

## واژه‌های کلیدی:

فرایند زیستی،  
زیست‌راکتور غشایی،  
فناوری غشا،  
تصفیه پساب

# مروری بر فناوری‌های غشایی در حال ظهور و پیشرفته برای تصفیه پساب

فرزاد مهرجو\*، محمدصابر باغخانی‌پور، امیر علم  
تهران، دانشگاه علم و صنعت، مرکز پژوهش و فناوری علم و توسعه

## چکیده ...

در طی سال‌ها، فرایندهای متداول تصفیه پساب تا حدودی در تصفیه پساب‌ها برای نقاط تخلیه موفق بوده‌اند. توسعه در فرایندهای تصفیه پساب برای قابل استفاده کردن مجدد پساب تصفیه شده در مصارف صنعتی، کشاورزی و خانگی ضروری است. فناوری غشایی به عنوان فناوری ایده‌آل برای تصفیه پساب و جریان‌های مختلف پساب ظهور کرده است. فناوری غشایی یکی از به‌روزترین پیشرفت‌هایی است که در کاهش بنیادی ناخالصی‌ها به سطوح موردنظر موفق بوده است. علی‌رغم داشتن موانع خاص، زیست‌راکتورهای غشایی (Membrane Bioreactors) برای تصفیه زیستی پساب مزایای زیادی نسبت به تصفیه معمولی دارند. این مقاله مروری، تمام جنبه‌های فناوری غشایی را که به‌طور گسترده در فرایندهای تصفیه پساب مورد استفاده قرار گرفته بررسی کرده است. و جنبه‌های اصلی فناوری غشا. طبقه‌بندی فرایندهای فناوری غشایی مطابق با فشار، غلظت، الکتریکی و حرارتی، کاربرد آن در فرایندهای مختلف صنایع، مزایا، معایب و افق آتی آن را پوشش داده است.

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

Elmotosee@iust.ac.ir

## ۱ مقدمه

مصرف آب در چند دهه اخیر به دلیل صنعتی شدن سریع، شهرنشینی و انفجار جمعیت به طور قابل توجهی افزایش یافته است. کمبود آب شیرین منجر به توسعه فنون جدید تصفیه شده است [۱]. صنایع مختلف پساب‌های خود را مستقیماً به محیط زیست تخلیه می‌کنند که اثرات نامطلوبی بر تنوع زیستی و اکوسامانه آبی دارند. آلاینده‌های پسماندی خطرناک که هر روز منتشر می‌شوند، چالشی برای حفظ محیط زیست هستند. هر روز تَن‌ها زباله جامد و مایع در سراسر جهان تولید می‌شود [۲]. با رشد روزافزون جمعیت و کاهش مکان‌های دفن پسماند، مدیریت دفع آلاینده‌ها موضوعی جدی است. در حال حاضر پیشرفت‌های فنی زیادی برای بررسی محدودیت‌ها انجام شده، اما هنوز راه زیادی در پیش است. هوا، خاک و آب در حال حاضر عواقب آن را برای مدت قابل توجهی متحمل شده است. پساب‌های سمی تولیدشده به‌طور عمده بر اکسیژن‌خواهی شیمیایی (Chemical Oxygen Demand) و اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (Biochemical Oxygen Demand)، جامدات معلق و محلول، کروم، مواد فعال در سطح (Surfactants) و سایر سمیت‌های مخازن آبی که در آن تخلیه می‌شوند، تأثیر می‌گذارد [۳]. بنابراین، این پساب‌ها باید به‌طور مؤثر تصفیه شوند تا از محیط زیست، آبزیان و انسان در برابر مسمومیت محافظت شود. توسعه غشاها در دهه ۱۹۶۰ شروع شد، زمانی که اولین کارخانه‌های نمک‌زدایی آب بر اساس فناوری اسمز معکوس (Reverse Osmosis) طراحی شدند. این فناوری یکی از روش‌های پذیرفته‌شده و مقرون به‌صرفه برای تصفیه پساب بود. با توجه به کاربردهای متنوع آن در بخش‌های مختلف، آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده آمریکا (United States Environmental Protection Agency) آن را به‌عنوان «بهترین فناوری موجود» شناخته بود. از مزایای فرایندهای غشایی می‌توان به مصرف انرژی کم، جداسازی مداوم و مقیاس‌پذیری آسان اشاره کرد [۴]. بسته به مواد تشکیل‌دهنده، غشاها می‌توانند آلی یا معدنی باشند. پلیمر آلی مصنوعی از غشاهای آلی برای فرایندهای جداسازی فشار-محور استفاده می‌کند. این پلیمرها شامل پلی‌اتیلن (Polyethylene)، پلی-تترافلوراتیلن (Polytetrafluorethylene)، پلی‌پروپیلن (Polypropylene) و استات سلولز (Cellulose Acetate) هستند. غشاهای ریزصافش (Microfiltration)، فراصافش (Ultrafiltration) و نانوصافش (Nanofiltration) از طیف گسترده‌ای از مواد مانند پلی‌پروپیلن (Polypropylene)، پلی‌وینیل دی‌فلوراید (Polyvinyl Difluoride)،

پلی‌سولفون (Polysulfone)، پلی‌اترسولفون (Polyethersulfone) و استات سلولز (CA) ساخته می‌شوند. همه این مواد غشایی ویژگی‌های بسیار متفاوتی دارند که برای صافش انواع مختلف آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا در این مقاله مروری به بررسی این فناوری‌های غشایی و خصوصیات آن‌ها برای تصفیه پساب پرداخته شده است.

## ۲ فرایندهای جداسازی غشا

فرایندهای جداسازی غشایی شامل جداسازی گونه‌های شیمیایی از طریق حالت میانی غشایی با تفاوت در سرعت انتقال است. این نرخ انتقال به نیروی محرک، تحرک و تمرکز اجزای جداگانه در داخل حالت بستگی دارد. اندازه مولکولی املاح، ساختار شکل‌شناسی غشا و میل ترکیبی شیمیایی، عوامل کلیدی برای جداسازی مؤثر اجزای شیمیایی هستند. کارایی جداسازی غشاها به انواع و مازول آن بستگی دارد [۵]. غشاها معمولاً به‌عنوان غشاهای همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد، آلی و معدنی، متخلخل و غیرمتخلخل و غشاهای کامپوزیتی طبقه‌بندی می‌شوند که در شکل ۱ نشان داده شده است.

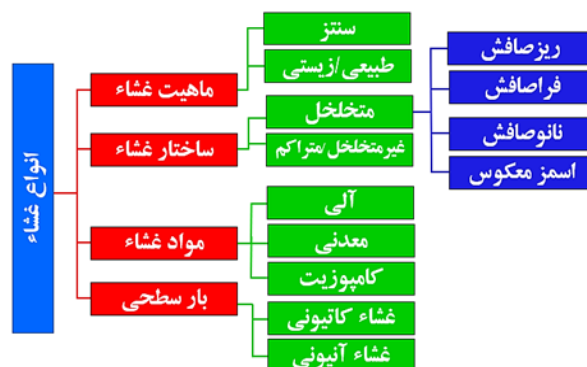
اصل فناوری غشا مبتنی بر اجازه انتخابی اجزای خاص برای عبور از غشا و در عین حال مسدود کردن عبور سایرین است. برای تسهیل این فرایند معمولاً نیروی محرک خارجی مورد نیاز است. برای درک آسان این موضوع، فرایند غشا بر اساس نوع نیروی محرک اعمال‌شده برای جداسازی اجزا در پساب طبقه‌بندی می‌شود. نوع متنوعی از نیروی محرک که تقسیم املاح را آغاز می‌کند شامل اختلاف فشار (ریزصافش (MF)، فراصافش (UF)، نانوصافش (NF) و اسمز معکوس (RO))، اختلاف غلظت در سراسر غشا که باعث انتشار یک گونه بین دو محلول می‌شود (دیالیز) و کاربرد میدانی بالقوه غشای تبادل یونی (Ion Exchange Membrane) که مهاجرت یون‌ها را در سراسر غشا آغاز می‌کند (دستگاه‌های الکترودیالیز و الکتروشیمیایی) [۶].

جدای از فنون مختلف جداسازی غشا، فناوری‌های ترکیبی و یکپارچه جدیدی نیز در زمان‌های اخیر توسعه یافته‌اند. تمام غشاهای سلولزی یا غیرسلولزی که برای تصفیه آب شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند، از پلیمرهای آلی مصنوعی تهیه می‌شوند. غشاهای ریزصافش (MF)، فراصافش (UF) از طیف گسترده‌ای از مواد مانند پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌وینیل دی‌فلوراید (PVDF)، پلی‌سولفون (PS)، پلی‌اترسولفون (PES) و استات سلولز (CA) ساخته می‌شوند. مواد مختلف مورد استفاده برای ساخت غشا دارای خواص متفاوت و pH متمایز، بار سطحی و آب‌گریز هستند. کاربرد کلی غشا تا حد زیادی تحت تأثیر ویژگی مواد

جداسازی غشایی براساس فشار، غلظت، الکتریک و دما طبقه‌بندی می‌شوند. (جدول ۱) [۷].

## ۲-۱ فرایند جداسازی غشایی فشار-محور

فرایندهای غشایی فشار-محور رایج‌ترین فناوری مورد استفاده برای تصفیه پساب هستند. این فناوری برای تغلیظ مجدد محلول رقیق بر اساس اعمال فشار برای جداسازی حالت‌های نفوذ و احتباس استفاده می‌شود. حالت تراوا در مقایسه با محلول نگه‌دارنده و خوراک دارای مقدار املاح کم است. فشار اعمال شده هزینه عملیاتی سامانه را تعیین می‌کند.



شکل ۱ نمودار دسته‌های مختلف غشای مورد استفاده در صنایع برای تصفیه پساب (طبقه‌بندی بر اساس ماهیت، ساختار، مواد و بار سطحی غشا).

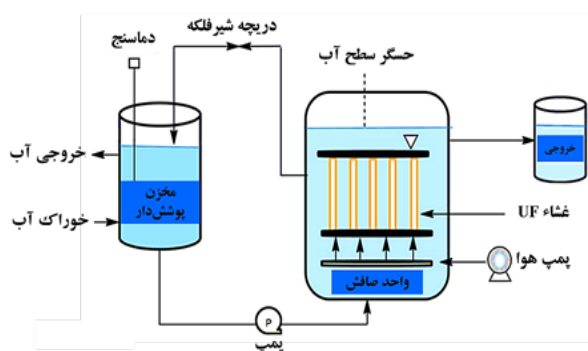
## ۲-۱-۱ ریزصافش (MF)

ریزصافش (MF) فرایند جداسازی فیزیکی حاوی غشاهای متخلخل است. این ماده جامدات محلول، کدورت و ریزموجودات را با عملکرد غربال بر اساس اندازه منافذ غشا

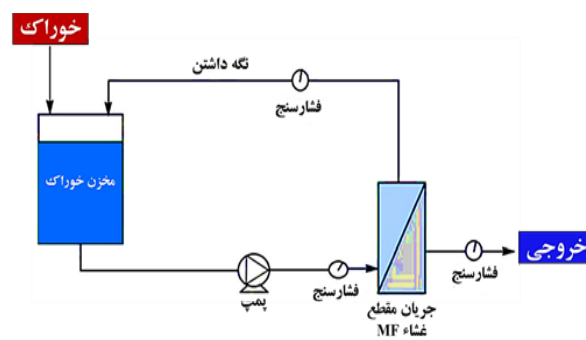
غشایی است. برای دستیابی به جداسازی مطلوب از طریق فنون جداسازی مبتنی بر غشا، انتخاب فرایندی مناسب با نیروی محرک، اندازه، شکل و غشا مناسب مورد نیاز است. فرایندهای

جدول ۱ طبقه‌بندی روش‌های جداسازی غشا.

مرجع	کاربرد	اساس جداسازی	فشار	اندازه منفذ	نوع غشا	فرایند جداسازی غشا	فرایندهای جداسازی
[۸]	صنایع غذایی و دارویی، تصفیه آب	غربال کردن	۰/۲-۱ اتمسفر	۰/۱۰-۰۵ میکرومتر	متخلخل	MF	فشار-محور
[۹]	صنایع نساجی، غذایی، دارویی، لبنیات، تصفیه آب	غربال کردن	۱۰-۱ اتمسفر	۱۰۰-۱ نانومتر	متخلخل	UF	
[۱۰]	نمک‌زدایی آب شور، تصفیه فاضلاب	انتشار-محلول	۲۵-۱۰ اتمسفر	۰/۱۰۰-۱ نانومتر	متخلخل	NF	
[۱۱]	نمک‌زدایی آب شور و دریا	انتشار-محلول	۸۰-۱۵ اتمسفر	کمتر از ۲ نانومتر	متخلخل	RO	
[۱۲]	بازیابی هیدروژن، هلیوم	انتشار-محلول	اختلاف فشار بخار (۱-۰/۰۰۱ اتمسفر)	-	غیرمتخلخل	تراوش تبخیری (Pervaporation)	غلظت-محور
[۱۳]	حذف اجزای آلی از آب	انتشار/ محلول (غشاهای غیرمتخلخل) جریان ناسن (غشاهای متخلخل)	اختلاف فشار جزئی	کمتر از ۱ میکرومتر	متخلخل/ غیرمتخلخل	جداسازی گاز	
[۱۴]	نمک‌زدایی آب دریا، جداسازی اسیدهای آمینه	عملکرد حذف دونان	اختلاف پتانسیل الکتریکی	-	متخلخل/ غیرمتخلخل	الکترودیالیز	الکتریک-محور
[۱۵]	نمک‌زدایی آب دریا، صنعت نیمه هادی	تعادل بخار-مایع	اختلاف فشار بخار	۰/۱-۲ میکرومتر	-	تقطیر غشایی	دما-محور



شکل ۳ نمودار فرایند فراصافش (UF) [۱۷].



شکل ۲ نمودار فرایند ریزصافش (MF) [۱۶].

مواد غذایی و غیره کاربرد دارد. فراصافش (UF) همچنین برای محافظت از غشای اسمز معکوس (RO) و به عنوان پیش تصفیه در اسمز معکوس (RO) استفاده می شود [۹]. در شکل ۳ نمودار فرایند فراصافش (UF) نشان داده شده است.

### ۲-۱-۳ نانوصافش (NF)

غشای نانوصافش (NF) اولین بار در اواخر دهه ۱۹۸۰ معرفی شد و خواصی بین غشای اسمز معکوس (RO) و فراصافش (UF) قرار دارد [۱۸]. در این فرایند، فشار هیدرواستاتیک برای انتقال مخلوط مولکولی به سطح غشا اعمال می شود. حلال و برخی املاح با وزن مولکولی کم در غشا نفوذ می کنند، در حالی که سایر اجزا باقی می ماند. حذف یون‌هایی که به شدت به فشار اسمزی می افزایند و در نتیجه به فشارهای عملیاتی کمتری نیاز دارند، کافی است. آب‌های بسیار آلوده قبل از نانوصافش (NF) نیاز به پیش تصفیه موفقیت آمیز دارند، اگرچه بخش‌های محلول نمی توانند توسط آن حذف شوند. کلر آزاد موجود در آب خوراک روی غشاها تأثیر می گذارد. غشای نانوصافش (NF) برای کاربردهای لبنی، پزشکی و تصفیه پساب و نمک زدایی استفاده می شود. این غشا همچنین برای نرم کردن آب و حذف محصولات جانبی از آب‌های سطحی و زیرزمینی شیرین مورد استفاده قرار می گیرد. غشاها مورد استفاده برای نانوصافش (NF) از ترکیبات استات سلولز (CA) یا کامپوزیت‌های پلی آمید (PA) تشکیل شده‌اند، یا می توانند شکل‌های اصلاح شده غشاهای فراصافش (UF) مانند پلی سولفون (PS) سولفون شده باشند [۱۰]. نمودار فرایند نانوصافش (NF) در شکل ۴ نشان داده شده است.

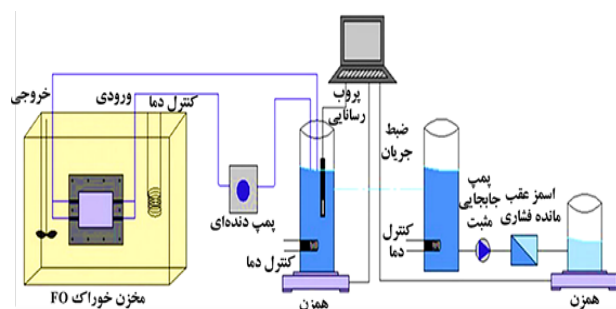
### ۲-۱-۴ اسمز معکوس (RO)

اسمز معکوس (RO) روش مبتنی بر فشار است که برای از بین بردن مواد محلول و ذرات کوچک تر استفاده می شود و

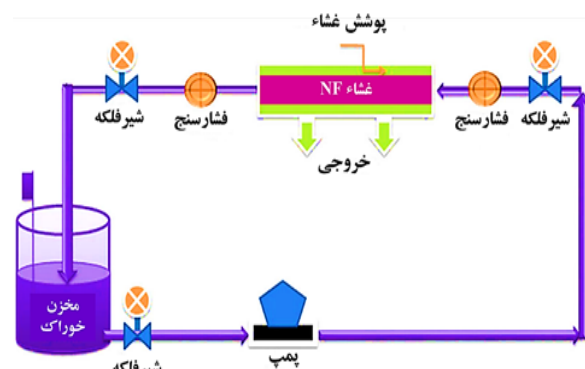
حذف می کند. اگر اندازه ذرات بزرگ‌تر از اندازه منافذ غشاها ( $0.1-0.2$  میکرومتر) باشد، می توان آن‌ها را به طور کامل حذف کرد، در حالی که کوچک‌تر از منافذ غشاها تا حدی حذف می شوند. این فرایند پیش تصفیه برای فراصافش (UF) و پس تصفیه برای صافش دانه‌ای در جهت کاهش رسوب است. در ریزصافش (MF)، مواد غشایی می تواند آلی یا معدنی باشد. غشاهای آلی از انواع مختلفی از پلیمرها مانند پلی وینیلیدین فلورید (PVDF)، پلی آمید (Polyamide)، پلی سولفون (PS)، سلولز استات (CA) و غیره تشکیل شده‌اند، در حالی که غشاهای معدنی از آلومینا متخلخل و فلزات تشکیل شده‌اند. برای جداسازی تعلیقی‌ها و امولسیون‌ها مناسب است و می تواند تا حدود ۴۰ درصد آلی را حفظ کند. این روش صافش‌ها عمدتاً رسوبات، جلبک‌ها، تک‌یاخته‌ها و باکتری‌ها را حذف می کنند، در حالی که آب ( $H_2O$ )، یون‌های تک‌ظرفیتی مانند  $Na^+$ ،  $Cl^-$ ، مواد محلول یا آلی، کلوئیدها و ویروس‌های کوچک می توانند از صافش عبور کنند [۲]. نمودار فرایند ریزصافش (MF) در شکل ۲ نشان داده شده است.

### ۲-۱-۲ فراصافش (UF)

غشاهای فراصافش (UF) صافی آب کم انرژی بسیار محبوبی هستند و در از بین بردن ریزموجودات بیماری‌زا، درشت‌مولکول‌ها و مواد معلق مفید هستند. این غشاها دارای اندازه منافذ تا حدود  $0.1$  میکرومتر در ابعاد هستند. با این حال، معایب آن شامل عدم توانایی در حذف برخی از آلاینده‌های معدنی محلول از آب و تمیز کردن مکرر برای اطمینان از جریان فشار مناسب آب هستند. برای جداسازی ذرات، فشار یا گرادیان غلظت از طریق غشاها مورد نیاز است. این غشاها پروتئین‌ها، اندوتوکسین‌ها، ویروس‌ها و سیلیس را حفظ می کنند. این روش در صنایعی مانند داروسازی، صنایع لبنی، نوشابه سازی، فرآوری



شکل ۵ نمودار فرایند اسمز مستقیم (FO) [۲۰].



شکل ۴ نمودار فرایند نانوصافش (NF) [۱۸].

آب بررسی شد. غشای اسمز مستقیم (FO) تجاری با استفاده از پلی-آگزادiazول-کو-هیدرازید (Polyoxadiazole-co-hy-drazide) و پلی تریازول-کو-آگزادiazول-کو-هیدرازید (Pol-tryiazole-co-oxadiazole-co-hydrazide) پلیمریزه شده و برای صاف کردن رنگ‌های آزو فعال از پساب تولیدشده از صنایع رنگ‌رزی نساجی استفاده می‌شود. خواص فیزیکی غشا را می‌توان به راحتی با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی و میکروسکوپ نیروی اتمی تعیین کرد [۱۵]. غشای متقارن با سطح صافش فعال ۱۰ سانتی متر مربع و به دلیل چگالی بالا و سطح بار منفی آن است. غشای اسمز مستقیم (FO) پلیمریزه شده می‌تواند به طور مؤثر غلظت بالایی از رنگ‌ها را حفظ کند. نمودار فرایند اسمز مستقیم (FO) در شکل ۵ نشان داده شده است.

## ۲-۲ فرایند جداسازی غشایی غلظت-محور

عملکرد سامانه غشایی زیستی توسط گرادیان غلظت در شرایط هم فشار و هم دما هدایت می‌شود. رایج‌ترین نمونه از غشای مصنوعی با استفاده از فرایند جداسازی غشایی متمرکز بر غلظت، کلیه مصنوعی است. اسمز مستقیم (FO) و دیالیز در این دسته قرار می‌گیرند، جایی که گرادیان غلظت برای جداسازی از طریق غشا غالب می‌شود.

### ۲-۲-۱ تراوش تبخیری

تراوش تبخیری برای حذف عناصر کمیاب اجزای فرار موجود در مخلوط مایع با فشار بخار از طریق غشای متخلخل/غیرمتخلخل استفاده می‌شود. این روش، نفوذ غشا و تبخیر را برای جداسازی مخلوط مایع بر اساس ترجیح آن‌ها جفت می‌کند. در جداسازی هیدروکربن‌ها (صنایع پتروشیمی) و ترکیبات آلی فرار استفاده می‌شود. در این روش اختلاف غلظت، نیروی محرکه است. این

فقط برای مولکول‌های آب قابل نفوذ است. فشار اعمال شده به اسمز معکوس (RO) باید کافی باشد تا آب از فشار اسمزی عبور کند. بازده غشای اسمز معکوس (RO) معمولاً از نفوذپذیری بالاتر، گزینش‌پذیری بیش‌تر و مقاومت بالاتر در برابر رسوب بهره می‌برد. به طوری که اسمز معکوس (RO) یکی از بهترین فرایندهای غشایی جداسازی موجود است. در این روش، آب تحت فشار قرار گرفته، با فشار وارد غشایی می‌شود که مواد معدنی و نیترات را صاف می‌کند. اسمز معکوس (RO) عمدتاً تمام مولکول‌ها را به جز آب حفظ می‌کند و به دلیل اندازه منافذ، فشار اسمزی مورد نیاز به طور قابل توجهی بیشتر از فشار اسمزی ریزصافش (MF) است. اسمز معکوس (RO) فرایند فشار بالا برای نمک زدایی آب نمک است. هر دو روش اسمز معکوس (RO) و نانوصافش (NF) اساساً با هم دارای اختلاف و جریان برخلاف گرادیان غلظت است. زیرا این سامانه‌ها از فشار برای وادار کردن آب استفاده می‌کنند تا از سمت فشار پایین به سمت فشار بالا برود. معایب غشاهای اسمز معکوس (RO) شامل استفاده از فشار بالا، در مقایسه با سایر فرایندهای غشایی گران و اغلب در برابر رسوب آسیب‌پذیر هستند. همچنین برای استفاده از این روش در شرایط خاص، پیش‌تصفیه بالا ضروری است [۱۹].

## ۲-۱-۵ اسمز مستقیم (Forward osmosis)

اسمز مستقیم (FO) سازوکاری است که در آن آب به دلیل گرادیان فشار اسمزی از طریق غشای نیمه‌تراوا از محلول خوراک به محلول کششی هدایت می‌شود. مزیت آشکار نسبت به فناوری غشای فشار-محور سنتی این است که عملکرد اسمز مستقیم (FO) بر فشار هیدرولیک بالا متکی نیست. بنابراین انگیزه‌ای برای صرفه‌جویی در هزینه‌های برق و تعمیر و نگهداری غشا (توانایی رسوب کم) ارائه می‌دهد. غشای اسمز مستقیم (FO) مهندسی شده و برای کارایی آن در نمک‌زدایی

می شوند. غلظت و گروه های یونی در کاربردهای مختلف استفاده شده است. حذف مواد آلی نامی به طور مؤثر توسط مبدل آنیونی نانومتخلخل انجام می شود. غشاهای تبادل یونی (IEMs) را می توان بر اساس عملکرد یون و استحکام پلیمری طبقه بندی کرد [۱۲]. مهم ترین نیروی محرک برای غشاهای تبادل یونی (IEMs) برهم کنش الکتروشیمیایی بین مولکول ها است.

## ۲-۴ فرایند جداسازی غشایی دما-محور

### ۲-۴-۱ تقطیر غشایی

تقطیر غشایی از سالیان دور روشی امیدوارکننده برای نمک زدایی آب دریا و تصفیه پساب است. تقریباً تمام درشت مولکول ها، کلئیدها، مواد فرار، غیرفرار، نمک ها در مقایسه با غشاهای آب دوست (Hydrophilic) توسط غشاهای آب گریز (Hydrophobic) حذف می شوند [۲۱]. این سامانه صافش غشایی به تجزیه زیستی مقاوم تر کمک می کند، بنابراین لجن کمتری تولید می شود و با وجود ارائه کیفیت بهتر پساب، باعث کاهش ردپا از این فرایند می شود. به دلیل پایداری فوق العاده، ارزان تر از زیست راکتور غشایی-اسمز معکوس (RO-MBR) است. همچنین توانایی محدودی در حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) از آب خوراک دارد.

## ۲-۵ غشای مایع (Liquid Membrane)

در این فرایند، لایه نازک از مایع آلی به عنوان مانع نیمه تراوا بین دو حالت آبی با ترکیبات مختلف عمل می کند. برخلاف سایر فرایندهای غشایی، غشای مایع (LM) به غشاهای جامد نیاز ندارد. این غشا دارای ویژگی جذاب گزینش پذیری بالا، استخراج تک مرحله ای و جداسازی است که مشخصه انتقال جرم غیرتعادلی است. غشای مایع (LM) را می توان به عنوان LM پشتیبانی شده، LM امولسیون و LM حجیم طبقه بندی کرد. غشای مایع (LM) پشتیبانی شده از تکیه گاه ریزمتخلخل بی اثر تشکیل شده که حالت آلی را می توان روی آن بی حرکت کرد. در امولسیون غشای مایع (LM)، لایه مایع غیرقابل اختلاط بین دو مایع امتزاج پذیر وجود دارد. غشای مایع (LM) حجیم از مسیر انتشار محدود، دور از لایه مرزی استفاده می کند [۲۲]. کاربرد اصلی فرایند غشای مایع (LM) شامل جداسازی یون های فلزی از پساب، جداسازی، بازیافت و غلظت اسیدها، تبدیل زیستی، جداسازی گازها و غیره است. اشکال عمده مرتبط با غشای مایع (LM)، ناپایداری رابط غشایی است که ممکن است به دلیل تفاوت فشار و آشفستگی در تنظیم این غشا باشد.

روش بر اساس عملکرد انتشار محلول است که منجر به تشکیل بخار در هنگام نفوذ می شود. بخار تشکیل شده در طول فرایند با اعمال فشار کم یا با جریان دادن محیط بی اثر در مرحله بعدی فرایند حذف می شود. نمونه ای از این روش جداسازی مخلوط اتانول-آب است [۱۲].

## ۲-۲-۲ جداسازی گاز

فرایند جداسازی گاز نیز بر اساس عملکرد مشابه فرایند تراوش تبخیری است. ابتدا جذب خوراک به داخل غشا و سپس انتشار تراواها از طریق غشا انجام می شود و در نهایت دفع تراوش در سمت کم فشار صورت می گیرد. انتخاب، عاملی کلیدی برای فرایند جداسازی گاز است. انتقال مولکول گاز از طریق غشا توسط عملکرد انتشار محلول انجام می شود. این فرایند به طور خاص برای جداسازی مخلوط گازی و بخارات قطبی با استفاده از غشاهای نامتقارن، همگن یا پلیمری قابل استفاده است. به طور کلی، پیکربندی لیف توخالی غشای پلیمری در جداسازی گاز استفاده می شود. اما مشکل اصلی با مواد غشایی زمانی ایجاد می شود که برای کاربردهای با دمای بالا مانند پالایشگاه های پتروشیمی و نفت، تصفیه گاز طبیعی، جداسازی هیدروکربن های سنگین و غیره استفاده شود [۱۵].

## ۲-۳ فرایند جداسازی غشایی الکتریک-محور

فرایند الکترودیالیز برای حذف اجزای یونی انتخابی از محلول آبی با اعمال توانایی الکتریکی از طریق غشاهای تبادل یونی (IEMs) استفاده می شود. غشاهای تبادل یونی (IEMs) از مواد پلیمری با گروه های بار یونی ثابت در ماتریس پلیمری ساخته شده اند و در طبیعت متراکم هستند. غشاهای تبادل یونی (IEMs) به دو نوع طبقه بندی می شوند که شامل غشاهای تبادل کاتیونی (Cation Exchange Membranes) و غشاهای تبادل آنیونی (Anion Exchange Membranes) هستند. غشاهای تبادل کاتیونی (CEMs) حاوی گروه هایی با بار منفی در ماتریس پلیمری خود هستند، در حالی که غشاهای تبادل آنیونی (AEMs) حاوی گروه هایی با بار مثبت هستند. فرایند الکترودیالیز بیشتر برای نمک زدایی آب دریا، حذف اسیدهای آلی از مواد غذایی و صنایع داروسازی استفاده می شود [۱۰].

## ۲-۳-۱ فرایند غشای تبادل یونی (IEM)

غشاهای تبادل یونی (IEMs) غشاهای نیمه تراوا هستند که در آن ها گروه های یونی با سازوکار پلیمری متصل می شوند. در این فرایند تبادل یون سیال و تبادل یون مغناطیسی با هم ترکیب

### ۲-۶-۳ فرایندهای اکسایش پیشرفته/انعقاد الکتریکی-MBR

کنترل این روش ترکیبی آسان است و سامانه می‌تواند رنگ‌ها و مواد ضد عفونی مانند آلاینده‌های دارویی را حذف کند. در طول عملیات، لجن کمتری تولید می‌شود و توانایی تولید رسوب کمتری دارد. مشکل اصلی آن این است که واقعاً در تصفیه فاضلاب‌های آلوده با کل مواد جامد معلق (TSS) بالا مؤثر نیست. هزینه عملیات بالا نیز کاربرد آن را محدود کرده است [۲۵].

### ۲-۶-۴ MBR دانه‌ای

این فرایند سرعت نیترات‌زایی و نیترات‌زدایی بالاتری دارد و در برابر ضربه مقاوم‌تر است. توانایی رسوب کم‌تری دارد و رد پای کم‌تری در حین کار بر جای می‌گذارد. اگرچه رسوب می‌تواند در مراحل بعدی عملیات به یک نگرانی جدی تبدیل شود و در طول راه‌اندازی برای تشکیل دانه‌ها زمان بیشتری طول می‌کشد [۲۶].

### ۲-۶-۵ زیست فیلم/ MBR محصور شده زیستی

این سامانه دارای سرعت نیترات‌زایی و نیترات‌زدایی خوبی است و تمایل کمتری به رسوب‌گیری دارد. همچنین می‌تواند غلظت جامدات معلق (SS) را کاهش دهد. اما رسوب شدید می‌تواند پس از مدت‌زمان کارکرد، عقب‌نشینی کند [۵].

### ۲-۶-۶ فرایند انعقاد غشایی

ترکیب انعقاد با صافش غشایی باعث افزایش حذف آلاینده‌ها و کاهش رسوب غشا می‌شود. بسیاری از محققان انعقاد را با صافش غشایی برای تصفیه آب‌های سطحی ترکیب کردند و از منعقدکننده‌هایی مانند کیتوزان، سولفات آلومینیوم، کلرید آلومینیوم، پلی آلومینیوم کلرید، کلرید آهن و سولفات آهن استفاده کردند. در این مطالعه، آن‌ها دریافتند که کیفیت نفوذ افزایش یافته و رسوب غشا کاهش یافته است. علاوه بر این، انعقاد با غشای فراصافش (UF) برای حذف یون‌های فلزات سنگین مانند آرسنیک و آنتیموان ترکیب شد [۲۷].

### ۲-۶-۷ فرایند جذب غشایی

فناوری جذب عمدتاً برای تصفیه آب استفاده می‌شود. ترکیبات آلی را می‌توان با پودر کربن فعال (Powdered Activated Carbon) حذف کرد. فرایند غشای جذب ترکیبی میزان رسوب غشا را کاهش خواهد داد. بسیاری از محققان اثر اندازه ذرات را بر رسوب غشا در سامانه PAC-UF گزارش کرده‌اند [۲۸].

نحوه انتقال جرم از طریق غشا توسط انتشار انجام می‌شود. با این حال، برخی سازوکارهای دیگر نیز مسئول جداسازی هستند که می‌تواند به صورت مرحله‌ای تعریف شوند. در ابتدا، انتشار در محلول خوراک در سراسر لایه مرزی صورت می‌گیرد و به دنبال آن جذب در سطح مشترک غشای خوراک انجام می‌شود. پس از آن، انتقال همرفتی در غشای انتشار و در سمت گیرنده در سراسر لایه مرزی رخ می‌دهد [۳].

### ۲-۶-۸ فرایندهای جداسازی غشای ترکیبی/یکپارچه

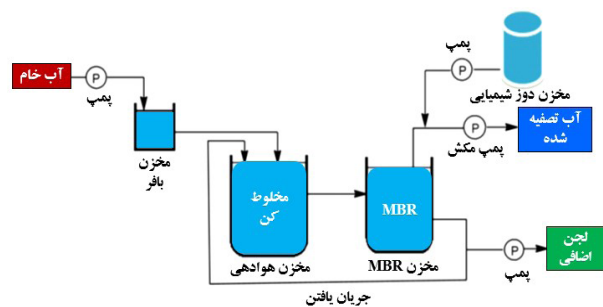
اشکال عمده در روش غشا برای تصفیه پساب رسوب غشایی است. برای غلبه بر این امر، فرایندهای ترکیبی با افزایش کیفیت آب و کاهش هزینه عملیاتی بررسی خواهند شد. فرایند ترکیبی، ترکیبی از دو فرایند که شامل فرایند غشایی مرسوم و دیگری فرایند مرسوم است [۲۳]. فرایند ترکیبی را می‌توان به دو گروه طبقه‌بندی کرد: (۱) ترکیبی از دو یا چند فرایند غشایی مختلف و (۲) ترکیبی از فرایند غشایی و فرایند دیگر [۶]. از آنجایی که هیچ روش تصفیه‌ای خاصی نمی‌تواند تمام اهداف تصفیه را برآورده کند، به طور کلی از چند روش برای حل مشکل استفاده می‌شود. در زیر به برخی از فناوری‌های غشای یکپارچه یا ترکیبی جدید توسعه یافته اشاره شده است.

### ۲-۶-۹ زیست راکتور غشایی-اسمز مستقیم (FO-MBR)

این فرایند نسبت به سایر روش‌های مرسوم انرژی کارآمدتر است. با این فرایند می‌توان فسفر را از خوراک بازیابی کرد و پساب با کیفیت مناسب تولید کرد. فرایند زیست راکتور غشایی-اسمز مستقیم (FO-MBR) همچنین به حذف آلاینده‌های آلی با موفقیت از کل مواد جامد معلق (Total Suspended Solid) حاوی پساب (بهتر از زیست راکتور غشایی-اسمز معکوس (RO-MBR)) کمک می‌کند. رسوب عمدتاً برگشت پذیر و کمتر از RO-MBR است. اشکال این روش شامل عدم قطعیت پایداری غشا است و با افزایش شوری، می‌تواند سینتیک میکروبی و جریان آب را کاهش دهد [۱۱].

### ۲-۶-۱۰ زیست راکتور غشایی-اسمز معکوس (RO-MBR)

RO-MBR جایگزین ارزان‌تر برای FO-MBR است. زیرا در مقایسه با MBR معمولی منجر به مصرف انرژی کم می‌شود. در مقایسه با فرایند FO-MBR، اثربخشی پایینی را برای تصفیه پساب با شوری بالا نشان می‌دهد. همچنین فرایند تصفیه آب با محصولی پایدار و با کیفیت بالا را فراهم می‌کند [۲۴].



شکل ۶ نمودار فرایند MBR.

## ۲-۶-۸ فرایند پیش صافش غشایی

در این روش برای حذف مواد درشت و شن و ماسه ریز موجودات از مواد بستر بسته بندی شده به عنوان موانع اولیه استفاده می شود. با استفاده از صافش های دانه ای می توان رسوب سطح غشا و گرفتگی منافذ را کاهش داد [۷].

## ۳ زیست راکتورهای غشایی (MBR)

زیست راکتورهای غشایی (MBR) فرایندی به روز و پیچیده برای تصفیه پساب است. این روش، تجزیه زیستی آلاینده ها را با لجن فعال، با جداسازی مستقیم جامد-مایع توسط صافش غشایی، با استفاده از غشای ریز صافش (MF) یا فراصافش (UF) ترکیب می کند [۲۱]. تصفیه پساب در سامانه های MBR به دو فرایند نیاز دارد، یعنی پردازش زیستی در راکتور زیستی رشد معلق برای واکنش های زیست شیمیایی (به عنوان مثال، اکسایش زیستی، نیترات زایی و نیترات زدایی) و روش صافش غشایی فیزیکی. در سطح جهانی، MBR در کاهش پساب صنعتی و شهری استفاده می شود. گزارش شده که نرخ رشد سالانه MBR در بازار جهانی حدود ۱۵ درصد بوده است. علاوه بر این، اثر مش غشاها با توجه به اندازه آلاینده کوتاه می شود و آن ها را با غشا در تماس با ریز موجودات تجزیه کننده در MBR برای تخریب کامل آن ها نگره می دارد [۲۲]. استفاده گسترده از MBR به دلیل مزایای قابل توجه آن از جمله کیفیت بالای آب تولیدی، توانایی تجزیه زیستی بالای آلاینده ها برای رد پای تجمعی کمتر بوده است. نمودار فرایند MBR در شکل ۶ نشان داده شده است.

## ۳-۱ انواع زیست راکتورهای غشایی (MBR)

### ۳-۱-۱ راکتور زیست فیلم بستر متحرک (MBBR)

راکتور زیست فیلم بستر متحرک (MBBR) و لجن فعال یکپارچه با فیلم ثابت (Integrated Fixed Film Activated Sludge) با تصفیه زیستی ثانویه رشد در تصفیه خانه های پساب همبستگی دارند. آب آلوده را می توان از طریق تجزیه و تحلیل کافی و کنترل محیطی به صورت زیستی تصفیه کرد. مواد حامل پلاستیکی کوچک از رشد زیست فیلم در MBBR پشتیبانی می کند. عملکرد راکتور در بسیاری از عملیات جفت شده برای حذف اکسیژن مورد نیاز زیست شیمیایی (BOD) و مواد مغذی نشان داده شده است. مزیت کلیدی این فرایند نسبت به راکتورهای لجن فعال، فشرده بودن آن است و شامل گردش مجدد لجن نمی شود. مزیت انعطاف پذیری برای اکثر سامانه های زیست فیلم است [۲۳].

### ۳-۱-۲ راکتور زیست فیلم بستر متحرک بی هوازی

دو فناوری بی هوازی مؤثر برای تصفیه پساب، فرایند بستر بی هوازی لجن با جریان رو به بالا (Up flow Anaerobic Sludge Blanket) و راکتورهای بستر توسعه یافته لجن دانه ای (Expanded Granular Sludge Bed) هستند. ثابت ترین پیکربندی MBBR بی هوازی جایی است که عملیات برشی بالا می تواند شارهای بالاتری را افزایش دهد. این موضوع به ویژه برای پساب های با مقاومت بالا با تمایل رسوب بالا مناسب است. با این حال، انرژی ورودی برای چنین عملیاتی نسبتاً بالا است. اخیراً، پیکربندی غوطه ور با موفقیت اجرا شده، که در آن از زیست گاز برای شستشوی غشا به همان روشی که هوا برای فرایند هوازی استفاده می شود، استفاده شده است. در حالی که فناوری MBBR بی هوازی مزیت کلیدی بازایی منابع را نسبت به معادل هوازی ارائه می کند، کیفیت آب تصفیه شده بالاتر و همچنین انعطاف پذیری عملیاتی بیشتری را نسبت به فرایند کلاسیک غیرغشایی فراهم می کند. با این وجود، توسط رسوب زدگی غشا و الزامات تمیز کردن بعدی محدود می شود. فرایندهای بی هوازی در تصفیه پساب صنعتی به دلیل تولید لجن کمتر و تبدیل مواد آلی به زیست گاز مفید بدون مصرف انرژی مفید هستند [۳۰].

### ۳-۱-۳ راکتور زیست فیلم غشایی (MBFR)

MBFR یا راکتور زیست فیلم هوادهمی غشایی (MABR)، فناوری نوظهور برای تصفیه پساب است. MBFR بر روی غشاهای قابل نفوذ گاز متمرکز است که بستری گازی را به زیست فیلم هایی که به طور طبیعی در سطح بیرونی غشا به روش ضدانتشار تشکیل شده اند، ارائه می دهد. این فناوری مزایای متمایزی را نسبت به روش های سنتی تصفیه زیست فیلم ارائه و امکان تصفیه پیشرفته را برای طیف وسیعی از ترکیبات احیا، اکسید شده و آلی فراهم می کند [۳۱].



#### ۳-۱-۴ غشاهای نانومواد MBR

نانومواد مسیری پایدار برای بهبود ویژگی‌های غشا و افزایش کارایی MBRs در تصفیه پساب است. غشاهای مبتنی بر نانومواد از نظر آب‌دوستی، زبری سطح، پایداری حرارتی، پایداری هیدرولیکی، رسوب‌پذیری، نفوذپذیری آب بالاتر و گزینش‌پذیری بالاتر به دلیل اندازه منافذ ریزشان کارآمدتر از غشاهای مرسوم هستند [۱۸]. انواع مختلف نانوالیاف (Nanofibers) MBR که به طور فعال در تصفیه پساب استفاده می‌شوند شامل NFs-MBR، نانوذرات (Nanoparticles) MBR، نانولوله‌های (Nanotubes) MBR، نانوبلورهای (Nanocrystals) MBR، نانوسیم‌های (Nanowires) MBR و نانوصفحات (Nanosheets) MBR هستند.

#### ۴ کاربرد فناوری غشایی برای تصفیه پساب

##### ۴-۱ تصفیه پساب صنعتی

ویژگی‌های پساب صنعتی را می‌توان به طور کلی با پارامترهای خاصی از جمله SS، BOD، COD، نیتروژن آمونیومی ( $\text{NH}_4^+\text{N}$ )، فلزات سنگین، pH، رنگ، کدورت و پارامترهای زیستی نشان داد. روش‌های غشایی معمولاً برای مدیریت پساب شهری استفاده شده که منجر به هزینه‌های بالاتر برای آب تصفیه‌شده و همچنین تخلیه پساب می‌شود. این روش به بازیابی مستقیم مواد بازیافتی، محصولات جانبی و حلال‌ها کمک می‌کند. همچنین به جلوگیری از جریان‌های عظیم و با آلودگی زیاد پساب کمک می‌کند [۲۲].

##### ۴-۲ صنایع غذایی

صنایع غذایی تعداد متنوعی از شرکت‌های تابعه مانند ماهی، لبنیات، دام، سبزیجات و بخش‌های تولید نوشیدنی را پوشش می‌دهد. در نتیجه، کیفیت پساب هر شاخه با بارهای آلی بالا متفاوت است. علاوه بر این، این پساب صنایع حاوی ترکیبات با ارزش افزوده بالا (مانند فنول‌ها، کاروتنوئیدها، پکتین، لاکتوز و پروتئین‌ها) هستند که می‌توان آن‌ها را استخراج کرد [۸]. اجرای موفقیت‌آمیز فناوری غشا شامل پساب تولید نشاسته سیب‌زمینی، آب-میوه، صنایع غذاهای دریایی و غیره بوده است.

##### ۴-۳ صنایع خمیر و کاغذ

فرایندها در صنایع خمیر و کاغذ بر استفاده از آب متمرکز و می‌تواند مقدار باور نکردنی پساب تولید کند. صافش غشایی امکان افزایش عملکرد سامانه تصفیه پساب موجود در صنعت

خمیر و کاغذ را فراهم می‌کند. معمولاً سامانه‌های MBR ۸۲-۹۹ درصد COD و تقریباً ۱۰۰ درصد SS را در دوره زمان نگه‌داری هیدرولیک ۲/۵-۰/۱۲ روزه استخراج می‌کنند. فرایند تصفیه نانوصافش (NF) باعث کاهش COD و رنگ پساب تا حدود ۹۰ درصد شده است.

##### ۴-۴ صنایع نساجی

صنعت فرآوری نساجی صنعت پرمصرف آب است، زیرا آب به‌عنوان محیط اولیه برای اعمال رنگ، مواد تکمیل‌کننده و حذف ناخالصی‌ها استفاده می‌شود. با روند اخیر تصفیه پساب صنعتی برای بازیافت انرژی و استفاده مجدد، ترکیب MBR بی‌هوازی و روش MBR هوازی روشی مناسب برای تصفیه پساب صنعت فرآوری نساجی خواهد بود. روش بی‌هوازی MBR برای بازیابی انرژی استفاده می‌شود و استفاده بعدی از MBR هوازی باعث کاهش رنگ برای تولید پساب برای استفاده مجدد بعدی می‌شود [۲۴].

##### ۴-۵ صنایع دباغی

دباغی فرایند پرمصرف آب است و در نتیجه دفع پساب یکی از بزرگ‌ترین مسائل دباغی‌ها است. سامانه ترکیبی از مواد معدنی MBR ارزان‌قیمت نشان داد که سامانه ترکیبی می‌تواند به راحتی کروم را حذف کند، در حالی که مواد معدنی اضافی رسوب را کاهش می‌دهند. MBR هوازی فناوری قابل دوام برای تصفیه پساب دباغی است، با این حال، اجرای آزمایشی و در مقیاس کامل حداقل است. توجه بیشتری باید به نقش احتمالی MBR بی‌هوازی در تصفیه پساب دباغی داده شود [۲۵].

##### ۴-۶ شیرابه دفن زباله

شیرابه ماده‌ای آلی با پساب با نیتروژن آمونیاک بالا است که در نتیجه نفوذ آب باران و رطوبت حاصل از زباله در محل‌های دفن زباله تولید می‌شود. ترکیب شیمیایی شیرابه به دوره و بلوغ محل تخلیه بستگی دارد. برای شیرابه جوان، اجزای آلی در مقایسه با شیرابه‌های قدیمی یا بالغ بسیار بیشتر است. کاهش موفقیت‌آمیز آلاینده‌های شیرابه را می‌توان با استفاده از جداسازی همراه با لخته‌سازی، MBR و RO تصفیه انجام داد [۲۶]. ترکیبی از روش‌های MBR و الکترواکسایش می‌تواند COD و  $\text{NH}_4^+\text{N}$  را کاهش دهد و سم‌زدایی قابل توجهی را دنبال کند [۳۲].

##### ۴-۷ پساب‌های دارویی

دفع صنعت داروسازی شامل دسته وسیعی از ترکیبات با

(سانتریفیوژ) گنجانده نمی‌شود. روش‌های غشایی دارای مزیت بسیار مطلوبی است که می‌تواند حجم زیادی را پردازش کند و به‌طور مداوم جریان‌هایی از محصولات را تولید کند [۳۴].

• روش‌های غشایی یک خدمت عملیاتی ساده، مبتنی بر اقتصادی ارزان و آسان برای جداسازی اجزای ناخواسته از پساب را ارائه می‌دهند. همچنین نیازی به سامانه‌های کنترلی پیچیده نیست. غشاها با توجه به اجزایی که باید جدا شوند با گزینش پذیری بالا تولید می‌شوند. مقادیر گزینش‌پذیری معمولاً برای جداسازی غشاء بالاتر از مقادیر رایج فراریت برای عملیات تقطیر است [۳۵].

• حذف باکتری‌ها و ذرات از طریق این فرایند بسیار راحت است. سادگی و عملیات روش اجازه می‌دهد تا کمتر کاربر توجه کند که آن‌ها را برای برنامه‌های کوچک سامانه مناسب می‌کند.

• تقریباً تمام یون‌های آلاینده و بیشتر غیریون‌های محلول حذف می‌شوند. همچنین برای سامانه‌های کوچک با درجه بالایی از نوسانات فصلی در تقاضای آب مناسب است. این روش به جریان و سطوح جامدات محلول در کل غیرحساس است و می‌تواند بلافاصله بدون حداقل دوره شکست کار کند.

• از آنجایی که بسیاری از پلیمرها و ترکیبات معدنی را می‌توان برای ساخت غشاها استفاده کرد، از این رو شانس بیشتری برای کنترل انتخاب جداسازی وجود دارد. روش‌های غشایی همچنین قادر به بازیابی اجزای جزئی از جریان خوراک بدون افزایش ارزش هزینه انرژی هستند [۳۶].

## ۶ معایب روش‌های جداسازی غشایی

معایب مرتبط با روش‌های جداسازی غشایی شامل دو پدیده اصلی یعنی رسوب غشایی و ماژول‌های غشایی است که در زیر به آن‌ها خواهیم پرداخت.

### ۶-۱ رسوب غشایی

رسوب غشایی به جنبه‌های مختلفی از راه‌اندازی متکی است، یعنی ویژگی‌های تغذیه (pH و قدرت یون)، ویژگی‌های غشا (زبری، آب‌گریزی، و غیره) و عوامل پردازش (سرعت جریان متقاطع، فشار غشاء و دما) [۲۰]. تعدادی از این متغیرها به یک شکل ترکیب می‌شوند تا رسوب غشایی را تشدید کنند. عواملی که می‌توان آن‌ها را مسئول خطا دانست در زیر به آن‌ها اشاره شده است.

### ۶-۱-۱ ویژگی‌های غشا

غشاهای آب‌دوست مانند غشاهای سرامیکی کمتر در معرض

ناهمگنی ساختاری، عملکرد، اعمال و عملکرد قابل توجه است. پساب دارویی حاوی سفالوسپورین پس از تصفیه با MBR باعث افزایش تخریب با افزایش زیستی می‌شود. MBRهایی که ریزموجودات ویژه را پیاده‌سازی می‌کنند، می‌توانند به عنوان رقبای بالقوه برای فرایندهای فعلی تصفیه فاضلاب دارویی عمل کنند [۲۱].

## ۴-۸ پساب‌های نفت و پتروشیمی

پساب‌های نفتی و پتروشیمی به دلیل ویژگی‌های سمی و نسوز خود که از منابع مختلفی مانند استخراج نفت خام، پالایش نفت، صنایع پتروشیمی، صنایع فلزی، روان‌کننده‌ها و خنک‌کننده‌ها و کارواش‌ها سرچشمه می‌گیرند، یکی از مشکل‌سازترین منابع آلاینده هستند. تأسیساتی در مقیاس کامل اصلاح‌شده از امولسیون‌زدایی (Demulsification) شیمیایی تا فرایند فراصافش (UF) همراه با روش MBR برای تصفیه پساب آلوده به نفت استفاده شد و قادر به حذف ۹۰ درصد COD و قطران کامل، گریس و فنول بود [۱۲].

## ۴-۹ تصفیه فاضلاب شهری

مقدار و نوع فاضلاب و آلاینده‌های شهری بسته به موقعیت هر کشور به دلیل تغییرات آب و هوایی، شرایط اجتماعی-اقتصادی، زیرساخت‌های خانگی و سایر عوامل متفاوت است. معمولاً برای از بین بردن آلاینده‌های ناخواسته فاضلاب شهری با تجزیه زیستی باکتریایی مواد آلی به مولکول‌های کوچکتر ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{PO}_4$ ، و غیره) در حضور اکسیژن تصفیه می‌شود [۲۲].

## ۵ مزایای روش‌های جداسازی غشایی

روش‌های جداسازی فناوری غشایی در مقایسه با روش‌های دیگر مزایای بسیاری را ارائه کرده‌اند که در زیر به برخی از این مزایا اشاره شده است [۳۳]:

• روش‌های جداسازی غشایی هم در مولکولی و هم در مقیاس سطح قابل اجرا هستند و بسیاری از جداسازی‌ها توسط فرایند غشایی برآورده می‌شوند. برای مشخص کردن فرایندهای جداسازی غشایی نیازی به تغییر حالت نیست. بنابراین، انرژی موردنیاز کمتر است، مگر اینکه نیاز به افزایش فشار جریان تغذیه برای هدایت جریان نفوذ در سراسر غشا باشد.

• روش‌های غشایی اقتصادی و سازگار با محیط زیست هستند زیرا ساده، کارآمد و بر اساس مواد غیرمضر تشکیل شده‌اند. از این روش برای نرم‌شدن آب استفاده می‌شود. مزیت اصلی که با روش‌های غشایی مرتبط است، انجام جداسازی مولکولی ملایم است که اغلب در سایر شکل‌های فرایندهای جداسازی

جامد معلق مایع مخلوط بالاتر است. با این حال، این مطالعه همچنین نشان داد که تأثیر آن بر رسوب‌گذاری هیچ یا بسیار کم است. هنگامی که غلظت مواد پلیمری خارج سلولی در خوراک بالا باشد، احتمال رسوب افزایش می‌یابد. همچنین افزایش گرانیوی منجر به افزایش رسوب غشا می‌شود [۳۰].

#### ۶-۱-۴ کنترل رسوب غشا

روش‌های مختلفی برای غلبه بر مشکلات ناشی از رسوب به کار می‌رود که در زیر توضیح داده شده است [۴۱].

الف) تزریق هوا: غلظت قطبی شدن و رسوب را کاهش می‌دهد. با وارد کردن تنش برشی بر روی سطح غشا، نوسانات تلاطم را کاهش می‌دهد. سرعت هوادهی بالا می‌تواند رسوب غشا را افزایش دهد.

ب) تمیزکردن مکانیکی: این کار با اعمال فشار محض به سطح غشا انجام می‌شود.

پ) کاهش فراصوت: در این سامانه، یک محیط آبی به کمک فراصوت برای حذف ذرات محلول و نامحلول استفاده می‌شود. اساساً قطبش غلظت را کاهش می‌دهد و زیست‌فیلم که سطح غشا را پوشانده، از بین می‌برد [۴۲].

ت) تمیزکردن شیمیایی: این روش شامل استفاده از اسیدها، بازها، اکسیدانها، مواد فعال در سطح و کلاتها و معرفی اخیر اسیدهای نیتريت و رامنولیبید برای از بین بردن رسوب از طریق انحلال و خنثی‌سازی بازهایی است که مسئول آب‌کافت، انحلال و صابون‌سازی مواد رسوب هستند [۴۳].

ث) سطوح آزادکننده رسوب و نانومواد: رسوب غشا را می‌توان با تهیه غشاهایی با سطوح ضد رسوب با خواص فیزیکی و شیمیایی سطح خاص کنترل کرد. سطوح آب‌دوست برای تنظیم اشکال مختلف رسوبات با سرکوب فعل‌وانفعالات غیراختصاصی سودمندی فوق‌العاده‌ای را نشان داده‌اند. پس از اصلاح غشاها توسط مواد ضد رسوب پلیمری یا نانومواد معدنی نیز برای کاهش رسوب شناخته شده است [۴۴].

ج) گیرافتادن سلولی: بی‌حرکتی سلولی (بی‌حرکتی غیرفعال و گیرافتادن سلولی) حرکت آزاد سلول‌ها را با محدود کردن یا اتصال آن‌ها به تکیه‌گاه جامد که سلول‌ها را به‌طور مصنوعی در ماتریس پلیمری متخلخل به دام می‌اندازد، محدود می‌کند. این روش نمی‌تواند تنها با حذف پاتوژن‌ها و ذرات بزرگ قابل اعتماد باشد، اما جایگزین خوبی برای سامانه‌های تصفیه زیستی مرسوم است [۴۵].

چ) کاهش زیستی: رویکرد جدیدتری با قابلیت‌های بالا در کنترل رسوب زیستی است. اتصال میکروبی یا تشکیل زیست‌فیلم از طریق

رسوب گرفتگی هستند، در حالی که غشاهای آب-گریز مانند غشاهای پلیمری بیشتر مستعد رسوب هستند. سطح ناهموار شیر برای جمع شدن ذرات کلئیدی روی سطح غشا در طول عملیات ایجاد می‌کند، رسوب‌گیری با افزایش زیری سطح افزایش می‌یابد. هرچه اندازه منافذ غشا بالاتر باشد، احتمال مسدود شدن توسط آلاینده بیشتر است، بنابراین احتمال رسوب بیشتر می‌شود [۳۷]. افزایش آب‌دوستی به معنی رسوب کمتر غشا است، در حالی که آب‌گریزی با افزایش تمایل به رسوب غشایی همراه است. غشاها به دلیل ریختن ذرات کلئیدی دارای بار منفی می‌شوند و بنابراین می‌توانند یون‌های دارای بار مثبت مانند  $Ca^{2+}$  و  $Al^{3+}$  را از جامدات معلق در مایع مخلوط جمع کنند و باعث رسوب غشایی معدنی شوند [۳۸].

#### ۶-۱-۲ شرایط عملیاتی

اجرای در حالت صافش جریان متقاطع، باعث تشکیل لایه کیک کم‌تری بر روی غشا می‌شود و در نتیجه احتمال رسوب غشا کمتر می‌شود. نرخ هوادهی بالاتر منجر به نرخ کمتر رسوب غشا می‌شود. دمای پایین توانایی رسوب غشا را افزایش می‌دهد، زیرا مواد پلیمری خارج سلولی بیشتری از باکتری آزاد می‌شوند و بار بیشتری از باکتری‌های رشته‌ای وجود دارد. نسبت COD/N بالاتر در خوراک، میزان رسوب غشا، راندمان بهتر غشا و زمان کار طولانی‌تر را کاهش می‌دهد [۳۹]. با این حال، گزارش‌ها همچنین نشان می‌دهند که نسبت COD/N پایین به معنی رسوب کم‌تر است. رسوب‌گیری با کاهش زمان نگهداری هیدرولیک افزایش می‌یابد. اگرچه، زمان ماند بیش از حد هیدرولیک منجر به تجمع عوامل رسوب‌کننده می‌شود. تولید مواد پلیمری خارج سلولی کم با کارکرد در زمان نگهداری جامدات بالا رسوب را محدود می‌کند. رسوب‌گیری در زمان نگهداری جامدات بسیار بالا افزایش می‌یابد، زیرا مواد جامد معلق در مایع مخلوط شده و گرانیوی لجن بالا را در خود جای می‌دهد. رسوب‌گیری با افزایش نرخ بارگذاری آلی افزایش می‌یابد. هنگامی که تولید مواد پلیمری خارج سلولی با افزایش نسبت خوراک به ریزموجودات از طریق مصرف زیست‌توده بالا افزایش می‌یابد، منجر به افزایش شدید رسوب می‌شود [۴۰].

#### ۶-۱-۳ عملکرد زیست‌توده/خوراک

رسوب غشا با اندازه لخته کم‌تر افزایش می‌یابد. مواد پلیمری خارج سلولی متصل که با افزایش شوری آزاد می‌شوند، باعث ایجاد رسوب بیشتر در غشا خواهند شد. کاهش pH منجر به افزایش رسوب غشا می‌شود. رسوب زیاد ناشی از مواد

کدام دارای مساحت ۲۰-۱۰ فوت مربع هستند که در اطراف لوله جمع‌آوری محوری محصور شده‌اند. مدول مارپیچی تجاری معمولی ۰/۶۶ فوت قطر و ۳/۳۳ فوت طول دارد. افت فشار توسط طرح‌های چندپوششی که در آن نفوذ از طریق لوله مرکزی حرکت می‌کند، کاهش می‌یابد [۴].

#### ۶-۲-۴ مدول‌های لیف توخالی

معمولاً، مدول‌های لیف توخالی ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر قطر و ارتفاع آن‌ها بین ۳ تا ۵ فوت است. آن‌ها عمدتاً با جریان تغذیه در قسمت بیرونی لیف کار می‌کنند. آب از مجرای لیف داخل غشا عبور می‌کند. تعداد زیادی الیاف با هم ترکیب شده و در رزین اپوکسی در دو انتها «به حالت گلدان» و در پوسته بیرونی قرار می‌گیرند [۴۷].

#### ۷ چشم‌اندازهای آینده

فناوری غشا به‌طور چشمگیری مدیریت آب و پساب را بهبود می‌بخشد. این فناوری کاربردهای گسترده‌ای را نشان می‌دهد و به‌عنوان روشی بسیار سودمند برای تصفیه پساب محسوب می‌شود [۴۸]. محققان جدید تا به امروز برای به‌کارگیری و توسعه مواد غشایی جدید و کارآمدتر، پلیمرهای ناهمگنی مانند پلی‌وینیلید-انفلوئوراید-هگزا فلئوئوروپروپیلن (Polyvi-nylid Enefluoride-Hexafluoropropylene) و پلی‌وینیلید-انفلوئوراید-تترا فلئوئورواتیلن (PVDF-Tetrafluoroethylene) در حال انجام هستند. در دهه گذشته، بیشتر تلاش‌ها عمدتاً بر روی استفاده از رویکردهای نوین و نوآورانه برای حل مسئله رسوب غشایی در MBR متمرکز شده است [۳۰]. در آزمایش‌های اخیر روی استفاده از نانومواد، گیرافتادن سلولی، اصول زیستی و رویکردهای مبتنی بر الکتریکی برای مدیریت رسوب غشایی کار کرده‌اند. این روش‌های جدید مدیریت رسوب غشایی کارایی بالایی را نشان داده‌اند [۷]. همچنین، کاربرد نانولوله‌های کربنی (Carbon Nanotubes) و غشاهای کاغذ-باکی (Buckey) در حال آزمایش هستند. با این حال، معرفی این روش‌ها برای MBRهای مقیاس بزرگ نیاز به مطالعه و بررسی بیشتری دارد. علاوه بر این، تنظیم رسوب غشایی به بیش از یک راه‌حل نیاز دارد [۴۹]. رسوب غشایی هنوز مشکل مهمی در زمینه روش‌های غشایی، به‌ویژه فناوری غشای زیستی است که باید در سال‌های آینده مورد توجه قرار گیرد [۱۵]. این مقاله مروری تلاشی برای خلاصه کردن فناوری‌های اصلی غشا با تمرکز بر فناوری زیست‌غشایی با سازوکار MBR، انواع و کاربرد آن‌ها، ادغام سامانه‌های MBR، ذکر محاسن و معایب

مهار سنتز آدنوزین تری فسفات (Adenosine Triphosphate) مهار می‌شود. آنزیم‌هایی (پروتئیناز K، تریپسین، سوبتیلیسین، و غیره) که مواد پلیمری خارج سلولی را هدف قرار می‌دهند، می‌توانند برای جلوگیری از اتصال اولیه میکروبی به جای ایجاد اختلال در زیست‌فیلم ایجاد شده استفاده شوند. پروتئاز برای کنترل غشاهای برگشت‌ناپذیر با وجود معایب (بی‌ثباتی، دما و pH) بسیار بهتر از مواد شیمیایی سنتی است [۴۶].

ح کاهش مبتنی بر الکتریکی: الکتروفورز و دافعه الکترواستاتیکی و نیروهای اعمال شده توسط میدان‌های الکتریکی بر ذرات باردار می‌توانند رسوب غشا را با روش‌های الکتریکی مهار کنند. برای کنترل رسوب در MBR، عمدتاً خارجی مانند انعقاد الکتریکی و الکتروفورز، یا داخلی مانند سلول‌های سوختی میکروبی استفاده می‌شود.

#### ۶-۲-۲ مدول‌های غشایی

برای دستیابی به جداسازی مورد نیاز، کارخانه‌های غشایی صنعتی به صدها تا هزاران مترمربع غشا نیاز دارند. راه‌های زیادی برای بسته‌های غشایی اقتصادی وجود دارد تا سطح وسیعی را برای جداسازی مؤثر و کارآمد فراهم کنند [۷]. معمولاً از طرح‌های مدول‌های غشایی برای جلوگیری از رسوب غشایی استفاده می‌شود. ماژول‌های غشایی که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل صفحه و قاب، مارپیچی، لوله‌ای و لیف توخالی هستند.

#### ۶-۲-۱-۱ مدول‌های صفحه و قاب

یکی از انواع اولیه سامانه‌های غشایی، ماژول‌های صفحه و قاب هستند که با مدول‌های مارپیچی و لیف توخالی جایگزین می‌شوند، زیرا نسبتاً ارزان‌تر از ماژول‌های صفحه و قاب هستند. در حال حاضر، مدول‌های صفحه و قاب در فرایندهای اسمز معکوس (RO) و فراصافش (UF) با شرایط رسوب بسیار کم استفاده می‌شوند [۴].

#### ۶-۲-۲-۲ ماژول‌های لوله‌ای

مدول‌های لوله‌ای مخصوصاً زمانی استفاده می‌شوند که نیاز به مقاومت بالا در برابر رسوب غشایی وجود داشته باشد، که معمولاً به کاربردهای فراصافش (UF) محدود می‌شود. این غشاها حاوی لوله‌های کوچکی با قطر ۱-۰/۵ سانتی‌متر هستند که در داخل یک لوله بزرگ جاسازی شده‌اند. تعداد زیادی از لوله‌ها به صورت توالی در داخل سامانه غشایی لوله‌ای نگه‌داری می‌شوند [۳۱].

#### ۶-۲-۳ ماژول‌های مارپیچی

مدول‌های مقیاس تجاری حاوی چند پوشش غشایی که هر

می‌تواند در سایر حوزه‌های نوظهور نیز مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع ممکن است در برابر موانع شیمیایی و مکانیکی نیز مقاوم باشد. در نتیجه، می‌توان گفت که فناوری غشایی پیشرفته قطعاً در حل مسائل فرایند تصفیه پساب و القای عملکرد طولانی‌مدت مفید خواهد بود.

آن‌ها بوده است. همچنین اشکال عمده غشا، یعنی رسوب‌گیری و خط‌مشی‌های ضد رسوب آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سال‌هاست که تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. هرچند هنوز از بسیاری جهات فضا برای اصلاحات وجود دارد. با توجه به موفقیت MBRهای معمولی، فناوری نانومواد MBR

## مراجع

1. Kaushik G., Bioremediation of Industrial Effluents :Distillery Effluent in Applied Environmental Biotechnology Present Scenario and Future Trends, *India: Springer*, 1-167, **2015**.
2. Bharagava R.N., Chowdhary P., Emerging and Ecofriendly Approaches for Waste Management, *Singapore: Springer*, 1-435, **2019**.
3. Sen T.K., Review on Dye Removal from its Aqueous Solution into Alternative Cost Effective and Non-Conventional Adsorbents, *Journal of Chemical Process Engineering*, 1-11, **2014**.
4. Fritzmann C., Lowenberg J., Wintgens T., Melin T., State of the Art of Reverse Osmosis Desalination, *Desalination*, 216, 1-76, **2007**.
5. Sonune A., Ghate R., Developments in Wastewater Treatment Methods, *Desalination*, 167, 55-63, **2004**.
6. de Gisi S., Notarnicola M., Industrial Wastewater Treatment, *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. 1 Ohio, *United States: Elsevier*, 23-42, **2017**.
7. Ezugbe E.O., Rathilal S., Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review, *Membranes (Basel)*, 10, 89, **2020**.
8. Radjenovic J., Petrovic M., Barcelo D., Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology Cytotreat View Project SEA-On-A-CHIP View Project, *Article Handbook Environmental Chemistry*, 5, 37-101, **2008**.
9. Gitis V., Hankins N., Water Treatment Chemicals: Trends and Challenges, *Journal of Water Process Engineering*, 25, 34-38, **2018**.
10. Bolong N., Ismail A.F., Salim M.R., Matsuura T., A Review of The Effects of Emerging Contaminants in Wastewater and Options for Their Removal, *Desalination*, 239, 229-246, **2009**.
11. Mulligan C.N., Yong R.N., Gibbs B.F., Surfactant-Enhanced Remediation of Contaminated Soil: A Review, *Engineering Geology*, 60, 371-380, **2001**.
12. Ahmadian M., Ravanchi M.T., Kaghazchi T., Kargari A., Application of Membrane Separation Processes in Petrochemical Industry: A Review, *Desalination*, 235, 199-244, **2009**.
13. Abedini R., Nezhadmoghadam A., Application of Membrane in Gas Separation Processes: Its Suitability and Mechanisms. *Petroleum and Coal*, 52, 69-80, **2010**.
14. Ghaly A.E., Ananthashankar R., Alhattab M.V., Ramakrishnan V.V., Production, Characterization and Treatment of Textile Effluents: A Critical Review, *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 5, 1-18, **2013**.
15. Ismail A.F., Khulbe K.C., Matsuura T., Reverse Osmosis, *Reverse Osmosis*, 227, 395-405, **2018**.
16. Singh G., Kumar Bulasara V., Preparation of Low-Cost Microfiltration Membranes from Fly Ash, *Desalination and Water Treatment*, 53, 1204-1212, **2015**.
17. Kazemimoghadam M., Mohammadi T., Chemical Cleaning of Ultrafiltration Membranes in the Milk Industry, *Desalination*, 204, 213-218, **2007**.
18. Waite T., Fane A., Schafer A., Nanofiltration: Principles and Applications, *Journal American Water Works Association*, 1, 1-560, **2005**.
19. Srinivasan A., Ahilan B., Divya C.M., Divya M., Aanand S., Srinivasan A., et al, Bioremediation an Ecofriendly Tool for Effluent Treatment: A Review, *International Journal of Applied Research*, 1, 530-537, **2015**.
20. Elimelech M., Mi B., Organic Fouling of Forward Osmosis Membranes: Fouling Reversibility and Cleaning Without Chemical Reagents, *Journal of Membrane Science*, 348, 337-345, **2010**.
21. Peters T., Membrane Technology for Water Treatment, *Chemical Engineering & Technology*, 33, 1233-1240, **2010**.
22. Jyoti J., Alka D., Jitendra., Kumar S., Application of Membrane Bioreactor in Wastewater Treatment: A Review, *International Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 3, 155-122, **2013**.
23. Magara Y., Kunikane S, Advanced Membrane Technology for Application to Water Treatment, *Water Science and Technology*, 37, 91-99, **1998**.
24. Collivignarelli M.C., Abba A., Carnevale Miino M., Damiani S., Treatments for Color Removal from Wastewater: State of The Art, *Journal of Environmental Management*, 236, 727-745, **2019**.
25. Ahmad A., Mohammad-Setapar S.H., Chuong C.S., Khattoon A., Wani V.A., Kumar R., Recent Advances in New Generation Dye Removal Technologies: Novel Search for Approaches to Reprocess Wastewater, *RSC Advances*, 21, 182-188, **2015**.
26. Koc-Jurczyk J., Removal of Refractory Pollutants from Landfill Leachate Using Two-Phase System, *Water Environment Research*, 86, 74-80, **2014**.
27. Pavithra K.G., Sentil Kumar P., Jaikumar V., Sundar Rajan P., Removal of Colorants from Wastewater: A Review on Sources and Treatment Strategies, *Journal of Industrial and*

- Engineering Chemistry*, 75, 1-19, **2019**.
28. Zoubeik M., Ismail M., Salama A., Henni A., New Developments in Membrane Technologies Used in the Treatment of Produced Water: A Review, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43, 2093-2118, **2018**.
29. Jefferson B., Bixio D., Membrane Bioreactor Technology for Wastewater Treatment and Reuse, *Desalination*, 187, 271-282, **2006**.
30. Chang I.S., Le Clech P., Jefferson B., Judd S., Membrane Fouling in Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment, *Journal of Environmental Engineering*, 128, 1018-1029, **2002**.
31. Valladares Linares R., Fortunato L., Farhat N.M., Bucs S.S., Staal M., Fridjonsson E.O., Mini-Review: Novel Non-Destructive in Situ Biofilm Characterization Techniques in Membrane Systems, *Desalination and Water Treatment*, 57, 22894-22901, **2016**.
32. Babuponnusami A., Muthukumar K., A Review on Fenton and Improvements to the Fenton Process for Wastewater Treatment, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 557-572, **2014**.
33. Gao W., Liang H., Ma J., Han M., Chen Z., Han Z., Membrane Fouling Control in Ultrafiltration Technology for Drinking Water Production: A Review, *Desalination*, 272, 1-8, **2011**.
34. Qu F., Liang H., Zhou J., Nan J., Shao S., Zhang J., et al., Ultrafiltration Membrane Fouling Caused by Extracellular Organic Matter (EOM) From *Microcystis Aeruginosa*: Effects of Membrane Pore Size and Surface Hydrophobicity, *Journal of Membrane Science*, 449, 58-66, **2014**.
35. Wang N., Li X., Yang Y., Zhou Z., Shang Y., Zhuang X., Photocatalysis-Coagulation to Control Ultrafiltration Membrane Fouling Caused by Natural Organic Matter, *Journal of Cleaner Production*, 265, 121790, **2020**.
36. Wang H., Park M., Liang H., Wu S., Lopez I.J., Ji W., et al., Reducing Ultrafiltration Membrane Fouling During Potable Water Reuse Using Pre-Ozonation, *Water Research*, 125, 42-51, **2017**.
37. Liao Y., Bokhary A., Maleki E., Liao B., A Review of Membrane Fouling and its Control in Algal-Related Membrane Processes, *Bioresource Technology*, 264, 343-358, **2018**.
38. Liu T., Drews A., Membrane Fouling in Membrane Bioreactors-characterizations, Contradictions, Cause and Cures, *Journal of Membrane Science*, 363, 1-28, **2010**.
39. Hilal N., Ogunbiyi O.O., Miles N.J., Nigmatullin R., Methods Employed for Control of Fouling in MF and UF Membranes: A Comprehensive Review, *Separation Science and Technology*, 40, 1957-2005, **2005**.
40. Vrouwenvelder J.S., van Paassen J.A.M., Wessels L.P., van Dam A.F., Bakker S.M., The Membrane Fouling Simulator: A Practical Tool for Fouling Prediction and Control, *Journal of Membrane Science*, 281, 316-324, **2006**.
41. Iorhemen O.T., Hamza R.A., Tay J.H., Membrane Fouling Control in Membrane Bioreactors (MBRs) Using Granular Materials, *Bioresource Technology*, 240, 9-24, **2017**.
42. Peng N., Widjojo N., Sukitpaneenit P., Teoh M.M., Lipscomb G.G., Chung T.S., Evolution of Polymeric Hollow Fibers as Sustainable Technologies: Past, Present, and Future, *Progress in Polymer Science*, 37, 1401-1424, **2012**.
43. Mishima I., Nakajima J., Control of Membrane Fouling in Membrane Bioreactor Process by Coagulant Addition, *Water Science and Technology*, 59, 1255-1262, **2009**.
44. Bagheri M., Akbari A., Mirbagheri S.A., Advanced Control of Membrane Fouling in Filtration Systems Using Artificial Intelligence and Machine Learning Techniques: A Critical Review, *Process Safety and Environmental Protection*, 123, 229-252, **2019**.
45. Ahmad A., Mohd-Setapar S.H., Chuong C.S., Khatoon A., Wani W.A., Kumar R., et al., Recent Advances in New Generation Dye Removal Technologies: Novel Search for Approaches to Reprocess Wastewater, *RSC Advances*, 5, 30801-30818, **2015**.
46. Kimura K., Oki Y., Efficient Control of Membrane Fouling in MF by Removal of Biopolymers: Comparison of Various Pretreatments, *Water Research*, 115, 172-179, **2017**.
47. Togo N., Nakagawa K., Shintani T., Yoshioka T., Takahashi T., Kamio E., Osmotically Assisted Reverse Osmosis Utilizing Hollow Fiber Membrane Module for Concentration Process, *ACS Publications*, 58, 6721-6729, **2019**.
48. Mbakop S., Nthunya L.N., Onyango M.S., Recent Advances in the Synthesis of Nanocellulose Functionalized-Hybrid Membranes and Application in Water Quality Improvement, *Processes*, 9, 611, **2021**.
49. Bouhid de Aguiar I., Schroen K., Microfluidics Used as A Tool to Understand and Optimize Membrane Filtration Processes, *Membranes*, 10, 316, **2020**.

