مروری بر روش‌های ساخت غشا اسمز پیشرو و بررسی پلیمرهای مناسب برای آن

وحیده نیک نژاد[1]، یاسمن خجسته[2]، محمدرضا میراولیایی[3]

[1] دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنرکرمان، کرمان، niknejad.vahideh@gmail.com
[2] دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنرکرمان، کرمان، yasaman.khojasteh@yahoo.com
[3] استادیار، دانشگاه شهید باهنرکرمان، کرمان، mrmiroliaie@uk.ac.ir

چکیده

کمبود آب شیرین یکی از چالش های بزرگی ا ست که اقتصاد جهانی، ثبات اجتماعی و تعادل اکوسیستم را تهدید می کند. نمک زدایی به مدت طولانی به عنوان یک روش موثر برای تولید آب شیرین از آب دریا و آب شور شناخته شده ا ست. FO یک فناوری نوظهور و موثر برای کاهش تقاضای انرژی و سیستم مقرون به صرفه برای احیای آب پایدار است. هرچند که با چالش های بسیاری چون پلاریزاسیون غلظتی، نفوذ معکوس نمک، شار کم آب و فقدان غشای با استحکام مکانیکی و شیمیایی مناسب مواجه است. بنابراین ساخت غشای متخلخل و آبدوست برای بهبود عملکرد فرایند FO حایز اهمیت است. ساخت غشا ارتباط قوی با خواص و عملکرد سطح غشا مانند ساختار منافذ، آبدوستی و زبری سطح دارد .در این مقاله روش های مختلف ساخت غ شاهای FO بیان می شود همچنین ویژگی های تعدادی از پلیمر های پرکاربرد و مناسب برای این نوع غشاها بررسی می‌گردد.

واژه های کلیدی: نمک‌زدایی، اسمزپیشرو، غشاپلیمری

1. مقدمه

اسمز پیشرو (FO)[1] یکی از انواع فرآیندهای غشایی نوین محسوب می شود. در این فرآیند از یک غشای نیمه تراوا به عنوان عامل جداسازی استفاده می‌گردد. این غشا دارای قابلیت انتخاب پذیری بوده و تنها به آب اجازه عبور از خود را می‌دهد. FO یک فرایند خودبه خودی است که طی آن حلال (آب) به واسطه فشار اسمزی خود از طریق غشا از ناحیه رقیق به ناحیه ای که دارای یک محلول نمکی جاذب آب با فشار اسمزی بیشتر است، حرکت میکند. این عمل تا زمانی ادامه پیدا میکند که تعادل ترمودینامیکی ایجاد شود و پتانسیل شیمیایی دو محلول برابر شود[1].

در دهه های اخیر FO در زمینه های مختلف صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله در زمینه های شیرین سازی آب، تولید نیرو، تصفیه پساب و صنایع غذایی. دلیل گستردگی کاربرد این فرآیند را می‌توان در ماهیت ساختاری آن یافت. FO به دلیل به کارگیری فشار هیدرولیکی اندک و در نتیجه هزینه بسیار پایین نسبت به سایر فرآیندهای جداسازی، مورد توجه ویژه ای قرار گرفته است. اما در کنار این مزایا مانند هر فرآیند دیگری دارای مشکلاتی می باشد. مشکلاتی که باعث می شوند راندمان فرآیند در مقایسه با راندمان تئوری محاسبه شده کمتر باشد. از جمله این مشکلات می توان به پلاریزاسیون غلظتی، گرفتگی غشا و نفوذ معکوس حلال اشاره کرد[2].

مزیت های فراوان غشاهای اسمزمستقیم باعث توجه و تمرکز پژوهشگران به فعالیت در این زمینه شده است و ساخت غشایی که در عین داشتن شار عبوری مناسب، بتواند حداقل میزان برگشت نمک را داشته باشد به عنوان هدفی مهم در زمینه اسمزپیشرو مطرح شده است. در نتیجه استفاده از یک پلیمر مناسب که بتواند ما را به اهداف فوق برساند بسیار حایز اهمیت است در این پژوهش برخی مواد پلیمری که با توجه به ویژگی هایشان ما را به اهدف فوق نزدیک می کنند بررسی می گردد.

2. مواد غشایی پلیمری برای اسمز پیشرو:

غشاها جایگاه اصلی را در علم غشاء به دست آورده اند و به دلیل توانایی آن‌ها در کنترل عبور آلاینده های موجود در آب و عمل به عنوان یک مانع انتخابی، در طیف وسیعی از کاربردها مورد استفاده قرار می گیرند[3].

غشاهای پلیمری از پلیمرهای طبیعی یا مصنوعی ساخته می‌شوند و به‌عنوان یک مانع بین دو محلول بوده که به صورت انتخابی عمل می‌کنند. سرعت جداسازی تحت تأثیر ماهیت شیمیایی پلیمر، ترکیب، تخلخل و خواص فیزیکی و شیمیایی است. از آنجایی که پلیمر به تنهایی نمی تواند به طور موثر مایع را انتقال دهد، نانوپرکننده ها در ماتریس پلیمری گنجانده می شوند تا عملکرد را بهبود بخشند

تاکنون از مواد پلیمری مختلف مانند استات سلولز/تری استات سلولز (CA/CTA)[2]، پلی آمید، پلی سولفون (Psf)[3] و غیره برای ساخت غشاهای FO استفاده شده است

[1] - Forward osmosis
[2]- cellulose acetate/cellulose triacetate
[3]- Polysulfone

ساخت غشاها با انواع مختلف پلیمر، بینش جدیدی به تحقیقات غشایی داده است.

ریخته گری محلول، ذوب و اختلاط مکانیکی برخی از روش های آماده سازی محلول های پلیمری برای ساخت غشا هستند. در ادامه برخی از مواد پلیمری که به طور گسترده در ساخت غشاهای نانوکامپوزیتی لایه نازک استفاده می شود بررسی می گردد[4].

3.1. مشتقات استر سلولز

غشاهای مبتنی بر استات سلولز و تری استات سلولز به دلیل امکان سنجی اقتصادی، زیست تخریب پذیری ترجیحی، مقاومت در برابر کلر و ماهیت آبدوست، رایج ترین غشاهای مورد استفاده در تجارت FO هستند.افزایش قابل توجهی در توسعه غشاهای سلولزی ورقه ای مسطح یا فیبر توخالی ساخته شده توسط وارونگی فاز [1] (PI) مشاهده می شود[5]. گزارش شده است که غشاهای CA دو پوسته رسوب وقطبش غلظتی داخلی[2] (ICP) را با ساختار لایه انتخابی منحصربفرد خود بین لایه متراکم کاهش می دهند که دفع نمک زیاد در فرآیند FO را امکان پذیر می کند [6]. پارامترهای مختلف ساخت مانند غلظت پلیمر-حلال، تبخیر و زمان بازپخت، بستر ریخته‌گری، انعقاد و غیره.به شدت بر مورفولوژی و خواص غشا تأثیر می گذارد [7]. گروه های عاملی موجود در استر سلولزی طبیعی استیل، هیدروکسیل، پروپیونیل و بوتیریل هستند که به کارایی جداسازی غشاهای مبتنی بر سلولز کمک می کند[8].

.

3.2پلیمرهای پلی آمیدی

به منظور کاهش ICP در سیستم غشایی اسمز پیشرو، از غشاهای لایه نازک پلی آمید[3] (PA) استفاده می شود و یک لایه فعال از طریق پلیمریزاسیون سطحی برای دفع نمک بالا و افزایش آبدوستی تشکیل می شود[9]. بستر پلی آمید میل بیشتری نسبت به تشکیل لایه فعال نشان داده است که عامل مهم کنترل کننده ICP و لایه انتخابی کنترل کننده شار معکوس نمک و دفع آن است[10]. پیشرفت‌های فعلی به منظور بهینه‌سازی بستر پلیمری برای بهبود ویژگی‌های ساختاری غشا و خواص می باشد[4].

PA-TFC به عنوان غشاهای پیشرفته با گزینش پذیری بالا و نفوذپذیری برتر شناخته شده است که توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است[11] .

3.3. پلیمرهای پلی سولفون و پلی اتر سولفون

پلیمرهای پلی سولفون[4] (psf) به طور گسترده ای به عنوان بستر در ساخت غشاهای اسمز پیشرو با پایداری مکانیکی، حرارتی و شیمیایی خوب استفاده می شود. اما به دلیل خاصیت آبگریز آنها، تخلخل و نفوذپذیری کاهش می یابد که به نوبه خود باعث ایجاد رسوب می شود [12].

آب دوستی را می توان با مخلوط کردن پلیمر با اصلاح کننده سطح یا نانوپرکننده آبدوست مانند اکسیدهای تیتانیوم و سیلیس افزایش داد.

پلی اتر سولفون[5] (PES) به طور گسترده ای به عنوان بستر پلیمری برای ساخت غشاهای FO به دلیل ثبات حرارتی مناسب، تحمل pH، مقاومت در برابر مواد شیمیایی و خواص مکانیکی استفاده می شود [13]. لایه فعال غشایی PES ،تخلخل را با تشکیل ساختارهای انگشت مانند به حداکثر می رساند و ضخامت بستر به طور موثر شار نمک معکوس را مدیریت می کند[14].

3.4. پلی الکترولیت ها

پلی‌الکترولیت‌های با وزن مولکولی بالا به‌عنوان محلول اسمزی FO مورد استفاده قرار گرفته‌اند و و باعث کاهش شار معکوس می شود[15]. پلی‌الکترولیت‌های آنیونی بر اساس شار آب، شار نمک معکوس ، دفع یون و روش تغلیظ مجدد،به عنوان محلول‌های کششی شناسایی می‌شوند [16]. جفت های پلی الکترولیت مانند پلی آلی آمین هیدروکلراید و پلی استایرن سولفونات، پلی اتیلن ایمین و پلی وینیل سولفات، پلی اکریلیک اسید و پلی اتیلنیمین در حال حاضر برای افزایش شار و گزینش پذیری بالا استفاده می شود [3].

3.5. سایر پلیمرها

پلی بنزیمیدازول[6] (PBI) پلیمری است که دارای مقاومت شیمیایی، استحکام مکانیکی وپایداری حرارتی بالا است.[17]. با فرآیند وارونگی فاز، غشاهای PBI نامتقارن، شارهای آب را با وجود دفع نمک کم ایجاد می کند.این غشاها در حذف فلزات سنگین از فاضلاب و تولید نیروی اسمزی کاربرد دارند[18] .

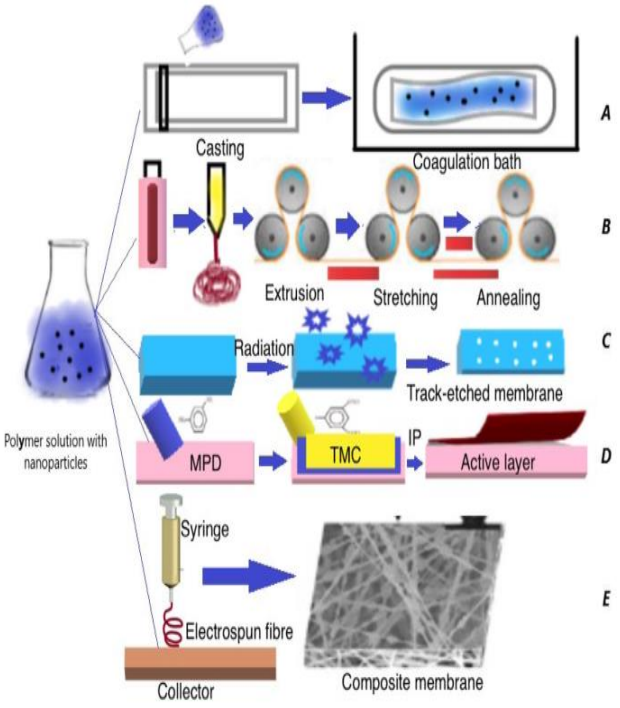
پلی ایمیدها[7] (PIs)، پلی آمیدها[8] (PAs) و پلی آمید ایمیدها[9] (PAI) به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردشان مانند مقاومت در برابر تخریب حرارتی،استحکام ، وزن کم و پایداری دمای بالا، به عنوان پلیمرهای با کارایی بالا در زمینه غشاهای اسمز پیشرو نامیده می‌شوند[19].

3. روش های ساخت برای تهیه غشاهای FO فیلم نازک

ساخت غشا عصر جدیدی را به فناوری غشاء و علم پلیمر بخشیده است. انتخاب روش ساخت مناسب به انتخاب پلیمر و ساختار غشایی مطلوب

[1]- phase inversion
[2] - internal concentration polarization
[3] - polyamide
[4]- Polysulfone
[5] - Polyethersulfone
[6] -Polybenzimidazole
[7]- Polyimides
[8]- polyamides
[9] -poly(amide imide)s

بستگی دارد. متداول‌ترین تکنیک‌های ساخت[1] (TFNM) ها برای اسمز مستقیم عبارتند از: وارونگی فاز، الکتروریسی، حک اثر ، پلیمریزاسیون سطحی و روش کششی.



شکل 1: تکنیک های مختلف ساخت غشاهای FO: A-وارونگی فاز، B-کشش، C-حک اثر، D- پلیمریزاسیون سطحی و E-الکتروریسی[20].

4.1. وارونگی فاز

وارونگی فازی یک روش جداسازی است که در آن محلول پلیمر همگن مایع به صورت کنترل‌شده به حالت جامد تبدیل می‌شود [21]

هنگامی که جداسازی و رسوب توسط تبادل حلال - غیر حلال رخ می‌دهد، این فرآیند به عنوان رسوب گذاری غوطه وری نامیده می‌شود. فیلم پلیمری ریخته‌گری شده (حلال) در یک حمام انعقادی متشکل از آب (غیر حلال قابل امتزاج) غوطه‌ور می‌شود[22].

روش دیگر، جداسازی فاز ناشی از حرارت است که حلال در آن تبخیر، استخراج یا خشک می‌شود. جداسازی فاز ناشی از بخار به محلول پلیمری اجازه می‌دهد که شامل یک غیر حلال باشد که باعث رسوب می‌شود. در روش رسوب غوطه‌وری، یک محلول پلیمری روی یک نگهدارنده مناسب ریخته می‌شود و سپس در یک حمام انعقادی غیر حلال غوطه‌ور می‌شود،که در آن حلال در حمام انعقادی و غیر حلال در لایه نازک ریخته گری پخش می شود.پس از جدایش یک لایه نازک پلیمری جامد با ساختارهای نامتقارن تشکیل می شود[16].

4.2. پلیمریزاسیون سطحی (IP)

این روش شامل فرو بردن غشای لایه نازک پلیمری در محلولی از مونومرهای آبی و غیر قابل امتزاج دی آمین مانند - m فنیلن دی آمین[2](MPD) وتری مسوئیل کلرید[3](TMC) است[23].

پلیمریزاسیون سطحی این دو حلال غیرقابل اختلاط به دلیل مونومرهای بسیار واکنش پذیری است که یک لایه رد پیوند متقاطع را روی بستر نگهدارنده تشکیل می دهند. IP به دلیل مزایای قابل توجهی که در تشکیل لایه فعال دارد، یکی از مهم ترین روش ها برای تجاری سازی غشاهای TFC FO، NF و RO در نظر گرفته می شود [3,11].در طول ساخت غشاها، خواص شیمیایی مونومرها نقش عمده ای در کنترل ضخامت، چگالی، مقاومت و آب دوستی لایه فعال فیلم ریخته گری دارد.همچنین غلظت مونومرها، زمان واکنش، نوع حلال‌ها و شرایط پس از تصفیه نیز بر ترکیب و مورفولوژی غشا تأثیر می‌گذارد [13].

4.3. کشش

استخراج، کشش ذرات و کشش خشک روش هایی هستند که در تولید غشاهای میکرو متخلخل FO،تقطیر غشایی[4] (MD) و اولترافیلتراسیون استفاده می شوند. در فرآیند استخراج، یک نرم‌کننده با پلیمر مخلوط می‌شود و مخلوط بالاتر از نقطه ذوب حرارت داده می‌شود و سپس به صورت ورقه‌های نازک استخراج می شود و نرم‌کننده در طول استخراج تبخیر می‌شود[24]. کشش شامل جدا کردن محلول پلیمر و ذرات و سپس کشش ماتریس پلیمری است که منجر به تشکیل غشا متخلخل به وسیله فرآیند کشش خشک می‌شود[25]. کشش موجب ایجاد غشای با ساختار متخلخل می شود. [12]. از جمله مزایای این روش به بازده اقتصادی و تمیزبودن این فرایند اشاره کرد زیرا به هیچ افزودنی و یا حلال نیاز ندارد و دارای استحکام مکانیکی بالایی است[26]. ویژگی‌های اصلی که بر روش کشش تاثیر می‌گذارند شامل نقطه ذوب، تبلور، استحکام کششی، وزن مولکولی است. همچنین بهینه سازی شرایط کشش منجر به غشا با شار و دفع نمک بالا می شود. گزارش شده است که دمای پایین در طول کشش، اندازه منافذ را برای دستیابی به یک غشای بسیار متخلخل کنترل می‌کند [11].

4. 4 حک اثر

[1]- thin-film nanocomposite membranes
[2] -m-phenylenediamine
[3] -trimesoyl chloride
[4] -Membrane distillation

حک اثر روشی است که در آن یک لایه پلیمر فوق نازک با یون‌های سنگین انرژی بالاتر روی لایه‌ای یونیزه می‌شود که باعث تخریب بیشترو ایجاد ترک هایی در ماتریس پلیمری می‌شود[27]. علاوه بر این، لایه پلیمری تحت فرآیند حک شیمیایی قرار می‌گیرد که در آن لایه با محلول‌های اسیدی یا قلیایی نگهداری می‌شود و لایه پلیمری برای تشکیل منافذ استوانه‌ای حکاکی می‌شود[28].

دو عامل مهم، ضخامت ریخته‌گری و انرژی تابشی اعمال شده است زمان تابش، تخلخل غشا را تعیین می کند در حالی که دما و زمان حک کردن اندازه منافذ یا قطر غشا را تعیین می کند. مطالعات نشان می دهد که ساخت غشاهای متخلخل نانو از طریق حکاکی‌اثر، منافذی بین 10تا 70 نانومتر ایجاد می کند که دارای دیواره بیرونی صاف با توزیع یکنواخت است [29].

4.5. الکتروریسی

الکتروریسی روش جدید در حال توسعه برای ساخت غشاها FO جهت نمک زدایی است[16]. از مزیت های این روش می توان به انتخاب گسترده ی مواد ، سرعت بالا، سازگاری و مقرون به صرفه بودن آن اشاره کرد[30] . اثربخشی این فرآیند توسط عواملی مانند وزن مولکولی پلیمر، رسانایی، ویسکوزیته، الاستیسیته، ثابت الکتریکی و پارامترهای محیطی درون محفظه کنترل می‌شود. ادغام نانومواد در محلول می تواند به طور قابل توجهی خواص غشاهای نانوکامپوزیت الکتروریسی شده را بهبود بخشد.

نتیجه گیری :

غشاهای FO نتایج امیدوارکننده‌ای را در تصفیه آب و فاضلاب، با نرخ دفع نمک بسیارخوب و ویژگی‌های رسوب به نسبت کم آن، نشان داده اند. اگر مواد غشایی، حلال کششی و رویکرد بازیابی آن، مکانیسم رسوب‌گیری و تکنیک‌های تمیز کردن غشا بهبود یابند احتمالن در آینده FO به یک فناوری غشایی حیاتی تبدیل خواهد شد اما عمده تحقیقات FO در مقیاس آزمایشگاهی است و پیشرفت در کاربردهای معقول و عملیاتی کردن آن مستلزم تحقیقات عمیق تر و مطالعات بیشتر است که بتواند شکاف های تحقیقات فعلی را ازبین برده یا کاهش دهد. موارد ذیل جهت انجام کارهای آتی در خصوص ساخت و استفاده از غشاهای اسمزمستقیم در فرایند نمک زدایی از آب دریا و دیگر فرایندهای اسمزی پیشنهاد شده است.

- به کار گیری نانوذرات جهت اصلاح سطح غشا و کاهش قطبش غلظتی درونی در فرایند اسمز مستقیم
- استفاده از فرآیند اسمزمستقیم در بیوراکتور غشایی برای تصفیه فاضلاب
- بررسی غشاهای سنتز شده موجود با شرایط عملیاتی متفاوت مثل غلظت خوراک ورودی و فشار و دما در فرایند تصفیه به منظور تعیین شرایط عملیاتی مطلوب
- بررسی سایر چارچوبهای آلی-فلزی به عنوان حفره ساز برای ساخت غشاهای لایه نازک کامپوزیتی
- بررسی پلیمرهای فوق آبدوست برای افزایش شار در فرایند اسمز مستقیم

مراجع:

[1] S. Shokrollahzadeh and S. Tajik, "Fabrication of thin film composite forward osmosis membrane using electrospun polysulfone/polyacrylonitrile blend nanofibers as porous substrate," Desalination, vol. 425, pp. 68-76, 2018.

[2] S. H. Mohamad, M. I. Idris, and H. Z. Abdullah, Preparation of polyethersulfone ultrafiltration membrane surface coated with TiO2 nanoparticles and irradiated under UV light. Trans Tech Publ, 2014.

[3] W. Suwaileh, D. Johnson, S. Khodabakhshi, and N. Hilal, "Superior cross-linking assisted layer by layer modification of forward osmosis membranes for brackish water desalination," Desalination, vol. 463, pp. 1-12, 2019.

[4] R. Dai, J. Li, and Z. Wang, "Constructing interlayer to tailor structure and performance of thin-film composite polyamide membranes: A review," Advances in Colloid and Interface Science, vol. 282, p. 102204, 2020.

[5] I. L. Alsvik, K. R. Zodrow, M. Elimelech, and M.-B. Hägg, "Polyamide formation on a cellulose triacetate support for osmotic membranes: Effect of linking molecules on membrane performance," Desalination, vol. 312, pp. 2-9, 2013.

[6] L.-x. Dong, H.-w. Yang, S.-t. Liu, X.-m. Wang, and Y. F. Xie, "Fabrication and anti-biofouling properties of alumina and zeolite nanoparticle embedded ultrafiltration membranes," Desalination, vol. 365, pp. 70-78, 2015.

[7] W. Wu, Y. Shi, G. Liu, X. Fan, and Y. Yu, "Recent development of graphene oxide based forward osmosis membrane for water treatment: A critical review," Desalination, vol. 491, p. 114452, 2020.
[8] R. C. Ong, T.-S. Chung, J. S. de Wit, and B. J. Helmer, "Novel cellulose ester substrates for high performance flat-sheet thin-film composite (TFC) forward osmosis (FO) membranes," Journal of Membrane Science, vol. 473, pp. 63-71, 2015.
[9] M. Bagherzadeh, A. Bayrami, and M. Amini, "Enhancing forward osmosis (FO) performance of polyethersulfone/polyamide (PES/PA) thin-film composite membrane via the incorporation of GQDs@ UiO-66-NH2 particles," Journal of Water Process Engineering, vol. 33, p. 101107, 2020.
[10] M. Amini, M. Seifi, A. Akbari, and M. Hosseinifard, "Polyamide-zinc oxide-based thin film nanocomposite membranes: Towards improved performance for forward osmosis," Polyhedron, vol. 179, p. 114362, 2020.
[11] W. J. Lee et al., "Fouling mitigation in forward osmosis and membrane distillation for desalination," Desalination, vol. 480, p. 114338, 2020.
[12] M.-N. Li, X.-J. Chen, Z.-H. Wan, S.-G. Wang, and X.-F. Sun, "Forward osmosis membranes for high-efficiency desalination with Nano-MoS2 composite substrates," Chemosphere, vol. 278, p. 130341, 2021.
[13] Y. Wang, R. Ou, Q. Ge, H. Wang, and T. Xu, "Preparation of polyethersulfone/carbon nanotube substrate for high-performance forward osmosis membrane," Desalination, vol. 330, pp. 70-78, 2013.
[14] M. J. Park et al., "Thin-film composite hollow fiber membranes incorporated with graphene oxide in polyethersulfone support layers for enhanced osmotic power density," Desalination, vol. 464, pp. 63-75, 2019.
[15] M. J. Hamad and E. M. Chirwa, "Forward osmosis for water recovery using polyelectrolyte PolyDADMAC and DADMAC draw solutions as a low-pressure energy saving process," Desalination, vol. 453, pp. 89-101, 2019.
[16] T. Ahmad, C. Guria, and A. Mandal, "Kinetic modeling and simulation of non-solvent induced phase separation: Immersion precipitation of PVC-based casting solution in a finite salt coagulation bath," Polymer, vol. 199, p. 122527, 2020.
[17] N. Akther, S. Daer, Q. Wei, I. Janajreh, and S. W. Hasan, "Synthesis of polybenzimidazole (PBI) forward osmosis (FO) membrane and computational fluid dynamics (CFD) modeling of concentration gradient across membrane surface," Desalination, vol. 452, pp. 17-28, 2019.
[18] M. F. Flanagan and I. C. Escobar, "Novel charged and hydrophilized polybenzimidazole (PBI) membranes for forward osmosis," Journal of membrane science, vol. 434, pp. 85-92, 2013.
[19] L. A. Ali, H. K. Ismail, H. F. Alesary, and H. Aboul-Enein, "A nanocomposite based on polyaniline, nickel and manganese oxides for dye removal from aqueous solutions," International Journal of Environmental Science and Technology, vol. 18, pp. 2031-2050, 2021.
[20] J. M. Gohil and R. R. Choudhury, "Introduction to nanostructured and nano-enhanced polymeric membranes: preparation, function, and application for water purification," in Nanoscale materials in water purification: Elsevier, 2019, pp. 25-57.
[21] T. A. Saleh and V. K. Gupta, Nanomaterial and polymer membranes: synthesis, characterization, and applications. Elsevier, 2016.
[22] V. Abitha and S. Thomas, "Fabrication Methods: Polymer Membranes for Liquid Transport," in Transport Properties of Polymeric Membranes: Elsevier, 2018, pp. 35-50.
[23] Y. Yang et al., "Porous membranes in pressure-assisted forward osmosis: Flux behavior and potential applications," Journal of industrial and engineering chemistry, vol. 60, pp. 160-168, 2018.

[24] M. Jaffe and J. Menczel, Thermal analysis of textiles and fibers. Woodhead Publishing, 2020.
[25] P. Karami, B. Khorshidi, M. McGregor, J. T. Peichel, J. B. Soares, and M. Sadrzadeh, "Thermally stable thin film composite polymeric membranes for water treatment: A review," Journal of Cleaner Production, vol. 250, p. 119447, 2020.
[26] L. Shen et al., "Constructing substrate of low structural parameter by salt induction for high-performance TFC-FO membranes," Journal of Membrane Science, vol. 600, p. 117866, 2020.
[27] V. Rao, "Radiation processing of polymers," Advances in Polymer Processing, vol. 3, pp. 402-437, 2009.
[28] F. Tibi, A. Charfi, J. Cho, and J. Kim, "Fabrication of polymeric membranes for membrane distillation process and application for wastewater treatment: Critical review," Process Safety and Environmental Protection, vol. 141, pp. 190-201, 2020.
[29] E. Ferain and R. Legras, "Efficient production of nanoporous particle track etched membranes with controlled properties," Radiation Measurements, vol. 34, no. 1-6, pp. 585-588, 2001.
[30] Y. Liao, C.-H. Loh, M. Tian, R. Wang, and A. G. Fane, "Progress in electrospun polymeric nanofibrous membranes for water treatment: Fabrication, modification and applications," Progress in Polymer Science, vol. 77, pp. 69-94, 2018.
[31] H. Ma and B. S. Hsiao, "Electrospun nanofibrous membranes for desalination," in Current trends and future developments on (bio-) membranes: Elsevier, 2019, pp. 81-104.