

گرفتگی غشاء در زیست‌راکتور غشایی: سازوکار، انواع، عوامل مؤثر و روش‌های کاهش

الهام عبدالله‌زاده شرقی*، لیلا داوری‌پناه

استادیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه مواد و انرژی

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۶/۲۰

پیام‌نگار: e.abdollahzadeh@merc.ac.ir

چکیده

در طول سه دهه اخیر زیست‌راکتورهای غشایی (MBR) برای تصفیه انواع مختلف فاضلاب شهری و صنعتی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. اما، گرفتگی غشاء و هزینه‌های هنگفت غشاء موانع اصلی برای کاربرد گسترده‌تر MBRها به‌شمار می‌آیند. از این‌رو، درک بهتر از گرفتگی غشاء نه تنها می‌تواند کلید حل مشکلات باشد، بلکه یکی از عوامل اصلی استفاده هرچه بیشتر از فرایندهای غشایی در آینده به‌حساب می‌آید. در طول دهه اخیر، تحقیقات چشمگیری برای فهم گرفتگی غشاء در MBR انجام شده‌است. در این مقاله، با هدف کنترل و کاهش گرفتگی غشاء در سیستم‌های MBR، در ابتدا سازوکارهای گرفتگی و انواع مختلف گرفتگی از منظر گرفتگی قابل رفع شدن و غیرقابل رفع شدن و برگشت‌ناپذیر، و نیز گرفتگی زیستی، گرفتگی مواد آلی و گرفتگی مواد غیرآلی مورد بحث قرار گرفته است. سپس عوامل مؤثر بر گرفتگی غشاء، شامل خواص فیزیکی غشاء، خواص رشدمایه و زیست‌توده و شرایط عملیاتی به‌طور کامل بررسی و درنهایت روش‌های کاهش گرفتگی MBR بیان شد.

کلیدواژه‌ها: زیست‌راکتور غشایی (MBR)، گرفتگی غشاء، سازوکار گرفتگی، محصولات محلول میکروبی (SMP)، مواد بسپاری خارج سلولی (EPS)، کاهش گرفتگی MBR.

۱. مقدمه

تصفیه انواع مختلف فاضلاب شهری و صنعتی کاربرد گسترده یافته‌اند. MBR ترکیبی از سامانه زیستی و غشایی است و با توجه به مزایای منحصر به فردش، مانند خروجی فاضلاب با کیفیت بالا، به یک فناوری پیشرفته نو در تصفیه خانه فاضلاب تبدیل شده است [۱ و ۲]. طبق گزارش بی‌بی‌سی، در سال ۲۰۱۴ بازار جهانی MBR، ۴۲۵/۷ میلیون دلار بوده که با نرخ رشد ۱۲/۸٪ پیش‌بینی شده است در سال ۲۰۱۹ به بیش از ۷۷۷/۷ میلیون دلار برسد [۳].

با توجه به بحران آب و خشک‌سالی در ایران، و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفع فاضلاب، بازیافت آب از فاضلاب‌ها در حکم یکی از منابع پایدار آب، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در طول پنج دهه اخیر، زیست‌راکتورهای غشایی (MBR) به عنوان یکی از برترین فناوری‌ها در عرصه بازیافت آب از فاضلاب، برای

* البرز، کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده انرژی، گروه محیط زیست
1. Membrane Bioreactor

درآمده‌اند [۳۳-۳۰ و ۱].

همانطور که گفته شد، میزان گرفتگی غشاء به پارامترهای متعددی بستگی دارد و تاکنون، هنوز هم درک اساسی از آنها فراهم نیامده و بنابراین این روابط هنوز نامشخص‌اند [۲۴]. در این مقاله، برای درک بهتر پدیده گرفتگی غشاء و روش‌های کاهش آن، با توجه به مطالعات جامع مقالات مختلف، در ابتدا سازوکار گرفتگی غشاء شامل گرفتگی حفره‌ها، تشکیل کیک، تشکیل لایه ژل و فشار اسمزی و انواع مختلف گرفتگی از منظر گرفتگی قابل رفع شدن، غیر قابل رفع شدن، و برگشت‌ناپذیر، و نیز گرفتگی زیستی، گرفتگی مواد آلی، و گرفتگی مواد غیرآلی بحث خواهد شد. سپس، عوامل مؤثر بر گرفتگی غشاء شامل خواص فیزیکی غشاء، خواص رشدمایه^۴ و زیست‌توده و شرایط عملیاتی، به طور کامل بررسی و در نهایت روش‌های کاهش گرفتگی غشاء در MBR بیان خواهد شد.

۲. سازوکار گرفتگی غشاء

گرفتگی غشاء، عبارت است از رسوب نامطلوب و تجمع ریزاندامگانها، کلونیدها، مواد حل شده و بقایای سلول در/ بر روی غشاء، که به کاهش شار عبوری (در حالت فشار ثابت) یا افزایش فشار عبوری از غشاء (TMP)^۵ (در حالت شار ثابت) می‌انجامد. به طور کلی، سازوکار گرفتگی غشاء در سامانه MBR از قرار زیر است که برخی از آن‌ها را در شکل (۱) مشاهده می‌کنید:

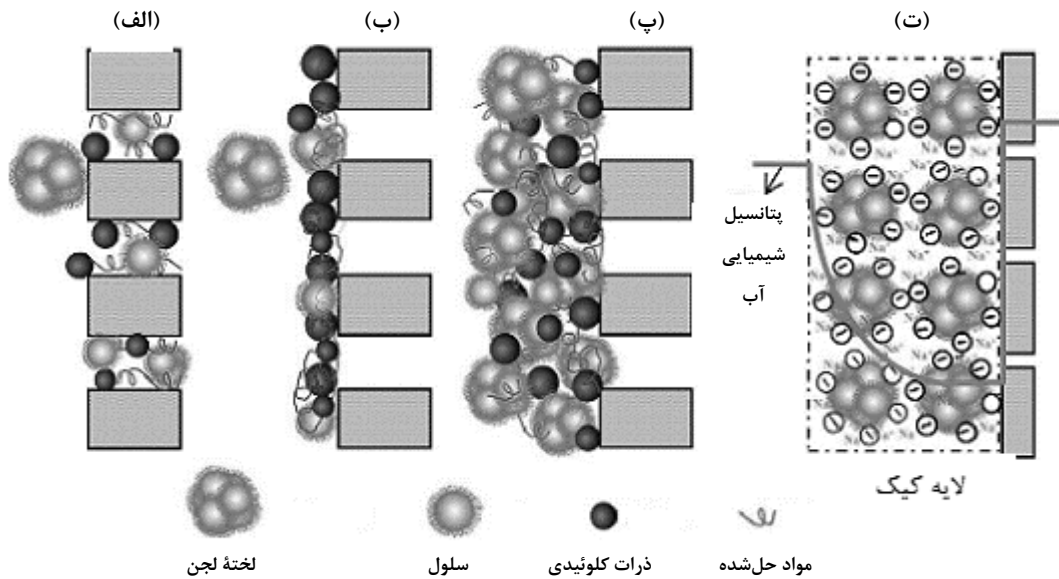
۱. جذب ترکیبات حل شده یا کلونیدی در/ بر روی غشاء (گرفتگی حفره‌ها)؛
۲. چسبندگی عوامل گرفتگی^۶ شامل EPS، SMP، مواد آلی محلول (DOM)^۷، خوشه‌های بسپارهای زیستی (BPC)^۸، کلونیدها، لخته‌های لجن و مواد آلی و غیرآلی؛
۳. تشکیل یک لایه کیک در سطح غشاء؛
۴. تثبیت لایه کیک؛
۵. مسدود شدن حفره‌ها و تشکیل یک لایه ژل مانند و چسبنده بر روی غشاء ناشی از تکثیر سلول‌ها و تولید EPS؛
۶. جدا شدن ترکیبات عامل گرفتگی، عمدتاً به واسطه وارد آمدن نیروهای برشی؛
۷. تغییرات مکانی و زمانی ترکیبات رسوبی در خلال عملیات طولانی مدت (مثلاً، تغییر جمعیت باکتریایی و ترکیبات زیست‌بسپار در لایه کیک)؛ و
۸. اثر فشار اسمزی [۱۹].

4. Substrate
5. Transmembrane Pressure
6. Membrane Foulants
7. Dissolved Organic Matters
8. Biopolymer Clusters

مشکل اصلی فناوری MBR در مقایسه با فرایند لجن فعال سنتی، هزینه‌های هنگفت آن است. در حالی که در طول سال‌های اخیر هزینه مدول غشاء به طور چشمگیری کاهش یافته و به کاهش در هزینه‌های سرمایه‌ای منجر شده است. اما کاهش گرفتگی غشاء منجر به افزایش تقاضای انرژی شده است که سهم اصلی در هزینه‌های عملیاتی MBR دارد. گرفتگی غشاء از طریق کاهش عملکرد سیستم در میزان فاضلاب خروجی، کاهش طول عمر غشاء، و در نتیجه افزایش هزینه تعویض غشاء و نیز افزایش میزان انرژی مورد نیاز برای هوادهی (حدود ۷۰٪ انرژی کل)، به افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌انجامد [۴]. در دو دهه اخیر، به اعتبار پیشرفت‌های زیاد در طراحی و فناوری غشاء، افزایش طول عمر غشاء‌ها از ۳ به ۸ سال و کاهش هزینه ساخت غشاء‌های MBR از فرایندی پرهزینه به فرایندی کم هزینه تبدیل شده است [۵].

بنابراین، گرفتگی غشاء از معضلات عمده فناوری غشایی و مشکل اصلی کاربرد تجاری فرایندهای غشایی به‌شمار می‌آید. از این‌رو، درک بهتری از گرفتگی غشاء نه تنها می‌تواند کلید حل مشکلات باشد، بلکه یکی از عوامل اصلی هدایت فرایندهای غشایی به پیش است. گرفتگی غشاء به واسطه ته نشینی و رسوب ذرات جامد و محلول هم بر روی سطح غشاء و هم درون حفره‌های آن اتفاق می‌افتد. در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در مورد سازوکارهای گرفتگی غشاء (شامل مدل‌های ریاضی) انجام شده است و تعداد بیشماری مقاله نیز به بررسی پدیده گرفتگی غشاء و بررسی پارامترهای مؤثر در عملکرد صافش در MBR اختصاص یافته‌اند؛ درخصوص روش‌های کاهش گرفتگی و افزایش مدت زمان عملکرد غشاء قبل از تمیز کردن شیمیایی نیز مطالعات زیادی انجام شده و مرورهای تفصیلی مطلوبی از یافته‌های نو درباره گرفتگی غشاء تاکنون ارائه شده است [۲۹-۲]. تحقیقات زیادی نیز برای دستیابی به رابطه گرفتگی غشاء با غلظت زیست‌توده، توزیع اندازه ذرات (PSD)^۱، محصولات میکروبی (مواد بسپاری خارج سلولی (EPS)^۲ و محصولات محلول میکروبی (SMP)^۳) و رئولوژی (جریان‌شناسی) لجن انجام شده است. با این حال، با توجه به پیچیدگی سامانه‌های زیستی و فقدان روش استاندارد برای اندازه‌گیری برخی پارامترهای مؤثر بر گرفتگی، این نتایج ناسازگار و غالباً متناقض از کار

1. Particle Size Distribution
2. Extracellular Polymer Substance
3. Soluble Microbial Products



شکل ۱. سازوکار گرفتگی غشاء در MBR: (الف) گرفتگی حفره‌ها، (ب) تشکیل لایه ژل، (پ) تشکیل لایه کیک، و (ت) اثر فشار اسمزی [۱۹].

غشا منجر می‌شود. در حالی که فقط در عملیات طولانی مدت MBR و تنها در مواردی، تشکیل لایه ژل مشاهده شده است [۳۵]. تشکیل لایه کیک شامل هر دو فرایند هیدرودینامیکی و ترمودینامیکی است. در MBR، نیروهای هیدرودینامیکی باعث نزدیک شدن عوامل گرفتگی به سطح غشا می‌شوند، در حالی که نیروهای ترمودینامیکی (برهم‌کنش‌های فیزیکی-شیمیایی) عامل اتصال عوامل گرفتگی در سطح غشا به‌شمار می‌آیند. شرایط هیدرودینامیکی به شدت هوادهی، اندازه‌های حباب، غلظت لجن، گرانیروی و ساختار مازول غشاء بستگی دارد. در حالی که برهم‌کنش‌های ترمودینامیکی بین سطح غشا و عوامل گرفتگی، تابع فاصله بین آنها، خواص سطحی آنها و ابعاد لخته‌هاست و معمولاً نظریه XDLVO^۱ آنها را توصیف می‌کند [۱۹].

۲-۳ تثبیت لایه کیک و تغییرات لایه کیک

هنگامی که عوامل زیستی گرفتگی تحت فشار وارد آمده فشرده می‌شوند، تثبیت لایه کیک با فرایند تشکیل لایه کیک همراه می‌شود. تثبیت لایه کیک از طریق تأثیر بر خواص فیزیکی لایه کیک از جمله تخلخل و محتوای آب، به افزایش مقاومت لایه کیک

۲-۱ گرفتگی حفره‌ها

عوامل مؤثر بر گرفتگی حفره‌ها شامل؛ خواص سطحی عوامل گرفتگی و منافذ غشاء، اندازه آنها و مقدار عوامل گرفتگی مؤثر است. اکثر مواد آلی محلول، از جمله SMP، می‌توانند در منافذ غشاء ریزصافی (با ابعاد حفره‌های $10-100 \mu\text{m}$) و فراصافی (با ابعاد حفره‌های $0.1-0.1 \mu\text{m}$) وارد شوند و سپس به دلیل خواص چسبنده آنها، به صورت جزئی در منافذ انباشته شوند. ذرات دیگری چون کلونیدها، BPC، باکتری‌ها و حتی لخته‌های کوچک (ابعاد باکتری در حدود $5-3 \mu\text{m}$) در صورتی که اندازه آنها کوچکتر از اندازه غشاء به‌کاربرده شده باشد، نیز ممکن است به گرفتگی حفره‌ها منجر شوند [۱۹]. نیز گزارش شده است که از گسیختگی لخته‌های لجن نیز مقدار زیادی مواد محلول و کلونیدی تولید می‌کند که منجر به گرفتگی شدید حفره‌ها و تشکیل غشاء دوم (لایه کیک) می‌انجامد [۳۴].

۲-۲ چسبندگی لخته و تشکیل لایه کیک

اگر EPS عامل اصلی گرفتگی غشاء باشد، چسبندگی لخته و تشکیل کیک می‌تواند مرحله دوم گرفتگی غشاء در MBR تلقی شود. عملیات پیوسته MBR به طور کلی به تشکیل لایه کیک روی سطح

1. Extended Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek

$kg^{-1} \cdot 10^{14}$ است [۱۹]. این نتایج نشان‌دهنده نقش غالب اثر فشار اسمزی در مقاومت کیک‌اند.

۳. انواع گرفتگی غشاء

۳-۱ گرفتگی قابل رفع شدن و غیر قابل رفع شدن و برگشت‌ناپذیر

معمولاً می‌توان گرفتگی را به سه گروه گرفتگی قابل رفع شدن (گرفتگی برگشت پذیر)، گرفتگی غیر قابل رفع شدن و گرفتگی برگشت‌ناپذیر تقسیم‌بندی کرد (شکل (۲)). گرفتگی قابل رفع شدن از طریق شستشوی فیزیکی مانند شستشوی معکوس یا مکش - استراحت به راحتی از بین می‌رود، در حالی که گرفتگی غیر قابل رفع شدن نیاز به شستشوی شیمیایی دارد. گرفتگی قابل رفع شدن و گرفتگی برگشت‌ناپذیر مشابه‌اند. گرفتگی قابل رفع شدن به علت وجود پیوندهای سست عوامل گرفتگی است. در مقابل، گرفتگی غیر قابل رفع شدن به علت پر شدن حفره‌ها و پیوندهای قوی عوامل گرفتگی است. گرفتگی برگشت‌ناپذیر نوعی گرفتگی است که با هیچ روشی رفع نمی‌شود. به طور کلی، گرفتگی رفع شدنی به تشکیل لایه کیک و گرفتگی غیر قابل رفع شدن به پر شدن حفره‌ها نسبت داده می‌شود. تحقیقات علمی زیادی برای رسیدن به درک درستی از تشکیل لایه کیک و ریخت‌شناسی آن انجام شده است [۱۹ و ۸ و ۴].

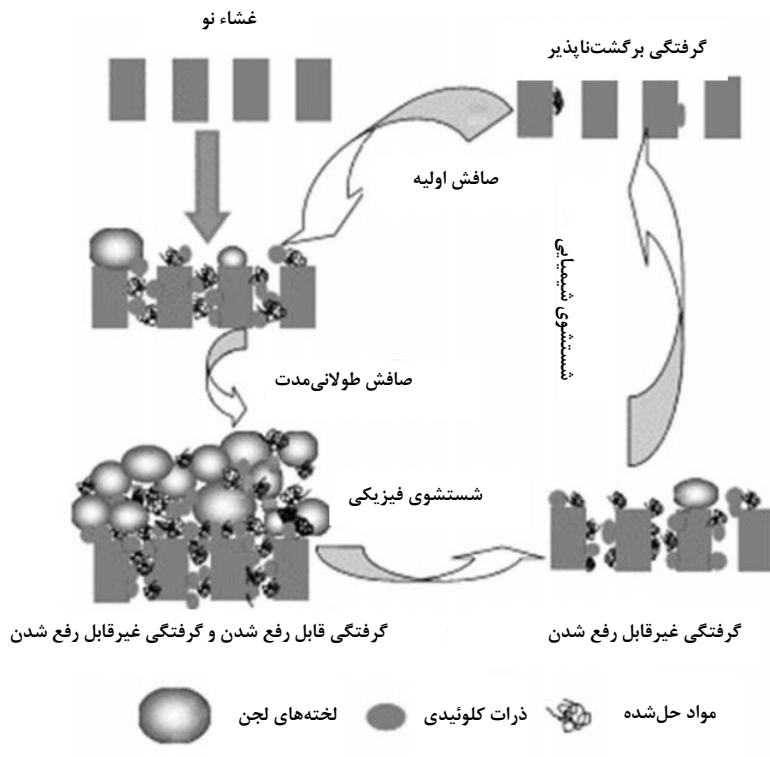
هرچند بسیاری از تحقیقات اخیر در جهت فهم اصول لایه کیک تمرکز کرده‌اند ولی بررسی و کنترل گرفتگی رفع ناشدنی در غشای MBR اهمیت زیادی برای عملیات طولانی مدت زیست‌راکتورها دارد. در طول صافش اولیه ذرات کلوئیدی، مواد محلول و سلول‌های میکروبی عبور و درون حفره‌های غشاء رسوب می‌کنند. اما طی عملیات طولانی مدت زیست‌راکتورها، سلول‌ها تکثیر می‌شوند و EPS را تولید می‌کنند، که باعث مسدود شدن حفره‌ها می‌شوند و یک لایه ژل مانند و چسبنده بر روی غشاء تشکیل می‌دهند. در همین شرایط، بعضی مواد معدنی ممکن است بر روی سطح غشاء یا درون حفره‌های آن رسوب کنند. ماهیت واقعی گرفتگی در MBR فرایند پیچیده‌ای است. بنابراین، نحوه پیش‌بینی و کنترل گرفتگی از اهمیت زیادی در MBR برخوردار است [۸].

می‌انجامد. بدلیل اهمیت نقش EPS بر ساختار لجن، تراکم‌پذیری لجن و یا لایه کیک به شدت به EPS وابسته است. افزایش ترکیبات مختلفی چون کلسیم نیز به افزایش تراکم‌پذیری کیک منجر می‌شود. تغییرات طولانی مدت لایه گرفتگی و ته‌نشینی گزینشی عوامل گرفتگی باعث تفاوت در خصوصیات و ترکیبات لجن معلق در داخل راکتور و کیک شده است. با توجه به مدت زمان طولانی تشکیل لایه کیک در MBR، و در نتیجه کم شدن رشد مایه و انتقال اکسیژن در لایه کیک، فساد درون‌زا و یا لیز شدن سلولی در لایه کیک اتفاق می‌افتد. محیط کاملاً متفاوت لایه کیک از لجن معلق نیز ممکن است دامنه تغییر جمعیت غالب میکروبی را در لایه کیک افزایش دهد. این تغییرات لایه کیک بر گرفتگی غشاء آثار چشمگیری وارد می‌آورد [۱۹].

۲-۴ اثر فشار اسمزی

زنگ^۱ و همکاران، سازوکار اثر فشار اسمزی در خلال صافش لایه کیک را در گرفتگی MBR پیشنهاد کردند. لایه کیک شامل لخته‌های لجن ست که در ماتریس EPS قرار دارد و از لحاظ ماکروسکوپی دارای بار خنثی است، ولی EPSها به دلیل برخورداری از گروه‌های یونیده‌شدنی CO_3^{2-} ، PO_4^{3-} و OH^- دارای بار منفی‌اند. بنابراین، یون‌هایی با بار مخالف باید در لایه کیک حضور داشته باشند [۳۶]. مطابق شکل ((۱-)) ت، علی‌رغم عدم توانایی غشای ریزصافی و فراصافی در نگهداری یون‌ها، این یون‌ها در لایه کیک گیر می‌افتد و از غشاء عبور نمی‌کنند و در نتیجه، غلظت یون‌ها در داخل لایه کیک به طور چشمگیری از غلظت محلول داخل راکتور بیشتر و یک گرادین (شیب) فشار اسمزی برقرار می‌شود. بنابراین، فشار اسمزی در خلال صافش کیک وارد می‌آید. در واقع، ماهیت فشار اسمزی، اختلاف پتانسیل شیمیایی آب بین دو محیط است که یک مانع آنها را جدا کرده است. عوامل تأثیرگذار در فشار اسمزی، شامل pH، ترکیب EPSها، تخلخل لایه کیک، قدرت یونی و فشار وارد آمده‌اند. مقاومت صافش لایه کیک عمدتاً ناشی از مقاومت هیدرولیکی و اثر فشار اسمزی است. مقاومت ویژه هیدرولیکی لایه کیک بر اساس مشخصات لایه کیک در محدوده $kg^{-1} \cdot m^{-1} \cdot 10^9$ تا $kg^{-1} \cdot m^{-1} \cdot 10^{11}$ است. ولی آزمایش‌ها نشان داده که مقاومت ویژه صافش کل لایه کیک در حدود $kg^{-1} \cdot m^{-1} \cdot 10^{12}$ تا

1. Zhang



شکل ۲. نمودار تشکیل و حذف گرفتگی قابل رفع شدن (گرفتگی برگشت پذیر)، گرفتگی غیر قابل رفع شدن و گرفتگی برگشت ناپذیر در MBR [۸].

کم فشار مانند ریزصافش و فراصافش در تصفیه فاضلاب، گرفتگی زیستی از مشکلات عمده به‌شمار می‌آید، زیرا بیشتر عوامل گرفتگی (لخته‌های میکروبی) در زیست‌راکتورها بزرگتر از اندازه حفره‌های غشاء‌اند. گرفتگی زیستی ممکن است با ته‌نشینی و رسوب تک سلول‌ها یا تکه‌های سلولی روی سطح غشاء شروع شوند، بعد از آن سلول‌ها رشد می‌کنند و یک لایه کیک تشکیل می‌دهند [۲۷ و ۱۱ و ۸].

گرفتگی مواد آلی در زیست‌راکتورهای غشایی به رسوب و ته‌نشینی زیست‌بسپارها (یعنی پروتئین‌ها و پلی ساکاریدها) روی غشاء مربوط می‌شود. DOMها اخیراً به عنوان عوامل مهم گرفتگی آلی تعریف شده‌اند که از دو بخش؛ مواد آلی محلول در خوراک ورودی و SMP ناشی می‌شوند. BPCها با ابعاد کوچکتر از میکرون، از عوامل گرفتگی آلی دیگری‌اند که توسط EPSهای شل و خوشه چسبنده SMP تشکیل شده است. یکی دیگر از عوامل گرفتگی آلی، ذرات اگزوسپار شفاف (TEP)^۱ است که به دو دسته محلول و پیوندیافته

راه‌اندازی زیست‌راکتور با شاری کمتر از شار بحرانی دیدگاهی است که مانع گرفتگی شدید غشاء شامل گرفتگی رفع شدنی و رفع نشدنی در سامانه صافش می‌شود. عملیات در زیر شار بحرانی، عملیات بدون گرفتگی نامیده می‌شود و انتظار می‌رود مقدار کمی گرفتگی رفع‌نشدنی ایجاد شود.

۲-۳ گرفتگی زیستی، گرفتگی مواد آلی و گرفتگی مواد غیرآلی (معدنی)

از لحاظ موادی که عامل گرفتگی‌اند، گرفتگی غشاء در زیست‌راکتورها را می‌توان به سه دسته اصلی گرفتگی زیستی، گرفتگی مواد آلی، و گرفتگی مواد غیرآلی تقسیم کرد. درک درست چگونگی تشکیل گرفتگی می‌تواند برای ارائه دیدگاه‌های مفید و کارآمد در کنترل گرفتگی کمک کند.

گرفتگی زیستی به تجزیه، رشد و سوخت‌وساز سلول‌های باکتری یا لخته‌ها روی غشاء مربوط می‌شود که نگرانی درخور توجهی را در فرایندهای صافش غشایی ایجاد می‌کند. برای فرایندهای غشایی

1. Transparent Exopolymer Particles

و اگنییر^۴ و همکاران [۴۰] نشان داده که در غشاءهایی از جنس مواد غیرآلی، گرفتگی غیرآلی آسانتر اتفاق می‌افتد. معمولاً، لایه یک مواد غیرآلی می‌تواند به دلیل وجود خواص چسبندگی از نوع گرفتگی‌های رفع‌نشده باشد. وانگ^۵ و همکاران [۳۵] تشکیل یک لایه یک از مواد آلی و عناصر غیرآلی مانند Al, Fe, Ca, Si و Mg را روی غشاء مشاهده کردند. در بسیاری موارد، رفع گرفتگی ناشی از مواد غیرآلی حتی با شستشوی شیمیایی هم دشوار است. این یافته‌ها مشخص می‌کند که گرفتگی ناشی از مواد غیرآلی برای زیست‌راکتورهای غشایی خیلی مهم است. تعیین غلظت محدودکننده یون‌های فلزی در فاضلاب‌ها که می‌تواند به گرفتگی منجر شود نکته مهمی است، زیرا ترکیب شیمیایی خوراک با تشکیل رسوب رابطه تنگاتنگی دارد [۲۷ و ۱۱ و ۸].

گرفتگی غیرآلی به دو طریق رسوب مواد شیمیایی و رسوب مواد زیستی ایجاد می‌شود (شکل (۳)). تعداد زیادی کاتیون و آنیون مانند Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , CO_3^{2-} , SO_4^{3-} , PO_4^{3-} , OH^- در زیست‌راکتورها یافت می‌شوند. رسوب مواد شیمیایی وقتی اتفاق می‌افتد که غلظت مواد شیمیایی به علت قطبش غلظت^۶ از غلظت اشباع آنها تجاوز کند. علاوه بر این، لایه گرفتگی روی سطح غشاء مانع برقراری نیروی برشی روی غشاء می‌شود زیرا ماهیت زیست‌لایه یا زیست‌کیک کشسان است که به قطبش غلظت بیشتر و رسوب بیشتر مواد غیرآلی می‌انجامد. کربنات‌ها یکی از انواع نمک‌های عمده در گرفتگی مواد غیرآلی‌اند. هوادهی و CO_2 تولیدی توسط ریزاندامگانها می‌تواند روی اشباع شدن کربنات‌ها و pH لجن معلق اثر گذارد. نمک‌های کربنات فلزاتی مثل Ca, Mg و Fe توانایی گرفتگی را افزایش می‌دهند [۸].

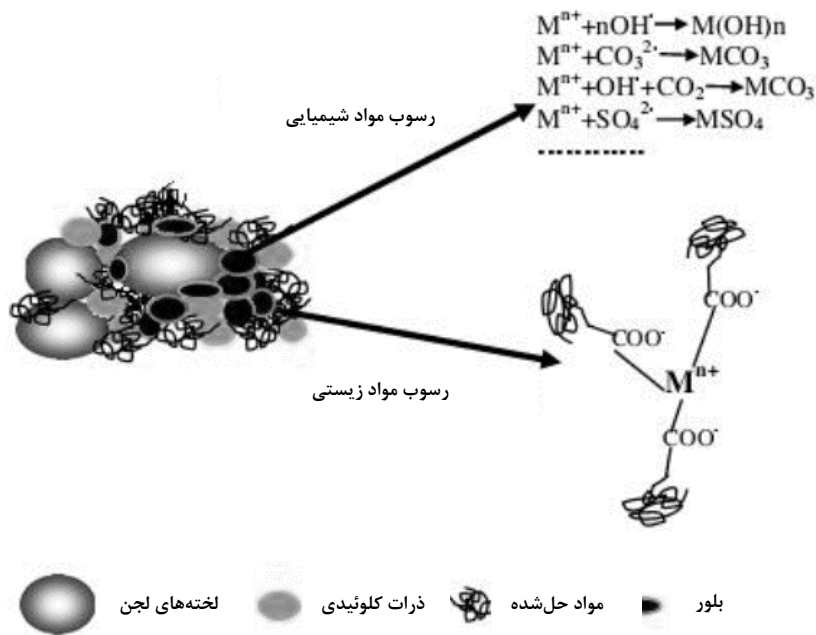
رسوبات زیستی یکی دیگر از مواردی است که در گرفتگی مواد غیرآلی نقش دارند. EPSها شامل گروه‌های یونش‌پذیر مانند CO_3^{2-} , SO_4^{3-} , PO_4^{3-} , OH^- ظرفیتی (مثلاً، Ca^{2+} و Mg^{2+}) واکنش برقرار کنند و کمپلکس تشکیل دهند. چنین پدیده‌ای را پل یونی می‌گویند و نه تنها بخشی از بارهای منفی EPS را خنثی می‌کند، بلکه باعث تقویت ساختار لایه یک و تسهیل چسبندگی‌های بعدی عوامل گرفتگی نیز می‌شود [۱۹].

طبقه‌بندی می‌شود. TEPها مواد بسیار چسبنده با خصوصیات ژل‌اند که یک جزء اسیدی از پلی‌ساکاریدها به شمار می‌آیند. همبستگی خطی بین TEP و شار بحرانی مشاهده شده است. کلئوئیدها ذرات کوچک با اندازه‌های ۱ تا ۱۰۰۰ نانومتر و از عوامل اولیه گرفتگی در MBRها هستند که منشاء آن‌ها خوراک ورودی و یا سوخت‌وساز میکروبی است. به طور کلی، کلئوئیدها به دو گروه؛ درشت‌مولکولهای آلی (زیست‌بسیارها (عمدتاً پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها) و ترکیبات فولویک) و کلئوئیدهای غیر آلی سفت و سخت (شامل سیلیس، نمک‌های آلومینیم سیلیکات و آهن هیدروکسید) تقسیم می‌شوند. حضور زیست‌بسیارها (کلئوئیدهای آلی) در لایه یک شکل گرفته توسط لخته‌های لجن (EPS) به طور چشمگیری باعث افزایش مقاومت کیک می‌شود [۱۹]. زیست‌بسیارها، به علت کوچک بودن اندازه، بر اثر جریان نفوذی خیلی آسان درون غشاء رسوب می‌کنند، اما این مواد نسبت به ذرات بزرگ (لخته‌های لجن) بر اثر نیروی بالا برنده سرعت برگشت کمتری دارند. بعد از صافش غشایی، لایه‌های گرفتگی که از طریق شستشو با آب، شستشوی معکوس و یا شستشوی شیمیایی جدا شده‌اند، به سه لایه بالایی، میانی و زیرین تقسیم می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که لایه بالایی از یک لایه متخلخل با پیوندهای سست تشکیل شده است که شامل لخته‌های لجن است. لایه میانی به طور مساوی به SMP و توده‌های میکروبی مربوط می‌شود که غلظت پلی‌ساکاریدهای آن زیاد است. لایه پایینی مربوط به بخش گرفتگی رفع‌نشده است و توسط SMP کنترل می‌شود و غلظت نسبتاً بالایی از پروتئین‌ها دارد [۲۷، ۱۱ و ۸].

معمولاً گرفتگی غشاء در زیست‌راکتورهای غشایی بیشتر به مواد آلی و زیستی نسبت داده می‌شود تا مواد غیرآلی، با این احوال، همه آن‌ها به طور همزمان در فرایند صافش غشایی با لجن فعال اتفاق می‌افتند. در نتیجه، تاکنون بسیاری از محققان گرفتگی غشاء را به رسوب سلول‌های باکتری و مواد زیستی نسبت داده‌اند و به گرفتگی ناشی از مواد غیرآلی فقط در تعداد کمی از مقالات اشاره شده است. بنابر نتایج مطالعات فخر رازی^۱ و همکاران [۳۷] و پنداشته^۲ و همکاران [۳۸]، در غلظت بالای نمک، تأثیر مواد غیرآلی روی گرفتگی بیشتر از مواد آلی است. مطالعات کنگ^۳ و همکاران [۳۹]

4. Ognier
5. Wang
6. Concentration Polarization

1. Fakhru'l-Razi
2. Pendashteh
3. Kang



شکل ۳. نمودار تصویری از گرفتگی غیرآلی در سامانه MBR [۸].

۴. عوامل مؤثر بر گرفتگی غشاء

گرفتگی، مقاومت غشاء را از طریق جذب، ته‌نشینی یا چسبندگی ذرات و سلول‌های میکروبی به سطح غشاء افزایش می‌دهد [۲]. شار خروجی از طریق مقاومت‌های مختلفی چون مقاومت غشاء (R_m)، مقاومت کیک (R_c) (عمدتاً ناشی از ته‌نشینی لخته‌ها و ذرات درشت بر روی سطح غشاء) و مقاومت جذب و گرفتگی منافذ (R_{a+p}) (به علت ته‌نشینی ذرات ریز در داخل منافذ غشاء و در نتیجه کاهش قطر یا انسداد منافذ غشاء) کنترل می‌شود [۴۲ و ۴۱ و ۲]. بخش اعظمی از گرفتگی در MBR به علت تشکیل لایه کیک زیست‌لایه روی سطح غشاء صورت می‌گیرد. با این‌که این لایه مقاومت در برابر صافش را می‌افزاید، اما یک لایه زیست‌صافش محسوب می‌شود و با این‌که ضخامت ناچیزی دارد، در عملیات صافش و حذف آلاینده‌ها نقش مثبتی دارد و بازدهی فرایند را بالا می‌برد [۴۳].

با توجه به قانون دارسی، بین شار خروجی از غشاء و تغییرات فشار در قالب معادله (۱) رابطه برقرار است [۱۱]:

$$J_V = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu R_t} = \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_c + R_{a+p})} \quad (1)$$

در این فرمول J_V شار خروجی غشاء ($m^3/(m^2 \cdot s)$)، V حجم غشاء (m^3)، A مساحت سطح غشاء (m^2)، μ گرانیروی آب در دمای ۳۰ درجه سلسیوس ($Pa \cdot s$) و ΔP میزان TMP (Pa) است. مقاومت کل (R_t) (m^{-1})، مجموع سه مقاومت غشاء (R_m)، مقاومت کیک (R_c) و مقاومت جذب و گرفتگی منافذ (R_{a+p}) است.

گرفتگی غشاء نه تنها از ماهیت شیمیایی غشاء، بلکه از پارامترهای عملیاتی نظیر زمان ماند لجن (SRT)^۱ و زمان ماند هیدرولیکی (HRT)^۲ نیز تأثیر می‌پذیرد. همچنین، پارامترهای زیستی همچون EPS، SMP، DOM، ریخت‌شناسی لجن، PSD و گرانیروی مخلوط لجن از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر گرفتگی غشاء معرفی شده‌اند که در بخش‌های بعد اثر این پارامترها را بررسی می‌کنیم [۴].

۴-۱-۴ خواص فیزیکی غشاء

توزیع و ابعاد حفره‌های غشاء، سختی و تخلخل غشاء، ساختار غشاء و خواص شیمیایی سطح غشاء شامل جنس و آبگریزی، از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر گرفتگی غشاء به‌شمار می‌آیند [۲]. برای بررسی نقش آبدوستی/آبگریزی غشاء در گرفتگی غشاء، به‌ویژه بر

1. Sludge Retention Time
2. Hydraulic Retention Time

منجر شده است [۵۷-۸ و ۵۰]. علی‌رغم تمامی مطالعات انجام شده، به اعتبار ماهیت پیچیده گرفتگی غشاء و EPS، هنوز هم نقش EPS در گرفتگی غشاء به طور کامل مشخص نشده است.

همچنین، EPS با سایر خواص لجن چون شاخص حجمی لجن، توانایی توده‌سازی، آبگریزی، بار سطحی، آبگیری و گرانبوی لجن رابطه تنگاتنگی برقرار است. بنابراین، با در نظر گرفتن اهمیت نقش EPS و اجزای آن در خواص لجن و گرفتگی غشاء کنترل میزان این پارامتر برای دستیابی به بازدهی بالا در فرایندهای غشایی بسیار ضروری است [۱۹].

۴-۲-۲ SMP

در خلال عبور مایع از غشاء MBR، SMP بر روی سطح غشاء جذب و باعث پر کردن حفره‌های غشاء و تشکیل یک ساختار ژل مانند بر روی سطح غشاء می‌شود، و ضمن فراهم آوردن منبع غذایی برای تشکیل زیست‌لایه، مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان خروجی ایجاد می‌کند [۸].

اخیراً تأثیر SMP بر گرفتگی غشاء در MBR توجه زیادی را جلب کرده است و تحقیقات فراوانی نشان داده‌اند که SMP اثر زیادی بر گرفتگی غشاء دارد و در بسیاری از آنها تأثیر آن از EPS مهم‌تر بوده است [۵۹ و ۵۸ و ۴۷ و ۳۳ و ۸]. تا جایی که گاهی SMP را به‌عنوان عامل اصلی در گرفتگی برگشت‌ناپذیر غشاء معرفی کرده‌اند [۶۱ و ۶۰ و ۲]. SMP می‌تواند به دو دسته محصولات مرتبط با مصرف رشدمایه (UAP)^۶ و محصولات مرتبط با زیست‌توده (BAP)^۷ تقسیم شود. گزارش شده است که جزء UAP شامل مولکول‌هایی با وزن مولکولی کمتر نسبت به BAP سهم بیشتری در مسدود شدن شدید حفره‌ها دارد [۶۲]. همچنین، تحقیقات نشان داده که غلظت، اجزاء و ترکیب SMP تعیین‌کننده پتانسیل گرفتگی آن است [۶۴ و ۶۳]. مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که جزء پلی‌ساکارید SMP بیش از پروتئین در گرفتگی مشارکت می‌کند [۶۷-۶۵]. در گزارش وو و لی^۸ [۶۴] به نقش جزء هیومیک SMP در گرفتگی فاضلاب خروجی از واحد SBR اشاره شده است.

چسبندگی غشاء تلاشهای چشمگیری بعمل آمده است. چسبندگی عوامل گرفتگی روی سطح غشاء در نتیجه برهم‌کنش‌های سطحی بین غشاء و عوامل گرفتگی است و با نظریه XDLVO که شامل سه برهم‌کنش، بر پایه اسیدی (AB)^۱، لیف‌شیتز-واندروالس^۲ (LW) و لایه دوگانه الکتروستاتیک (EL)^۳ است، توصیف می‌شود [۲۳]. مطالعه لی‌یو^۴ و همکاران نشان داد که گرفتگی غشاهای آبدوست، نسبت به غشاهای آبگریز کمتر است [۴۴]. یامامورا^۵ و همکاران گزارش کردند که عوامل گرفتگی آبگریز به شدت بر سطح غشای آبگریز جذب‌شده و از طریق عوامل گرفتگی آبگریز بیشتر، گرفتگی غیر قابل برگشت ایجاد می‌شود [۴۵]. نتایج متناقضی نیز مبنی بر گرفتگی کمتر غشاهای آبگریز نسبت به آبدوست گزارش شده است [۴۶]. نتایج متناقض در مورد نقش آبدوستی/آبگریزی غشاء در گرفتگی غشاء، به عوامل متعددی چون؛ تغییرات در دیگر خواص غشاء مانند ریخت‌شناسی سطح و پتانسیل زتا، ماهیت پیچیده و متفاوت عوامل گرفتگی و تعداد محدود غشاهای مطالعه شده در متون مختلف مربوط می‌شود [۲۳].

۴-۲-۴ خصوصیات رشدمایه و زیست‌توده

۴-۲-۱ EPS

تحقیقات بسیار نشان می‌دهند که EPS یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر گرفتگی غشاء است که برهم‌کنش و رابطه پیچیده‌ای با عوامل گرفتگی و سازوکار گرفتگی در MBR دارد [۴۱ و ۴۷ و ۱۹ و ۲۰]. EPS از طریق مسدود کردن حفره‌های غشاء، پوشش سطح غشاء، تأثیر روی ساختار کیک و ایجاد اثر اسمزی، آثار عمیقی بر گرفتگی غشاء می‌گذارد [۱۹]. EPS عامل تشکیل کیک گزارش شده و رابطه مهمی بین مقاومت کیک تشکیل شده بر روی غشاء و EPS برقرار است [۴۱ و ۲]. در تحقیقات مختلف دیده شده که کاهش در اجزای کربوهیدرات و پروتئین EPS منجر به از هم گسستگی لخته‌های لجن فعال و در نتیجه ایجاد ذراتی با اندازه کوچک‌تر شده که سبب افزایش گرفتگی غشاء شده‌اند [۴۹ و ۴۸ و ۳۸]. اما در تحقیقات دیگر افزایش EPS در نتیجه حجیم شدن لخته‌های لجن، به افزایش گرفتگی غشاء

1. Acid-Based
2. Lifshitz-Vanderwaals
3. Electrostatic Double Layer
4. Liu
5. Yamamura

6. Utilization Associated Products
7. Biomass Associated Products
8. Wu and Lee

۴-۲-۳ ماهیت و غلظت رشدمايه

میزان املاح و یون‌های موجود در فاضلاب یا مواد مغذی اضافه شده به سیستم و نسبت آن‌ها می‌تواند تأثیر نامستقیم بر گرفتگی غشاء بگذارد. گزارش شده است که نسبت بین یون‌های تک ظرفیتی و دو ظرفیتی سبب تغییر ریخت‌شناسی و در نهایت گرفتگی می‌شود [۳۴ و ۶۸].

سمیت نیز یکی از پارامترهایی است که بر گرفتگی غشاء تأثیر نامستقیم می‌گذارد. از هم پاشیدگی لخته‌ها شاید از مهم‌ترین مشکلات در ارتباط با مواد سمی باشد [۶۹-۷۱]. از این رو سمیت با تغییر ریخت‌شناسی و ایجاد ذرات ریز کلوئیدی موجبات گرفتگی غشاء را فراهم می‌آورد [۳۴]. فلاح^۱ و همکاران با افزایش غلظت ماده سمی استایرن، تغییر ریخت‌شناسی لجن فعال را از حالت لخته به صورت رشد پراکنده و دارای سلول‌های آزاد مشاهده کردند که به افزایش گرفتگی منجر شد [۴۸].

۴-۲-۴ اجزاء زیست‌توده

برای مطالعه سهم نسبی اجزای زیست‌توده بر گرفتگی غشاء MBR، زیست‌توده لجن به سه جزء جامدات معلق، کلوئیدی (SMP) و حل شده تقسیم می‌شود. سهم نسبی مواد کلوئیدی و محلول بر گرفتگی غشاء محدوده‌ای حدود ۱۷٪ تا ۸۱٪ دارد [۲].

۴-۲-۵ پارامترهای زیست‌توده

۴-۲-۵-۱ غلظت زیست‌توده (MLSS)^۲

در تحقیقات زیادی اثر MLSS را در گرفتگی غشاء بررسی شده است [۲ و ۵۰]. برخی، آثار منفی از این پارامتر ارائه کرده‌اند [۷۲-۷۴] و برخی نیز آن را بدون تأثیر یا دارای اثر مثبت گزارش کرده‌اند [۲ و ۷۵ و ۴۷]. این پارامتر خود تحت تأثیر عواملی چون SRT، HRT و نوع فاضلاب است. به نظر برخی پژوهشگران، SRT بالا سبب افزایش غلظت MLSS می‌شود و این غلظت بالاتر MLSS به دلیل ته‌نشینی ذرات لجن بر سطح غشاء، به افزایش سرعت گرفتگی غشاء می‌انجامد و از سوی دیگر گرانروی محلول و مقدار و ترکیب محصولات میکروبی و نیز خواص سطحی سلول‌ها تغییر می‌کند و این پارامترها نیز بر گرفتگی غشاء تأثیر می‌گذارد [۲].

چنگ و کیم^۳ [۷۴] اثر زیست‌توده را بر گرفتگی غشاء با غلظت‌های مختلف MLSS بررسی کردند و نشان دادند که مقاومت کیک با کاهش MLSS کاهش می‌یابد.

۴-۲-۵-۲ گرانروی

یکی از پارامترهای مؤثر بر گرفتگی غشاء، افزایش گرانروی است. خصوصیت‌های جریان‌شناسی لجن تأثیر بسزایی بر پدیده‌های انتقال در نزدیکی سطح غشاء و نیز انتقال اکسیژن و شرایط لجن در مراحل بعدی می‌گذارد. برای یک هوادهی مشخص افزایش گرانروی لجن باعث کاهش شدید تنش برشی در سطح غشاء و در نتیجه عدم توانایی در جدا کردن لایه کیک روی سطح غشاء می‌شود و در نتیجه به تشدید پدیده گرفتگی غشاء منجر می‌شود. همچنین، هر چه گرانروی سیال بیشتر باشد، اختلاف فشار لازم برای عبور آن از سطح غشاء بیشتر است که این امر باعث کاهش راندمان می‌شود [۵۴].

در متون مختلف، رابطه بین گرانروی با پارامترهای دیگر نظیر MLSS، ترکیب لجن، اندازه و شکل لخته، ماهیت برهم‌کنش بین ذرات، مقدار آب متصل شده، EPS و SMP ذکر شده است [۳۷ و ۷۶]. در بسیاری از تحقیقات، افزایش MLSS به افزایش گرانروی منجر شده است [۸۱-۷۷، ۷۷ و ۵۰]. حد بحرانی ۱۰ تا ۱۷ گرم بر لیتر برای غلظت تأثیرگذار MLSS روی گرانروی در متون گزارش شده است که در زیر مقدار این حد گرانروی کم است و با افزایش غلظت MLSS به آهستگی افزایش می‌یابد. بالای این حد بحرانی با افزایش غلظت MLSS، گرانروی مایع داخل راکتور به صورت نمایی افزایش می‌یابد [۸۲].

گرانروی دینامیک نشان‌دهنده اندازه مواد بسیار گرانرو نظیر پروتئین و کربوهیدرات است. بنابراین، افزایش مواد بسیاری در تعلیق لجن باعث افزایش گرانروی و در نتیجه کاهش شارش عبوری از غشاء MBR می‌شود [۸۴ و ۸۳]. EPS سهم مهمی در افزایش گرانروی دینامیک دارد. نتایج تحقیقات مینگ^۴ و همکاران نشان داده که تعلیق لجن دارای مقادیر زیاد باکتری‌های رشته‌ای به دلیل حضور مقادیر زیاد EPS دارای گرانروی بالایی است [۵۳]. نتایج تحقیقات دیگر مینگ و همکاران نشان داد که کاهش HRT و در نتیجه افزایش

3. Chang and Kim
4. Meng

1. Fallah
2. Mixed Liqour Suspended Solids

۴-۲-۵-۳-۴ دما

دما از جمله پارامترهایی است که بر خواص فیزیولوژیکی لجن تأثیر می‌گذارد. شوک ناشی از افزایش دما نیز مانند شوک ناشی از مواد سمی سبب تغییر ریخت‌شناسی می‌شود. علاوه بر این، به دلیل این تغییر ریخت‌شناسی، مواد بسپاری آزاد و به محیط منتقل می‌شود و SMP در سیستم را افزایش می‌دهد [۸۷] و بنابراین گرفتگی غشاء را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. اما در جایی دیگر افزایش عبور پذیری غشاء با بالا رفتن دما در نتیجه کاهش گرانیوی لجن گزارش شده است [۸۸].

۴-۲-۵-۴ اکسیژن محلول

میزان اکسیژن محلول به طور خاص بر خواص و ریخت‌شناسی لجن و به دنبال آن بر گرفتگی غشاء تأثیر می‌گذارد. منگ و همکاران میزان پایین اکسیژن محلول را عامل اصلی رشد بیش از حد باکتری‌های رشته‌ای و در نتیجه افزایش میزان گرفتگی با کاهش HRT از ۱۲ به ۳ ساعت در تحقیق خود بر روی MBR گزارش کردند [۵۰].

۴-۲-۵-۵ تولید کف

یکی دیگر از دلایل گرفتگی غشاء در MBR، تشکیل کف زیستی توسط مخلوط میکروبی است. دلایل تشکیل کف زیستی نه تنها تکثیر بیش از حد باکتری‌های آبگریز فیلامنتوس است، بلکه عمدتاً افزایش غلظت پروتئین در EPS است [۱۹].

۴-۲-۶ خصوصیات لخته

۴-۲-۶-۱ توزیع اندازه ذرات

در MBR اندازه ذرات مربوطه به پایداری لخته‌های لجن و نیروی برشی وارد آمده دارد. پایداری لجن مربوط به برهم‌کنش‌های بین مولکولی در ساختار لخته است. EPSها به‌عنوان چسب نگهدارنده سلول‌ها از طریق این برهم‌کنش‌ها، نقش مهمی در پایداری لجن بازی می‌کنند. شرایط شدید، از جمله pH شدید، دما، DO، شوری و سمیت خوراک به از هم پاشیدگی لخته‌های لجن و تولید ذرات مجزا منجر می‌شود. سازوکارهای از هم پاشیدگی لخته‌های لجن شامل تغییرات غلظت کاتیون‌ها (Fe^{3+} و Fe^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+)

بارآلی ورودی منجر به رشد بیش از حد باکتری‌های رشته‌ای و افزایش غلظت EPS و در نتیجه غلظت MLSS و گرانیوی لجن افزایش یافت. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که گرانیوی لجن عامل اصلی تأثیرگذار بر شرایط هیدرولیکی سیستم MBR است [۵۰]. در مطالعه‌ای دیگر توسط عبداله‌زاده شرقی و بنکدارپور در تصفیه آب تولیدی میدان نفتی در MBR توسط مخلوط میکروبی نمک دوست دیده شد که افزایش بار آلی ورودی باعث تغییر ریخت‌شناسی به حالت حجیم EPS و در نتیجه تغییر جریان‌شناسی مخلوط مایع درون راکتور از حالت نیوتونی به غیر نیوتونی شد که این تغییرات در نهایت باعث گرفتگی غشاء شد [۸۶ و ۸۵].

با توجه به ماهیت غیر نیوتونی جریان لجن، گرانیوی به‌گرا دیان آهنگ برش تعیین شده به کمک فشار و دما بستگی دارد و معمولاً مقدار آن در آهنگ برش $100 s^{-1}$ گزارش شده است [۸۱]. مدل‌های جریان‌شناسی ارائه شده برای لجن فعال به دو دسته مدل‌های فاقد تنش تسلیم، مانند مدل توانی^۱ و مدل‌های دارای تنش تسلیم نظیر مدل بینگهام^۲، هرشل-بالکی^۳ و کاسن^۴ تقسیم بندی می‌شوند که معادلات آن‌ها در زیر آورده شده است [۸۱]:

$$\tau = \tau_0 + K \times \dot{\gamma} \quad \text{بینگهام} \quad (2)$$

$$\tau = \tau_0 + K \times \dot{\gamma}^n \quad \text{هرشل-بالکی} \quad (3)$$

$$\tau = (\tau_0^{0.5} + Kc \times \dot{\gamma}^{0.5})^2 \quad \text{کاسن} \quad (4)$$

$$\tau = K \times \dot{\gamma}^n \quad \text{قانون توانی} \quad (5)$$

که در آن τ تنش برشی^۵ (Pa)، τ_0 تنش تسلیم^۶ (Pa)، K ضریب سازگاری^۷ (Pa.sⁿ)، Kc ضریب سازگاری^۸ معادله کاسن^۸ (Pa.s)^{n/۵}، n شاخص رفتار جریان^۹ و $\dot{\gamma}$ سرعت برشی^{۱۰} است.

1. Power Law or Ostwald
2. Bingham
3. Herschel Bulkey
4. Casson
5. Shear Stress
6. Yield Stress
7. Consistency Coefficient
8. Consistency Coefficient in the Casson Equation
9. Flow Behavior Index
10. Shear Rate

نه تنها بر بازدهی سیستم بلکه بر گرفتگی غشاء نیز تأثیر می‌گذارد. در مقالات زیادی گزارش شده است که کاهش HRT به افزایش گرفتگی منجر می‌شود [۷۸ و ۵۲ و ۵۰ و ۴۷ و ۳۸]. این تأثیر به دو صورت مستقیم و نامستقیم است. تأثیر مستقیم بر اساس افزایش شار بیش از حد شار بحرانی و تأثیر نامستقیم آن از طریق تأثیر بر روی خواص زیست‌توده و به دنبال آن گرفتگی است [۵۰]. چنگ^۲ و همکاران نتیجه گرفتند که این تأثیر از افزایش زیست‌توده ناشی شده است [۵۲]. حال آنکه در تحقیقات دیگر گزارش شده که تغییر HRT به دلیل تأثیری که بر میزان EPS از طریق تغییر ریخت‌شناسی و افزایش گرانش‌روی می‌گذارد، سبب افزایش گرفتگی می‌شود [۷۸ و ۵۰]. فلاح و همکاران با کاهش HRT و به تبع آن افزایش بار استایرن ورودی در فاضلاب سنتزی درون زیست‌راکتور MBR شاهد کاهش اندازه ذرات، افزایش سهم ذرات ریز در لجن فعال و افزایش میزان SMP بوده و این عوامل را عامل گرفتگی غشاء گزارش کردند [۴۸]. هوانگ^۳ و همکاران افزایش گرفتگی مشاهده شده با کاهش HRT را به افزایش SMP و بخصوص غلظت پروتئین و کاهش نسبت کربوهیدرات به پروتئین در SMP نسبت دادند [۴۹].

۴-۳-۲ زمان ماند لجن (SRT)

SRT یکی از عوامل تأثیرگذار نامستقیم به‌شمار می‌آید که از طریق تأثیر بر سایر خواص لجن می‌تواند بر گرفتگی تأثیر بگذارد. گزارش‌های ضد و نقیضی در مورد اثر SRT بر گرفتگی انتشار یافته است. برخی افزایش SRT را به دلیل افزایش زیست‌توده سبب افزایش گرفتگی می‌دانند [۹۴]. در حالی که برخی دیگر کاهش آن را سبب افزایش SMP و EPS و در نتیجه موجب افزایش گرفتگی دانسته‌اند [۹۵ و ۶۶].

۵. ترکیبات لایه‌های گرفته شده روی غشاء

محدودیت عمده استفاده از MBR کاهش سریع عبورپذیری غشاء در نتیجه گرفتگی است. مقاومت صافش غشاء در طول عملیات غشاء از طریق مقاومت گرفتگی منافذ، مقاومت ذاتی غشاء و کیک تشکیل شده روی سطح غشاء سبب می‌شود. لی^۴ و همکاران سهم هر یک از این مقاومت‌ها را، به ترتیب، ۸٪، ۱۲٪ و ۸۰٪ گزارش کرده‌اند [۹۶].

و EPSs و یا تغییرات جمعیت میکروبی و یا لیز شدن سلولی است [۱۹]. تحقیقات زیادی نشان داده است که توزیع اندازه ذرات در MBR در مقایسه با اندازه ذرات در سیستم لجن فعال معمولی کوچک‌تر است [۸۹ و ۵۲]. این اندازه کوچک اگرچه مزایایی از جمله بازدهی بالاتر را در پی دارد [۹۱ و ۹۰] اما گرفتگی شدید به دلیل ذرات کوچک‌تر گزارش شده است [۹۳ و ۹۲ و ۴۸]. تحقیقات نشان داده که کیک تشکیل شده از ذرات کوچک می‌تواند مقاومت بیشتری ایجاد کند [۹۳ و ۹۲ و ۵۵ و ۳۴].

۴-۶-۲ آبگریزی / بار سطحی

آبگریزی به طور کلی تمایل مولکول‌های غیر قطبی برای تشکیل توده به‌منظور کاهش سطح تماس با مولکول‌های آب تلقی می‌شود. EPSها در لخته‌های لجن معمولاً حاوی گروه‌های باردار و گروه‌های غیر قطبی (مثلاً، مناطق آبگریز در پلی ساکاریدها و آروماتیک‌ها، آلیفاتیک‌ها در پروتئین) هستند [۱۹]. معمولاً لخته‌های آبگریز تمایل بیشتری به توده‌ای شدن دارند و تمایل کمتری به برهم‌کنش با غشاء آبدوست بروز می‌دهند. با وجود این، در تعدادی از تحقیقات علیرغم آبگریزی زیاد لخته‌ها، گرفتگی غشاء MBR گزارش شده است. در لجن فعال به دلیل یونیدگی گروه‌های عاملی آنیونی، بار سطحی لخته‌ها و EPS منفی و در محدوده ۱۰ mV - تا ۵۰ mV - است [۱۹ و ۲].

۴-۶-۳ حجیم شدن لجن

حجیم شدن لجن بر اثر رشد بیش از حد باکتری‌های رشته‌ای و یا افزایش بیش از حد میزان EPS، به افزایش گرانش‌روی و کاهش میزان تنش برشی و در نتیجه تشکیل لخته‌های بزرگ و نامنظم و کاهش نفوذپذیری غشاء می‌انجامد [۷۶ و ۵۷ و ۵۵ و ۵۲ و ۵۰ و ۳۴ و ۸]. تیان^۱ و همکاران مشاهده کردند که تمایل به گرفتگی در سیستم MBR برای لجن حجیم شده بخاطر میزان EPS بالاتر آن از لجن معمولی بیشتر است [۵۷].

۴-۳-۳ شرایط عملیاتی

۴-۳-۱ زمان ماند هیدرولیکی (HRT)

HRT یکی از پارامترهای مهم عملیاتی در فرایند MBR است که

1. Tian

2. Chang
3. Huang
4. Lee

گرفتگی غشاء، استفاده از روش پخش کردن گاز و با تمیز کردن با هواست. بنابر گزارشها، تقریباً اکثر MBRهای غوطه‌ور تجاری از روش تمیز کردن با هوا بهره می‌گیرند [۱۰۰].

روش پخش کردن گاز یکی از روشهای مؤثر برای کنترل گرفتگی غشاء شناخته شده است که با ایجاد یک چرخش داخلی برای توده سیال، آشفته‌گی و اغتشاشی در سیستم برقرار می‌کند که نتیجه آن کاهش قطبی شدن غلظتی است. ز طریق تنش ایجاد شده به کمک جریان لجن نیز لایه کیک روی سطح غشاء و تمیز کردن سطح غشاء در داخل زیست‌راکتور تحقق می‌یابد. این روش ساده و اقتصادی است و سبب افزایش شار خروجی می‌شود [۵۵]. علی‌رغم تأثیر مثبت افزایش شدت هوادهی در MBR غوطه‌ور روی بهبود شرایط هیدرودینامیکی سیستم، باوجود این افزایش شدت هوادهی می‌تواند باعث افزایش هزینه انرژی، فروپاشی لخته‌های لجن، تولید ذرات با ابعاد کوچک‌تر و رهاسازی EPS بیشتر شود که تأثیر منفی بر گرفتگی غشاء و عملکرد سیستم دارد. بنابراین، باید حد بهینه‌ای برای آن وجود داشته باشد [۵]. مطالعات قبلی نشان داده که افزایش بازده حذف کیک تشکیل شده روی سطح غشاء توسط هوادهی رابطه متناسبی با افزایش سرعت هوادهی نداشته و یک مقدار بهینه سرعت هوادهی برای حذف کیک لازم است [۱۰۱].

هرچند پخش کردن گاز پر کاربردترین روش در کاهش گرفتگی است، اما روش‌های دیگری چون شستشوی معکوس^۶، ضربان معکوس با تناوب زیاد^۷، ضربان با تناوب زیاد^۸، مکش-استراحت^۹ و شستشوی فیزیکی و شیمیایی^{۱۰} نیز در زیست‌راکتورهای غشایی برای رفع گرفتگی و کاهش مقاومت بهره گرفته شده است [۱۰۲ و ۱۰۳]. همچنین، روش‌های مرسوم دیگری نیز نظیر کار کردن در شرایط عملیاتی شار مناسب، کنترل SRT، اضافه کردن کربن فعال و مواد منعقدکننده و لخته‌کننده مناسب و اصلاح غشاء برای کنترل گرفتگی به کار برده می‌شود [۵۵ و ۳۰ و ۲۸ و ۱۱ و ۵ و ۲]. همچنین، از سال ۲۰۱۰، روش‌های کنترل گرفتگی نوظهوری از قبیل؛ تمیز کردن مکانیکی همراه با هوا [۱۰۳]، تمیز کردن شیمیایی در محل [۲۲]، تخریب آنزیمی و باکتریایی عوامل گرفتگی چون SMP و EPS [۱۰۴]، کاهش گرفتگی به روش انعقاد الکتریکی و یا

در حالی که پنداشته و همکاران سهم هر یک از این مقاومت‌ها را، به ترتیب، ۸/۸، ۵/۵ و ۸۵/۹٪ گزارش کردند [۳۸].

شناخت ماهیت و منشأ مواد گرفته شده موجود روی غشاء و کیک به برآورد روش‌های کنترلی مؤثر برای کمینه کردن گرفتگی غشاء کمک می‌کند. روش‌های آنالیزی زیر برای تعیین مشخصات مواد گرفته شده به کار می‌روند [۹۷].

اندازه‌گیری SMP و EPS و اجزای آن‌ها: برای تعیین اثر SMP و EPS و اجزای آن‌ها در تشکیل لایه‌های گرفته شده روی سطح غشاء AFM^۱ برای توصیف ریخت‌شناسی، توپولوژی (پست‌وبلند) و زبری سطح لایه کیک گرفته شده

FTIR^۲: برای تعیین ترکیب درصد لایه‌های گرفته شده روی غشاء از نظر گروه‌های عاملی آلی شامل الکل‌ها، اسیدها، کربوکسیلیک (مواد هیومیک)، آمین‌ها (پروتئین‌ها) و کربوهیدرات‌ها (پلی ساکاریدها) و غیرآلی

SEM^۳: برای توصیف ریخت‌شناسی لایه کیک گرفته شده و شکل ریزاندامگانها

EDX^۴: برای تعیین اجزای شیمیایی لایه کیک

PSD: برای تعیین ابعاد ذرات در لایه‌های گرفته شده روی غشاء در تحقیقات مختلف حضور درشت‌مولکولها و مواد کلونیدی نظیر SMP و EPS [۹۸]، مواد آلی با ساختار پیچیده [۳۵] و مواد غیرآلی [۹۷] روی لایه گرفته شده و کیک روی غشاء گزارش شده است. ما^۵ و همکاران در تصفیه فاضلاب روغن نباتی در MBR با به‌کارگیری تکنیک‌های FTIR، SEM و EDX برای تعیین خواص عوامل گرفتگی مشاهده کردند که لایه رسوب غشاء نه‌تنها شامل مواد آلی تشکیل شده از EPS (مانند پروتئین‌ها، پلی ساکاریدها و غیره) و روغن است، بلکه شامل مواد معدنی نیز هست. عوامل گرفتگی آلی به همراه مواد معدنی ته‌نشین شده، سرعت تشکیل لایه ژل را افزایش می‌دهد و باعث شدیدتر شدن گرفتگی غشاء می‌شوند [۹۹].

۶. روش‌های کاهش گرفتگی در زیست‌راکتور غشایی

یکی از مهم‌ترین روش‌های به‌کار رفته برای جلوگیری و کاهش

6. Back Washing
7. High-Frequency Backpulsing
8. High-Frequency Impulses
9. Suction-Relaxation
10. Chemical Cleaning

1. Atomic Force Microscopy
2. Fourier Transform Infrared
3. Scanning Electron Microscopy
4. Energy Dispersive X-ray
5. Ma

الکتروفورز [۱۰۵] و استفاده از غشاهای بر پایه نانومواد [۱۰۶] نیز توسعه یافته است.

با این وجود، آهنگ گرفتگی با توجه به نوع فاضلاب متفاوت است. نتایج تحقیقات زاوو^۱ و همکاران نشان داد که در سیستم MBR به کار برده شده برای تصفیه فاضلاب کک، گرفتگی شدید غشاء از نوع پرشدن منافذ در طولانی مدت رخ داده که تنها با شستشوی شیمیایی قابل برطرف شدن بود [۱۰۷]. علاوه بر این، مواد شیمیایی و یا ذرات موجود در فاضلاب‌های صنعتی مانند فاضلاب کاغذ، در واقع، بالقوه، عوامل گرفتگی اند که ممکن است بر روی غشاء رسوب کنند و در نتیجه باعث گرفتگی پیچیده‌تر غشاء شوند. اما، در تصفیه فاضلاب شهری توسط MBR، گرفتگی عمدتاً از طریق رسوب EPS، SMP و میکروب‌ها روی می‌دهد. بنابراین، با توجه به پیچیدگی زیاد، کنترل گرفتگی یک چالش در استفاده گسترده‌تر از MBR ها در تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی چالش به حساب می‌آید. به این ترتیب، تمیز کردن همیشگی فیزیکی و حتی شیمیایی مورد نیاز است و بنابراین طول عمر غشاء ممکن است کوتاه شود [۵].

یکی از روش‌های درخور توجه برای کاهش گرفتگی غشاء در MBR، توسعه یک MBR اسمز رو به جلو (FOMBR)^۲ است. مطالعه مقایسه‌ای بین MBR و FOMBR معمولی نشان داده که شار پایدار بالاتر و گرفتگی غشاء کمتر و همچنین حذف COD و آمونیم بهتر در سیستم‌های FOMBR دیده شده است [۱۰۸].

در تحقیقات اخیر، سیستم‌های هیبریدی (ترکیبی یا دورگه) برای بررسی گرفتگی غشاء ارزیابی شده‌اند. لی^۳ و همکاران برای کاهش گرفتگی غشاء یک MBR را با لجن دانه‌ای هوازی ترکیب کرده‌اند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده که ترکیبات کلئیدی و املاح در مایع درون راکتور به نحو چشمگیری توسط لجن دانه‌ای کاهش یافته و در نتیجه گرفتگی غشاء کمتر شده است [۱۰۹]. لیکنس^۴ و همکاران در یک MBR زیست‌لایه‌ای پی بردند که عملکرد غشاء در سیستم همراه شده با یک دستگاه لخته‌کننده بهبود یافته است [۱۱۰]. از آنجا که آهنگ بالای بار آلی سبب افزایش غلظت لجن و در نتیجه افزایش غلظت EPS و SMP می‌شود، بنابراین به نظر می‌رسد استفاده ترکیبی از فرایند بی‌هوازی و سیستم MBR

هوازی جایگزینی برای کنترل گرفتگی غشاء باشد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که یک طراحی و یا استفاده مناسب از فرایند MBR به کنترل گرفتگی غشاء در تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی کمک خواهد کرد.

برخی پژوهشگران در زمینه کنترل زیستی در گرفتگی غشاء متمرکز شده‌اند. بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی و عملیات عملی نشان داده که رسوب لجن در سطح غشاء عامل اصلی گرفتگی غشاء در سیستم‌های MBR است. کنترل رسوب لجن به کاهش چشمگیری گرفتگی غشاء منجر خواهد شد. زنگ^۵ و همکاران تفاوت درخور توجهی در جامعه میکروبی لجن در سطح غشاء و در لجن موجود در مایع درون راکتور مشاهده و پیشنهاد کردند که برخی از باکتری‌ها ممکن است پیشگامان گرفتگی در غشاء ریزش‌افش باشند [۱۱۱]. نتایج آنالیزهای مختلف روی جامعه میکروبی لخته‌های کوچک و بزرگ لجن در مایع درون راکتور نشان داده که جامعه میکروبی اجزای لخته‌های کوچک در لجن موجود در مایع درون راکتور مشابه با لجن کیک است [۱۱۲]. بنابراین، این لخته‌های کوچک نقش پررنگ‌تری در گرفتگی غشاء دارد و کنترل آن‌ها دارای اهمیت است. علاوه بر جامعه میکروبی، وانگ و لی^۶ [۱۱۳] و وانگ و همکاران [۱۱۴] دریافتند که BPCها از عوامل مهم گرفتگی بوده که بر گرفتگی غشاء در MBRها تأثیر عمیقی می‌گذارند. برهم‌کنش بین BPCها و لخته‌های لجن تا حد زیادی عامل رسوب لجن در سطح غشاء است. بر اساس مطالعه سون^۷ و همکاران، ازون زنی به طور چشمگیری باعث کاهش غلظت BPC و اصلاح خواص سطحی آن شده و در نتیجه گرفتگی غشاء به طور مؤثری کنترل می‌شود [۱۱۵]. در مواردی که EPS عامل اصلی گرفتگی غشاء باشد، کنترل EPS یکی از مهم‌ترین راهکارها برای کاهش گرفتگی غشاء است. این راهبرد به طور کلی به سه گروه؛ کنترل تولید EPS از طرق تنظیم شرایط عملیاتی و ویژگی‌های خوراک ورودی و افزودن افزودنی‌ها به ذرات معلق لجن، اصلاح خواص EPS با هدف افزایش بار و آبگریزی آن از طریق تنظیم pH و قدرت یونی، اضافه کردن عوامل جاذب و منعقدکننده، کنترل HRT و SRT و همچنین حذف EPS از طریق شستشوی فیزیکی، شیمیایی و آنزیمی تقسیم می‌شود [۱۱۹].

1. Zhao
2. Forward Osmosis MBR
3. Li
4. Leiknes

5. Zhang
6. Wang and Li
7. Sun

می‌تواند توصیه‌های مفیدتری را نیز برای جوامع صنعتی بر اساس کاربردهای مرتبط ارائه دهد.

۸. سپاسگزاری

از زحمات و راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای دکتر بابک بنکدارپور سپاسگزارم.

مراجع

- [1] Judd, S., Judd, C., "The MBR Book: Principles and Application of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment", 2th ed., Oxford, Elsevier, (2011).
- [2] Le-Clech, P., Chen, V., Fane, T. A. G., "Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment", *Journal of Membrane Science*, 284, 17-53, (2006).
- [3] BCC Research, Membrane Bioreactors: Global Markets, <http://www.bccresearch.com/market-research/membrane-and-separation-technology/membrane-bioreactors-global-markets-report-mst047d.html> (Accessed 22 June 2016).
- [4] Drews, A., "Membrane fouling in membrane bioreactors: Characterisation, contradictions, cause and cures", *Journal of Membrane Science*, 363, 1-28, (2010).
- [5] Lin, H., Gao, W., Meng, F., Liao, B. Q., Leung, K. T., Zhao, L., Chen, J., Hong, H., "Membrane Bioreactors for Industrial Wastewater Treatment: A Critical Review", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42, 677-740, (2012).
- [6] Guo, W., Ngo, H. H., Li, J., "A mini-review on membrane fouling", *Bioresource Technology* 122, 27-34, (2012).
- [7] Yoon, S. H., "Membrane bioreactor processes: Principles and applications", CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, New York, (2016).
- [8] Meng, F., Chae, S. R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H. S., Yang, F., "Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material", *Water Research*, 43, 1489-1512, (2009).
- [9] Bornare, J. B., Raman, V. K., Sapkal, V. S., Sapkal, R. S., Minde, G., Sapkal, P. V., "An Overview of Membrane Bioreactors for Anaerobic Treatment of Wastewaters", *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*, 1 (7), 91-97, (2014).
- [10] Drews, A., Lee, C. H., Kraume, M., "Membrane fouling- a review on the role of EPS", *Desalination*, 200, 186-188, (2006).
- [11] Mutamim, N. S. A., Noor, Z. Z., Abu Hassan, M. A., Yuniarto, A., Olsson, G., "Review, Membrane bioreactor: Applications and limitations in treating high strength industrial wastewater", *Chemical Engineering Journal*, 225, 109-119, (2013).

بهینه‌سازی راکتور و طراحی مدول‌های غشایی نیز می‌تواند روی کنترل گرفتگی غشاء تأثیر مثبت بگذارد. از دیدگاه هوادهی در MBRها، معمولا حساب‌های کوچک مناسب برای هوادهی و حساب‌های درشت و بزرگ‌تر مناسب برای کنترل گرفتگی‌اند. علاوه بر این، لو^۱ و همکارانش با به‌کارگیری غشاء ریزصافی از نوع قرص دوار در سیستم MBR مشاهده کردند که چنین سیستمی با غلظت لجن بالا و سیال بسیار گرانبه‌تری برخوردار است و گرفتگی غشاء در آن بسیار کم بوده است [۱۱۶].

یک روش جدید دیگر برای کنترل گرفتگی استفاده از فراصوت است. سوئی^۲ و همکاران مشاهده کردند که در یک MBR بی‌هوازی، گرفتگی غشاء به‌طور مؤثری به کمک فراصوت کنترل شده است. غلظت زیاد لجن و زمان طولانی تابش فراصوت باعث افزایش اثر فراصوت شده است [۱۱۷]. با وجود تمامی روش‌های ذکر شده، توسعه اقدامات مؤثرتر و اقتصادی‌تر برای کنترل گرفتگی غشاء در آینده بسیار مطلوب است.

۷. نتیجه‌گیری کلی

در حال حاضر، گرفتگی غشاء هنوز بزرگ‌ترین چالش و مانع عمده برای اجرای گسترده فرایندهای زیست‌راکتور غشایی است. گرفتگی غشاء از طریق کاهش عملکرد سیستم در میزان فاضلاب خروجی، کاهش طول عمر غشاء و در نتیجه افزایش هزینه تعویض غشاء و همچنین افزایش میزان انرژی مورد نیاز برای هوادهی باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. از این رو، درک بهتری از گرفتگی غشاء نه تنها کلید حل مشکلات است، بلکه یکی از عوامل اصلی هدایت فرایندهای غشایی به جلو به‌شمار می‌آید. در این مقاله به منظور کنترل و کاهش گرفتگی غشاء در سیستم‌های MBR، نتایج بیش از ۱۲۰ مقاله در ارتباط با سازوکارهای گرفتگی و انواع مختلف گرفتگی و همچنین عوامل مؤثر بر گرفتگی غشاء به‌طور کامل مرور شد و در نهایت روش‌های کاهش گرفتگی MBR بیان شد. راهبردهای اخیر برای کنترل گرفتگی غشاء نشان داده که علاوه بر هدف بهبود عملکرد غشاء، مصرف انرژی کمتر و روش‌های کنترلی سبز و پایدار بیشتر نیز از اهداف مورد نظر در آینده است. به‌طور کلی، مقاله مروری اخیر نه تنها چالش‌های موجود و نیازهای تحقیق برای دانشمندان در زمینه فناوری‌های MBR را بیان می‌کند، بلکه

1. Lu
2. Sui

- [12] Besha, A. T., Gebreyohannes, A. Y., Tufa, R. A., Bekele, D. N., Curcio, E., Giorno, L., "Removal of emerging micropollutants by activated sludge process and membrane bioreactors and the effects of micropollutants on membrane fouling: A review", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 2395–2414, (2017).
- [13] Huang, L., Lee, D. J., "Membrane bioreactor: A mini review on recent R&D works", *Bioresource Technology*, 194, 383–388, (2015).
- [14] Aslam, M., Charfi, A., Lesage, G., Heran, M., Kim, J., "Membrane bioreactors for wastewater treatment: A review of mechanical cleaning by scouring agents to control membrane fouling", *Chemical Engineering Journal*, 307, 897–913, (2017).
- [15] Chen, R., Nie, Y., Hu, Y., Miao, R., Utashiro, T., Lia, Q., Xua, M., Li, Y. Y., "Fouling behaviour of soluble microbial products and extracellular polymeric substances in a submerged anaerobic membrane bioreactor treating low-strength wastewater at room temperature", *Journal of Membrane Science*, 531, 1–9, (2017).
- [16] Deng, L., Guo, W., Hao Ngo, H., Zhang, H., Wang, J., Li, J., Xia, S., Wu, Y., "Biofouling and control approaches in membrane bioreactors", *Bioresource Technology*, 221, 656–665, (2016).
- [17] Juntawang, Ch., Rongsayamanont, Ch., Khan, E., "Fouling characterization in entrapped cells-based-membrane bioreactor treating wastewater", *Separation and Purification Technology*, 175, 321–329, (2017).
- [18] Krzeminski, P., Leverette, L., Malamis, S., Katsou, E., "Membrane bioreactors – A review on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations, LCA and market prospects", *Journal of Membrane Science*, 527, 207–227, (2017).
- [19] Lin, H., Zhang, M., Wang, F., Meng, F., Liao, B. Q., Hong, H., Chen, J., Gao, W., "A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies", *Journal of Membrane Science*, 460, 110–125, (2014).
- [20] Zuthi, M. F. R., Ngo, H. H., Guo, W. S., Zhang, J., Liang, S. A., "review towards finding a simplified approach for modelling the kinetics of the soluble microbial products (SMP) in an integrated mathematical model of membrane bioreactor (MBR)", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 466–473, (2013).
- [21] Zuthi, M. F. R., Ngo, H. H., Guo, W. S., "Modelling bioprocesses and membrane fouling in membrane bioreactor (MBR): A review towards finding an integrated model framework", *Bioresource Technology*, 122, 119–129, (2012).
- [22] Wang, Zh., Ma, J., Tang, Ch. Y., Kimura, K., Wang, Q., Han, X., "Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review", *Journal of Membrane Science*, 468, 276–307, (2014).
- [23] Shen, L., Wang, X., Li, R., Yu, H., Hong, H., Lin, H., Chen, J., Liao, B. Q., "Physicochemical correlations between membrane surface hydrophilicity and adhesive fouling in membrane bioreactors", *Journal of Colloid and Interface Science*, 505, 900–909, (2017).
- [24] Meng, F., Zhang, Sh., Oh, Y., Zhou, Zh., Shin, H. S., Chae, S. R., "Fouling in membrane bioreactors: An updated review", *Water Research*, 114, 151–180, (2017).
- [25] 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).
- [26] Habib R, Asif, M. B., Iftekhhar, S., Khan, Z., Gurung, K., Srivastava, V., Sillanpää, M., "Influence of relaxation modes on membrane fouling in submerged membrane bioreactor for domestic wastewater treatment", *Chemosphere*, 181, 19–25, (2017).
- [27] Sheikholeslami, R., "Composite Fouling - Inorganic and Biological: A Review", *Environmental Progress*, 18 (2), 113–122, (1999).
- [28] Liao, B. Q., Bagley, D. M., Kraemer, H. E., Leppard, G. G., Liss, S. N., "A review of biofouling and its control in membrane separation bioreactors", *Water Environmental Research*, 76 (5), 425–436, (2004).
- [29] Judd, S., "Fouling control in submerged membrane bioreactors", *Water Science & Technology*, 51 (6–7), 27–34, (2005).
- [30] Chang, I. S., Le-Clech, P., Jefferson, B., Judd, S., "Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment", *Environmental Engineering Science*, 128 (11), 1018–1029, (2002).
- [31] Le-Clech, P., Jefferson, B., Judd, S. J., "Impact of aeration, solids concentration and membrane characteristics on the hydraulic performance of a membrane bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 218, 117–129, (2003).
- [32] Drews, A., Vocks, M., Iversen, V., Lesjean, B., Kraume, M., "Influence of unsteady membrane bioreactor operation on EPS formation and filtration resistance", *Desalination*, 192, 1–9, (2006).
- [33] Drews, A., Vocks, M., Bracklow, U., Iversen, V., Kraume, M., "Does fouling in MBRs depend on SMP?", *Desalination*, 231, 141–149, (2008).
- [34] Meng, F., Yang, F., "Fouling mechanisms of deflocculated sludge, normal sludge, and bulking sludge in membrane bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 305 (1–2), 48–56, (2007).
- [35] Wang, Z., Wu, Z., Yin, X., Tian, L., "Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (MBR) under sub-critical flux operation: Membrane foulant and gel layer characterization", *Journal of Membrane Science*, 325, 238–244, (2008).
- [36] Zhang, M., Peng, W., Chen, J., He, Y., Ding, L., Wang, A., Lin, H., Hong, H., Zhang, Y., Yu, H., "A new insight into membrane fouling mechanism in submerged membrane bioreactor: osmotic pressure during cake layer filtration", *Water Research*, 47, 2777–2786, (2013).
- [37] Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abidin, Z. Z., Abdullah, L. Ch., Awang Biak, D. R., Madaeni, S. S.,

- "Application of membrane-coupled sequencing batch reactor for oilfield produced water recycle and beneficial re-use", *Bioresource Technology*, 101(18), 6942-6949, (2010).
- [38] Pendashteh, A. R., Luqman Chuah, A., Fakhru'l-Razi, A., Madaeni, S. S., Zainal, Z. A., Dayang Radiah, A. B., "Evaluation of membrane bioreactor for hypersaline oily wastewater treatment", *Process Safety and Environmental Protection*, 90 (1), 45-55, (2011).
- [39] Kang, I. J., Yoon, S. H., Lee, C. H., "Comparison of the filtration characteristics of organic and inorganic membranes in a membrane-coupled anaerobic bioreactor", *Water Research*, 36, 803-1813, (2002).
- [40] Ognier, S., Wisniewski, C., Grasmick, A., "Characterisation and modeling of fouling in membrane bioreactors", *Desalination*, 146, 141-147, (2002).
- [41] Meng, F., Zhang, H., Yang, F., Liu, L., "Characterization of cake layer in submerged membrane bioreactor", *Environmental Science & Technology*, 41, 4065-4070, (2007).
- [42] Park, H. D., Chang, I. S., Lee, K. J., "Pinciples of Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment", CRC Press, Boca Raton, Taylor and Francis Inc., United States, (2015).
- [43] Hosseinzadeh, M., Mehrnia, M. R., Mostoufi, N., "Experimental study and modeling of fouling in immersed membrane bioreactor operating in constant pressure filtration", *Mathematical Problems in Engineering*, 1 (1), 456143, (2013).
- [44] Liu, L., Liu, J., Bo, G., Yang, F., Crittenden, J., Chen, Y., "Conductive and hydrophilic polypyrrole modified membrane cathodes and fouling reduction in MBR", *Journal of Membrane Science*, 429, 252-258, (2013).
- [45] Yamamura, H., Kimura, K., Watanabe, Y., "Mechanism involved in the evolution of physically irreversible fouling in microfiltration and ultrafiltration membranes used for drinking water treatment", *Environmental Science & Technology*, 41, 6789-6794, (2007).
- [46] Chen, L., Tian, Y., Cao, C. Q., Zhang, J., Li, Z. N., "Interaction energy evaluation of soluble microbial products (SMP) on different membrane surfaces: role of the reconstructed membrane topology", *Water Research*, 46, 2693-2704, (2012).
- [47] Pajoum Shariati, S. R., Bonakdarpour, B., Zare, N., Zokae Ashtiani, F., "The effect of hydraulic retention time on the performance and fouling characteristics of membrane sequencing batch reactors used for the treatment of synthetic petroleum refinery wastewater", *Bioresource Technology*, 102, 7692-7699, (2011).
- [48] Fallah, N., Bonakdarpour, B., Nasernejad, B., Alavi Moghadam, M. R., "Long-term operation of submerged membrane bioreactor (MBR) for the treatment of synthetic wastewater containing styrene as volatile organic compound (VOC): Effect of hydraulic retention time (HRT) ", *Journal of Hazardous Materials*, 178(1-3), 718-724, (2010).
- [49] Huang, Zh., Ong, S. L., Ng, H. Y., "Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: Effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling", *Water Research*, 45, 705-713, (2011).
- [50] Meng, F., Shi, B., Yang, F., Zhang, H., "Effect of hydraulic retention time on membrane fouling and biomass characteristics in submerged membrane bioreactors", *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 30, 359-367, (2007).
- [51] Sun, D. D., Khor, S. L., Hay, C. T., Leckie, O. J., "Impact of prolonged sludge retention time on performance of a submerged membrane bioreactor", *Desalination*, 208, 101-112, (2007).
- [52] Chang, M. C., Horng, R. Y., Shao, H., Hu, Y. J., "Performances and filtration characteristics of non-woven membranes used in a submerged membrane bioreactor for synthetic wastewater treatment", *Desalination*, 191 (1-3), 8-15, (2006).
- [53] Meng, F., Zhang, H., Yang, F., Li, Y., Xiao, J., Zhang, X., "Effect of filamentous bacteria on membrane fouling in submerged membrane bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 272 (1-2), 161-168, (2006).
- [54] Meng, F., Shi, B., Yang, F., Zhang, H., "New insights into membrane fouling in submerged membrane bioreactor based on rheology and hydrodynamics concepts", *Journal of Membrane Science*, 302 (1-2), 87-94, (2007).
- [55] Meng, F., Yang, F., Shi, B., Zhang, H., "Comprehensive study on membrane fouling in submerged membrane bioreactors operated under different aeration intensities", *Separation and Purification Technology*, 59, 91-100, 2008.
- [56] Choi, J. G., Bae, T. H., Kim, J. H., Tak, T. M., Randall, A. A., "The behavior of membrane fouling initiation on the cross flow membrane bioreactor system", *Journal of Membrane Science*, 203, 103-113, (2002).
- [57] Tian, Y., Chen, L., Zhang, S., Cao, Ch., Zhang, Sh., "Correlating membrane fouling with sludge characteristics in membrane bioreactors: An especial interest in EPS and sludge morphology analysis", *Bioresource Technology*, 102, 8820-8827, (2011).
- [58] Dong, B., Jiang, S., "Characteristics and behaviors of soluble microbial products in sequencing batch membrane bioreactors at various sludge retention times", *Desalination*, 243, 240-250, (2009).
- [59] Xiang, T., sheng, Z., lirong, X., Mingchuan, Z., jiangrong, Z., "Performance and fouling characteristics in a membrane sequence batch reactor (MSBR) system coupled with aerobic granular sludge", *Desalination*, 261(1), 191-196, (2010).
- [60] Visvanathan, C., Choudhary, M. K., Montalbo, M. T., Jegatheesan, V., "Landfill leachate treatment using thermophilic membrane bioreactor", *Desalination*, 204, 8-16, (2007).
- [61] Trussell, R. S., Merlo, R. P., Hermanowicz, S. W., Jenkins, D., "The effect of organic loading on process performance and membrane fouling in a submerged membrane bioreactor treating municipal wastewater", *Water Research*, 40, 2675-2683, (2006).
- [62] Jiang, T., Kennedy, M. D., Schepper, V. D., Nam, S. N., Nopens, I., Vanrolleghem, P. A., Amy, G.,

- "Characterization of soluble microbial products and their fouling impacts in membrane bioreactors", *Environmental Science & Technology*, 44, 6642–6648, (2010).
- [63] Lyko, S., Wintgens, T., Al-Halbouni, D., Baumgarten, S., Tacke, D., Drensla, K., Janot, A., Dott, W., Pinnekamp, J., Melin, T., "Long-term monitoring of a full-scale municipal membrane bioreactor – characterization of foulants and operational performance", *Journal of Membrane Science*, 317 (1–2), 78–87, (2008).
- [64] Wu, S. C., Lee, C. M., "Correlation between fouling propensity of soluble extracellular polymeric substances and sludge metabolic activity altered by different starvation conditions", *Bioresource Technology*, 102, 5375–5380, (2011).
- [65] Yigit, N. O., Harman, I., Civelekoglu, G., Koseoglu, H., Cicek, N., Kitis, M., "Membrane fouling in a pilot-scale submerged membrane bioreactor operated under various conditions", *Desalination*, 231 (1–3), 124–132, (2008).
- [66] Grelier, P., Rosenberger, S., Tazi-Pain, A., "Influence of sludge retention time on membrane bioreactor hydraulic performance", *Desalination*, 192 (1-3), 10–17, (2006).
- [67] Viero, A. F., Melo, T. M., Torreses, A. P. R., Ferreirab, N. R., Sant'Anna, G.L., Borges, C. P., Santiagob, V. M. J., "The effects of long-term feeding of high organic loading in a submerged membrane bioreactor treating oil refinery wastewater", *Journal of Membrane Science*, 319, 223–230, (2008).
- [68] Kim, I. S., Jang, N., "The effect of calcium on the membrane biofouling in the membrane bioreactor (MBR)", *Water Research*, 40 (14), 2756–2764, (2006).
- [69] Li, J., Li, Y., Ohandja, D. G., Yang, F., Wong, F. S., Chuad, H. G., "Impact of filamentous bacteria on properties of activated sludge and membrane-fouling rate in a submerged MBR", *Separation and Purification Technology*, 59, 238–243, (2008).
- [70] Bott, C. B., Love, N. G., "Investigating a mechanistic cause for activated- Sludge deflocculation in response to shock loads of toxic electrophilic chemicals", *Water Environmental Research*, 74, 306–315, (2002).
- [71] Bott, C. B., Duncan, A. J., Love, N. G., "Stress protein expression in domestic activated sludge in response to xenobiotic shock loading", *Water Science and Technology*, 43(1), 123–130, (2001).
- [72] Trussell, R. S., Merlo, R. P., Hermanowicz, S. W., Jenkins, D., "Influence of mixed liquor properties and aeration intensity on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor at high mixed liquor suspended solids concentrations", *Water Research*, 41 (5), 947–958, (2007).
- [73] Cicek, N., Franco, J. P., Suidan, M. T., Urbain, V., Manem, J., "Characterization and comparison of a membrane bioreactor and a conventional activated sludge system in the treatment of wastewater containing high-molecular weight compounds", *Water Environmental Research*, 71, 64–70, (1999).
- [74] Chang, I. S., Kim, S. N., "Wastewater treatment using membrane filtration – effect of biosolids concentration on cake resistance", *Process Biochemistry*, 40 (3–4), 1307–1314, (2005).
- [75] Brookes, A., Jefferson, B., Guglielmi, G., Judd, S. J., "Sustainable flux fouling in a membrane bioreactor: impact of flux and MLSS", *Separation Science and Technology*, 41, 1279–1291, (2006).
- [76] Chang, C. Y., Chang, J. S., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., "Pharmaceutical wastewater treatment by membrane bioreactor process- a case study in southern Taiwan", *Desalination*, 234, 393–401, (2008).
- [77] Gao, M., Yang, M., Li, H., Wang, Y., Pan, F., "Nitrification and sludge characteristics in a submerged membrane bioreactor on synthetic inorganic wastewater", *Desalination*, 170, 177–185, (2004).
- [78] Chae, S. R., Ahn, Y. T., Kang, S. T., Shin, H. S., "Mitigated membrane fouling in a vertical submerged membrane bioreactor (VSMBR)", *Journal of Membrane Science*, 280 (1–2), 572–581, (2006).
- [79] Reid, E., Liu, X., Judd, S. J., "Sludge characteristics and membrane fouling in full-scale submerged membrane bioreactors", *Desalination*, 219, 240–249, (2008).
- [80] Xing, C. H., Qian, Y., Wen, X. H., Wu, W. Z., Sun, D., "Physical and biological characteristics of a tangential-flow MBR for municipal wastewater treatment", *Journal of Membrane Science*, 191, 31–42, (2001).
- [81] Yang, F., Bick, A., Shandalov, S., Brenner, A., Oron, G., "Yield stress and rheological characteristics of activated sludge in an airlift membrane bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 334, 83–90, (2009).
- [82] Itonaga, T., Kimura, K., Watanabe, Y., "Influence of suspension viscosity and colloidal particles on permeability of membrane used in membrane bioreactor (MBR)", *Water Science and Technology*, 50, 301–309, (2004).
- [83] Chang, I. S., Lee, C. H., "Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system, the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling", *Desalination*, 120, 221–233, (1998).
- [84] Chang, I. S., Bag, S. O., Lee, C. H., "Effects of membrane fouling on solute rejection during membrane filtration of activated sludge", *Process Biochemistry*, 36 (8–9), 855–860, (2001).
- [85] [85] عبدالله‌زاده شرقی، الهام، "تصفیه زیستی آب تولیدی میدان نفتی در زیست‌راکتور غشایی"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۹۱).
- [86] Abdollahzadeh Sharghi, E., Bonakdarpour, B., "The study of organic removal efficiency and halophilic bacterial mixed liquor characteristics in a membrane bioreactor treating hypersaline produced water at

- varying organic loading rates", *Bioresource Technology*, 149, 486–495, (2013).
- [87] Morgan-Sagastume, F., Grant Allen, D., "Activated sludge deflocculation under temperature upshifts from 30 to 45 degrees C, *Water Research*, 39 (6), 1061–1074, (2005).
- [88] Chiemchaisri, C., Yamamoto, K., "Performance of membrane separation bioreactor at various temperatures for domestic wastewater treatment", *Journal of Membrane Science*, 87, 119-129, (1994).
- [89] Holbrook, R. D., Massie, K. A., Nobak, J. T., "A Comparison of Membrane Bioreactor and Conventional –Activated –Sludge Mixed liquor and Biosolids Characteristics", *Water Environment Research*, 77(4), 323-330, (2005).
- [90] Li, D. H., Ganczarzyk, J. J., "Factors affecting dispersion of activated sludge flocs", *Water Environment Research*, 65, 258-26, (1993).
- [91] Schroder, H. F., "Mass spectrometric monitoring of the degradation and elimination efficiency for hardly eliminable and hardly biodegradable polar compounds by membrane bioreactors", *Water Science and Technology*, 46, 57-64, (2002).
- [92] Bai, R., Leow, H. F., "Microfiltration of activated sludge wastewater—the effect of system operation parameters", *Separation and Purification Technology*, 29, 189–198, (2002).
- [93] Lim, A. L., Bai, R., "Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater", *Journal of Membrane Science*, 216, 279-290, (2003).
- [94] Han, S. S., Bae, T. H., Jang, G. G., Tak, T. M., "Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system", *Process Biochemistry*, 40, 2393–2400, (2005).
- [95] Ng, H. Y., Hermanowicz, S. W., "Membrane bioreactor operation at short solids retention times: performance and biomass characteristics", *Water Research*, 39, 981–992, (2005).
- [96] Lee, J., Ahn, W. Y., Lee, C. H., "Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor", *Water Research*, 35, 2435–2445, (2001).
- [97] Pendashteh, A. R., Fakhru'l-Razi, A., Madaeni, S. S., Luqman Chuah, A., Zainal, Z. A., Dayang Radiah, A. B., "Membrane foulants characterization in a membrane bioreactor (MBR) treating hypersaline oily wastewater", *Chemical Engineering Journal*, 168, 140–150, (2011).
- [98] Amy, G., "Fundamental understanding of organic matter fouling of membranes", *Desalination*, 231, 44-51, (2008).
- [99] Ma, Z., Lei, T., Ji, X., Gao, X., Gao, C., "Submerged Membrane Bioreactor for Vegetable Oil Wastewater Treatment", *Chemical Engineering Technology*, 38, 1-10, (2015).
- [100] Chang, I. S., Lee, C. H., Ahn, K. H., "Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system: the effect of floc structure on membrane fouling", *Separation Science and Technology*, 34, 1743–1758, (1999).
- [101] Han, S. S., Bae, T. H., Jang, G. G., Tak, T. M., "Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system", *Process Biochemistry*, 40, 2393–2400, (2005).
- [102] Marrot, B., Barrios-Martinez, A., Moulin, P., Roche, N., "Industrial wastewater treatment in a membrane bioreactor: A review", *Environmental Progress*, 23, 59-68, (2004).
- [103] Rosenberger, S., Helmus, F. P., Drews, A., "Addition of particles for fouling minimization in membrane bioreactors - permeability performance, fluid dynamics, and rheology", *Chemie Ingenieur Technik*, 88, 29–38, (2016).
- [104] Chen, D., Columbia, M., "Enzymatic control of alginate fouling of dead-end MF and UF ceramic membranes", *Journal of Membrane Science*, 381, 118–125, (2011).
- [105] Wang, Y. K., Li, W. W., Sheng, G. P., Shi, B. J., Yu, H. Q., "In-situ utilization of generated electricity in an electrochemical membrane bioreactor to mitigate membrane fouling", *Water Research*, 47, 5794–5800, (2013).
- [106] Qu, X. L., Alvarez, P. J. J., Li, Q. L., "Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment", *Water Research*, 47, 3931–3946, (2013).
- [107] Zhao, W., Huang, X., Lee, D., Wang, X., Shen, Y., "Use of submerged anaerobic-anoxic-oxic membrane bioreactor to treat highly toxic coke wastewater with complete sludge retention", 330 (1–2), 57–64, (2009).
- [108] Achilli, A., Cath, T. Y., Marchand, E. A., Childress, A. E., "The forward osmosis membrane bioreactor: A low fouling alternative to MBR processes", *Desalination*, 239, 10–21, (2009).
- [109] Li, X., Gao, F., Hua, Z., Du, G., Chen, J., "Treatment of synthetic wastewater by a novel MBR with granular sludged enveloped for controlling membrane fouling", *Separation and Purification Technology*, 46, 19–25, (2005).
- [110] Leiknes, T., Bolt, H., Engmann, M., Odegaard, H., "Assessment of membrane reactor design in the performance of a hybrid biofilm membrane bioreactor (BF-MBR). *Desalination* 199, 328–330, (2006).
- [111] Zhang, K., Choi, H., Dionysiou, D. D., Sorial, G. A., Oerther, D. B., "Identifying pioneer bacterial species responsible for biofouling membrane bioreactors", *Environmental Microbiology*, 8, 433–440, (2006).
- [112] Lin, H. J., Gao, W. J., Leung, K. T., Liao, B. Q., "Characteristics of different fractions of microbial flocs and their role in membrane fouling", *Water Science and Technology*, 63, 262–269, (2010).

- [113] Wang, X. M., Li, X. Y., "Accumulation of biopolymer clusters in a submerged membrane bioreactor and its effect on membrane fouling", *Water Research*, 42, 855–862, (2008).
- [114] Wang, X. M., Li, X. Y., Huang, X., "Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (SMBR): Characterisation of the sludge cake and its high filtration resistance", *Separation and Purification Technology*, 52, 439–445, (2007).
- [115] Sun, F. Y., Wang, X. M., Li, X. Y., "Effect of biopolymer clusters on the fouling property of sludge from a membrane bioreactor (MBR) and its control by ozonation", *Process Biochemistry*, 46, 162–167, (2010).
- [116] Lu, S. G., Imai, T., Ukita, M., Sekine, M., Fukagawa, M., Nakanishi, H., "Fermentation wastewater treatment in a membrane bioreactor", *Environmental Technology*, 20, 431–436, (1999).
- [117] Sui, P., Wen, X., Huang, X., "Membrane fouling control by ultrasound in an anaerobic membrane bioreactor", *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 1, 362–367, (2007).