

Review Article



DOI: 10.22034/ijche.2021.287383.1116



DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.121.3.5



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

Application of Membrane Processes in Supply and Development of Sustainable Water and Energy in Country

S. Davoudi Darzi¹, F. Hashemi Nasr², F. Sadeghi³, A. Khalili-Garakani^{4*}

1- M. Sc. in Chemical Engineering, Niroo Research Institute (NRI)

2- Ph. D. in Chemistry, Niroo Research Institute (NRI)

3- Ph. D. in Chemical & Environmental Engineering, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

4- Assistant Professor of Chemical Engineering, Niroo Research Institute (NRI)

E-mail: akhalili@nri.ac.ir

Abstract

Increased energy demand and lack of clean water as a result of urbanization, population growth, and climate change have become global challenges. Membrane technology can play a special role in water purification, desalination and supplying process water required by power plants. Membrane processes have certain advantages, including high quality water with easy maintenance, low chemical sludge effluent, selectivity and selective transfer of desired components, appropriate adaptability and applicability in integrated processes, low energy consumption, environmental friendliness and good controllability. Also, using this technology in batteries and fuel cells and select the right material and membrane structure, there will be the ability to produce clean, sustainable and efficient electrical energy. Sustainable energy is a type of energy that can be used indefinitely without affecting the environment and the depletion of the resource. In addition, the use of membrane processes in the production and the purification of biofuels and the separation and recovery of gaseous pollutants are other important issues studied in water and energy industry.

Received: 20 May 2021

Accepted: 31 August 2021

Page Number: 33-54

Keywords:

Membrane Processes,
Water Treatment,
Energy,
Bioreactors,
Batteries

Please Cite this Article Using:

Davoudi Darzi, S., Hashmi Nasr, F., Sadeghi, F., Khalili-Garakani, A. "Application of Membrane Processes in Supply and Development of Sustainable Water and Energy in Country", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 21, No. 121, pp. 33-54, In Persian, (2022).



DOI: 10.22034/ijche.2021.287383.1116



DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.121.3.5

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

به کارگیری فرایندهای غشایی در تأمین و توسعه آب و انرژی پایدار

سحر داودی درزی^۱، فرزانه هاشمی نصر^۲، فاطمه صادقی^۳، امیرحسین خلیلی گرکانی^{۴*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، پژوهشگاه نیرو

۲- دکتری شیمی، پژوهشگاه نیرو

۳- دکتری مهندسی شیمی و محیط زیست، پژوهشگاه صنعت نفت

۴- استادیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه نیرو

پیام نگار: akhalili@nri.ac.ir

چکیده

افزایش تقاضای انرژی و کمبود آب تمیز در نتیجه شهرنشینی، رشد جمعیت و ایجاد اختلال در آب و هوا به چالشی جهانی تبدیل شده است. فناوری غشایی، می‌تواند نقش ویژه‌ای در تصفیه، شیرین‌سازی آب و تأمین آب فرایندی مورد نیاز نیروگاه‌ها داشته باشد. فرایندهای غشایی دارای برتری‌های مشخصی از جمله کیفیت بالای آب با نگهداری آسان، پساب لجن شیمیایی کم، انتخاب پذیری و انتقال گزینشی اجزای مورد نظر، تطابق و قابلیت به کارگیری مناسب در فرایندهای یک پارچه، پایین بودن انرژی مصرفی، سازگاری با محیط زیست و کنترل پذیری مناسب هستند. هم‌چنین با به کارگیری این فناوری در باتری‌ها و پیل‌های سوختی و استفاده از جنس و ساختار غشایی مناسب قابلیت تولید انرژی الکتریکی پاک، پایدار و کارآمد وجود خواهد داشت. منظور از انرژی پایدار، نوعی از انرژی است که می‌تواند به‌طور نامحدود و بدون تأثیرگذاری بر محیط زیست و نیز به پایان رسیدن منبع، مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر آن، استفاده از فرایندهای غشایی در تولید و خالص‌سازی سوخت‌های زیستی و جداسازی و بازیابی آلاینده‌های گازی از دیگر موارد مهم و مورد مطالعه صنعت آب و انرژی است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

شماره صفحات: ۳۳ تا ۵۴

کلیدواژه‌ها:

فرایندهای غشایی،

تصفیه آب، انرژی،

بیوراکتور،

باتری

* تهران، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی شیمی و فرآیند

استناد به مقاله:

داودی درزی، س.، هاشمی نصر، ف.، صادقی، ف.، خلیلی گرکانی، ا.، "به کارگیری فرایندهای غشایی در تأمین و توسعه آب و انرژی پایدار"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست‌ویکم، شماره ۱۲۱، صص. ۳۳-۵۴، (۱۴۰۱).

۱. مقدمه

- به دلیل نبود فاز انتقال دهنده در فرایندهای جداسازی- است. هم‌چنین، به سبب قابلیت استفاده از جریان‌های بازگشتی و بازیافت برخی مواد در جریان‌های خروجی می‌تواند در کاهش ضایعات و پسماند در صنایع مختلف به کار گرفته شود [۱].

در سال‌های اخیر، فرایند جداسازی با استفاده از غشاها در بسیاری از صنایع اعم از دارویی، زیست‌فناوری، غذایی، پتروشیمی، پالایش، نساجی، کاغذسازی، خودروسازی، تصفیه آب و پساب به کار می‌رود [۴]. این فناوری در برخی از حوزه‌ها در دنیا هنوز در مقیاس آزمایشگاهی است و به مرحله صنعتی نرسیده است؛ در این زمینه دست‌یابی به فناوری فرایند نیز در زمینه‌های تصفیه پساب‌های صنعت نفت، شیرین‌سازی گازهای ترش و ارتقای کیفیت حلال‌ها و برش‌های نفتی با استفاده از غشاها در حال انجام است [۵].

بازار در حال رشد غشاها سنتزی و بهبود عمل‌کرد آن‌ها در بسیاری از صنایع، منجر به پیشرفت‌های بسیاری شده است. صنایع و کارخانه‌ها بر روی فرایندهای جداسازی با استفاده از غشاها سرمایه‌گذاری کرده‌اند که از این راه، مشکلات روش‌های دیگر از جمله تبخیر، تقطیر و یا استخراج را رفع کنند. فرایندهای جداسازی با استفاده از غشا شامل فرایندهای میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس^۱ (RO)، الکترودیالیز، جداسازی گازی و تراوش تبخیری می‌شوند. در سال‌های اخیر، توجه بیشتر به مسائل زیست‌محیطی، لزوم بیشتر تصفیه آب و بهبود بازده انرژی این فرایندها منجر به کاربرد بیشتر فرایندهای غشایی در بسیاری از زمینه‌ها شده است [۵].

با وجود برتری‌های بسیاری که سیستم‌های غشایی دارند و در ادامه نیز کاربردهای فراوان آن در صنعت آب و انرژی به تفصیل بیان می‌شود؛ اما مشکلات و کاستی‌هایی نیز دارند. یکی از این مشکلات، گرفتگی غشاهاست که منجر به مشکلات فنی و کاهش بازده فرایندها می‌شود و به تمیزکاری غشاها در حین عملیات برای کنترل آن به شدت نیاز است. هم‌چنین در این صورت استفاده از فرایندهای پیش تصفیه الزامی است که باعث افزایش هزینه‌های سیستم می‌شود. از دیگر چالش‌های این فرایندها به عنوان مثال می‌توان به آب شور تغلیظ‌شده خروجی از سیستم اسمز معکوس اشاره کرد که منجر به تأثیرات منفی بر محیط‌زیست می‌شود، در نتیجه یکی از

یکی از فرایندهایی که در صنایع شیمیایی و دیگر صنایع مشابه اهمیت بسزایی دارد، جداسازی مواد گوناگون است. این فرایند باعث افزایش سرعت انجام عملیات شیمیایی و کاهش مصرف انرژی می‌شود و از این رو کاربرد بسیاری دارد. در بعضی از صنایع، لزوم جداسازی اجزای مواد خام اولیه در فرایندهای گوناگون و در پی آن خالص‌سازی محصول تولید شده، منجر به کاربرد فراوان فرایند جداسازی شده است. هم‌چنین در بیشتر موارد، جداسازی به علت توجه به ضوابط و معیارهای زیست‌محیطی بسیار حائز اهمیت است؛ بنابراین، به دلیل اهمیت فرایند جداسازی و دستگاه‌ها و تجهیزات آن در بعضی از صنایع، بخش زیادی از بهای تمام‌شده محصولات تولیدی به هزینه جداسازی و تخلیص آن اختصاص می‌یابد. از این رو کاهش هزینه تولید به استفاده از یک روش جداسازی با کارایی بالا و به صرفه بسیار وابسته است. از عواملی که باید در انتخاب روش جداسازی مناسب مورد توجه قرار گیرد، کارایی آن، دسترسی به تجهیزات، هزینه‌های جداسازی، انرژی، هزینه ساخت با توجه به مسائل زیست محیطی و سیاسی است. یکی از روش‌های به صرفه برای جداسازی حالت‌های مختلف مواد، جداسازی با استفاده از غشاست. استفاده از این روش نوین، با توجه به بازده و سهولت در کاربرد آن، در سال‌های اخیر با استقبال بسیاری روبه‌رو شده است [۱]. فرایندهای غشایی می‌توانند ظرفیت قابل توجهی در استخراج انرژی از منابع تجدیدپذیر و تولید انرژی الکتریکی پایدار داشته باشند [۲]. انرژی پایدار شکلی از انرژی است که می‌تواند به طور مداوم و بدون به خطر انداختن و یا اتمام منابع، استفاده شود [۳].

۲. فرایندهای غشایی

فرایندهای غشایی به دلیل سادگی و کارایی بالا، انتخاب‌پذیری و انتقال گزینشی اجزای مورد نظر، تطابق و قابلیت به کارگیری مناسب در فرایندهای یک‌پارچه، پایین بودن انرژی مصرفی، پایداری مناسب در شرایط عملیاتی مختلف، سازگاری با محیط زیست، کنترل‌پذیری مناسب و قابلیت افزایش مقیاس آسان همواره به عنوان یک گزینه جذاب در فرایندهای مختلف صنعتی مد نظر قرار گرفته است. یکی از برتری‌های فرایندهای غشایی مصرف انرژی بسیار کم آن‌ها

1. Reverse Osmosis

محدودیت‌های فرایند مرسوم اسمز معکوس به‌شمار می‌رود [۶]. از محدودیت‌های سیستم بیوراکتور غشایی نیز علاوه بر گرفتگی غشا که بسیار مهم است، تجمع نمک در نزدیک غشاست که منجر به شار آب پایین در این فرایند می‌شود [۷]. بنابراین نیاز است در زمینه محدودیت‌ها و چالش‌های موجود در سیستم‌های غشایی تحقیقات بیشتری انجام گیرد؛ در نتیجه کاربرد گسترده این فناوری‌ها را در همه زمینه‌ها با حداقل چالش‌ها و بیشترین بازده ممکن سازد.

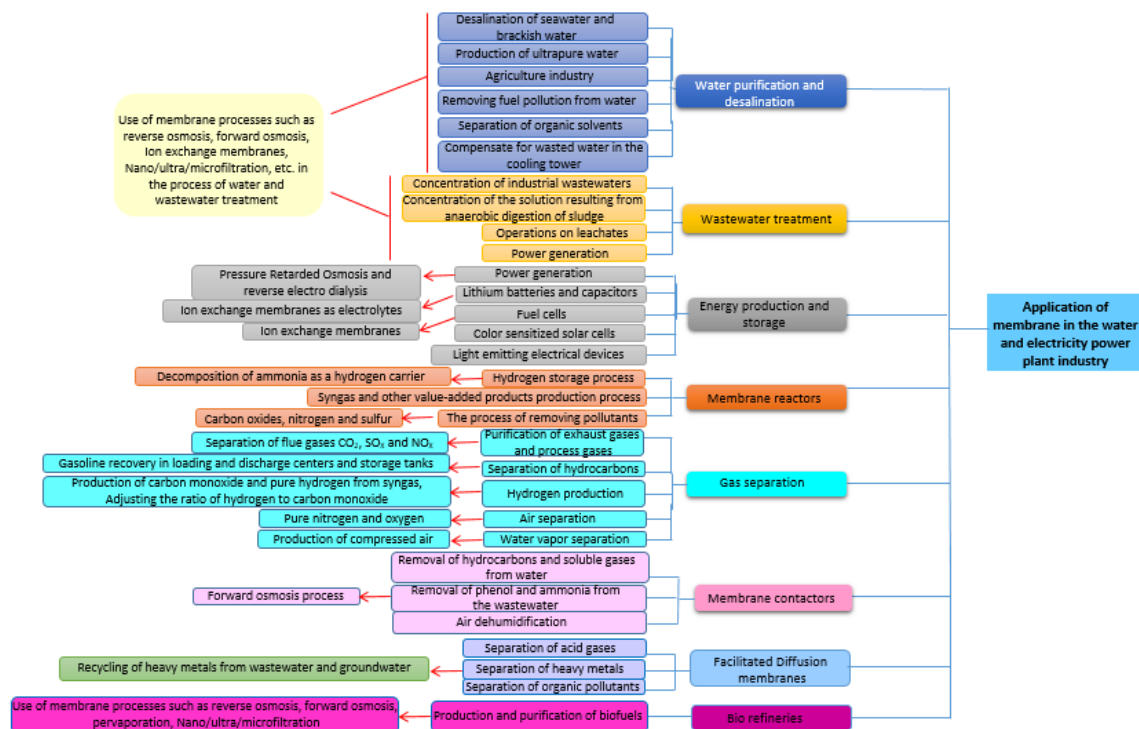
۳. کاربرد فرایندهای غشایی در صنعت آب و انرژی

در شکل (۱)، کلیه کاربردهای فناوری غشایی در صنعت نیروگاهی آب و برق نشان داده شده است. در ادامه، بخش‌های مختلف شرح داده شده است.

۳-۱- تصفیه و شیرین‌سازی آب

برای تصفیه آب‌های سطحی در مصارف آشامیدنی، نخستین واحدهای میکروفیلتراسیون در سال ۱۹۹۰ ایجاد شد [۸]. غشاهای لیاف توخالی در ماژول‌های این واحدها استفاده شد. خوراک ورودی اغلب تمیز است؛ از این رو عملیات در ماژول‌ها اغلب به‌صورت

انتهاسته در مدت‌زمان ۱۰-۲۰ دقیقه انجام می‌شود. پس از آن، عملیات شست‌وشوی ماژول‌ها به‌وسیله هوا یا آب تصفیه به‌مدت ۲۰-۳۰ ثانیه انجام می‌شود که منجر به حذف ذرات تجمع یافته می‌شود. پس از این عملیات، بار دیگر سیکل کاری شروع می‌شود [۹]. تقریباً بیش از نیمی از واحدهای اسمز معکوس فعال، در حوزه شیرین‌سازی آب دریا و آب شور فعالیت دارند [۱۰]. از مابقی، حدود ۴۰٪ به تولید آب بسیار خالص مصرفی صنایع الکترونیکی، دارویی و تولید قدرت می‌پردازند. بقیه نیز برای کنترل آلودگی در صنایع غذایی به‌صورت سیستم‌های بسیار کوچک استفاده می‌شوند. غشاهای نانوفیلتراسیون توانایی حذف مولکول‌های آلی کوچک را از درون آب دارند. ممکن است در صورت وجود نمک در خوراک ورودی، عبور نمک از غشا رخ دهد. در بعضی زمینه‌ها، استفاده از غشاهای نانوفیلتراسیون به‌علت میزان دفع کمتر این غشاها نسبت به اسمز معکوس ترجیح داده می‌شود. از این حوزه‌ها می‌توان به سیستم‌های تصفیه آب اشاره کرد که در این سیستم‌ها به‌علت لزوم وجود کربنات کلسیم، عبور نسبی کلسیم و بیکربنات از غشاهای نانوفیلتراسیون یک برتری به حساب می‌آید [۱۱].



شکل ۱. کاربردهای فناوری غشایی در صنعت نیروگاهی آب و برق.

Figure 1. Applications of membrane technology in the water and electricity power plant industry.

شیرین‌سازی آب‌های شور با استفاده از غشاهای سلولز استات است. در نتیجه، در سال‌های ۱۹۶۰ چندین واحد شیرین‌سازی برای این منظور تأسیس شد [۱۳].

فشار اسمزی آب‌های شور تقریباً ۰/۷۶ بار به‌ازای ۱۰۰۰ ppm نمک است؛ بنابراین تأثیر این فشار به‌طور کلی نمی‌تواند جهت نفوذ آب را در شرایط آب تحت تأثیر قرار دهد. محدودیت‌ها اغلب به‌دلیل آلودگی است [۱۴]. طرح کلی یک واحد اسمز معکوس که برای شیرین‌سازی آب‌های شور استفاده شده، در شکل (۲) نمایش داده شده است.

۳-۱-۲ شیرین‌سازی آب دریا

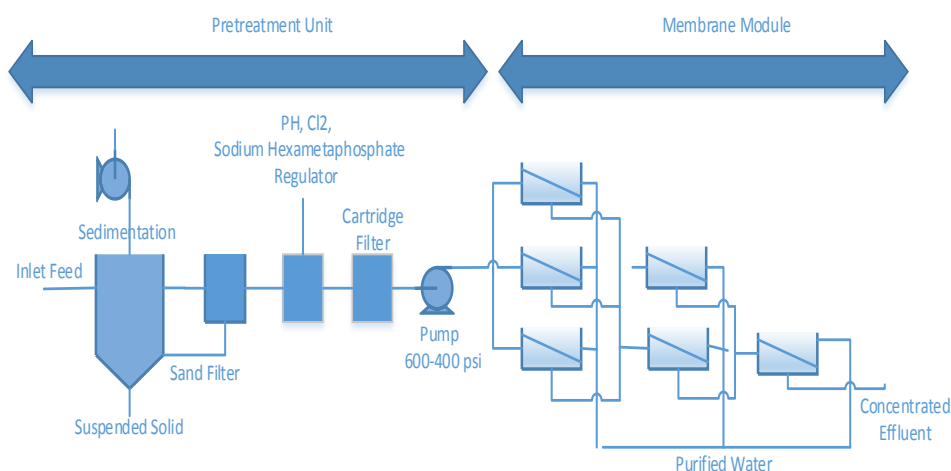
غلظت نمک در آب دریا بین ۳/۲ تا ۴ درصد است که بسته به منطقه‌ای که در آن قرار دارد متغیر است. به‌دلیل درجه شوری بالا تنها از غشاهایی که درصد جداسازی نمک در آن‌ها بیش از ۹۹/۳٪ است، می‌توان برای تولید آب با کیفیت مطلوب استفاده نمود. غشاهای اولیه که از سلولز استات ساخته شده بودند توانایی جداسازی ۹۷ تا ۹۹٪ را داشتند. بنابراین، استفاده از آن‌ها در شیرین‌سازی آب دریا محدودیت‌هایی را به‌همراه داشت [۱۵]. با توسعه فناوری ساخت غشا و تولید غشاهای پلی‌آمیدی و غشاهای ترکیبی که توانایی جداسازی کافی نمک را داشتند، اولین واحدهای شیرین‌سازی آب دریا تأسیس شد.

در سیستم‌های تصفیه آب، ماژول مارپیچی با نوع فرایند ناهمسو دارای عمل‌کرد خوبی است. وجود فاصله‌دهنده^۱ در سمت جریان خوراک منجر به آشفته‌گی در این جریان می‌شود. هزینه ماژول‌های لوله‌ای بسیار زیاد است. هم‌چنین هر غشا، آب‌بندی جداگانه‌ای نیاز دارد. به‌منظور جلوگیری از گرفتگی غشا در فرایند نانوفیلتراسیون در ماژول‌های حلزونی و یا لوله‌ای، عملیات پیش‌تصفیه ضروری است. در صورت به‌کارگیری عملیات پیش‌تصفیه مناسب، دوره‌های شست‌وشو به تعویق می‌افتد [۱۲].

یکی از بزرگ‌ترین واحدهای نانوفیلتراسیون، واحد مری-سور-اویز^۲ در نزدیکی پاریس با ظرفیت $140000 \text{ m}^3/\text{day}$ است. واحد جرنی^۳ و لُسواژن^۴ برای حذف سولفات به کار می‌رود. این واحد در شرق فرانسه قرار دارد و خوراک آن دارای مقادیر بسیار زیادی سولفات است که مقدار آن گاهی تا 2000 mg/L نیز می‌رسد. وجود یک معدن آهن در میان سفره‌های آب زیرزمینی باعث آلودگی آب این قسمت شده است.

۳-۱-۳ شیرین‌سازی آب‌های شور

درجه شوری آب‌های شور معمولاً بین ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است؛ بنابر استاندارد سازمان بهداشت جهانی^۵ (WHO)، حداکثر غلظت مجاز نمک در آب آشامیدنی باید کمتر از 500 mg/L باشد. بنابراین باید بیش از ۹۰٪ نمک از این آب‌ها حذف شود. به طوری که اولین کاربرد موفقیت‌آمیز اسمز معکوس در



شکل ۲. طرح کلی یک واحد شیرین‌سازی آب و نحوه چیدمان در واحد اسمز معکوس.

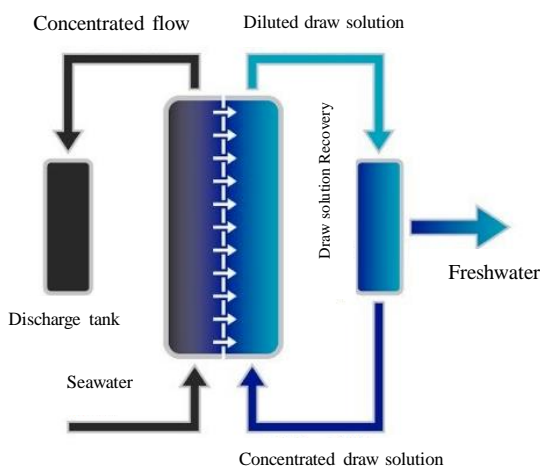
Figure 2. Schematic diagram of a water desalination unit and arrangement in reverse osmosis unit.

1. Spacer
4. Le Soiron

2. Mery-Sur-Oise
5. World Health Organization

3. Jarny

در سراسر غشا، از سمت محلول خوراک (آب دریا) با ظرفیت شیمیایی آب بالا (فشار اسمزی پایین) به سمت محلول با پتانسیل شیمیایی آب پایین (یعنی فشار اسمزی بالا یا غلظت بالا) که به عنوان محلول جاذب، عامل اسمزی، یا محرک اسمزی^۳ شناخته شده، انتقال می‌یابد؛ بنابراین، نمک دریا در سمت خوراک باقی می‌ماند. معمولاً محلول جاذب نیز به منظور جداسازی نمک جاذب و استفاده مجدد از آن، گرم می‌شود [۱۸]. اشکال اصلی در مورد اسمز مستقیم، داشتن ظرفیت بسیار بالاست؛ اما هنوز هم نمک‌زدایی در مقیاس بزرگ، کاری جدید به شمار می‌رود و بنابراین نیازمند بودجه و پژوهش برای بررسی امکاناتی است که بتواند آن را اصلاح کند و موجب کاهش هزینه‌های مربوط به انرژی شود.



شکل ۳. شمای کلی فرایند اسمز مستقیم در شیرین‌سازی آب دریا [۱۸].

Fig. 3. Schematic diagram of the forward osmosis process in seawater desalination [18].

در روش دیگری، از الکترودیالیز^۴ برای شیرین‌سازی آب دریا استفاده می‌شود (شکل (۴)). در فرایند الکترودیالیز با استفاده از یک غشا و انتقال یک بار الکتریکی به محلول، یون‌های فلزی از یک سمت به قطب مثبت و یون‌های دیگر (به‌عنوان مثال نمک) به سمت قطب منفی در سمت دیگر جذب می‌شوند. به منظور جلوگیری از آلودگی بیش از حد غشا که به‌طور معمول در فرایند الکترودیالیز منظم اتفاق می‌افتد، بارهای الکتریکی به‌صورت دوره‌ای معکوس می‌شوند.

بیشتر غشاها از نظر ظرفیت شیرین‌سازی قابل رقابت با فناوری تبخیرکننده‌ها نیستند؛ به‌عنوان مثال، ظرفیت تبخیرکننده‌های چندمرحله‌ای بیش از ۱۰ میلیون گالن در روز است. فشار اسمزی آب دریا تقریباً ۲۴ بار بوده و هم‌چنین فشار اسمزی محلول غلیظ پس‌زده شده بیش از ۴۱ بار است. بنابراین فشار اسمزی تأثیر بسزایی بر فشار فرایندی خواهد داشت. واحدهای شیرین‌سازی آب دریا به دلیل فشار اسمزی بالای آب شور، با درجهٔ بازیابی بیش از ۴۵-۳۵٪ فعالیت نمی‌کنند [۱۶].

به دلیل فشار بالایی که در شیرین‌سازی آب دریا وجود دارد، بازیابی انرژی از آب شور تحت فشار، بسیار مفید است. این امر با استفاده از هیدروتوربین‌هایی که به پمپ‌های فشار قوی متصل هستند، میسر و باعث کاهش هزینهٔ انرژی مصرفی به اندازهٔ ۳۰٪ می‌شود [۱۷].

آب دریا برای شیرین‌سازی به‌روش اسمز معکوس به پیش‌تصفیهٔ نیاز دارد. هزینه‌های پیش‌تصفیه را می‌توان با حفر چاه‌های کم‌عمق در ساحل دریا به‌عنوان منبع ذخیره آب کاهش داد. حفر این چاه‌ها در ساحل مشابه با پیش‌تصفیهٔ شنی عمل می‌کند و به‌مقدار زیادی منجر به کاهش املاح می‌شود. شاخص چگالی سیلت^۱ (SDI) به‌عنوان معیاری برای ظرفیت گرفتگی ذرات معلق در خوراک ورودی سیستم اسمز معکوس است. این شاخص برای این آب ذخیره‌شده، بسیار کمتر از آبی است که مستقیم از دریا گرفته شده باشد و بیش از یک فیلتر شنی برای تصفیه نیاز نیست. با این وجود ضدعفونی و مواد ضد رسوب هم‌چنان مورد نیاز است.

از فرایند اسمز مستقیم^۲ (FO) نیز در شیرین‌سازی آب دریا استفاده می‌شود (شکل (۳)). در فرایند اسمز مستقیم، پدیدهٔ فیزیکی اسمز مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ در این پدیده، یک ماده از ناحیه‌ای با غلظت کم (فشار اسمزی پایین) به سمت ناحیه‌ای با غلظت بالا (فشار اسمزی بالا) انتقال می‌یابد. در واقع اسمز مستقیم هنگامی رخ می‌دهد که تنها نیروی محرکه اختلاف فشار اسمزی است. به‌عبارت دیگر، هیچ فشار هیدرواستاتیکی بر سیستم اعمال نشود. بنابراین برای انجام عملیات، انرژی کمتری استفاده می‌شود. در نتیجه هزینهٔ این فرایند، نصف هزینهٔ فرایند اسمز معکوس است. در فرایند شیرین‌سازی آب دریا، آب از میان یک غشای نیمه‌تراوای انتخاب‌پذیر نسبت به آب، به‌علت نیروی محرکه اختلاف فشار اسمزی

3. Osmotic Engine
4. Electrodialysis

1. Silt Density Index
2. Forward Osmosis

جدول ۱. مشخصات آب فوق خالص مصرفی در صنایع الکترونیکی و مقادیر پارامترها در آب شهری [۲۰ و ۲۱].

Table 1. Specifications of ultra-pure water used in electronic industries and values of parameters in municipal water [20, 21].

	Ultra-pure water	Ordinary drinking water
Resistivity at 25°C (mega ohm-cm)	18.2	-
TOC (ppb)	5<	5000
Particle per unit length with laser >0.1 μm	100<	-
Bacteria in 100 ml with culture	0.1<	30<
Dissolved silica (ppb)	3<	3000
Boron (ppb)	1<	40
Ions (ppb)		
⁺ Na	0.01<	3000
⁺ K	0.02<	2000
⁻ Cl	0.02<	10000
⁻ Br	0.02<	-
⁻ NO ₃	0.02<	-
⁻ SO ₄ ²⁻	0.02<	15000
Total ions	0.1<	10000<

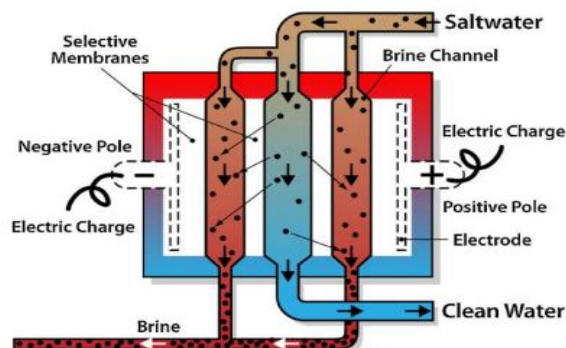
هر مگاوات برق تولیدی برآورد شده است که این روند مصرف آب و تولید پساب با توجه به رشد سریع تولید برق در کشور به شدت رو به افزایش است. از این رو بازیافت آب برای تأمین آب مورد نیاز می‌تواند هزینه‌های یک واحد نیروگاهی را بسیار کاهش دهد. آب خروجی از بویلرها، برج‌های خنک‌کننده، پساب‌های فرایندی و سطحی و غیره در نیروگاه‌ها قابلیت بازیافت و افزایش کیفیت را به‌منظور بازگشت و به‌کارگیری مجدد دارند [۲۳].

۳-۳-۱- جبران آب هدر رفته در برج‌های خنک‌کننده

برای جبران آب از دست‌رفته از تبخیر، ماندگی و تخلیه در برج‌های خنک‌کننده تبخیری، مقدار زیادی آب با کیفیت نیاز است. برای تأمین این آب از راه فرایند اسمزی دو روش پیشنهاد می‌شود:

به‌کارگیری فرایند نمک‌زدایی کامل با استفاده از یک فرایند دو مرحله‌ای انجام می‌شود که هدف آن، تولید آب با مقادیر پایین مواد جامد حل‌شده است و با استفاده از یک فرایند تک‌مرحله‌ای اسمز مستقیم که نمای آن در شکل (۵) پیداست. در این فرایند، با

در سال‌های اخیر، غشاهایی سنتز شده‌اند که نسبت به کلر مقاوم هستند و نسبت به فرایند اسمز معکوس، توانایی حذف یون‌های بیشتری دارند [۱۹].



شکل ۴. شمای کلی فرایند الکترودیالیز در شیرین‌سازی آب دریا [۱۹].

Figure 4. Schematic diagram of the electrodesis process in seawater desalination [19].

۳-۲- تولید آب فوق خالص

تولید آب فوق خالص برای صنایع الکترونیکی یکی از کاربردهای در حال رشد اسمز معکوس است. خوراک این واحدها اغلب آب آشامیدنی شهری است که کمتر از ۲۰۰ ppm مواد جامد محلول دارد. با این وجود، صنایع الکترونیکی به آبی با درجه خلوص بسیار بالا برای ساخت نیمه‌هادی‌ها نیاز دارند [۲۰]. جدول (۱) مقایسه‌ای بین غلظت مواد موجود در آب شهری و هم‌چنین آب فوق خالص مصرفی این صنایع را نشان می‌دهد.

به‌تازگی استفاده از روش الکترودیالیز در تهیه آب فوق خالص قابل استفاده در صنایع الکترونیکی ساخت نیمه‌هادی‌ها، شایع شده است. ترکیب ستون‌های تعویض یونی با غشاهای الکترودیالیز یکی از روش‌های معمول برای انجام این عملیات است. در این روش آب عاری از یون بدون استفاده از مواد شیمیایی برای احیای رزین‌ها به‌دست می‌آید [۲۲].

۳-۳- تولید آب فرایندی

آب با کیفیت بالا یکی از هزینه‌های اصلی عملیاتی در صنایع نیروگاهی است؛ بر اساس آمارهای موجود میزان مصرف آب مورد نیاز یک نیروگاه بخار با برج خنک‌کننده ۲ تا ۳ مترمکعب بر ساعت به‌ازای

آب‌رسانی به مناطق دارای آب شور، بسیار پرهزینه است. از این رو، امکان جایگزینی آب شور موجود در منطقه با آب نمک‌زدایی شده و همچنین استفاده از انرژی و آب نمک‌زدایی شده در منطقه دیگر با استفاده از فناوری اسمز مستقیم وجود دارد. در این زمینه می‌توان به کاربرد مخلوط کود تغلی شده و آب استخرا شده از منابع آب شور اشاره کرد.

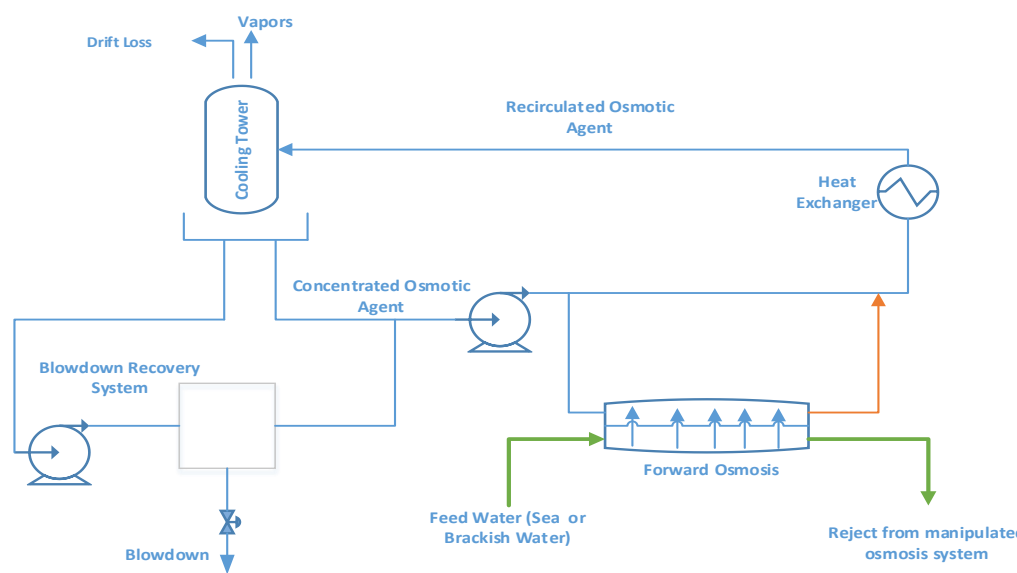
این روش با عنوان فناوری «کود آبیاری» برای آبیاری گیاهان در مناطق نزدیک دریا که با کمبود آب مناسب آبیاری گیاهان روبه‌رو هستند یا مناطقی که آب‌های زیرزمینی در آنجا شور است، استفاده می‌شود. اساس کار چنین است که ابتدا یک محلول غلیظ از کود شیمیایی تهیه می‌شود. این محلول با استفاده از غشای اسمز مستقیم به‌عنوان محلول جاذب نمکی در تماس با آب شور قرار می‌گیرد. آب از راه غشا به درون محلول کود شیمیایی نفوذ می‌کند و سبب کاهش غلظت آن می‌شود. در پایان، کود رقیق شده (محلول جاذب) می‌تواند به‌طور مستقیم برای آبیاری یا کود استفاده شود؛ زیرا شامل مواد مغذی ضروری رشد گیاه است. با کاهش غلظت محلول کود شیمیایی، امکان آبیاری مساحت بیشتری از زمین با استفاده بهینه از منابع آب شور موجود امکان‌پذیر می‌شود (شکل (۶)).

به کارگیری محلول خوراک که معمولاً آب دریا یا آب شور است، محلول جاذب یا عامل اسمزی رقیق شده با فرایند اسمز مستقیم، پس از عبور از یک مبدل حرارتی وارد برج خنک‌کننده می‌شود. پس از این مرحله، برای استفاده دوباره از مقدار آبی که تبخیر، تخلیه و با دچار ماندگی نشده، آن را به‌صورت تغلیظ شده به‌عنوان محلول جاذب در فرایند اسمز مستقیم استفاده می‌کنند؛ به عبارت دیگر، محلول جاذب جدید، ترکیب سه جریان محلول جاذب قبلی، جریان محلول پایین برج و جریان محلول خروجی از سامانه تخلیه برج است. این فرایند نسبت به فرایند اسمز معکوس، به‌عنوان فرایند متداول به کار رفته در برج‌های خنک‌کننده، دارای هزینه عملیاتی و نیز مصرف انرژی پایین‌تری است [۲۴].

۲-۴ صنایع کشاورزی

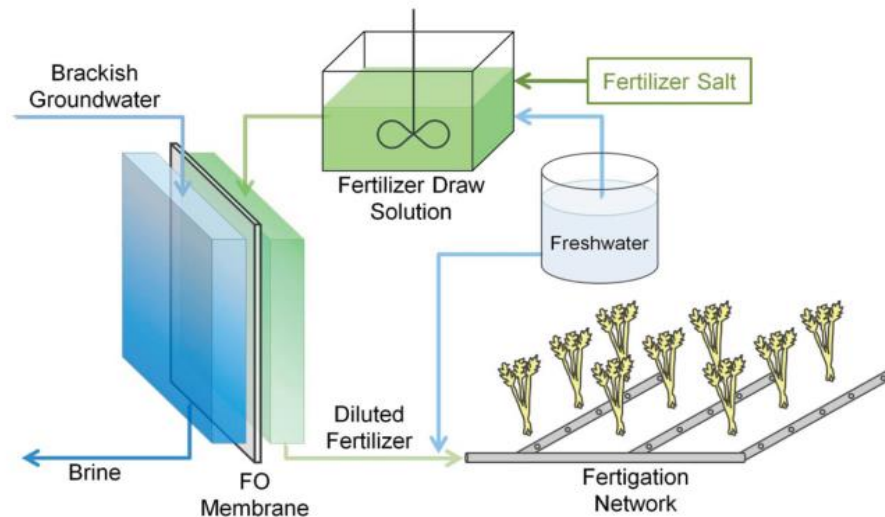
حدود ۷۰٪ مصرف جهانی آب به صنایع کشاورزی وابسته است؛ پیشرفت و توسعه فناوری‌های آبیاری و مدیریت آب به افزایش آب مورد نیاز برای مصارف کشاورزی می‌انجامد. از فرایندهایی که می‌تواند با هزینه و مصرف انرژی اندک، این هدف را محقق کند، فرایند اسمز مستقیم است.

در صورت بالاتر بودن میزان شوری آب از حد تحمل گیاه، کاهش یا توقف رشد گیاه و یا کاهش کیفیت فراورده، رخ خواهد داد. هم‌چنین



شکل ۵. شمای کلی فرایند بازیابی آب در برج‌های خنک‌کننده.

Figure 5. Schematic diagram of the water recovery process in cooling towers.



شکل ۶. شمای کلی کاربرد فناوری اسمز مستقیم در فرایند کود آبیاری [۲۵].

Figure 6. Schematic diagram of an application of forward osmosis technology in irrigation fertilizer process [25].

(PAN) هستند. برای تصفیه سوخت‌های فسیلی، فشار و دمای عملیاتی در حدود ۱۰ بار و 21°C خواهد بود [۲۶].

۳-۶ جداسازی حلال‌های آلی

یکی از جدیدترین کاربردهای اسمزمعکوس در صنایع شیمیایی جداسازی مخلوط‌های آلی از یکدیگر است. این جداسازی کمی متفاوت است؛ زیرا فشار عملیاتی بالایی می‌طلبد و هم‌چنین غشاهایی که در این مورد استفاده می‌شوند باید نسبت به حلال‌ها مقاوم، از نظر مکانیکی پایدار و هم‌چنین شار جریان عبوری بالایی نیز فراهم کنند [۲۷].

غشاهای تولیدشده برای استفاده در فرایند اسمزمعکوس محلول‌های آلی تفاوت‌های بسیاری با غشاهای معمولی مورد استفاده در شیرین‌سازی آب دارد. این غشاهای باید به‌طور مشخص و برای دسته معلومی از حلال‌ها ساخته شوند [۲۸].

شرکت نیتودنکو^۵ غشاهای اولترافیلتراسیون بر پایه پلی‌آمید ساخته است که کاربردهای محدودی را در زمینه بازیابی استون، تولوئن، ایتیلستات، هگزان و دیگر حلال‌ها از پساب‌های رنگی و محلول‌های پلیمری، پیدا کرده است.

تا سال‌های ۱۹۹۰ چنین غشاهایی در بازار وجود نداشت Y از این سال به بعد شرکت اِبکور^۶ اولین غشاهای ترکیبی سیلیکونی را که در

با این وجود، کاربرد این فناوری در صنایع مختلف هنوز محدودیت‌ها و چالش‌هایی دارد؛ از جمله این چالش‌ها می‌توان به دفع یا مصرف مناسب آب شور تغلیظ‌شده اشاره کرد. برای جلوگیری از وقوع مشکلات مربوط به ازدیاد برداشت، مصرف منابع آب شور باید به دقت مدیریت شود. انتخاب مناسب املاح جاذب نیز یکی دیگر از مسائلی است که باید با دقت بررسی شود. از ویژگی‌های املاح جاذب مناسب می‌توان به هزینه پایین، انحلال‌پذیری بالا در آب، گزینش‌پذیری بالا و هم‌چنین داشتن نیروی محرکه مناسب برای فرایند اسمز اشاره کرد [۲۵].

۳-۵ حذف آلودگی ناشی از سوخت‌ها از آب

براساس گزارش‌های شرکت شل^۱ می‌توان با استفاده از غشاهای آب‌گریز، مواد آلوده‌کننده درشت‌مولکول را از محصولات هیدروکربنی جدا کرد. حد اکثر غلظت آلاینده‌ها در حدود ۵٪ وزنی است. از جمله محصولاتی که با فرایند نانوفیلتراسیون قابل تصفیه است، سوخت‌های فسیلی (گازوئیل، کروژین و دیزل) است. آلاینده‌هایی با وزن مولکولی 400 Da و بیشتر به‌طور مطلوب قابل حذف هستند. غشاهای مورد استفاده بیشتر از جنس پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان^۲ (PDMS) بر روی PDMS و یا پلی‌اتر ایمید^۳ (PEI) بر روی پلی‌آکریلو نیتریل^۴

1. Shell
2. Polydimethylsiloxane
3. Polyetherimide
4. Polyacrylonitrile

5. Nitto Denko
 6. Abcor

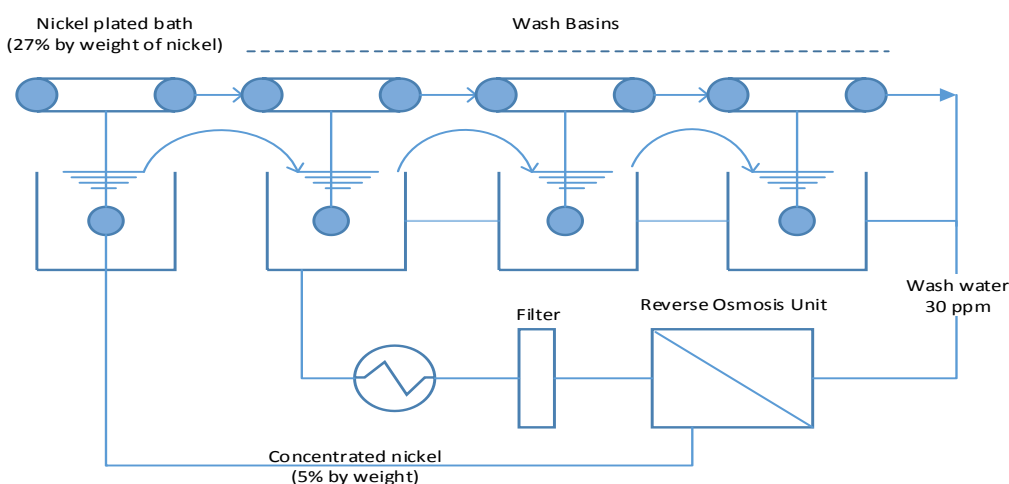
فیلتراسیون حلال‌های غیرقطبی کاربرد دارند، تولید کرد. به هر حال چون اغلب این غشاها از ماده‌ای از جنس لاستیک ساخته شده‌اند، در اثر برخورد با اغلب حلال‌های آلی، در آن‌ها حل می‌شود و انتخاب‌پذیری و کارایی خود را بعد از مدت کوتاهی از دست می‌دهد. اولین غشاهایی که در برابر حلال‌ها مقاوم‌اند، غشاهای استارمن^۱ هستند که شرکت دلیو. آر. گریس^۲ تولید می‌کند.

۷-۳ تصفیهٔ پساب

در نیروگاه‌ها بسته به هر قسمت پساب‌های گوناگونی وجود دارد، از جمله آب‌های خنک‌کننده که ممکن است عامل آلودگی حرارتی یا برخی مواد شیمیایی و کلر در آب‌های طبیعی شوند، پساب‌های ناشی از واحد تصفیهٔ آب و واحد زلال‌سازی آب کندانسور، پساب‌های آلوده به مواد نفتی و سوختی، پساب‌های ناشی از شست‌وشوی سطوح خارجی، لوله‌های بویلر، پیش گرم‌کن‌ها، سوپر هیترها و کوره، پساب‌های ناشی از شست‌وشوی شیمیایی (اسید شویی یا قلیا شویی) لوله‌های بویلر و سوپر هیترها، پساب‌های ناشی از سیستم هیدرولیکی انتقال خاکستر در نیروگاه‌ها با سوخت جامد یا زغال سنگ، پساب‌های شست‌وشوی واحدها و رواناب سطحی ناشی از آب باران، پساب‌ها و پس‌مانده‌های ناشی از سیستم تصفیه و گوگردزایی دود خروجی در صورت وجود سیستم تصفیهٔ دود [۲۹]. از حوزه‌هایی که فرایند اسمز معکوس می‌تواند به کار گرفته شود، تصفیهٔ پساب و کنترل آلودگی است. تنها عاملی که موجب

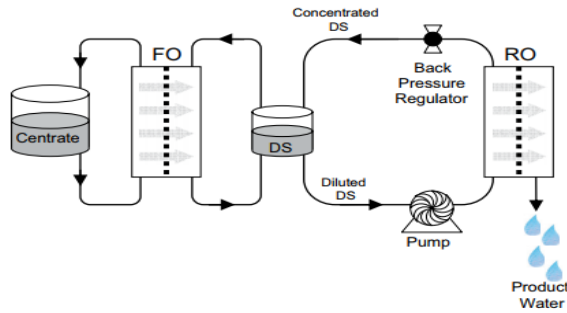
محدودیت در به کارگیری این فرایند می‌شود، بحث گرفتگی و آلودگی غشاهای ناشی از پساب حاوی غلظت بالای ذرات ریز جامد است. از اهداف مهم این فرایند، جداسازی مواد شیمیایی از آب است. از حوزه‌های کاربرد این فناوری می‌توان به جداسازی نیکل از آبی اشاره کرد که برای شست‌وشوی صفحات دارای روکش نیکل به کار گرفته شده‌اند (شکل ۷).

حمام‌های آبکاری نیکل، غلظت بالایی از نیکل و دیگر فلزات روکشی دارد. بعد از روکش دار شدن، صفحات از یک دسته حوضچه‌های شست‌وشو عبور داده می‌شوند. آب موجود در این حمام‌ها به‌طور متناوب از حمام خارج می‌شود و پس از عبور از یک فیلتر و واحد اسمز معکوس و خالص‌سازی، دوباره به تانک‌های شست‌وشو بازگردانده می‌شود. جریان غنی از نیکل نیز برای استفادهٔ مجدد به حمام آبکاری فرستاده می‌شود [۳۰]. در ابتدای توسعهٔ فناوری غشا، انتظار می‌رفت که بتوان از غشا در تصفیهٔ مرحلهٔ سوم پساب و تولید مجدد آب آشامیدنی استفاده کرد. بدین منظور چند واحد کوچک نیز در ژاپن و امریکا با نام کارخانهٔ آب ساخته شده است. این سیستم‌ها از لجن خروجی از تصفیهٔ مرحلهٔ دوم پساب برای تولید آب با کیفیت مناسب استفاده می‌کنند. البته آب تولیدی این واحدها با جریان آب‌های ورودی به واحدهای تصفیهٔ آب شهری مخلوط می‌شوند و به همراه آن‌ها و پس از گذراندن مراحل عمومی تصفیهٔ آب آشامیدنی به مصرف می‌رسند.



شکل ۷. بازیابی نیکل از پساب‌های ناشی از شست‌وشوی صفحات با استفاده از فناوری اسمز معکوس.^۱

Figure 7. Nickel recovery from wastewaters from plate washing using reverse osmosis technology.



شکل ۸. عملیات پیوسته FO/RO برای تغلیظ آب لجن و تولید آب خالص (DS: محلول جاذب) [۳۳].

Figure 8. Continuous FO/RO operation to concentrate sludge water and produce pure water [33].

جریان خروجی نیز باشد. به طور معمول، شیرابه‌ها ترکیب پیچیده‌ای از چهار آلاینده، ترکیبات آلی، فلزات سنگین محلول، نیتروژن آلی و غیر آلی و مواد جامد حل شده‌اند. عملیات بر روی شیرابه‌ها در واحدهای تصفیهٔ پساب انجام می‌گیرد. با این حال، غالباً هدف این واحدها جداسازی ترکیبات آلی، فلزات سنگین و نیتروژن است و برای کاهش TDS اقدامی نمی‌کنند و گاهی منجر به افزایش مقدار آن نیز می‌شوند. از فرایندهای تجاری کاهش TDS از پساب، می‌توان به تبخیر مکانیکی (از جمله فشرده کردن بخار، لوله‌های عمودی بلند با فیلم نزولی، لوله‌های افقی با افشانه کردن فیلم و گردش اجباری) و فرایندهای غشایی اشاره کرد [۳۵]. بر اساس تحقیقات، فرایند اسمز مستقیم ظرفیت بسیاری در فرآوری شیرابه‌های تولیدشده از محل دفن پس‌ماند دارد. شرکت اسموتک در سال ۱۹۹۸، یک ماژول اسمز مستقیم در مقیاس آزمایشگاهی به‌منظور فرآوری شیرابه‌های ناشی از محل دفن پس‌ماند کافین بیوت شهر کوروالیس ایالت اورگان آمریکا تولید کرد. به‌علت میزان بالای بارندگی در آن بخش، مقدار شیرابهٔ تولیدی بیش از ۲۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ متر مکعب بود. جمع‌آوری و پیش‌تصفیهٔ شیرابهٔ خام قبل از وارد شدن به ماژول اسمز مستقیم انجام گرفت. پس از آن به‌منظور فراهم کردن آب خالص و تغلیظ دوبارهٔ محلول جاذب، ماژول RO به کار رفت. حد مجاز TDS برای دستیابی به استانداردهای ملی دفع آلاینده‌ها باید کمتر از ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌بود. شیرابهٔ تغلیظ‌شدهٔ خروجی با استفاده از سیمان و خاکستر بادی جامد شده، سپس دفن می‌شود. این شرکت با استفاده از ماژول غشایی اسمز مستقیم، بازبایی آب ۹۴-۹۶٪ را از راه حذف بالای آلاینده‌ها ممکن کرد [۳۶].

۳-۷-۱- تغلیظ پساب صنعتی رقیق

نخستین تحقیقات در زمینهٔ به‌کارگیری اسمز مستقیم در حوزهٔ تصفیهٔ صنعتی در سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۷۷ منتشر شد [۳۰ و ۳۱]. از اهداف این طرح‌ها، استفاده از یک فرایند مقرون‌به‌صرفه برای احیای پساب صنعتی دارای غلظت پایین فلزات سنگین بوده است. در این پژوهش، برای تغلیظ جریان‌های خالص یا ترکیب‌شدهٔ مس یا کرم، یک سیستم غشایی سلولزی اسمز معکوس در مقیاس کارگاهی به‌کار گرفته شد. آب دریا به‌علت فراوانی در مناطق ساحلی و هزینهٔ پایین، به‌عنوان محلول جاذب به کار رفت. در این حالت مقدار شار آب واقعی کمتر از میزان شار آب حساب‌شده از معادلهٔ انتقال جرم و اطلاعات ارائه‌شده از سوی سازندگان غشا رخ داد. به‌علت بهره‌وری پایین، آزمایش‌های بیشتر بر روی این غشا، متوقف و بهینه‌سازی آن پیشنهاد شد [۳۲].

۳-۷-۲- تغلیظ محلول تولیدشدهٔ ناشی از هضم بی‌هوازی لجن‌ها

به‌طور معمول در واحدهای تصفیهٔ پساب، برای حذف بیشتر مواد جامد آلی و یا پایدارسازی لجن به‌دست‌آمده، در یک واحد هاضم بی‌هوازی فرایندهایی بر روی لجن انجام می‌گیرد (شکل ۸). آب‌گیری لجن پس از هضم به‌وسیلهٔ فرایند مرکزگریزی انجام می‌شود و مواد جامد زیستی فشرده و نیز آب لجن به‌صورت جریان مایع تولید می‌شود. آب لجن حاوی غلظت بالای مواد مغذی (مانند آمونیم و نیتروژن زیستی)، فلزات سنگین، مواد آلی محلول، کل مواد جامد محلول^۱ (TDS) و رنگ و مواد جامد معلق است [۳۳]. این جریان در صنایع کشاورزی به‌عنوان کود خاک استفاده می‌شود. با این حال، در فرایندهای متداول، این آب به‌منظور عملیات مجدد به خط عملیاتی واحد تصفیه برگردانده می‌شود. در این صورت، بار آلی و هزینهٔ عملیاتی واحد تصفیه افزایش می‌یابد و هم‌چنین انتظار می‌رود که جریان خروجی، حاوی موادی از جمله نیتروژن و فسفر باشد؛ زیرا پایداری بیشتری دارند [۳۴].

۳-۷-۳- عملیات روی مایع نشت یافته از محل دفن پس‌ماند (شیرابه‌ها)

فرآوری شیرابه‌ها یا مایع تولیدی از محل دفن پس‌ماند با بیشترین تغییرات، ترکیبی پیچیده است؛ به‌ویژه زمانی که هدف، کیفیت بالای

1. Total Dissolved Solids

۲-۸ بیوراکتورهای غشایی

بیوراکتورهای غشایی از سیستم‌های جدید در تصفیهٔ پساب اند که ترکیبی از فرایند هضم بیولوژیکی و جداسازی غشایی هستند. مطالعات نشان می‌دهد که ترکیب فناوری غشا با فرایندهای تصفیهٔ بیولوژیکی متعارف نتایج بسیار مطلوبی در حذف مواد آلی در مقایسه با سیستم‌های متعارف بیولوژیکی در تصفیهٔ پساب خواهد داشت [۳۷ و ۳۸]. از غشاهای میکروفیلتراسیون به‌طور گسترده در این فناوری جدید استفاده می‌شود. ترکیب فرایند جداسازی غشایی با فرایند تصفیهٔ بیولوژیکی به سه دلیل ممکن است، انجام شود:

۱. جداسازی و بازگشت مواد جامد

۲. جداسازی مواد آلاینده از پساب‌های خطرناک^۱

۳. هوادهی بیوراکتورها بدون تشکیل حباب^۲

در حالت اول از یک غشای اولترافیلتراسیون و یا میکروفیلتراسیون برای برگشت دادن تودهٔ زیستی به داخل بیوراکتور استفاده می‌شود. در حالت دوم فرایندهای غشایی برای انتقال مواد آلایندهٔ آلی قابل تجزیه از پساب‌های صنعتی خطرناک به داخل یک محیط بیولوژیکی برای تجزیه به کار می‌رود. در حالت سوم از یک غشا برای انتقال اکسیژن بدون تشکیل حباب در بیوراکتور استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که این سه فرایند ممکن است همراه یکدیگر نیز استفاده شوند. محصول بیوراکتورهای غشایی دارای کیفیت بالایی در خروجی است و حتی در شرایطی که بار آلی ورودی نیز بالا باشد، کیفیت محصول حفظ خواهد شد.

برتری‌های استفاده از بیوراکتورهای غشایی در تصفیهٔ پساب عبارتند از [۳۹]:

۱. کم‌تر بودن فضای اشغال شده به وسیلهٔ سیستم نسبت به

دیگر سیستم‌های بیولوژیکی

۲. میزان پایین لجن تولیدی

۳. قابلیت تصفیهٔ پساب‌های مقاوم نسبت به تجزیهٔ بیولوژیکی

۴. مستقل بودن زمان ماند و زمان تخلیهٔ لجن

۵. قابلیت استفادهٔ مجدد از جریان تصفیه‌شدهٔ خروجی

۶. غلظت بالای تودهٔ زیستی و کاهش حجم راکتور

۷. حذف کلاریفایر و دیگر تجهیزات مربوط به حذف مواد جامد

بیولوژیکی از پساب خروجی.

در مقابل، گرفتگی غشا و تمیز کردن آن از کاستی‌های این روش به شمار می‌آید [۴۰ و ۴۱].

۳-۹ تولید انرژی پایدار

۳-۹-۱ فناوری گرا دیان شوری

از دو جریان دارای پتانسیل شیمیایی یا شوری مختلف، می‌توان انرژی تجدیدپذیر تولید کرد. با در نظر گرفتن این که فشار اسمزی آب دریا در حدود ۲/۷ مگاپاسکال است و آب رودخانه دارای فشار اسمزی ناچیزی است، این فشار می‌تواند برای تولید برق به کار گرفته شود. اسمز با فشار تأخیری^۳ یکی از روش‌هایی است که در تولید برق به کار می‌رود. شمای کلی این فرایند در شکل (۹) نمایش داده شده است. در صورت غلبه کردن اختلاف فشار اسمزی بر اختلاف فشار هیدرولیکی، به این فرایند اسمز با فشار گفته می‌شود [۴۲].

نخست، آب شیرین به درون غشا تلمبه شده، آب شیرین در یک سمت غشا جریان می‌یابد و نفوذ آب شیرین از راه غشا به سمتی که آب دریا وجود دارد (بخش پرفشار) رخ می‌دهد. بعد از آن، جریان آب دریای رقیق و پرفشار به دو جریان تقسیم می‌شود: از راه کاهش فشار یکی از جریان‌ها به کمک توربین، برق تولید می‌شود و با عبور دیگر جریان از یک تبادلگر فشاری، فشار آب دریای ورودی به سیستم افزایش می‌یابد. دو بخش مهم یک واحد اسمز با فشار تأخیری، غشا و تبادلگر فشاری هستند. از خصوصیات ویژهٔ تولید برق با روش اسمز با فشار تأخیری از آب دریا می‌توان به این مورد اشاره کرد: آب دریا از منابع عظیمی است که دارای پتانسیل تجدیدپذیری با کم‌ترین تأثیر مخرب بر محیط زیست است و از چگالی (نسبت ظرفیت نیرو به ابعاد فیزیکی) بالایی برخوردار است. برآوردها نشان می‌دهد که توان نهفتهٔ تولید نیرو از منابع نمکی به حدود ۲۰۰۰ تراوات ساعت در سال می‌رسد [۴۳].

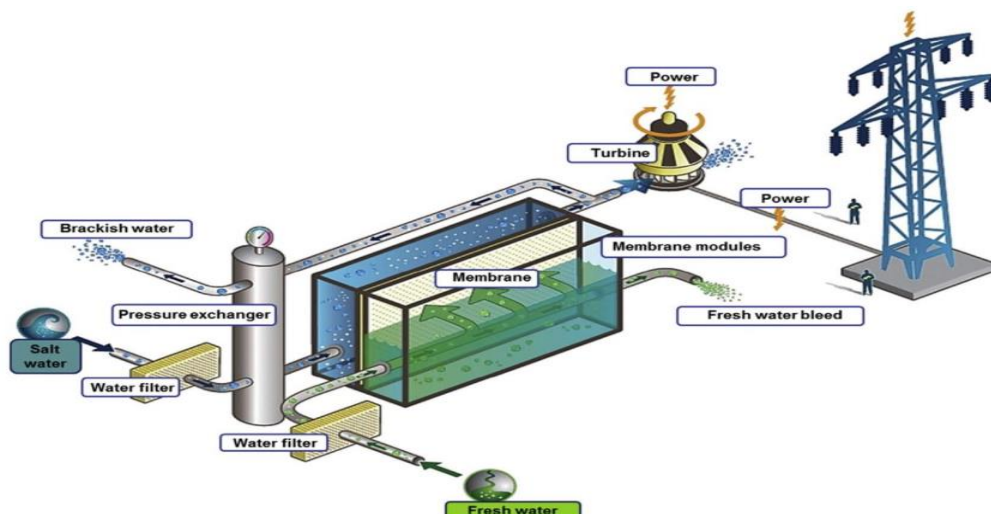
۳-۹-۲ باتری‌ها و پیل‌های سوختی

۳-۹-۲-۱ باتری‌های لیتیومی

انواع الکترولیت‌های درون باتری‌ها الکترولیت‌های مایع، الکترولیت‌های جامد معدنی و الکترولیت‌های پلیمری جامد هستند. در الکترولیت‌های مایع، همهٔ یون‌ها متحرک و در رسانایی سهیم‌اند.

1. Hostile Industrial Waste Water
2. Bubble-Free Aeration of the Bioreactor

3. Pressure Retarded Osmosis



شکل ۹. شمای کلی چرخه تولید برق با فرایند اسمز با فشار تأخیری [۴۲].

Figure 9. Schematic diagram of the power generation cycle with pressure retarded osmosis process [42].

الکتروشیمیایی مانند ابرخان‌ها و سنسورها جلب کرده است. در باتری‌ها، الکترولیت پلیمری به‌عنوان غشای جداکننده باید شرایطی از قبیل هدایت یونی بالا، عدد انتقال کاتیون بالا، پایداری ابعادی خوب، پایداری الکتروشیمیایی بالا و سازگاری شیمیایی با آند لیتیم و مواد کاتدی و بالأخره پایداری مکانیکی مناسبی را تأمین کند [۴۴].

۳-۲-۹-۲ پیل‌های سوختی

پیل‌های سوختی، راکتورهای الکتروشیمیایی هستند که تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی واکنش دهنده‌ها را به انرژی الکتریکی، با کارایی و سازگاری زیست‌محیطی بالا تحقق می‌بخشند. مشابه سایر دستگاه‌های الکتروشیمیایی، پیل‌های سوختی از الکترولیتی متصل به آند و کاتد تشکیل می‌شوند. توزیع‌کنندگان گاز (به‌طور معمول صفحات کانال‌دار با هدایت الکتریکی بالا، که به آن‌ها صفحات دوقطبی نیز گفته می‌شود)، عمل کرد تغذیه سوخت به سمت آند و هوا (یا اکسیژن خالص) به سمت کاتد را انجام می‌دهند. تعدادی سلول معمولاً به‌صورت سری به‌هم متصل می‌شوند. در این حالت صفحات دوقطبی اتصال الکتریکی را بین یک سلول و سلول دیگر فراهم می‌کنند؛ اغلب مداری برای گردش آب مایع خنک‌کننده وجود دارد [۴۵].

معمولاً در الکترولیت‌های از نوع جامد، تنها یکی از یون‌ها متحرک هستند. الکترولیت‌های جامد، انواع مختلفی دارند: رساناهای یون اکسیدشده، رساناهای یون فلئورید، رساناهای یون نقره و مس، رساناهای یون سدیم و پتاسیم، رساناهای یون لیتیم، رساناهای پروتونی و الکترولیت‌های جامد پلیمری. بیشتر باتری‌های پلیمری از نوع $IC/salt Li-PEO/Li$ هستند. سازوکار انتقال بار پلیمرها با بلورهای معدنی، متفاوت و در واقع شبیه انتقال یون در محیط مایع است. کاربرد این الکترولیت‌ها در پیل‌های سوختی به‌عنوان غشای رسانای پرتون، در باتری‌های لیتیومی به‌عنوان غشای تبادل یون Li و در حسگرهای حساس به رطوبت به‌عنوان غشاست. این پلیمرها به دو نوع پلی‌الکترولیت‌ها و الکترولیت‌های پلیمری تقسیم می‌شوند. در الکترولیت‌های پلیمری برخلاف پلی‌الکترولیت‌ها، زنجیر آن‌ها حامل یون نیست؛ اما یون‌های حاصل از نمک‌ها در اطرافشان قرار می‌گیرند که شامل الکترولیت پلیمری خشک، الکترولیت پلیمری ژلی و الکترولیت پلیمری کامپوزیتی هستند [۴۴].

بیشترین کاربرد الکترولیت‌های پلیمری در باتری‌های قابل شارژ لیتیم به‌عنوان جای‌گزینی برای الکترولیت‌های مایع است؛ برتری‌هایی هم‌چون نشتی نبودن الکترولیت، چگالی انرژی بالاتر، قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتر و ایمنی بالاتر توجه بسیاری از محققان را به‌سوی توسعه باتری‌های لیتیم پلیمری و دیگر وسایل

۳-۹-۲-۳ پیل‌های سوختی پلیمری

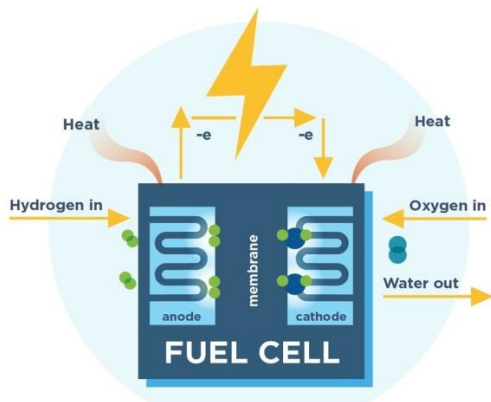
در پیل‌های سوختی پلیمری، الکترولیت پلیمری به کار می‌رود. این پیل‌ها با چگالی توان مناسب ۱۴۰۰ وات بر لیتر به‌عنوان جایگزینی برای موتورهای احتراق داخلی در بخش حمل و نقل هستند. با توجه به نوع سوخت مصرفی، این سلول سوختی دارای انواع هیدروژنی و متانولی است.

در این سلول، از غشای تبادل یونی سنتز شده از مواد آلی از جنس پلیمر اسید سولفونیک آغشته به فلئور یا پلیمرهای مشابه به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌شود. این غشا که از نوع آبدوست است، در صورت وجود آب، فقط بار مثبت را از خود عبور می‌دهد؛ بنابراین عبور بار منفی از مسیر دیگری رخ می‌دهد. از این رو غشای مبادله‌کننده پروتون نیز نامیده می‌شود. طرز کار این نوع سلول سوختی (شکل ۱۰)، عبور یون‌های هیدروژن به‌وسیله غشا از سمت آند به کاتد است. به‌طور معمول از نافیون^۱ برای سنتز این غشا استفاده می‌شود و ضخامت آن در محدوده ۵۰-۱۷۵ میکرون است. لایه الکترودکاتالیست و غشای تبادل پلیمری به‌صورت یک‌پارچه در این پیل به کار می‌رود و مجموعه غشا-الکترود نامیده می‌شوند [۴۶].

طرز کار پیل سوختی پلیمری هیدروژنی بسیار ساده است. در واقع عمل الکترولیز آب معکوس می‌شود و با ترکیب هیدروژن و اکسیژن جریان الکتریکی تولید می‌شود. در واقع در یک پیل سوختی، گاز هیدروژن تحت واکنشی الکتروشیمیایی قرار می‌گیرد و به‌عنوان سوخت به مصرف می‌رسد [۴۷].

بدین شکل به‌جای انرژی گرمایی آزاد شده، انرژی الکتریکی ایجاد می‌شود؛ اما جریان‌های ایجاد شده بسیار اندک هستند. علت اساسی این جریان‌های اندک عبارت است از سطح تماس پایین بین گاز، الکترود و الکترولیت و فاصله زیاد میان الکترودها و الکترولیت که در مقابل جریان الکتریکی مقاومت از خود نشان می‌دهند.

به‌منظور فائق آمدن بر این مسئله، همراه الکترودهای تخت، لایه نازکی از الکترولیت به کار رفته است. ساختار متخلخل الکترودهای به کار رفته، منجر به نفوذ الکترولیت از یک سو و گاز از سوی دیگر در آن می‌شود و بالاترین تماس ممکن بین الکترود، الکترولیت و گاز ایجاد می‌شود. هم‌چنین برای دانستن این موضوع که چطور واکنش بین هیدروژن و اکسیژن باعث ایجاد جریان الکتریسیته می‌شود،



شکل ۱۰. نمای از پیل سوختی پلیمری [۴۶].

Figure 10. Schematic diagram of the polymer fuel cell [46].

لازم است که واکنش هر یک از الکترودها به‌صورت جداگانه مطالعه شود. در سمت آند پیل سوختی گاز یونیزه می‌شود و الکترون و یون H^+ با پروتون ایجاد می‌کند که همراه با رهاسازی انرژی است.

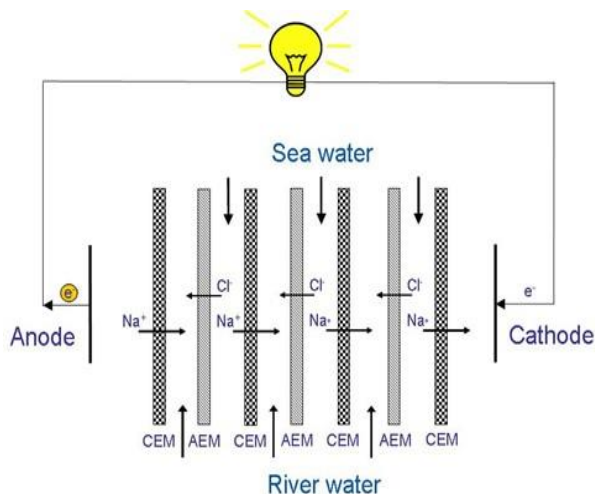
در طرف کاتد اکسیژن با الکترون‌هایی که به‌وسیله الکترود آمده و یون H^+ که به‌وسیله الکترولیت آمده است، به‌منظور تولید آب واکنش می‌دهد. واضح است که برای پیشرفت هر دو واکنش به‌صورت پیوسته، الکترون‌های ایجاد شده در آند باید به‌وسیله مدار الکتریکی به طرف آند بروند. یون H^+ نیز برای عبور از الکترولیت لازم است. پلیمرهای معینی تولید شده‌اند که توانایی عبور یون H^+ را دارند؛ به این مواد غشاهای تبادل پروتون می‌گویند [۴۸].

در سمت آند، واکنش‌های هیدروژن منجر به آزادسازی انرژی می‌شود، با این حال آزادسازی انرژی حتماً به‌معنای پیشرفت واکنش با نرخ نهایی نیست؛ زیرا که واکنش‌ها دارای یک انرژی کلاسیک هستند. در صورتی که انرژی مورد نیاز در مولکول وجود نداشته باشد، واکنش به‌کندی پیش خواهد رفت. به‌جز دماهای بالا برای واکنش‌های کامل باید انرژی فعال‌سازی اعمال شود که از سه راه انجام می‌پذیرد: به‌کارگیری کاتالیست، افزایش دما و افزایش سطح الکترود. دو گزینه نخست در تمامی واکنش‌های شیمیایی به کار می‌روند؛ اما افزایش سطح الکترود تنها مربوط به پیل سوختی و بسیار مهم است.

۳-۹-۲-۴ پیل‌های سوختی اکسید جامد (SOFCs)

پیل‌های سوختی اکسید جامد نویدبخش بهبود بهره‌وری انرژی و

(به جای آب) حرکت می کند و مشکل سازوکار قبلی را ندارد (شکل (۱۱)). اما در این سازوکار نیز مشکل تولید انرژی بسیار کم است [۵۱].



شکل ۱۱. شمای کلی فرایند الکترو دیالیز معکوس در تولید برق [۵۲].

Figure 11. Schematic diagram of the reverse electro dialysis process in power generation [52].

محققان دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا موفق شدند که این مشکلات را با ادغام روش های الکترو دیالیز معکوس و مخلوط برق گنجایی^۲ در یک سل الکتروشیمیایی حل کنند. مخلوط برق گنجایی یک فناوری نسبتاً جدید است که از دو الکتروود درون آب هایی با غلظت های متفاوت نمک تشکیل شده است. در هنگام عبور آب نمک از میان این الکتروودها، ولتاژ و توان الکتریکی تولید می شود. این روش به تنهایی توان الکتریکی بسیار پایینی تولید می کند؛ اما ادغام آن با روش الکترو دیالیز معکوس، توان ادغامی را از توان تولیدی هر یک از این سازوکارها به تنهایی، بسیار بالاتر خواهد برد؛ برای مثال، انرژی تولیدی در حالت ادغام بیش از چهار برابر انرژی تولیدی سازوکار الکترو دیالیز معکوس به تنهایی می شود. این از کارایی انرژی روش اسمز تأخیری نیز بسیار بیشتر است. در شکل (۱۲) مقایسه تولید برق در سه روش غشایی الکترو دیالیز معکوس، اسمز تأخیری و ترکیب روش های الکترو دیالیز معکوس و مخلوط برق گنجایی نشان داده شده است [۵۲].

ارائه فناوری تولید انرژی پاک به جامعه است. این پیل ها بی صدا و بدون آلودگی هستند و راندمان بالای آن ها کاهش انتشار گازهای گلخانه ای را در پی دارد. درجه حرارت بالا (۵۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی گراد) در پیل های سوختی اکسید جامد، این قابلیت را برای آن ها ایجاد می کند که از سوخت های فسیلی موجود استفاده نماید و به طور مؤثر با توربین ها ترکیب شود تا تبدیل سوخت به برق با راندمان بسیار بالا انجام گیرد. پیل های سوختی اکسید جامد، دستگاه های الکتروشیمیایی پیچیده ای هستند که شامل سه جزء اصلی، یک آنند متخلخل، یک غشای الکترولیت و یک کاتد متخلخل اند. غشای الکترولیت متراکم، محفظه هوا و سوخت را جدا کرده و یک رسانای یون اکسیژن خالص است. اکسیژن هوا از یک طرف سلول و هیدروژن و مونوکسید کربن از سوخت هیدروکربنی اصلاح شده در طرف دیگر، تأمین می شود [۴۹].

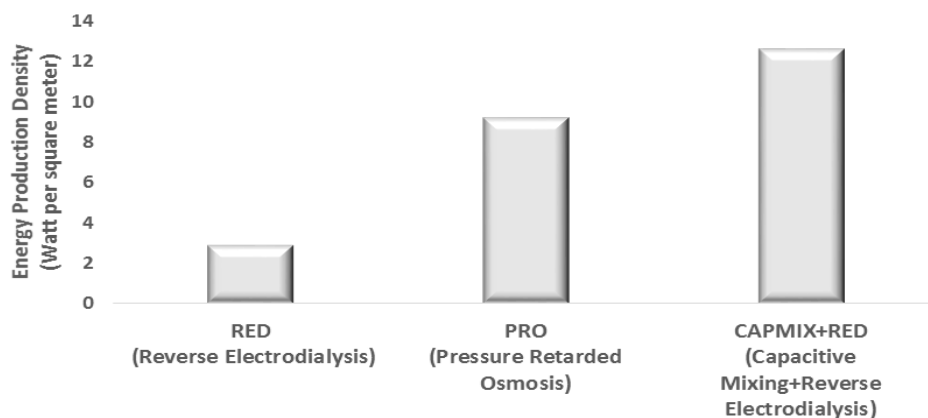
غشاهای سرامیکی نیز به عنوان الکترولیت متراکم جامد در سلول های سوختی اکسید جامد رسانای پروتون^۱ (PC-SOFCs) استفاده می شوند. PC-SOFCs یک فناوری جایگزین برای تولید برق پاک است که از نظر مصرف سوخت، کارایی کلی و سادگی سیستم با سوخت های فسیلی اصلاح شده و هم چنین هیدروژن برتری هایی دارد. یک الکترولیت PC-SOFC باید رسانایی پروتونیک بالا با سهم الکترونیک بسیار کم از خود نشان دهد، در حالی که مواد سرامیکی متراکم یک غشای جداکننده H₂ باید یک هادی ترکیب الکترونیک- پروتونیک باشد [۵۰].

۳-۱۰ تولید برق به روش الکترو دیالیز

تا به امروز موفقیت آمیزترین و متداول ترین فرایند به دست آوردن انرژی از اختلاف غلظت نمک در آب، فرایند اسمز با فشار معکوس بوده است. در این سازوکار، آب از میان یک غشای نیمه تراوا، از محلول آب نمک غلیظ تر به محلول آب نمک رقیق تر می رود. این حرکت آب فشار اسمزی ایجاد می کند که به حرکت در آوردن توربین ها و تولید توان الکتریکی را ممکن می سازد. با این حال، گرفتگی غشاهای گران قیمت و کارایی نداشتن برای آب های خیلی شور از کاستی های این فرایند است. سازوکار دیگر الکترو دیالیز معکوس است که در آن نمک از میان مجموعه ای از غشاها

2. Capacitive Mixing

1. Proton-Conducting Solid Oxide Fuel Cells



شکل ۱۲. مقایسه تولید برق در سه روش غشایی الکترودیالیز معکوس، اسمز تأخیری و ترکیب روش‌های الکترودیالیز معکوس و مخلوط برق‌کنجایی [۵۳].

Figure 12. Comparison of power generation in three membrane methods of reverse electrodesialysis, pressure retarded osmosis and combination of reverse electrodesialysis and capacitive mixing methods [53].

۱۱-۲ راکتور غشایی

در طول دهه اخیر، راکتورهای غشایی به‌طور گسترده مطالعه شده‌اند [۵۴]. یکی از مهم‌ترین برتری‌های استفاده از این راکتورها خاصیت جداسازی انتخابی آن‌هاست. از سایر برتری‌های آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد که منجر به افزایش بازده و انعطاف‌پذیری فرایند می‌شوند [۵۵]:

- توزیع همگن یکی از واکنش‌دهنده‌ها در طول بستر کاتالیست
- به‌وسیله غشای این راکتورها
- افزایش سرعت واکنش
- کاهش تشکیل محصولات جانبی
- تعدیل کردن مصرف انرژی
- کاهش صدمات و زیان‌های حرارتی
- امکان سیکل مجدد و کم کردن حجم گازهای خروجی
- دستیابی به میزان مطلوب جداسازی در یک راکتور غشایی مستلزم بازده انتقال جرم بالا از راه غشا، کیفیت استاندارد و ثابت غشا و ساخت غشایی با عمر طولانی و صرفه اقتصادی مناسب- که دارای مساحت سطح بالا در واحد حجم باشد- است.
- راکتورهای غشایی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد:

- راکتورهای غشایی خنثی
- راکتورهای غشایی کاتالیستی

۱۱-۳ راکتورهای غشایی خنثی

غشای مورد استفاده در این راکتورها در واکنش شرکت نمی‌کند و فقط برای افزایش یا کاهش گونه‌ها به کار گرفته می‌شود.

۲-۱۱-۳ راکتورهای غشایی کاتالیستی

غشای موجود در این راکتورها شامل دو ناحیه فعال (لایه کاتالیستی غشا) و ناحیه غیرفعال (لایه نگهدارنده) است و به دلیل دارا بودن خاصیت کاتالیستی به‌صورت مسقیم در واکنش شرکت می‌کند.

انکون در پی مصرف سوخت‌های فسیلی، آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای در مرکز توجه قرار گرفته و از این رو، هیدروژن به‌عنوان یک سوخت پاک و جایگزین مطرح شده است. مطالعات نظری نشان داده‌اند که با بهره‌گیری از فناوری راکتور غشایی در فرایندهای تبدیل هیدروکربن‌ها، می‌توان به هیدروژن دست یافت.

در راکتورهای غشایی برای جداسازی هیدروژن، انواع مختلفی از غشا به کار می‌رود؛ به‌عنوان مثال: آلومینای متخلخل که دارای نفوذپذیری بالا و گزینش ضعیف است، زئولیت و بیژگی‌های نفوذپذیری و انتخاب‌پذیری متوسطی دارد، پروسکایت دارای نفوذپذیری نسبتاً بالا و انتخاب‌پذیری بالقوه بسیار بالایی دارند.

است. از این رو جداسازی گازهایی مانند CO_2 ، SO_x و NO_x از سایر گازها در صنایع مختلف الزامی شده است. درغشاهای جداسازی، گازها و بخارها به‌عنوان یکی از واحدهای عملیاتی مهم در صنایع شناخته می‌شوند. بازدهی این فرایند به انتخاب مواد، خواص فیزیکی و شیمیایی و سازوکار غالب در زمان عبور گاز از درون غشا مرتبط است [۶۰].

۳-۱۲-۱ تصفیه گازهای خروجی و گازهای فرایندی

تصفیه جریان‌های گاز خروجی از فرایندها در صنایع گوناگون، از کاربردهای متداول فناوری‌های غشایی به‌شمار می‌آید. در این جریان‌ها، مقداری بخار حلال‌های آلی وجود دارد که باید تا رسیدن غلظت هگزان به زیر 150 mg/m^3 تصفیه شود. برای خالص‌سازی حلال از روغن استفاده می‌شود [۶۰].

۳-۱۲-۲ بازیابی بخارهای گازوئیل در مراکز بارگیری

مقدار زیادی از گازوئیل، حین توزیع این محصول به‌صورت بخار از بین می‌رود. تغییرات فشار و دما و تولید فاز بخار هنگام جابه‌جایی و هدر رفت از لوله‌های اتصال در زمان بارگیری و تخلیه، از جمله عوامل این امر است. میانگین غلظت گازوئیل در این گازهای خروجی، حدود ۲۰ الی ۴۰ درصد حجمی است که معادل ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ گرم هیدروکربن در هر متر مکعب هواست. در حالی که طبق استانداردهای اروپا، مقدار مجاز هیدروکربن در گازهای انتشاریافته به محیط زیست، ۳۵ گرم هیدروکربن در هر متر مکعب هواست؛ لذا احیای بخارهای گازوئیل مانند بخارهای آلی بسیار مهم است.

یک واحد احیای گازوئیل که از فرایندهای غشایی استفاده می‌کند، معمولاً شامل یک مرحله احیا به‌وسیله جذب سطحی، یک مرحله جداسازی غشایی و یک تصفیه نهایی به‌وسیله واحد جذب تحت فشار و یا یک موتور گازی است. در موتور گازی، جریان غلیظ خارج‌شده از غشا به‌عنوان سوخت گازی استفاده می‌شود. جریان گازی که مقادیر گازوئیل آن بیش از مقدار مجاز است، در یک قسمت جمع و به‌عنوان خوراک به کمپرسور وارد و فشرده می‌شود. بعد از آن جریان فشرده‌شده به مرحله غشایی وارد می‌شود. بخارهای هیدروکربنی به‌وسیله غشا عبور داده می‌شوند و سایر عناصر گازی پس‌زده می‌شوند. یک پمپ خلأ در طرف جریان عبور کرده از غشا برای بالابردن نفوذپذیری هیدروکربن‌ها استفاده می‌شود. جریان

غشای پالادیوم و آلیاژ پالادیوم بسیاری از این ویژگی‌ها از جمله انتخاب‌پذیری بی‌نهایت به هیدروژن را دارند و یک فناوری خوب برای استفاده در راکتور غشایی برای تولید هیدروژن به حساب می‌آیند [۵۶].

برای تهیه غشای راکتورهای غشایی از روش‌های ته‌نشینی بخار شیمیایی، ته‌نشینی بخار فیزیکی و تکنیک‌های سل-ژل استفاده می‌شود.

در چندین سال اخیر، پیشرفت‌های بسیاری در این حوزه حاصل شده و شبیه‌سازی راکتورهای غشایی کاتالیستی در مراکز دانشگاهی و تحقیقات صنعتی در کاربردهای گوناگون انجام شده است. با این وجود، راکتور غشایی کاتالیستی هم‌چنان با چالش‌هایی زیادی در خصوص پایداری حرارتی و شیمیایی مواد غشا، سرعت نفوذ و نفوذگزینی مواد روبه‌روست [۵۷]. سنتز غشای پلیمری پلی سولفون^۱ (PSF) و ارزیابی عمل‌کرد آن برای حذف فوتوکاتالیستی رنگ متیلن بلو از پساب مطالعه شده است. افزودن $NH_2-MIL125(Ti)$ به غشای پلی‌سولفون منجر به افزایش فعالیت نوری غشا، تخلخل و آب‌دوستی بدون از دست‌رفتن یک‌پارچگی غشا شد. هم‌چنین حداکثر ۶۰ درصد رنگ متیلن بلو پس از پنج ساعت تابش پرتو ماورای بنفش به غشا حذف شد [۵۸].

یک غشای کاتالیستی جدید از راه پیوند یک پلی‌مایع یونی^۲ (PIL) روی غشای پلی‌پروپیلن^۳ (PP) و سپس کمپلکس‌سازی با پلی‌اکسوما‌تالات^۴ (POM) سنتز شد. این غشا برای تجزیه رنگ در آب تحت نور مرئی، استفاده و عمل‌کرد فوتوکاتالیستی غشا ارزیابی شد. با خیساندن استاتیک غشا در محلول، غشای کاتالیستی نشان داد که قادر است ۹۵٪ اسید اورنج ۷ را در ۰/۰۲ گرم در لیتر محلول در ۱۲۰ دقیقه با تابش دو لامپ فلورسنت ۵۵ واتی تخریب کند [۵۹].

۳-۱۲-۳ جداسازی گازی

امروزه از عوامل مهم آلودگی، انتشار آلاینده‌های گازی از دودکش نیروگاه‌های حرارتی با سوخت‌های فسیلی است. هم‌چنین محدودیت‌های ناشی از حضور گازهای اسیدی در جریان‌های گوناگون گازی، صنایع را با چالش‌های اجتناب‌ناپذیر روبه‌رو کرده

1. Polysulfone
 2. Poly(Ionic Liquid)
 3. Polypropylene
 4. Polyoxometalate

عبوری غنی از هیدروکربن بعد از چگالش به منظور استفاده مجدد به مخازن ذخیره ارسال می‌شود.

جریان باقی‌مانده‌ای که از غشا خارج شده با غلظت ناچیزی از هیدروکربن‌های سبک به بخش جذب سطحی تحت فشار ارسال می‌شود. در این بخش، جداسازی هیدروکربن‌های سبک باقی‌مانده به وسیله بستر جاذب انجام می‌شود و جریان هوای تمیز پس از گذشتن از بستر در هوا رها می‌شود [۶۱].

بیشتر واحدهای احیا گازوئیل که از فرایندهای غشایی استفاده می‌کنند، بر روی تانک‌های نگهداری گازوئیل وجود دارند. به کارگیری فناوری غشا در کنار فرایند جذب سطحی تحت فشار، در احیای بخارهای گازوئیل بیشترین کاربرد را دارند. برای احیای بخارهای گازوئیل، از دو نوع غشا بیشتر از سایر غشاها استفاده می‌شود:

PDMS - ۱

POMS - ۲

غشاهای PDMS دارای ویژگی‌های شار بالا و گزینش‌پذیری کم هیدروکربن‌ها در هوا هستند؛ اما پلیمرهای پلی اکتیل متیل سیلوکسان^۱ (POMS) از گزینش‌پذیری بالا و شار کمی برخوردارند. در صورت وجود قوانین سخت زیست‌محیطی در مورد هوای پاک، غشاهای POMS بهترین انتخاب برای واحد غشایی هستند [۶۲].

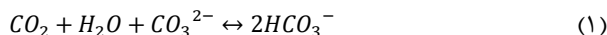
۳-۱۲-۳ رطوبت‌زدایی از هوا

حذف رطوبت از هوای فشرده یکی از موارد استفاده جداسازی گازی به وسیله غشاست. فرایندهایی که به منظور از بین بردن رطوبت استفاده می‌شوند، شامل چگالش و یا جذب رطوبت با جاذب‌های جامد می‌شوند که هر دو این فرایندها بیشترین استفاده را دارند و هزینه‌های عملیاتی آن‌ها نیز کم است. غشاهای دارای گزینش‌پذیری آب/هوا حدود ۵۰۰ سنتز شده‌اند که این مقدار در حین عملیات به علت اثرات منفی حاصل از پلاریزاسیون غلظتی بر روی سطح غشا کاهش می‌یابد. با این حال، غشاهای موجود قابلیت این جداسازی را دارند. هدر رفتن مقداری از هوای فشرده‌شده در این فرایند، محدودیت به حساب می‌آید. فشار هوای فشرده‌ای که به ماژول غشایی وارد می‌شود، حدود ۷ بار است. در صورت فرض فشار ۱ بار برای جریان خارج‌شده از غشا (در حالت بدبینانه)، نسبت فشار در

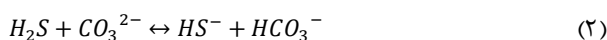
طول غشا ۷ خواهد بود. بدین معناست که تغلیظ جریان خروجی از غشا، ۷ مرتبه بیشتر از خوراک غیر ممکن است. بنابراین مصرف بخشی از خوراک ورودی به منظور انتقال و خروج بخارهای آب عبور کرده از غشا الزامی است. حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد از هوای فشرده باید برای این کار استفاده شود که در حقیقت هدر خواهد رفت [۶۳].

۳-۱۳ غشای انتقال تسهیل‌یافته

وارد آ و همکاران جداسازی گازهای اسیدی دی‌اکسیدکربن و سولفید هیدروژن از متان و هیدروژن را مطالعه کردند؛ البته این کار با گسترش غشاهای پلیمری گزینش‌پذیر متوقف شد [۶۴]. اگرچه حمل‌کننده‌های مختلفی برای انتقال دی‌اکسیدکربن و سولفید هیدروژن وجود دارد؛ اما در بیشتر مطالعات شیمیایی از محلول‌های آبی کربنات- بیوکربنات استفاده شده است. دی‌اکسیدکربن در سمت خوراک غشا در محلول آبی کربنات- بیوکربنات حل شده و با آب و یون‌های کربنات واکنش می‌دهد. طبق واکنش (۱):



در سمت جریان عبوری غشا واکنش عکس انجام می‌شود و یون‌های بیوکربنات، دی‌اکسیدکربن، آب و یون‌های کربنات را تشکیل می‌دهد. انتقال دوسویه سولفید هیدروژن نیز در غشای کربنات- بیوکربنات به‌طور مشابه انجام شده است. طبق واکنش (۲):



از بهترین کاربردهای انتقال دوسویه، حذف و بازیافت فلزات از حجم بالای محلول‌های خوراک رقیق مانند آب‌های زیرزمینی آلوده‌شده یا جریان‌های رقیق فرایند هیدرومتالورژی است. تصفیه این جریان‌ها با رسوب شیمیایی، فرایند مرسوم استخراج حلال با محلول شناساگرهای تبادل یونی و یا استخراج با رزین‌های تبادل یونی اغلب غیراقتصادی است. توانایی انتقال دوسویه در تصفیه حجم بالایی از جریان‌های رقیق با عامل ماده حمل‌کننده نه‌چندان گران، یک برتری به شمار می‌آید. از کاربردهایی که با استقبال روبه‌رو شده،

1. Poly Octyl Methyl Siloxane

2. Ward

پلیمری (مانند پلی‌وینیل الکل) استفاده می‌شوند. در این سیستم جداسازی بر مبنای اثر متقابل غشا و ترکیبات است، به گونه‌ای که گلیسرول و متانول که با برقراری پیوند هیدروژنی اثر متقابل شدیدی با گروه OH از غشای پلی‌وینیل الکل دارند، از غشا عبور می‌کنند. در نتیجه، روغن‌ها و بیودیزل به دلیل ساختار شیمیایی متفاوت از غشا عبور نمی‌کنند و باقی می‌مانند [۶۷].

مرکز پژوهشی ایمز^۲ ناسا برای تولید سوخت‌های زیستی از جلبک دریایی، فرایندی را پیشنهاد کرده است. در این فرایند پیشنهادی، برای بهینه‌سازی رشد و برداشت ریزجلبک‌های دریایی و نیز تصفیه پساب در یک زمان، از اسمز مستقیم بهره گرفته شده است. به این فرایند، امگا گفته می‌شود. استفاده از این فناوری با مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی پایین می‌تواند بر محدودیت‌های فرایندهای متداول کاشت جلبک دریایی غلبه کند.

در این فرایند، از محفظه‌ای (کیسه) استفاده می‌شود که آن را با پساب شهری غنی از مواد مغذی پر می‌کنند. در این کیسه‌ها دانه‌های جلبک دریایی قرار می‌گیرد که به تدریج رشد و لپیدها را فراوری می‌کنند. این محفظه‌ها در محیطی مرطوب با شوری بالا (بیشتر آب اقیانوس) قرار می‌گیرند که شرایط خوبی را از نظر شنواری و ظرفیت گرمایی لازم برای تنظیم درجه حرارت ایجاد می‌کند و فرایند اختلاط به وسیله امواج انجام می‌گیرد. محلول جاذب مورد استفاده در فرایند امگا آب دریاست. نور خورشید و CO_2/O_2 برای انجام عملیات فتوسنتز جلبک‌های دریایی از غشای موجود در محفظه عبور می‌کند. لایه پشتیبان غشا نیز از حذف یا کاهش میزان ترکیبات پساب جلوگیری می‌کند.

آب‌گیری مؤثر از جلبک‌های دریایی آماده برداشت، به علت ناچیزبودن غلظت آن‌ها در محیط کشت از مشکلات بزرگ در فراوری ریزجلبک‌های دریایی است. در امگا- در این فرایند غشای اسمز مستقیم با به کارگیری اختلاف فشار اسمزی ایجادشده با آب دریای با شوری بالا، به کار گرفته می‌شود. در طول دوره ۱۰ تا ۲۰ روزه، بیش از ۷۵٪ آب با فرایند اسمز دفع شده، که این عمل سهم بسزایی در کاهش هزینه آبیاری دارد. زمان آماده برداشت بودن جلبک‌های دریایی، تلمبه محلول آبی از داخل کیسه‌ها به بخش‌های فرایندی، برای آب‌گیری بیشتر انجام می‌گیرد و کیسه‌ها بار دیگر آماده پر شدن با پساب می‌شوند [۶۸].

بازیافت مس از جریان‌های رقیق فرایند هیدرومتالورژی است. محلول رقیق مس خروجی از مخزن آب کثیف^۱، محلول خوراک و اسیدسولفوریک غلیظ خروجی از عملیات استخراج الکتریکی، محلول محصول را تشکیل می‌دهند. مس موجود در محلول خوراک به غشا نفوذ می‌کند و محلول رفینیت حاوی ppm ۵۰ تا ۱۰۰ مس تولید شده به مخزن آب کثیف برگردانده می‌شود. محلول محصول که شامل ۲ تا ۵٪ مس است به مخزن استخراج الکتریکی فرستاده می‌شود [۶۵].

۳-۱۴ تولید و خالص‌سازی سوخت‌های زیستی در پالایشگاه‌های زیستی

از مهم‌ترین سوخت‌های جای‌گزین، سوخت‌های زیستی هستند که به‌عنوان منابع پایدار انرژی شناخته می‌شوند. سوخت‌های زیستی دارای برتری‌هایی چون در دسترس بودن منابع اولیه، انتشار آلاینده‌ی کمتر و تطابق و سازگاری بیشتر با محیط زیست‌اند. از فناوری غشایی می‌توان در تولید و خالص‌سازی دامنه وسیعی از سوخت‌های زیستی مانند: بیوهیدروژن، بیومتان، بیواتانول، بیوبوتانول، بیودیزل و غیره بهره گرفت [۶۶].

برای نمونه در فرایند تولید بیودیزل، غشا نقش مهمی در جداسازی و خالص‌سازی محصول نهایی از محصولات جانبی مانند گلیسرول و هم‌چنین مواد اولیه (روغن‌های گیاهی و حیوانی) که وارد واکنش نشده‌اند، ایفا می‌کند. کیفیت غشای مورد استفاده به اندازه قطره‌های روغن (قطر حفره‌های غشا) و یا تراوایی و انتخاب‌پذیری آن بستگی دارد. در سیستم‌های بر مبنای اندازه قطره‌ها، غشاهای متخلخل میکرو- که بر پایه سرامیک و یا کربن هستند- به کار گرفته می‌شود (به سبب محیط عملیاتی بسیار اسیدی و بازی موجود در تولید بیودیزل). با توجه به قطبیت متفاوت متانول و روغن‌ها آن‌ها با یکدیگر مخلوط نمی‌شوند و به صورت یک سیستم دوفازی- که در آن روغن‌ها به صورت قطرات پراکنده در متانول که فاز پیوسته را تشکیل می‌دهد- حضور دارند. این قطره‌ها دارای قطر بیشتری نسبت به بیودیزل، گلیسرول، و متانول هستند و به راحتی با غشا از سیستم جدا می‌شوند. در مرحله بعد با شست و شو با آب سایر ناخالصی‌ها از بیودیزل پاک‌سازی می‌شود. در مقابل، در سیستم‌های بر مبنای انتخاب‌پذیری، غشاهای متراکم غیرمتخلخل آب‌دوست

2. Ames

1. Dump

۴. نتیجه گیری کلی

امروزه در بسیاری از فرایندهای جداسازی، از فناوری‌های نوین از جمله غشا و فرایندهای غشایی - به علت کاربرد بسیار در حوزه‌های مختلف - استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، فرایندهای جداسازی در بسیاری از صنایع با استقبال روبه‌رو شده و فرایندهای غشایی نسبت به دیگر فرایندها از جمله جذب، جذب سطحی، تقطیر و غیره از برتری‌های بسیاری برخوردار شده است. از امتیازهای کاربرد فرایندهای غشایی در صنایع مختلف می‌توان به کاهش مصرف انرژی، بازده بالای انتقال جرم و سادگی کاربرد اشاره کرد؛ به همین دلیل در حوزه صنعت آب و پساب و تصفیه پساب‌های صنعتی اهمیت بسیاری دارد. علاوه بر کاربردهای فراوان غشا که شامل فیلتراسیون غشایی، فرایندهای جداسازی گازها و فرایندهایی هم‌چون فرایند الکترودیالیز است، در سال‌های اخیر موارد کاربرد جدیدی برای آن‌ها یافت شده که نویدبخش جایگاه بالایی در استفاده از غشا در صنعت است. یکی از مهم‌ترین این کاربردها استفاده از این غشاها در زمینه تولید انرژی با استفاده از پیل‌های سوختی است. استفاده از پیل‌های سوختی برتری‌های زیادی دارد که از جمله آن می‌توان به بازده بالا، نیالودن هوا، آلودگی صوتی ناچیز و قابلیت تولید هم‌زمان حرارت و الکتریسیته اشاره کرد. پیشرفت فناوری‌های جداسازی غشایی در گرو کوشش محققان دانشگاهی و صنعتی است که در بسیاری از زمینه‌های به کارگیری این فناوری در صنایع، در حال تحقیق و پژوهش هستند.

مراجع

- [1] Crespo, J. G., Bøddeker, K. W., "Membrane processes in separation and purification", Springer Science & Business Media, 272, (2013).
- [2] Buonomenna, M., Bae, J., "Membrane processes and renewable energies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43: pp. 1343-1398, (2015).
- [3] Junejo, F., Saeed, A., Hameed, S., 5.19 energy management in ocean energy systems (2018).
- [4] Nath, K., "Membrane Separation Processes", PHI Learning Private Limited, Delhi, second edition, (2017).
- [5] Judd, S. J., "Membrane technology costs and me", Water research, 122: pp. 1-9, (2017).
- [6] Alzahrani, S., Mohammad, A. W., "Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment: A review", Journal of Water Process Engineering, 4: pp. 107-133, (2014).
- [7] Wang, X., Chang, V. W., Tang, C. Y., "Osmotic membrane bioreactor (OMBR) technology for wastewater treatment and reclamation: Advances, challenges, and prospects for the future", Journal of membrane science, 504: pp. 113-132, (2016).
- [8] Li, L., Visvanathan, C., "Membrane technology for surface water treatment: advancement from microfiltration to membrane bioreactor", Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 16(4): pp. 737-760, (2017).
- [9] Mallevialle, J., Odendaal, P. E., Wiesner, M. R., "Water treatment membrane processes", American Water Works Association, (1996).
- [10] Wu, W., Shi, Y., Liu, G., Fan, X., Yu, Y., "Recent development of graphene oxide based forward osmosis membrane for water treatment: A critical review", Desalination, 491, 114452, (2020).
- [11] Zhai, Z., Zhao, N., Liu, J., Dong, W., Li, P., Sun, H., Niu, Q. J., "Advanced nanofiltration membrane fabricated on the porous organic cage tailored support for water purification application", Separation and Purification Technology, 230, 115845, (2020).
- [12] Abdel-Fatah, M. A., "Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment", Ain Shams Engineering Journal, 9(4): pp. 3077-3092, (2018).
- [13] WHO. (2017) Retrieved from www.who.int/water_sanitation_health/gdwqrevision/desalination.pdf
- [14] Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., Moulin, P., "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges", Water Research, 43: pp. 2317-2348, (2009).
- [15] Amy, G., Ghaffour, N., Li, Z., Francis, L., Linares, R. V., Missimer, T., Lattemann, S., "Membrane-based seawater desalination: Present and future prospects", Desalination, 401: pp. 16-21, (2017).
- [16] Binger, Z. M., Achilli, A., "Forward osmosis and pressure retarded osmosis process modeling for integration with seawater reverse osmosis desalination", Desalination 491, 114583, (2020).
- [17] Voutchkov, N., "Energy use for membrane seawater desalination - current status and trends", Desalination, 431: pp. 2-14, (2018).
- [18] Thabit, M. S., Hawari, A. H., Hafez Ammar, Mhd., Zaidi, S., Zaragoza, G., Altaee, A., "Evaluation of forward osmosis as a pretreatment process for multi stage flash seawater desalination", Desalination, 461: pp. 22-29, (2019).
- [19] Strathmann, H., "Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications", Desalination, 264: pp. 268-288, (2010).
- [20] Lee, H., Jin, Y., Hong, S., "Recent transitions in ultrapure water (UPW) technology: Rising role of reverse osmosis (RO) ", Desalination, 399: pp. 185-197, (2016).

- [21] Institute of Standards and Industrial Research of Iran. Drinking water-Physical and chemical specifications, No 1053 [Online]. [cited 1997]; Available from: URL: <http://www.environmentlab.ir/standards/water-drink-standard-1053.pdf>
- [22] Turek, M., Mitko, K., "Ultra-pure water production by integrated electrodialysis-ion exchange/electrodeionization", *Membrane Water Treatment*, 4: pp. 237-249, (2013).
- [23] Karakulski, K., Gryta, M., Sasim, M., "Production of process water using integrated membrane processes", *Chemical Papers*, 60: pp. 416-421, (2006).
- [24] Careta, L. O., Begnini, M. L., Pereira Lima, E. A., Delalibera Finzer, J. R., "Processing of residual water by reverse osmosis", *International Journal of Hydrology*, 3: pp. 436-440, (2019).
- [25] Quist-Jensen, C. A., Macedonio, F., Drioli, E., "Membrane technology for water production in agriculture: Desalination and wastewater reuse", *Desalination*, 364, 17-32, 2015.
- [26] Rezakazemi, M., Khajeh, A., Mesbah, M., "Membrane filtration of wastewater from gas and oil production", *Environmental Chemistry Letters*, 16: pp. 367-388, (2018).
- [27] Liu, C., Takagi, R., Shintani, T., Cheng, L., Lun Tung, K., Matsuyama, H., "Organic Liquid Mixture Separation Using an Aliphatic Polyketone-Supported Polyamide Organic Solvent Reverse Osmosis (OSRO) Membrane", *ACS Applied Materials Interfaces*, 12: pp. 7586-7594, (2020).
- [28] Chau, J., Basak, P., Sirkar, K. K., "Reverse osmosis separation of particular organic solvent mixtures by a perfluorodioxole copolymer membrane", *Journal of Membrane Science*, 563: pp. 541-551, (2018).
- [29] Talaeian Iraqi, M., Goodarzvand Chegini, A., Moradi, Sh., "Study of wastewater from the operation of various units of a thermal power plant", *The Second International Conference on Engineering and Applied Sciences*, (In Persian), (2016).
- [30] Duong, H. C., Pham, T. M., Luong, S. T., Nguyen, K. V., Nguyen, D. T., Ansari, J. A., Long D. Nghiem, "A novel application of membrane distillation to facilitate nickel recovery from electroplating wastewater", *Environmental Science and Pollution Research*, 26: pp. 23407-23415, (2019).
- [31] Anderson, D. K., "Concentration of dilute industrial wastes by direct osmosis", (1977).
- [32] Haupt, A., Lerch, A., "Forward osmosis application in manufacturing industries: A short review", *Membranes*, 8: pp. 47, (2018).
- [33] Khalili-Garakani, A., Mostofi, N., Sarrafzadeh, M. H., Sadeghi, F., Hosseinzadeh, M., Fatourehchi, H., Mehrnia, M. R., "Comparison of Different Models for Rheological Characterization of Activated Sludge", *Iranian Journal of Health, Science & Engineering*, 8: pp. 255-264, (2011).
- [34] Cong, N., Shiao-Shing, N., Hung-Yin, C., Nguyen, Y., Hau, T., "Application of forward osmosis on dewatering of high nutrient sludge", *Bioresource Technology*, 132: pp. 224-229, (2013).
- [35] Suzaimi, N. D., Goh, P. S., Ismail, A. F., Mamah, S. C., "Strategies in Forward Osmosis Membrane Substrate Fabrication and Modification: A Review", *Membranes*, 10: pp. 332-374, (2020).
- [36] Thomas, I., Peters, A., "Purification of landfill leachate with membrane filtration", *Filtration & Separation*, 35: pp. 33-36, (1998).
- [37] Khalili-Garakani, A., Mehrnia, M. R., Wali, M., Sarrafzadeh, M. H., "Hydrodynamic simulation of membrane bioreactors in the treatment of petrochemical wastewaters using computational fluid dynamics", the first petrochemical conference in Iran, (In Persian), (2010).
- [38] Khalili-Garakani, A., Mehrnia, M. R., Mostofi, N., Sarrafzadeh, M. H., "Flow Characteristics in an Airlift Membrane Bioreactor", *Chemical Product & Process Modeling journal*, 4, article18, (2009).
- [39] Sadeghi, F., Sarrafzadeh, M. H., Nabizadeh, R., Azami, H., Khalili-Garakani, A., Mehrnia, M. R., "Biological treatment of wastewater containing acetate and phosphate ions in a membrane bioreactor", Presented in International Conference on Advanced Wastewater Treatment & Reuse, University of Tehran, Tehran, Iran, 10-12 November (2009).
- [40] Khalili-Garakani, A., Mehrnia, M. R., Mostofi, N., Sarrafzadeh, M. H., "A New Approach to Analysis and Control of Fouling in Airlift Membrane Bioreactors", *Process Biochemistry Journal*, 46: pp. 1138-1145, (2011).
- [41] Hosseinzadeh, M., Mehrnia, M. R., Mostofi, N., Khalili-Garakani, A., "New approach to modelling of biofouling in a submerged membrane bioreactor (sMBR) ", Presented in IWA Regional Conference and Exhibition on Membrane Technology and Water Reuse, Istanbul, Turkey, 18-22 October (2010).
- [42] Ramon, G. Z., Feinberg, B. J., Hoek, E. M. V., "Membrane-based production of salinity-gradient power". *Energy Environ. Sci.*, 4: pp. 4423-4434, (2011).
- [43] Straub, A. P., Deshmukh, A., Elimelech, M., "Pressure-retarded osmosis for power generation from salinity gradients: is it viable? " *Energy Environment Science*, 9: pp. 31-48, (2016).
- [44] Lee, H., Yanilmaz, M., Toprakci, O., Fu, K., Zhang, X., "A review of recent developments in membrane separators for rechargeable lithium-ion batteries", *Energy Environment Science*, 7: pp. 3857-3886, (2014).

- [45] Costamagna, P., "Transport phenomena in polymeric membrane fuel cells", *Chemical engineering science*, 56(2): pp. 323-332 (2001).
- [46] Wang, Y., Mishler, J., Chan Cho, S., Cordobes Adroher, X., "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research", *Applied Energy*, 88: pp. 981-1007, (2011).
- [47] Zakaria, Z., Shaari, N., Kamarudin, S. K., Bahru, R., Taufiq Musa, M., "A review of progressive advanced polymer nanohybrid membrane in fuel cell application", *Energy Research*, 44: pp. 8255-8295, (2020).
- [48] Abouzari-Lotf, E., Jacob, M. V., Ghassemi, H., "Highly conductive anion exchange membranes based on polymer networks containing imidazolium functionalised side chains", *Scientific Reports*, 11: pp. 3764, (2021).
- [49] Jacobson, A. J., "Materials for solid oxide fuel cells", *Chemistry of Materials*, 22(3): pp. 660-674, (2010).
- [50] Meulenbergh, W., Ivanova, M., Serra, J., Roitsch, S., "Proton-conducting ceramic membranes for solid oxide fuel cells and hydrogen (H₂) processing", In *Advanced membrane science and technology for sustainable energy and environmental applications*: pp. 541-567, (2011).
- [51] Culcasi, A., Gurreri, L., Micale, G., Tamburini, A., "Bipolar membrane reverse electrodialysis for the sustainable recovery of energy from pH gradients of industrial wastewater: Performance prediction by a validated process model", *Journal of Environmental Management*, 287, p. 112319, (2021).
- [52] Tufa, R. A., Curcio, E., Fontananova, E., Profio, G. D., "Membrane-Based Processes for Sustainable Power Generation Using Water: Pressure-Retarded Osmosis (PRO), Reverse Electrodialysis (RED), and Capacitive Mixing (CAPMIX)", in *"Membrane-Based Processes for Sustainable Power Generation Using Water"*, Elsevier, (2017).
- [53] <https://futurism.com/a-new-technology-could-provide-40-of-the-worlds-energy-needs-and-its-carbon-neutral>
- [54] Hafeez, S., Al-Salem, S. M., Manos, G., Constantinou, A., "Fuel production using membrane reactors: a review", *Environmental Chemistry Letters*, 18: pp. 1477-1490, (2020).
- [55] Chakraborty, S., Rusli, H., Nath, A., "Immobilized biocatalytic process development and potential application in membrane separation: a review", *Critical Reviews in Biotechnology*, 36: pp. 43-58, (2014).
- [56] Uemiyama, S., "Brief review of steam reforming using a metal membrane reactor", *Topics in Catalysis*, 29: pp. 79-84, (2004).
- [57] Sigurdardóttir, S. B., Lehmann, J., Ovtar, S., "Enzyme Immobilization on Inorganic Surfaces for Membrane Reactor Applications: Mass Transfer Challenges, Enzyme Leakage and Reuse of Materials", *Advanced synthesis & catalysis*, 360: pp. 2578-2607, (2018).
- [58] Ahmadi, A., Sarrafzadeh, M. H., Mohamadi, M., Mahdigholian, Z., Hosseinian, A., "Investigation on polysulfone blended NH₂-MIL125 (Ti) membrane for photocatalytic degradation of Methylene Blue dye. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*", 5(3): pp. 234-245 (2020).
- [59] Ma, S., Meng, J., Li, J., Zhang, Y., Ni, L., "Synthesis of catalytic polypropylene membranes enabling visible-light-driven photocatalytic degradation of dyes in water", *Journal of membrane science*, 453: pp. 221-229, (2014).
- [60] Kandath Valappil, R. S., Ghasem, N., Al-Marzouqi, M., "Current and future trends in polymer membrane-based gas separation technology: A comprehensive review", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 98: pp. 103-129, (2021).
- [61] Semenova, S. L., "Polymer membranes for hydrocarbon separation and removal", *Journal of Membrane Science*, 231: pp. 189-207, (2004).
- [62] Miyagi, A., Nabetani, H., Nakajima, M., "Analysis of transport mechanism of binary organic solvent system through a PDMS-based dense membrane using a regular solution model combined with a solution-diffusion model", *Separation and Purification Technology*, 88: pp. 216-226, (2012).
- [63] Yang, B., Yuan, W., Gao, F., "A review of membrane-based air dehumidification", *Indoor and Built Environment*, 24: pp. 11-26, (2015).
- [64] Robb, W. L., "Carbon Dioxide-Oxygen Separation: Facilitated transport of carbon dioxide across a liquid film", *Science* 156: pp. 1481, (1967).
- [65] He, X., Lei, L., Chu, Y., "Chapter 9 - Facilitated Transport Membranes for CO₂ Removal from Natural Gas, Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes Carbon Dioxide Separation/Capture by Using Membranes": pp. 261-288, (2018).
- [66] Y. He, D. M. Bagley, K. T. Leung, S. N. Liss, B. Q. Liao, "Recent advances in membrane technologies for biorefining and bioenergy production", *Biotechnology Advances*, 30, pp. 817-858, 2012.
- [67] A. Figoli, A. Cassano, A. Basile, "Part Three: Integrated membrane operations for biofuel production", in *"Membrane Technologies for Biorefining"*, Pages 483-500, Elsevier, 2016.
- [68] <https://ntrs.nasa.gov/citations/20100039342>.