ۱۲) | تراوایی غشا پیش خیسانده شده تا ۱۴ برابر بیشتر از غشا نگهداری شده در شرایط خشک | پیش خیساندن |
| (۱۱) | بیشتر بودن تراوایی و نمک زدایی غشا بازیافت شده از غشا مستعمل نگهداری شده در شرایط تر در مقایسه با غشا مستعمل نگهداری شده در شرایط خشک | نگهداری در آب دو بار تقطیر |
| (۲۱) | پیش تصفیه شیمیایی به ترتیب با غوطه ور ساختن در محلول ۰/۱ درصد وزنی NaOH (pH= ۱۲) و سپس محلول ۰/۲ درصد وزنی HCl (pH= ۲-۱) هر کدام به مدت ۱۶ h و به دنبال آن پیش خیساندن در اتانول یا مخلوط با آب با نسبت حجمی ۵۰ درصد به مدت ۵-۱۵ min انجام شد. | پیش تصفیه شیمیایی (مواد شیمیایی NaOH، HCl و سیتریک و اگزالیک اسید، مدت ۱۶ h، جریان چرخشی به مدت ۳۰ min و غوطه وری در یک حمام اولتراسونیک به مدت ۲۰ min) و پیش خیساندن (آب، اتانول و HCl در نسبت های ترکیبی مختلف و زمان های غوطه وری مختلف در بازه ۱۵ h - ۵ min) |
| (۲۲) | - | غوطه وری در محلول ۱ درصد حجمی اولتراسیل ۱۱۰ (ترکیبی از SDS، NaOH، EDTA، سدیم کومن سولفونات) (pH= ۱۲/۳) به مدت ۲۴ h و سپس شستشو با آب بدون یون |



نمودار ۱- تاثیر خیساندن (در ۱۵ bar) بر راندمان تبدیل (تراوایی در ۴-۰ bar تست شده است)

بیشتر است (۱۱، ۱۲، ۲۱). این ماده با حمله شیمیایی به لایه PA در شرایطی کنترل شده، علاوه بر تخریب آن موجب حذف گرفتگی‌های غشا نیز می‌شود (۲۴).

– مقدار ماده اکسنده

جدول ۲ شرایط اکسیداسیون (غلظت ماده اکسنده، زمان و pH) مورد استفاده در پژوهش‌های مختلف را نشان می‌دهد. شرایط اکسیداسیون به فاکتورهای زیادی مانند نوع کاربرد اولیه (SW، BW و ...) که متعاقباً بر نوع و میزان رسوبات روی سطح غشا تاثیرگذار است، نوع محصول تولیدی مورد نظر بعد از بازیافت (RO، UF، NF، MF) و همچنین نوع خوراک ورودی (آب شور، لب‌شور، مواد آلی و ترکیب مواد آلی و معدنی) جهت ارزیابی میزان تخریب لایه PA بستگی دارد. اما در هر حال باید توجه داشت که غلظت ماده اکسنده و زمان غوطه‌وری نسبت مستقیمی با میزان تخریب لایه PA دارند. به همین دلیل برای مقایسه درست نتایج پژوهش‌ها، پارامتر غلظت-زمان (ppm.h) در جدول گزارش شده است. در برخی پژوهش‌ها از غلظت‌های زیاد عامل اکسنده و زمان غوطه‌وری کم و در برخی دیگر از غلظت‌های کم و زمان زیاد استفاده شده است. اما در بسیاری از آنها، یک محدوده مشخص غلظت-زمان گزارش شده است. براساس مستندات موجود، لایه PA المان‌های غشائی مستعمل از نوع SW با غوطه‌وری در NaOCl در محدوده ۳۰۰۰۰۰ تا ۳۶۰۰۰۰ ppm.h به‌طور کامل تخریب و به غشا UF تبدیل خواهد شد. شاخص ارزیابی میزان تخریب لایه پلی‌آمیدی در بسیاری از پژوهش‌ها، میزان فلاکس آب عبوری و حذف نمک NaCl است. با تخریب تقریباً کامل این لایه، فلاکس آب عبوری بیش از ۳۰۰ درصد افزایش یافته و میزان حذف نمک NaCl نیز به کمتر از ۱ درصد می‌رسد. اما در برخی از پژوهش‌ها از ترکیبات دیگری (مانند مواد جامد معلق در فاضلاب شهری (۱۵)، آلومین گاو، اسید هیومیک (۱۲)، سولفات منگنز، دکستروز (۱۱)) به عنوان خوراک جهت ارزیابی میزان تخریب لایه PA استفاده شده است، به همین

می‌شود. نمودار ۱ تاثیر چشمگیر پیش‌خیساندن و نگهداری غشا مستعمل (از شرکت‌های مختلف) در شرایط تر را در مقایسه با شرایط خشک بر تراوایی غشا بازیافت شده نشان می‌دهد. تمیزکردن شیمیایی غشا مستعمل پیش از خیساندن آن به دلیل حذف رسوبات می‌تواند باعث بهبود بیشتر عملکرد غشا بازیافتی شود. NaOH، HCl، SDS و EDTA از جمله مواد شیمیایی مؤثر در حذف رسوبات غشا مستعمل هستند (۲۱).

– نوع ماده اکسنده

با توجه به اینکه مشخصات سطح فیلترهای متخلخل، همچون سایز حفرات و میزان تخلخل، نسبت به RO بیشتر بوده و از این نظر مشابه مشخصات سطح اصلاح شده لایه PA یا مشخصات سطح لایه PSF غشا RO است، لذا در پژوهش‌های مختلف از تخریب نسبی یا کامل لایه بیرونی غشا جهت بازیافت مستقیم آن استفاده شده است. بدین منظور تاکنون اثر مواد مختلفی همچون هیدروژن پراکسید، سدیم دودسیل سولفات (۱۴)، NaOCl (۱۶)، KMnO₄ (۲۲)، ان-متیل-۲-پیرولیدون (۱۱) و سدیم هیدروکسید (NaOH) (۲۱) بر تخریب لایه PA مورد آزمایش قرار گرفته است.

همانطور که در جدول ۲ مشخص است، در سال‌های نخست شروع پژوهش در زمینه بازیافت غشا مستعمل با روش اکسیداسیون، استفاده از KMnO₄ به عنوان عامل اکسنده به دلیل راندمان خوب اکسیداسیون در غلظت‌های کم در مقایسه با سایر اکسنده‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفت (۱۴، ۱۵، ۲۳). اما با گذشت زمان و بررسی‌های بیشتر مشخص شد که این ماده حتی در غلظت بهینه نیز قادر به تخریب کامل لایه PA نیست. به همین علت، در سال‌های اخیر در مواردی که هدف تبدیل RO مستعمل به UF است، یعنی تخریب کامل لایه PA مورد نیاز است، بیشتر از NaOCl استفاده می‌شود. نتایج پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که خاصیت اکسیدکنندگی و پایداری شیمیایی NaOCl در بازیافت RO مستعمل از KMnO₂

شیمیایی پیش از اکسایش (با محلول NaOH ، HCl ، SBS و ... (۲۱، ۲۳)) یا پس از آن، جهت حذف برخی رسوبات خاص استفاده می‌شود. در پژوهشی از اسید سیتریک برای حذف اکسید منگنز تشکیل شده پس از فرایند اکسیداسیون با KMnO_4 استفاده شد و نتایج چشمگیری در بهبود فلاکس آب عبوری مشاهده شد (۲۳). شایان ذکر است که برای تبدیل غشا RO مستعمل به غشا NF ، به دلیل اینکه تنها تخریب جزئی لایه PA مورد نیاز است، غلظت-زمان کمتری از ماده اکسنده در مقایسه با شرایط تولید UF مورد استفاده قرار می‌گیرد. براساس گزارشات موجود، NaOCl حتی کمتر از 10000 ppm.h نیز قابلیت بازیافت غشا RO مستعمل به غشا NF را دارد (۱۰، ۱۱، ۱۶، ۱۹).

pH -

شیمی محلول‌های NaOCl تا حد زیادی به pH وابسته

دلیل در بعضی مواقع مقدار بهینه غلظت-زمان گزارش شده برای تولید UF خارج از محدوده مذکور است. به عنوان مثال، در پژوهشی از ترکیب نمک NaCl ، دکستروز و سولفات منگنز به عنوان خوراک جهت ارزیابی تخریب لایه PA المان غشائی مستعمل از نوع SW و تبدیل آن به UF استفاده شد. براساس نتایج حاصل از این پژوهش، NaOCl با 30000 ppm.h که تقریباً یک دهم محدوده رایج است، بهترین عملکرد را در تخریب لایه PA و تبدیل آن به UF نشان می‌دهد (۱۱). برای بازیافت نوع BW غشا RO مستعمل به دلیل استفاده از خوراک با TDS کمتر و متعاقباً گرفتگی و رسوب کمتر در مقایسه با نوع SW ، غلظت کمتری از ماده اکسنده مورد نیاز است (۱۰-۱۲، ۱۶، ۱۹).

در برخی مواقع برای کاهش میزان غلظت اکسنده مورد استفاده یا کاهش زمان غوطه‌وری از فرایند تمیزکردن

جدول ۲- شرایط بازسازی غشا RO به NF یا UF

| منبع | سنجش عملکرد غشا جدید | غشا جدید | سیستم تماس با اکسیدکننده | مقدار ماده اکسیدکننده (ppm.h) | نوع ماده اکسیدکننده | نوع غشا RO |
|------|---|-----------------|--------------------------|--|------------------------|---------------------|
| (۱۴) | $\text{PE} = 300$ | - | چرخشی | 1000 ppm | KMnO_4 | SW |
| (۱۵) | $\text{PE} = 445$ | MF | چرخشی | 5472 ppm | KMnO_4 | SW |
| (۲۳) | افزایش فلاکس خروجی و کاهش میزان دفع نمک. | - | چرخشی | $1\% + 2 \text{ g L}^{-1} + 1\%$ | KMnO_4 | - |
| (۱۲) | میزان دفع پروتئین‌ها و ترکیبات هیومیک و نرخ گرفتگی (مشابه UF حذف پانتوزن (لگاریتم 10 kDa). حذف $2/4$ ذرات به سائز ویروس). | UF | - | 30000 | NaOCl (12.5%) | BW, SW |
| (۲۵) | میزان تراوایی مشابه UF تجاری گزارش شد. | UF | - | 37500 | NaOCl | SW |
| (۱۱) | ضرایب تراوایی و دفع مشابه نمونه‌های UF و NF تجاری. | UF, NF | غوطه‌وری | $4500-15000$ 30000 | NaOCl (10%) | BW, SW |
| (۲۱) | مقایسه میزان تراوایی و دفع نمک قبل و بعد از بازیابی | UF, MF | غوطه‌وری | 30000 | NaOCl | BW |

ادامه جدول ۲- شرایط بازسازی غشا RO به NF یا UF

| | | | | | |
|--|--------|-------------------------|---|---------------------|--------------------|
| ضرایب تراوایی و دفع غشاهای RBW در مقایسه با NF تجاری عملکرد متوسطی را نشان دادند. (۱۹) | NF, UF | غوطه‌وری | ۱۲۵۰۰ و ۶۲۰۰ ۴۲۰۰ ۳۳۰۰۰-۴۶۰۰۰ ۳۵۰۰۰۰ | NaOCl (14%) | BW, SW |
| تراوایی و MWCO در هر دو غلظت- زمان برای هر غشا یکسان گزارش شد. میزان تراوایی در غشاهای RBW در حدود ۱۰ برابر RSW گزارش شد. (۲۶) | UF | غوطه‌وری | ۳۰۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ | NaOCl (10%) | BW, SW |
| تصاویر SEM ساختار غشاهای بازسازی شده را تأیید کردند. (۱۶) | NF, UF | غوطه‌وری | ۶۲۰۰ ۳۰۰۰۰۰ | NaOCl (10%) | BW, SW (PA-TFC) |
| جریان خروجی و میزان دفع نمک مشابه غشاهای جدید. (۱۰) | NF, UF | غوطه‌وری | ۶۲۰۰ ۳۰۰۰۰۰-۳۰۰۰۰۰ | NaOCl (10%) | BW, SW |
| میزان تراوایی آب نمک و دفع نمک حتی فراتر از NF و نزدیک به RO گزارش شد. (۲۲) | NF | غوطه‌وری همراه با همزنی | ۱۳۰۰۰-۲۴۰۵۰۰ | NaOCl (1.3% wt.) | SW |

فرایند اکسیداسیون غشا مستعمل مطلوب‌تر است. در pH بازی (بیشتر از ۱۰)، ترکیب اصلی محلول اکسند NaOCl است، در حالی که در pH خنثی تنها ۲۲ درصد از محلول اکسند، ClO^- است. از این رو اثر ClO^- بر لایه PA در pH بازی بسیار بیشتر از pH خنثی است.

- سیستم تماس غشا با محلول اکسند

به‌طور کلی سیستم تماس غشا با محلول اکسند در پژوهش‌ها در دو فرم «چرخشی» و «غوطه‌وری» مورد بررسی قرار گرفته است. به سیستم غوطه‌ور اصطلاحاً "غیرفعال" و به سیستم چرخشی "فعال" گفته می‌شود (۱۸). در سیستم فعال، محلول اکسند در فشار مشخصی (۴/۴ bar) (۱۴)، (۱۰ bar) (۲۱) پیرامون غشا می‌چرخد و در سیستم غیرفعال، غشا تنها در محلول اکسند در زمان مشخص غوطه‌ور می‌شود. پژوهش‌های مختلفی راندمان

است. NaOCl در آب به طور کامل تجزیه شده و NaOH و هیپوکلروس اسید (HOCl) را تشکیل می‌دهد که در تعادل با دو گونه دیگر هیپوکلریت (OCl^-) و گاز کلر (Cl_2) (g) است (۱۱). به همین دلیل در برخی از پژوهش‌ها علاوه بر بهینه‌سازی پارامتر غلظت-زمان، پارامتر pH نیز جهت دستیابی به بیشترین راندمان بازیافت مورد ارزیابی قرار گرفت. البته نتایج بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه حاکی از آن است که محلول اکسند NaOCl بدون تنظیم pH که معمولاً در محدوده ۱۰ تا ۱۰/۵ است، بیشترین راندمان را دارد و نیازی به تنظیم آن در محدوده مشخصی نیست (۱۰، ۱۱، ۱۶، ۲۱). برخی نیز گزارش دادند که pH در محدوده ۱۲ بیشترین بازدهی را در بازیافت غشاهای مستعمل دارد (۱۲، ۲۲). به‌طور کلی pH بازی نسبت به اسیدی و خنثی برای

اکسایش بستگی دارد، سیستم فعال به میزان حجم آب بیشتر و زمان کوتاه تری نسبت به سیستم غیرفعال جهت توقف اکسایش و خنثی سازی نیاز دارد (۱۸).

– مقایسه محیط زیستی

همان طور که در بخش های پیشین گفته شد، استراتژی های مختلفی مانند دفن، پردازش حرارتی، بازیافت اجزاء مدول، استفاده مجدد و بازیافت مستقیم جهت مدیریت پسماندهای غشاهای RO وجود دارد. اثرات محیط زیستی این روش ها از اولین ملاحظات است که باید برای انتخاب بهترین گزینه، مورد بررسی قرار گیرد. ارزیابی چرخه عمر (LCA)، یک ابزار سیستماتیک جهت بررسی اثرات بالقوه محیط زیستی است که طیف گسترده ای از ورودی ها شامل مواد و انرژی مصرفی، پسماند و پساب خروجی و آلاینده های گازی منتشر شده را در نظر می گیرد. عموماً دو حوزه کلی برای بررسی LCA در استراتژی های مدیریت پسماند وجود دارد که عبارتند از ارزیابی عملکرد محیط زیستی یک سیستم مدیریت پسماند خاص و مقایسه سناریوهای مختلف مدیریت پسماند برای یک نوع پسماند خاص. اخیراً در برخی از پژوهش ها حالت دوم LCA، یعنی مقایسه سناریوهای مختلف مدیریت پسماندهای غشائی RO بررسی شده است (۴، ۱۸، ۲۶). براساس نتایج حاصل از این پژوهش ها، دیاگرام جریان فرایند تبدیل غشا RO قدیمی به غشا UF در شکل ۳ ترسیم شده است.

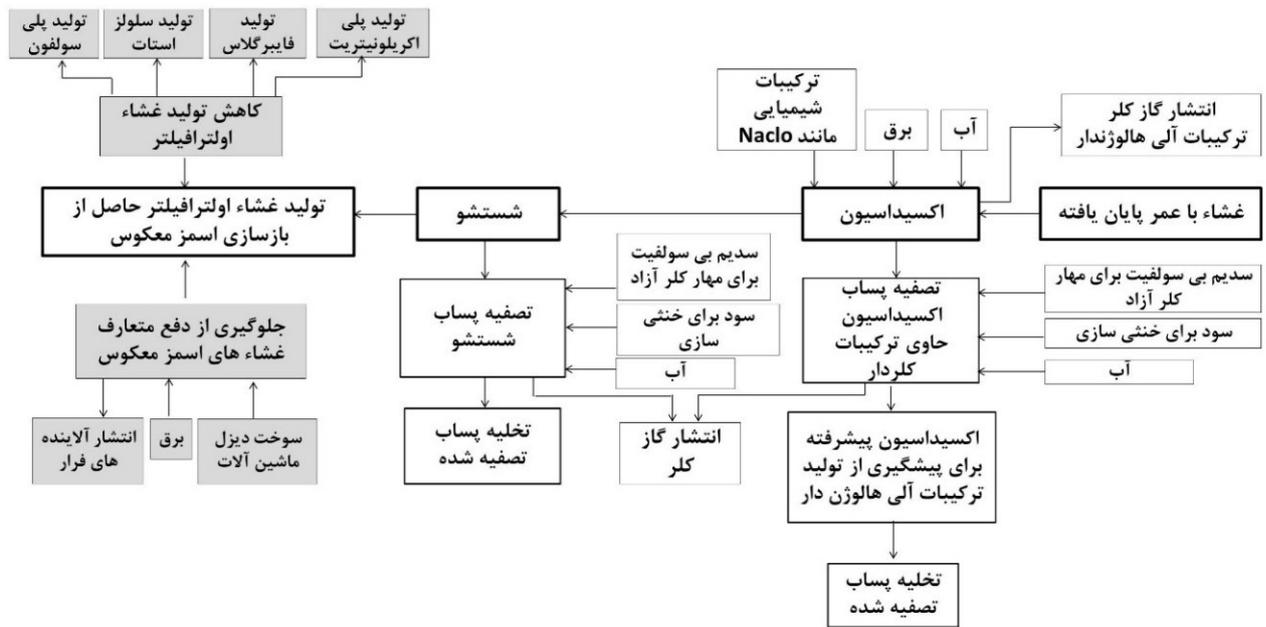
همانطور که در شکل ۳ مشخص است و در بخش فنی نیز توضیح داده شد، تبدیل غشا RO مستعمل به غشا UF از دو مرحله کلی اکسیداسیون و شستشو تشکیل شده است. اما پیش از بررسی اثرات محیط زیستی این دو مرحله، لازم است اثرات محیط زیستی سناریوی تبدیل به غشا UF با سایر سناریوهای مدیریت پسماندهای غشائی RO مقایسه شده و مشخص گردد که تحت چه شرایطی بهره‌وری محیط زیستی این گزینه در مقایسه با سایر گزینه‌های موجود بیشتر است. Lawler و همکاران اثرات محیط زیستی سناریوهای مختلف مدیریت

بازیافت این دو سیستم تماسی را باهم مقایسه کرده‌اند (۱۴، ۱۵، ۲۱). استفاده از سیستم فعال موجب افزایش سطح تماس محلول اکسنده با لایه PA شده و متعاقباً راندمان اکسایش را افزایش می‌دهد. به این ترتیب می‌توان پارامتر غلظت-زمان را کاهش داد. اما باید توجه داشت که با استفاده از سیستم فعال، میزان مصرف انرژی افزایش یافته و از نظر اقتصادی در توسعه صنعتی این تکنولوژی ایجاد محدودیت می‌کند. به همین دلیل، در برخی از پژوهش‌ها جهت ایجاد تماس مؤثر بین محلول اکسنده و غشا، تنها در دقایق ابتدایی فرایند اکسایش، جریان آشفته‌ای از محلول اکسنده را در عرض غشا ایجاد کرده و سپس از سیستم غیرفعال جهت تکمیل فرایند بازیافت استفاده کردند (۱۹).

- شستشو و نگهداری نهایی

پس از اینکه غشاهای RO در معرض دز مشخصی از عامل اکسنده قرار گرفتند و تخریب مورد نظر در لایه PA اتفاق افتاد، لازم است تا اکسیداسیون لایه PA متوقف شده و غشا بازیافت شده جهت انجام آزمایشات مربوط به عملکرد و در نهایت استفاده در کاربرد مورد نظر در شرایط مطلوبی نگهداری شود. زیرا همان‌طور که در شرایط آماده سازی برای اکسیداسیون نیز اشاره شد، شرایط نگهداری غشاها تاثیر قابل توجهی بر بهبود یا افت عملکرد آنها دارد.

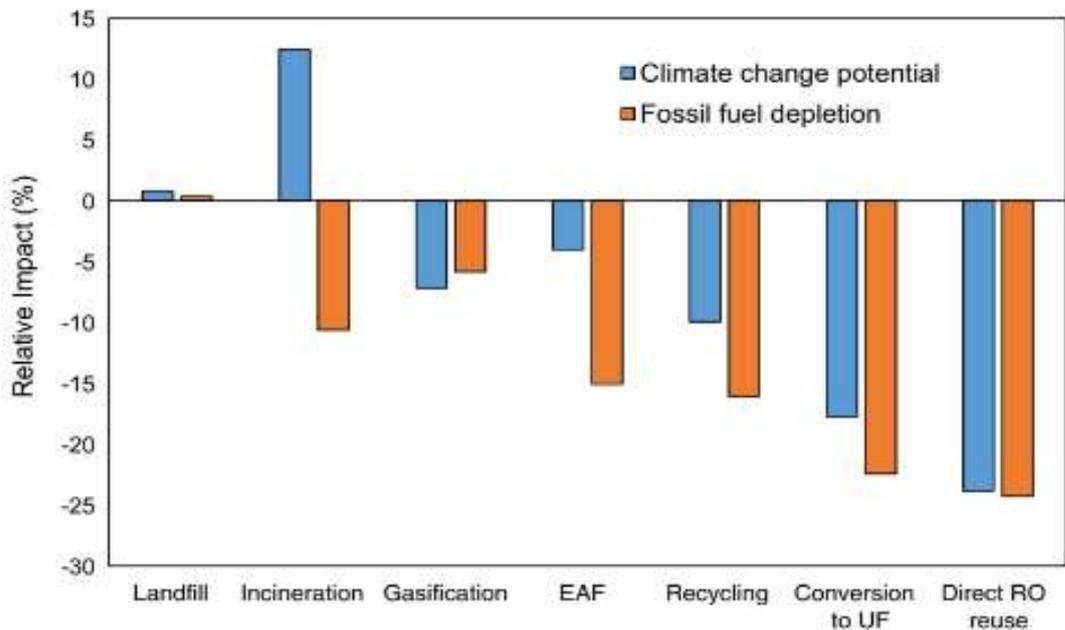
در غالب پژوهش‌های انجام شده، در انتهای فرایند تبدیل غشا به منظور توقف واکنش‌های اکسیداسیون، غشاها تا زمان دستیابی به pH آب مقطر، با آب دو بار تقطیر شسته شده (۱۱، ۲۳) و تا زمان استفاده، در مخزن حاوی آب مقطر دو بار تقطیر در دمای محیط (۱۶، ۲۲) یا دمای ۰C (۱۲) نگهداری شدند. استفاده از محلول SBS یکی دیگر از شیوه‌های رهایی از کلر باقیمانده در مخزن اکسیداسیون و نگهداری از غشا بازیافت شده تا زمان استفاده است (۱۴، ۱۹). شستشو با آب بدون یون جهت خنثی سازی و آب بندی غشا در کیسه‌های پلاستیکی، از دیگر شرایط نگهداری غشا بازیافت شده به‌شمار می‌رود (۲۷). شایان ذکر است که شرایط شستشوی غشا به نوع سیستم



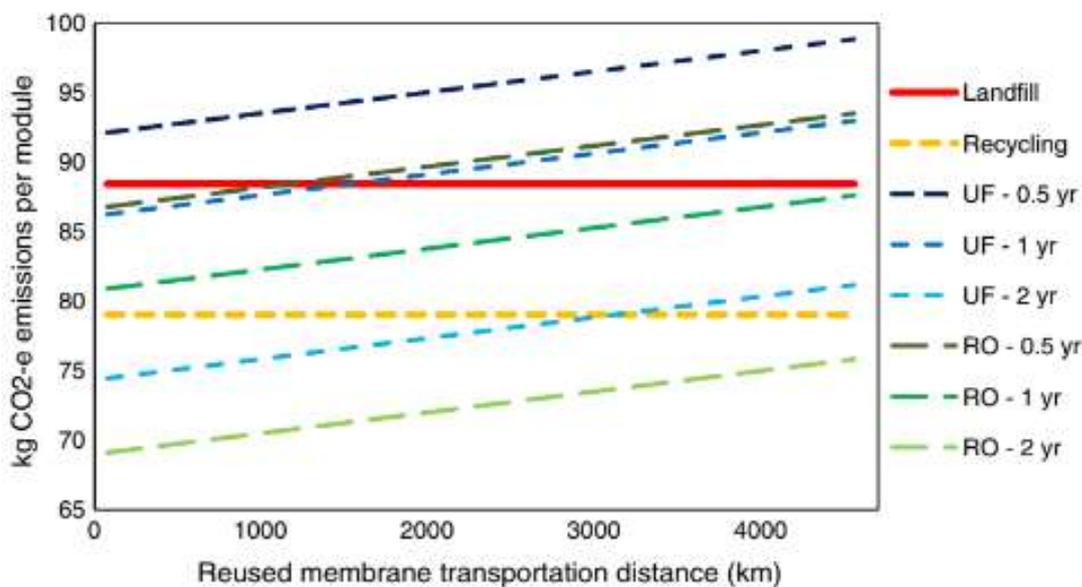
شکل ۳- دیاگرام جریان فرایند تبدیل غشا RO قدیمی به غشا UF

در فرایند تولید آنها نیز افزایش خواهد یافت. با توجه به میزان انرژی مصرف شده و CO_2 منتشر شده در حین فرایند تولید غشا RO، بازیافت مستقیم غشا RO و سپس تبدیل آن به غشا UF از نظر مصرف سوخت فسیلی و تغییرات اقلیمی مناسب‌ترین گزینه جهت مدیریت پسماندهای غشائی است (نمودار ۲). تفاوت بین استفاده مستقیم از غشا RO و تبدیل آن به غشا UF ناشی از ترکیبات شیمیایی مورد نیاز جهت تخریب لایه PA در فرایند تبدیل است. مسافت حمل‌ونقل و طول عمر ثانویه غشا از فاکتورهای مهم دیگری است که باید در بررسی اثرات محیط‌زیستی سناریوهای استفاده مجدد مستقیم و همچنین سناریوی تبدیل به UF و NF در نظر گرفته شود. همانطور که در نمودار ۲ نشان داده شد، با افزایش مسافت حمل‌ونقل و کاهش طول عمر، میزان انتشار CO_2 در سناریوی استفاده مجدد مستقیم و تبدیل به UF برخلاف بازیافت و دفن، افزایش یافته و در مسافت‌های بیش از ۲۰۰۰ km و طول عمر کمتر از یک سال برای سناریوی تبدیل به UF و کمتر از نیم سال برای سناریوی

پسماندهای غشائی را از نظر تغییرات اقلیم، مصرف سوخت فسیلی، تخریب لایه ازن، سمیت سلولی، سمیت انسانی، تغذیه‌گرایی (Eutrophication) آب شیرین، تغذیه‌گرایی دریایی و اسیدی شدن زمین بررسی کردند (۲۶). براساس بررسی‌های انجام شده، تولید و انتقال یک مدول ۸ اینچی باعث انتشار ۸۷ kg CO_2 به محیط می‌شود که از این مقدار، بیشترین سهم انتشار مربوط به ساخت ورقه‌های غشائی به عنوان سنگین‌ترین جزء (۴۵ درصد) و بعد از آن مربوط به ساخت زیرلایه (۲۵ درصد) و حلال مورد استفاده برای لایه‌های PSF و PA (۱۲ درصد) است. ۹۰ درصد اثرات محیطی تولید لایه‌های PSF و PA مربوط به تغذیه‌گرایی دریایی است. این امر به دلیل حجم بالای نیتروژنی است که در حین فرایند تولید به محیط رها می‌شود. در نهایت، نتایج بررسی‌های این تیم تحقیقاتی نشان داد که ساخت یک المان غشائی با وزن ۱۳/۵ kg مستلزم مصرف ۳۸/۵ kg انرژی سوخت فسیلی است. شایان ذکر است که با افزایش اندازه المان‌های غشائی مورد استفاده در صنایع، میزان انتشار CO_2 و مصرف انرژی



(الف)



(ب)

نمودار ۲- الف) انتشار گاز گلخانه‌ای و کاهش مصرف سوخت فسیلی برای یک المان غشائی RO. نتایج بر حسب انحراف نسبی از تولید غشا نشان داده شده است؛ ب) اثر مسافت حمل و نقل بر میزان انتشار CO₂ در سناریوهای بازیافت، دفن، تبدیل به UF (با طول عمر ۱،۰/۵ و ۲ سال) و استفاده مستقیم مجدد RO (با طول عمر ۱،۰/۵ و ۲ سال)

جدول ۳- اثرات منفی محیط‌زیستی تبدیل یک المان غشائی RO به UF (۲۸)

| اثرات محیط‌زیستی در هر نوع ضایعات | وزن هر ماده (Material intensity) به تفکیک (kg) | | | مصرف ماده (kg) | ضایعات |
|--------------------------------------|--|--------|----------|-------------------|--|
| | هوا | آب | غیرزیستی | | |
| ۳/۱۱ | ۰/۰۳۵ | ۲/۹۸ | ۰/۰۹۱ | ۰/۰۳۳ | سدیم هیدروکسید ۰/۱ درصد (تمیز کردن) |
| ۲/۹۱ | ۰/۰۲۵ | ۲/۶۸ | ۰/۲ | ۰/۰۶۶ | هیدروکلریک اسید ۰/۲ درصد (تمیز کردن) |
| ۲۸/۸۲ | ۰ | ۲۸/۶ | ۰/۲۲ | ۲۲ | آب |
| ۹۰/۱۸ | ۰/۹۸ | ۸۶/۳۳ | ۲/۸۷ | ۰/۹۲ | سدیم هیپوکلریت ۱۰ تا ۱۲ درصد (تخریب لایه PA) |
| ۲۹/۲ | ۰/۳۳ | ۲۸ | ۰/۸۶ | ۰/۳۱ | سدیم تیوسولفات (خنثی‌سازی) |
| ۶۳/۳۱ | ۰/۳۱ | ۶۲/۶۳ | ۰/۳۷ | ۰/۰۶۸ | پلی‌آمید |
| ۲۱۷/۵۱ | ۱/۶۸ | ۲۱۱/۲۲ | ۴/۶۱ | ۲۳/۳۷ | جمع |

kg ۲۶۰۹/۸۱ گزارش شده است. بنابراین، با فرض شباهت بین المان‌های RO و UF (۸ اینچ) با پوسته خارجی فایبرگلاس، بهره‌وری محیط‌زیستی ناشی از تبدیل یک المان RO به UF kg ۲۳۹۲/۳ است. میزان پسماندهای غشائی حاصل از کاربرد ثانویه غشا RO نیز از نظر محیط‌زیستی حائز اهمیت است. بدون شک طول عمر غشا UF حاصل از تبدیل غشا RO مستعمل کمتر از طول عمر غشا UF جدید خواهد بود. در برخی پژوهش‌ها میانگین طول عمر این غشا ۲ سال برآورد شده است، درحالی‌که طول عمر غشا جدید حدود ۵ سال است.

استفاده مجدد مستقیم، میزان انتشار CO₂ بیش از حالت بازیافت و دفن خواهد بود. نوع و میزان مواد مورد استفاده در فرایند تبدیل غشا RO به غشا UF از دیگر مسائل مهمی است که باید جهت بررسی اثرات محیط‌زیستی فرایند لحاظ شود. جدول ۳ میزان مواد مصرفی و اثرات منفی این مواد را در فرایند تبدیل یک المان غشائی RO به UF نشان می‌دهد (۲۸). بر اساس این جدول اثرات منفی ناشی از فرایند تبدیل (اکسیداسیون شیمیایی) kg ۲۷۱/۵۱ است. بهره‌وری محیط‌زیستی یک المان غشائی RO نیز حدود

جدول ۴- معضلات محیط‌زیستی فرایند تبدیل غشا RO مستعمل به غشا UF و روش‌های رفع و پیشگیری از انتشار آلاینده‌ها (۱۸)

| معضل محیط‌زیستی | نوع سیستم | نوع انتشار | روش حذف یا کاهش انتشار آلاینده |
|---|--------------|---------------|--|
| تشکیل ترکیبات آلی هالوژنه در طول اکسیداسیون | فعال/غیرفعال | انتشار به آب | اکسیداسیون پیشرفته جهت حذف ترکیبات هالوژنه |
| انتشار فرار ترکیبات آلی هالوژنه و کلردار | غیرفعال | انتشار به هوا | بهبود آب‌بندی سیستم جهت پیشگیری از انتشار اسکراب کردن قلیایی گاز جهت به‌دام انداختن گاز و پیشگیری از انتشار آن به محیط |
| انتشار موضعی ترکیبات آلی هالوژنه و کلردار | فعال/غیرفعال | انتشار به هوا | انتخاب پمپ بهتر |
| برق مصرفی در پمپ | فعال | مصرف انرژی | |

بنابراین با تبدیل غشا RO مستعمل به غشا UF می‌توان حدود ۹۹/۱ درصد (حدود ۹۷۱/۵۳ دلار آمریکا برای هر المان UF) از هزینه‌های تولید غشا UF را کاهش داد. این تخمین‌ها بدون احتساب بحث اقتصادی محل دفن پسماند غشائی است (۲۸).

یکی از چالش‌های اقتصادی فرایند بازیافت مستقیم، میزان مصرف بالای برق (۱/۳۴ kWh/module) فرایند ازن‌زنی جهت حذف ترکیبات هالوژن‌دار خروجی از واحد اکسیداسیون است. برق مصرفی در فرایند ازن‌زنی بسته به ماهیت و کمیت رسوب و متعاقباً میزان تولید ترکیبات هالوژنه، ۵۷ تا ۸۹ درصد برق کل مصرفی است. یک استراتژی مهم برای کاهش انرژی مصرفی در تولید ازن، پیشگیری از تشکیل ترکیبات هالوژنه است که از دو طریق محقق می‌گردد: ۱- بررسی عوامل اکسیداسیون مختلف مانند محلول استون، ان-متیل-۲ پیرولیدون و پتاسیم پرمنگنات ۲- تمیزکردن شیمیایی پیش از فرایند اکسیداسیون با عواملی مانند سود برای کاهش رسوب آلی پیش از فرایند اکسیداسیون/بازیافت (۱۸). بجز NaOCl، عوامل اکسیداسیون مختلفی مانند استون، ان-متیل-۲ پیرولیدون و پتاسیم پرمنگنات برای بازیافت غشا RO مستعمل وجود دارد. استفاده از این عوامل در مقایسه با NaOCl باعث کاهش آلاینده‌های خروجی از واحد اکسیداسیون شده که در نتیجه آن به انرژی کمتری برای ازن‌زنی جهت حذف آلاینده‌ها مورد نیاز خواهد بود. اما همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، از آنجایی که راندمان NaOCl در بازیافت غشاهای مستعمل بیشتر از سایر عوامل اکسند است، این عامل اکسیداسیون بیشتر مورد توجه بوده و عملاً تاکنون به‌عنوان گزینه اول جهت کاهش میزان انرژی مصرفی واحد ازن‌زنی مورد استقبال قرار نگرفته است. اما گزینه دوم که تمیزکردن شیمیایی غشا پیش از اکسیداسیون است، در تعداد زیادی از پژوهش‌ها (که در بخش‌های پیشین به آن اشاره شد) مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از فرایند تمیزکردن شیمیایی

بنابراین میزان پسماند غشائی UF حاصل از بازسازی غشا RO تقریباً ۲/۵ برابر پسماند غشائی UF جدید است. البته با در نظر گرفتن میزان کاهش دفع سالانه ضایعات غشائی RO، فرایند تبدیل غشاهای مستعمل به غشا UF یا NF دارای بهره‌وری محیط‌زیستی قابل توجهی است (۲۸). جدول ۴ آلاینده‌های منتشرشده از دو مرحله اکسیداسیون و شستشو و همچنین بهترین روش در دسترس جهت حذف این آلاینده‌ها را نشان می‌دهد (۱۸). پساب کلردار خروجی از مرحله اکسیداسیون را می‌توان با استفاده از SBS حذف و با سود خنثی کرد. در مرحله اکسیداسیون، احتمال ترکیب کلر آزاد با رسوبات و تشکیل ترکیبات آلی هالوژنه نیز وجود دارد که برای حذف آن، نیاز به یک مرحله اکسیداسیون پیشرفته است. ازن‌زنی، از فناوری‌های موجود جهت حذف ترکیبات هالوژنه به‌شمار می‌رود.

- مقایسه اقتصادی

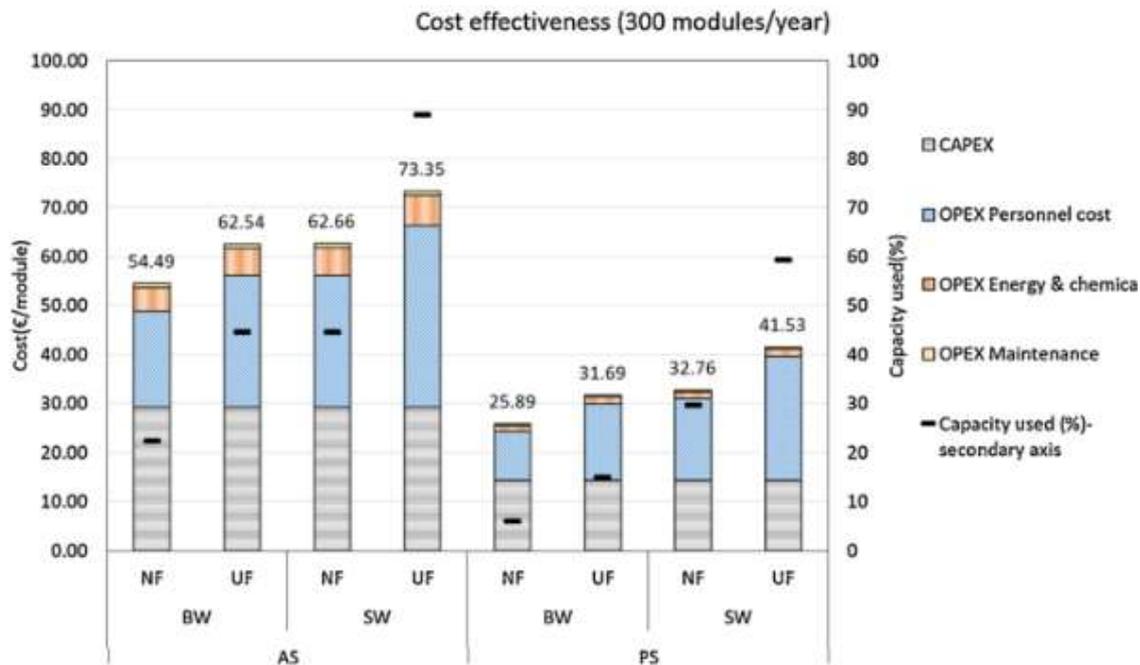
ملاحظات اقتصادی از دیگر فاکتورهای مهم بررسی سیستماتیک سناریوهای مدیریت پسماندهای غشائی است. براساس بررسی‌های انجام شده در پژوهش‌های پیشین، هزینه مواد مورد استفاده جهت تبدیل هر المان غشائی RO به غشا UF حدود ۱/۹۹ دلار آمریکا، هزینه طراحی سیستم بازیافت مستقیم (Capital Expenditure) حدود ۲۵۵۰ دلار آمریکا و هزینه‌های عملیاتی (CapEx) حدود ۰/۵۶ دلار آمریکا بر کیلوگرم ماده بازیافت شده است (جدول ۵). با در نظر گرفتن هر المان غشائی معادل ۱۳/۵ kg، مقدار کل OpEx برای هر مدول تبدیل شده معادل ۷/۶۱ دلار آمریکا است. در نهایت با فرض اینکه هزینه حمل‌ونقل حدود ۱۲ درصد است، هزینه هر المان تبدیل شده ۸/۵۳ دلار آمریکا خواهد بود. این درحالی است که میانگین قیمت هر المان پیچشی UF جدید (غشا پلیمری ۸ اینچ) برای پیش‌تصفیه RO و تصفیه آب سطحی حدود ۹۸۰ دلار آمریکا است (با توجه به متفاوت بودن مالیات در کشورهای مختلف، این قیمت بدون در نظر گرفتن مالیات است).

جدول ۵- مروری بر هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری فرایند بازیافت مستقیم (۲۸)

| هزینه‌ها | توصیف | ارزش (دلار آمریکا) | ارزش (دلار آمریکا بر کیلوگرم) |
|----------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|
| CapEx | پمپ خوراکی‌دهی | ۵۰۰ | - |
| | مخزن تحت فشار | ۱۴۰۰ | - |
| | تانک CIP با واحد دوزینگ | ۳۰۰ | - |
| | فلومتر و فشارسنج | ۲۰۰ | - |
| | تانک بافر | ۱۵۰ | - |
| | جمع | ۲۲۵۰ | - |
| OpEx | استهلاک هزینه‌های سرمایه‌ای | - | ۰/۱۵۳ |
| | آب و ترکیبات شیمیایی | - | ۰/۱۴۷ |
| | انرژی | - | ۰/۰۰۸ |
| | کارگر | - | ۰/۲۲۸ |
| | نگهداری | - | ۰/۰۲۸ |
| | جمع | - | ۰/۵۶۴ |

به پایلوت نیاز است. البته OpEx مربوط به مصرف انرژی و مواد شیمیایی در سیستم غیرفعال بیشتر از سیستم فعال است. با توجه به نمودار ۳، نوع کاربرد اولیه غشا RO (SW و BW) و محصول نهایی فرایند بازیافت مستقیم (UF و NF) نیز تاثیر زیادی بر هزینه سیستم بازیافت مستقیم دارد. به‌طور کلی، تبدیل غشا RO به UF در شرایط یکسان، هزینه بیشتری نسبت به تبدیل آن به NF دارد. همچنین، هزینه فرایند تبدیل RO مورد استفاده برای تصفیه آب دریا در مقایسه با آب لب‌شور بیشتر است. از این‌رو تبدیل غشا RO که پیش‌تر جهت تصفیه آب دریا مورد استفاده قرار گرفته، به غشا UF، با سیستم فعال مقرون به صرفه نیست. در حالی که تبدیل RO به کار رفته برای تصفیه آب لب‌شور به غشا NF هزینه کمی دارد. برای مقایسه اقتصادی دقیق‌تر غشا UF جدید و غشا RO تبدیل شده به UF باید طول عمر و هزینه‌های تعویض آنها نیز در نظر گرفته شود. میانگین طول عمر UF جدید

پیش از اکسیداسیون باعث کاهش میزان رسوب موجود در سطح غشا شده و منجر به افزایش تماس محلول اکسند با لایه PA می‌شود. در نتیجه، با استفاده از فرایند تمیز کردن شیمیایی، می‌توان میزان استفاده از NaOCl در واحد اکسیداسیون و متعاقباً میزان ترکیبات هالوژنه خروجی از این واحد را کاهش داد و در نهایت انرژی کمتری برای از زنی جهت حذف این آلاینده‌ها مصرف کرد. در پژوهشی CapEx و OpEx تبدیل غشا RO به غشا UF و NF در دو سیستم فعال و غیرفعال با هم مقایسه شد (نمودار ۳) (۱۸). هزینه سیستم غیرفعال (euro/module ۲۹/۹-۴۱/۵۳) به دلیل عدم نیاز به پمپ جهت چرخش سیال، کمتر از سیستم فعال (euro/module ۵۴/۵-۷۳/۳۵) است. CapEx سیستم فعال تقریباً دو برابر سیستم غیرفعال گزارش شده است. OpEx مربوط به هزینه پرسنلی نیز در سیستم غیرفعال کمتر است، چون به زمان کمتری برای نظارت بر فرایند و ورود یک مدول



نمودار ۳- هزینه تبدیل یک مدول RO (در دو نوع متفاوت SW و BW) به غشا UF و NF به تفکیک CapEx (ستون خاکستری) و OpEx (شامل سه بخش هزینه پرسنلی، انرژی و ترکیبات شیمیایی مصرفی و هزینه نگهداری) (۱۸)

۵ سال (با تعویض سالانه ۲۰ درصد) و RO تبدیل شده به UF، ۲ سال (با تعویض سالانه ۵۰ درصد) است. با توجه به چندین برابر بودن هزینه ساخت یک غشا UF جدید (۹۸۰ دلار آمریکا) نسبت به هزینه تبدیل غشا RO به UF (۸/۵۳ دلار آمریکا)، کمتر بودن طول عمر غشا تبدیل شده، تاثیر چشمگیری بر افزایش هزینه‌ها ندارد. یعنی با احتساب هزینه تعویض سالانه، هزینه کل یک المان UF جدید، ۱۱۷۶ دلار آمریکا و یک المان RO تبدیل شده به UF، ۱۲/۷۷ دلار آمریکا است (۲۸).

PA مانند استون انجام داد (۱۱). استفاده از مواد اکسندنده به‌ویژه KMnO_4 و NaOCl به‌واسطه راندمان خوب حذف لایه PA، از رایج‌ترین روش‌های بازیافت به‌شمار می‌روند. نرخ تخریب لایه PA عموماً با تنظیم پارامتر غلظت-زمان، یعنی غلظت محلول اکسندنده در مدت زمان غوطه‌وری غشا در این محلول، کنترل می‌شود (۱۱، ۱۲، ۲۱). نقطه بهینه این پارامتر به نوع غشا مستعمل و نوع محصول تولیدی بستگی دارد. جهت ارزیابی نرخ تخریب معمولاً از پارامتر فلاکس آب عبوری و میزان عبور یا حذف نمک‌ها یا مواد آلی مانند پروتئین استفاده می‌کنند. بازیافت غشا RO نوع SW به دلیل میزان گرفتگی و رسوب بیشتر، به ماده اکسندنده بیشتری جهت تخریب رسوبات و لایه PA در مقایسه با BW نیاز دارد (۱۰، ۱۱، ۱۶). شایان ذکر است که میزان استفاده از ماده اکسندنده را می‌توان با یک مرحله پیش تمیزسازی و حذف رسوب با استفاده از مواد شیمیایی مانند NaOH ، HCl و SBS کاهش داد.

بازیافت غشا RO مستعمل با حذف کامل رسوب و تخریب کامل یا جزئی لایه PA اتفاق می‌افتد. تخریب لایه PA را می‌توان با استفاده از مواد اکسندنده مانند KMnO_4 و NaOCl ، موادی که لایه PA را در خود حل می‌کنند، مانند آن-متیل-۲-پیرولیدون و یا مواد جداکننده لایه

بحث

بازیافت غشا RO مستعمل با حذف کامل رسوب و تخریب کامل یا جزئی لایه PA اتفاق می‌افتد. تخریب لایه PA را می‌توان با استفاده از مواد اکسندنده مانند KMnO_4 و NaOCl ، موادی که لایه PA را در خود حل می‌کنند، مانند آن-متیل-۲-پیرولیدون و یا مواد جداکننده لایه

بازیافت، بهینه‌سازی کردند. این درحالی است که استفاده از کمترین میزان ماده اکسند در کوتاه‌ترین زمان ممکن، از نظر اقتصادی و محیط‌زیستی بسیار حائز اهمیت است. در برخی مواقع کیفیت غشا مستعمل، به‌ویژه در مورد نوع SW، به‌شدت ضعیف بوده و استفاده مجدد از آن، به‌خصوص تبدیل آن به UF، به دلیل زمان‌بر بودن فرایند و حجم زیاد ماده اکسند، از نظر اقتصادی و محیط‌زیستی مقرون به صرفه نیست. پیش‌خیساندن غشا مستعمل، استفاده از واحد تمیزسازی شیمیایی پیش از فرایند اکسیداسیون و طراحی نحوه غوطه‌وری یا همزدن سیستم، به دلیل کاهش چشمگیر میزان مصرف ماده اکسند و زمان اکسیداسیون، تا حد زیادی منجر به کاهش هزینه‌ها و اثرات منفی محیط‌زیستی می‌گردد. در حال حاضر، ترکیبات هالوژنه خروجی از واحد اکسیداسیون، یکی از مهمترین مسائل پیش‌روی توسعه تجاری تکنولوژی بازیافت غشا مستعمل است. ازن‌زنی از رایج‌ترین روش‌های حذف این آلاینده‌های خطرناک به‌شمار می‌رود که به دلیل مصرف انرژی زیاد و متعاقباً پرهزینه بودن، استفاده از آن در مقیاس صنعتی مقرون به صرفه نیست. استفاده از واحد تمیزسازی شیمیایی پیش از اکسیداسیون، کمک زیادی به کاهش میزان مصرف مواد اکسند، متعاقباً کاهش ترکیبات هالوژنه خروجی از این واحد و در نهایت کاهش مصرف انرژی واحد ازن‌زنی خواهد کرد.

به‌طور کلی، بازیافت و استفاده مستقیم از غشاهای RO قدیمی در صورت بهینه‌سازی شرایط مذکور با در نظر گرفتن نوع غشا RO و انتخاب هدف مناسب از بازیافت (تولید غشا MF یا UF یا NF)، از راهبردهای مدیریتی پربازده و با بهره‌وری اقتصادی و محیط‌زیستی قابل توجهی خواهد بود. اما باید توجه داشت که گسترش کاربرد این غشا در صنایع و نفوذ آن در بازار به‌شدت به رفع چالش‌های فنی، رقابت در بازار و موانع اجتماعی بستگی دارد. افزایش آگاهی اجتماعی و قانون‌گذاری جهت پذیرش استفاده از محصولات بازیافت شده، از اقدامات مهم در این

این مواد با حذف رسوب روی لایه PA، سطح تماس این لایه را با مواد اکسند افزایش داده و کنترل نرخ تخریب را تسهیل می‌کنند (۲۱، ۲۳). همچنین باید توجه داشت که شرایط نگهداری غشا مستعمل بر موفقیت بازیافت آن بسیار تاثیرگذار است. بخش قابل توجهی از ساختار متخلخل غشا مستعملی که مدت زیاد تحت شرایط خشک نگهداری می‌شود به دلیل نیروی مویبندی و تبخیر آب، تخریب می‌گردد. بنابراین نگهداری آن در شرایط مرطوب و یا حتی پیش‌خیساندن غشا کمک زیادی به بازیافت آن با روش اکسیداسیون خواهد کرد. محلول بازی نیز نسبت به محلول اسیدی یا خنثی به دلیل در دسترس بودن بیشتر عامل اکسند ClO^- ، تاثیر بیشتری بر میزان تخریب لایه PA خواهد داشت (۱۲، ۲۲).

در صورت تخریب جزئی لایه PA، مشخصات غشا بازیافت شده مشابه غشا NF خواهد بود و با تخریب کامل آن و تنها باقیماندن لایه PSF بر روی زیرلایه، غشائی با مشخصه مشابه UF و MF به‌دست خواهد آمد. بنابراین برای تولید NF به میزان غلظت-زمان کمتری در مقایسه با MF و UF نیاز است (۱۰، ۱۱، ۱۹).

نحوه تماس محلول اکسند با غشا مستعمل از دیگر پارامترهای تاثیرگذار بر راندمان تبدیل است. سیستم چرخشی یا فعال در مقایسه با حالت غوطه‌وری یا غیرفعال، سطح تماس بیشتری را بین محلول و غشا فراهم کرده، اما از طرف دیگر باعث افزایش مصرف انرژی و هزینه بازیافت می‌گردد. همچنین از نظر محیط‌زیستی نیز مطلوب نیست. بنابراین بهترین روش اقتصادی برای اطمینان از سطح تماس مؤثر بین محلول اکسند و غشا، استفاده از سیستم چرخشی تنها در دقایق ابتدایی فرایند اکسیداسیون است. مسائل اقتصادی و محیط‌زیستی دو فاکتور مهم تصمیم‌گیری در مورد نحوه استفاده مجدد از غشا مستعمل است. اما اکثر پژوهش‌های پیشین تنها به مسائل فنی بازیافت غشا مستعمل توجه کرده و پارامترهایی کلیدی مانند غلظت-زمان را با هدف دستیابی به بیشترین راندمان

هزینه‌های عملیاتی و طراحی سیستم است که در صورت انتخاب مناسب آنها، بازیافت مستقیم دارای صرفه اقتصادی گزارش شده است. میزان بهره‌وری محیط‌زیستی بازیافت مستقیم غشا RO به دلیل کاهش میزان دفن پسماندهای غشائی و همچنین کاهش مواد مورد استفاده جهت تولید غشا NF و UF جدید، نسبت به اثرات منفی محیط‌زیستی ناشی از پساب خروجی واحد اکسیداسیون و شستشو به‌طور قابل توجهی بیشتر است.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

زمینه به‌شمار می‌رود. مشخصات غشا بازیافت شده باید با مشخصات محصولات جدید و متنوع UF موجود در بازار قابل رقابت باشد. عملکرد مناسب، قیمت پایین و مصرف کم انرژی و طول عمر مشابه با UF جدید، از جمله نیرومحرکه‌های افزایش نفوذ این غشاها در بازار است (۷).

نتیجه‌گیری

از نظر فنی، در شرایط بهینه، تبدیل موفقیت‌آمیز غشا RO قدیمی به غشاهای NF، UF و MF امکان‌پذیر است. هرچند، غشاهای شیرین‌کننده آب لب‌شور نسبت به آب دریا پتانسیل بیشتری جهت بازیافت مستقیم دارند. نوع غشا (RO (BW و SW)، نحوه تماس غشا با محلول اکسنده، نوع محصول نهایی فرایند تبدیل (NF، UF و MF) و طول عمر آن از فاکتورهای مهم تاثیرگذار بر

References

1. Greenlee LF, Lawler DF, Freeman BD, Marrot B, Moulin P. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*. 2009;43(9):2317-48.
2. Coutinho de Paula E, Amaral MCS. Extending the life-cycle of reverse osmosis membranes: A review. *Waste Management & Research*. 2017;35(5):456-70.
3. Ang WS, Tiraferri A, Chen KL, Elimelech M. Fouling and cleaning of RO membranes fouled by mixtures of organic foulants simulating wastewater effluent. *Journal of Membrane Science*. 2011;376(1-2):196-206.
4. Lawler W, Bradford-Hartke Z, Cran MJ, Duke M, Leslie G, Ladewig BP, et al. Towards new opportunities for reuse, recycling and disposal of used reverse osmosis membranes. *Desalination*. 2012;299:103-12.
5. Pontié M, Awad S, Tazerout M, Chaouachi O, Chaouachi B. Recycling and energy recovery solutions of end-of-life reverse osmosis (RO) membrane materials: A sustainable approach. *Desalination*. 2017;423:30-40.
6. Landaburu-Aguirre J, García-Pacheco R, Molina S, Rodríguez-Sáez L, Rabadán J, García-Calvo E. Fouling prevention, preparing for re-use and membrane recycling. Towards circular economy in RO desalination. *Desalination*. 2016;393:16-30.
7. García-Pacheco R, Lawler W, Landaburu-Aguirre J, García-Calvo E, Le-Clech P. End-of-life membranes:

- challenges and opportunities. In: Drioli E, Giorno L, Fontananova E, editors. *Comprehensive membrane science and engineering*. 2nd ed. Oxford: Elsevier; 2017. p. 293-310.
8. Muñoz S, Frank R, Pilar I, Pérez C, Simón FX. Life+ Remembrance: End-of-life recovery of reverse osmosis. *FuturEnviro*. 2014;1-5.
 9. Karami M, Farzadkia M, Jonidi Jaafari A, Nabizade R, Gohari M, Karimae M. Investigation of Industrial waste Management in industries Located between Tehran and Karaj Zone in 2009-2010. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2012;4(4):507-18 (in Persian).
 10. García-Pacheco R, Landaburu-Aguirre J, Lejarazu-Larrañaga A, Rodríguez-Sáez L, Molina S, Ransome T, et al. Free chlorine exposure dose (ppm·h) and its impact on RO membranes ageing and recycling potential. *Desalination*. 2019;457:133-43.
 11. García-Pacheco R, Landaburu-Aguirre J, Molina S, Rodríguez-Sáez L, Teli SB, García-Calvo E. Transformation of end-of-life RO membranes into NF and UF membranes: evaluation of membrane performance. *Journal of Membrane Science*. 2015;495:305-15.
 12. Lawler W, Antony A, Cran M, Duke M, Leslie G, Le-Clech P. Production and characterisation of UF membranes by chemical conversion of used RO membranes. *Journal of Membrane Science*. 2013;447:203-11.
 13. Saeid N, Roudbari A, Yaghmaeian K. Design and implementation of integrated solid wastes management pattern in industrial zones, case study of Shahroud, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2014;12(1):32.
 14. Rodriguez JJ, Jiménez V, Trujillo O, Veza J. Reuse of reverse osmosis membranes in advanced wastewater treatment. *Desalination*. 2002;150(3):219-25.
 15. Veza JM, Rodriguez-Gonzalez JJ. Second use for old reverse osmosis membranes: wastewater treatment. *Desalination*. 2003;157(1-3):65-72.
 16. Morón-López J, Nieto-Reyes L, Aguado S, El-Shehawry R, Molina S. Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes for membrane biofilms reactors (MBfRs). Effect of chlorination on the membrane surface and gas permeability. *Chemosphere*. 2019;231:103-12.
 17. Flynn DJ. *Nalco Water Handbook*. New York: McGraw-Hill; 2009.
 18. Senán-Salinas J, García-Pacheco R, Landaburu-Aguirre J, García-Calvo E. Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes: Comparative LCA and cost-effectiveness analysis at pilot scale. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;150:104423.
 19. García-Pacheco R, Landaburu-Aguirre J, Terrero-Rodríguez P, Campos E, Molina-Serrano F, Rabadán J, et al. Validation of recycled membranes for treating brackish water at pilot scale. *Desalination*. 2018;433:199-208.
 20. Louie JS, Pinnau I, Reinhard M. Effects of surface coating process conditions on the water permeation and salt rejection properties of composite polyamide reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*. 2011;367(1-2):249-55.
 21. Coutinho de Paula E, Gomes JCL, Amaral MCS. Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes by oxidative treatment: a technical evaluation. *Water Science and Technology*. 2017;76(3):605-22.
 22. Moradi MR, Pihlajamäki A, Hesampour M, Ahlgren J, Mänttari M. End-of-life RO membranes recycling: Reuse as NF membranes by polyelectrolyte layer-by-layer deposition. *Journal of Membrane Science*. 2019;584:300-08.
 23. Ambrosi A, Tessaro IC. Study on potassium permanganate chemical treatment of discarded reverse osmosis membranes aiming their reuse. *Separation Science and Technology*. 2013;48(10):1537-43.
 24. Kwon Y-N, Leckie JO. Hypochlorite degradation of crosslinked polyamide membranes: II. Changes in hydrogen bonding behavior and performance. *Journal of Membrane Science*. 2006;282(1-2):456-64.
 25. Pontié M. Old RO membranes: solutions for reuse. *Desalination and Water Treatment*. 2015;53(6):1492-98.
 26. Lawler W, Alvarez-Gaitan J, Leslie G, Le-Clech P. Comparative life cycle assessment of end-of-life options for reverse osmosis membranes. *Desalination*. 2015;357:45-54.
 27. Molina S, Landaburu-Aguirre J, Rodríguez-Sáez L, García-Pacheco R, José G, García-Calvo E. Effect of sodium hypochlorite exposure on poly-

sulfone recycled UF membranes and their surface characterization. *Polymer Degradation and Stability*. 2018;150:46-56.

28. de Paula EC, Amaral MCS. Environmental and economic evaluation of end-of-life reverse osmosis membranes recycling by means of chemical conversion. *Journal of Cleaner Production*. 2018;194:85-93.



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>
Systematic Review Article



A review of approaches to direct reverse osmosis membrane recycling: a technical, economic and environmental assessment

Seyedeh Elahe Mahdavian¹, Seyedeh Masumeh Ghaseminezhad^{2,*}

1- Environmental Engineering Group, Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research, Rasht, Iran

2- Industrial Biotechnology Group, Iranian Institute of Research and Development in Chemical Industries, Academic Center for Education, Culture and Research, Karaj, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 16 June 2020
Revised: 31 August 2020
Accepted: 2 September 2020
Published: 21 September 2020

ABSTRACT

Background and Objective: Global market growth of reverse osmosis (RO) has led to an increase in annual disposal of membrane wastes. Therefore, evaluation of membrane waste management strategies is important to reduce their adverse environmental impacts. Due to the widespread domestic RO membrane market and their economic considerations, this study aims at investigation the direct recycling methods of RO membranes to extend their life cycles.

Materials and Methods: Academic search engines and citation databases such Scopus and PubMed was used to retrieve relevant papers. Selected documents were analyzed and compared in three aspects of technical, economic and environmental issues.

Results: Direct recycling of RO is performed with fouling removal and degradation of polyamide layer (PA) using oxidizing agents like KMnO_4 and NaOCl . The degradation rate of the PA layer is controlled by optimizing the oxidant concentration during the oxidation process. Factors such as the type of membrane used, its storage conditions, the operating units' conditions and the final expected product will determine the required concentration-time values. Strategies to reduce these values are very important from an economic and environmental point of view. Decreasing the concentration of oxidizing agent reduces the chlorinated and halogenated compounds emitted from the oxidizing unit which subsequently lessen their harmful environmental impacts and reduces the energy consumption required for treatment.

Conclusion: The conversion of RO membranes to porous filters is technically possible by optimizing the conditions. In addition, the proper choice of RO membrane and final product type lead to economic and environmental productivity.

Keywords: Membrane waste, Recycling, Reverse osmosis, Ultrafilter

*Corresponding Author:
Masume.ghasemi@gmail.com

Please cite this article as: Mahdavian SE, Ghaseminezhad SM. A review of approaches to direct reverse osmosis membrane recycling: a technical, economic and environmental assessment. Iranian Journal of Health and Environment. 2020;13(2):365-84.

