کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران
دانشگاه تهران، تهران
۲۶ و ۲۷ بهمن‌ماه ۱۳۹۵

1245P-NWWCE

مروری بر سامانه کاربردی بیوراکتورهای غشایی دینامیکی در تصفیه فاضلاب و بررسی عوامل تاثیر گذار این سامانه در حذف بهتر آلاینده‌ها

محمد صباغیان[۱]، محمدرضا مهرنیا[۲]، محمد اسماعیلی[۳]، داود نورمحمدی[٤]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران

۲و۳- دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

٤- مدیر دفتر فنی و خدمات مهندسی، شرکت فاضلاب تهران، تهران

Mmehrnia2@gmail.com

خلاصه

فرایند بیوراکتورهای غشایی ترکیبی از فرآیندهای بیولوژیکی با جداسازی غشایی برای تصفیه فاضلاب می‌باشد. این فرایند از جدیدترین تکنولوژی‌های تصفیه فاضلاب است، به طوری که می توان در یک واحد فرایندی کوچک به آب تصفیه شده با کیفیت خروجی بالادست یافت. اما دارای مشکلاتی نظیر گرفتگی و مسدود شدن تدریجی غشا و تعویض غشا می‌باشد. وجود این معضلات، مطالعات در این زمینه را افزایش داده است. بنابراین بر اساس پژوهش‌های انجام شده، می‌توان به بیوراکتورهای غشایی دینامیکی(DMBRs) به عنوان یک جایگزین برای کاهش گرفتگی و هزینه‌های مربوط به غشاهای پلیمری مرسوم اشاره کرد. استفاده از غشای دینامیکی در بیوراکتورهای غشایی از لحاظ هزینه‌های عملیاتی، مصرف انرژی، کیفیت خروجی مطلوب و افزایش شار اثربخش است. بنابراین در این مقاله ابتدا به معرفی بیوراکتور غشایی دینامیکی و نحوه عملکرد آن پرداخته می‌شود و سپس در ادامه با مروری بر مطالعات انجام گرفته در این زمینه، عوامل موثر در تصفیه فاضلاب با استفاده از بیوراکتورغشایی دینامیکی بررسی می‌شود.

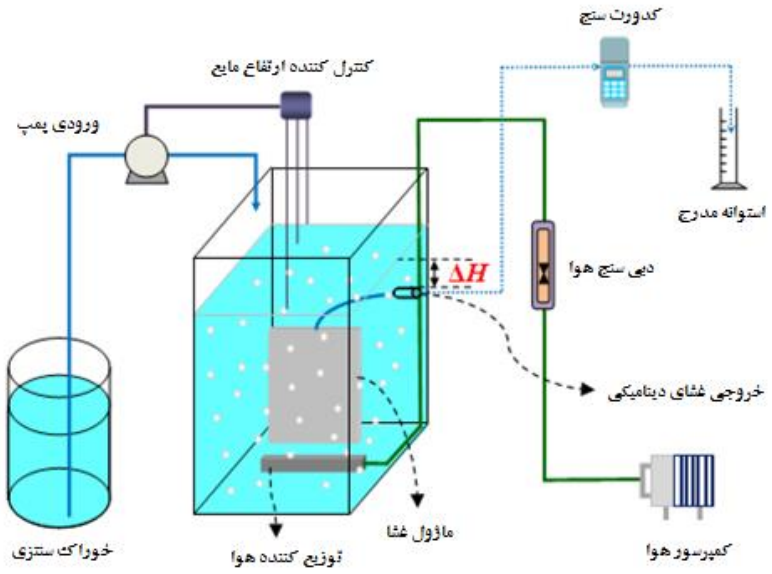
کلمات کلیدی:بیوراکتورهای غشایی، گرفتگی، بیوراکتورهای غشایی دینامیکی، مصرف انرژی.

۱. مقدمه

بیوراکتورهای غشایی در واقع سیستم تصفیه متمرکز و منسجم متشکل از دو مرحله‌ی تجزیه‌ی بیولوژیکی و جداسازی غشایی است که مرحله‌ی غشایی را می‌توان به عنوان جایگزین واحد شفاف‌سازی و ته‌نشینی سیستم رایج لجن فعال دانست. یکی از مزیت‌های استفاده از بیوراکتورهای غشایی نسبت به فرایندهای موجود در زمینه تصفیه پساب این است که با ترکیب فیلتراسیون غشایی همراه با یک فرایند بیولوژیک می‌توان در یک واحد فرایندی کوچک به آب تصفیه شده با کیفیت خروجی بالادست یافت. علاوه بر مزایای بیوراکتورهای غشایی در زمینه تصفیه‌ی پساب، این سیستم‌ها دارای معایبی نظیر هزینه‌های بالای تعویض غشاهای پلیمری، انرژی مصرفی، گرفتگی غشا و شار عملیاتی پایین نسبت به فرایندهای متداول می‌باشند که دلایلی بر عدم فراگیر شدن فرایندهای بیوراکتور غشایی (MBR) شده است[۱].بنابراین استفاده از غشا دینامیکی در بیوراکتور غشایی می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای مرتفع نمودن این موانع مورد توجه قرار گیرد.

بیوراکتورهای غشایی دینامیکی: در تصفیه‌ی فاضلاب، غشاهای دینامیکی به عنوان جایگزین برای غشاهای مرسوم در بیوراکتورهای غشایی مورد بررسی قرار گرفته است. عملیات بیوراکتورهای غشایی دینامیکی به سه مرحله‌ی تشکیل غشای دینامیکی، فیلتراسیون و شست وشو[1] تقسیم می‌شود[۲]. با اینکه غشای دینامیکی سبب نگهداشت بالای ذرات جامد معلق[2] درداخل بیوراکتور می‌شود اما کیفیت[3] خروجی در مراحل اول فیلتراسیون خوب نبوده و به دلیل عبور مقدار زیادی لخته‌های لجن از منافذ درشت، دارای ذرات جامد معلق زیادی است. زمانی که لایه غشای دینامیکی تشکیل می‌شود، خروجی با کیفیت بسیار بالا و قابل مقایسه با خروجی از غشاهای میکرو و اولترا حاصل می شود. در بیشتر تحقیقات انجام شده لایه‌ی غشای دینامیکی به سرعت در مرحله اول فیلتراسیون تشکیل می‌شود و سبب نگهداشت بالای ذرات جامد معلق در ادامه‌ی فیلتراسیون می‌شود. بنابراین برای دستیابی به خروجی با کیفیت بالا تا زمانی که غشای دینامیکی تشکیل شود خروجی از فیلتر به داخل بیوراکتور بر می گردد[۳و۲]. شکل ۱ نمایی از سامانه بیوراکتورغشایی دینامیکی را نشان می‌دهد.

بیشتر تحقیقات بیوراکتور غشایی دینامیکی در زمینه تصفیه فاضلاب شهری و پساب سنتزی با بار آلی کم متوسط انجام شده است. گزارش شده است که بیوراکتورهای غشایی دینامیکی از نظر حذف بیولوژیک عملکردی مشابه عملکرد بیوراکتورهای مجهز به غشاهای میکرو و اولترا داشته‌اند.



شکل ۱- سامانه بیوراکتورغشایی دینامیکی[٤]

انواع غشای دینامیکی: در یک تقسیم بندی کلی در فرایند بیوراکتورهایی غشایی دینامیکی، غشای دینامیکی به دو صورت خودساخته[4] و پوششی[5] بر روی سطح فیلتر تشکیل می‌شود.

غشا دینامیکی خودساخته: این غشا توسط میکروارگانیسم‌ها و موادکلوئیدی با جرم مولکولی بالا در طی عملیات فیلتراسیون یک مخلوط مایع-جامد بر روی سطح فیلتر با اندازه منافذ در حد میکرو تشکیل می‌شود و جنس لایه دینامیکی از جنس لجن فعال موجود در بیوراکتور می‌باشد[۵].

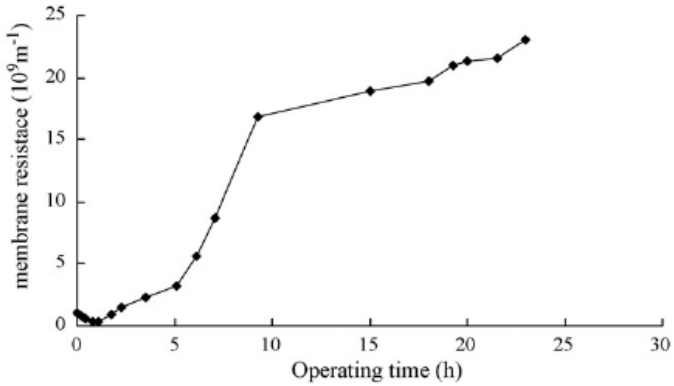
غشا دینامیکی پوششی: غشای دینامیکی پوششی با عبور یک محلول حاوی یک یا چند جزء کلوئیدی فیلتر یا غشای پایه متخلخل در حین عملیات فیلتراسیون تشکیل می‌شود. این نوع غشا می‌تواند از جنس پودر کربن فعال[۶] ، دیاتومیت [۷] و غیره باشد.

---

[1] Batch Wash
[2] Suspended Solids (SS)
[3] Turbidity
[4] Self-Forming Dynamic Membrane
[5] Pre-Coating Dynamic Membrane

۲. مکانیسم تشکیل غشا دینامیکی

همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود بیوراکتور توسط غشا به سه منطقه چپ، راست و میانه تقسیم‌بندی می‌شود. از سیستم هوادهی برای تأمین میزان اکسیژن لازم برای میکروارگانیسم‌ها و لجن فعال استفاده می‌شود[۸]. غلظت ذرات معلق جامد مخلوط در مایع ۷۵۰۰mg/l بوده و شار جریان تولیدی حدوداً ۲۰ لیتر بر مترمربع در ساعت در لحظات ابتدایی فیلتراسیون است. بعد از سپری شدن چندین دقیقه شار جریان تولیدی تا ده لیتر بر مترمربع در ساعت جهت به تأخیر انداختن مدت زمان هر مرحله کاهش می‌یابد. شکل ۲ فرایند افزایش مقاومت غشا دینامیکی با سپری شدن زمان فرایند فیلتراسیون را نشان می‌دهد که بر طبق این شکل فرایند شکل‌گیری غشا دینامیکی را می‌توان به چهار مرحله تقسیم نمود.



شکل ۲- تغییرات مقاومت غشا با زمان عملیات فیلتراسیون[۸]

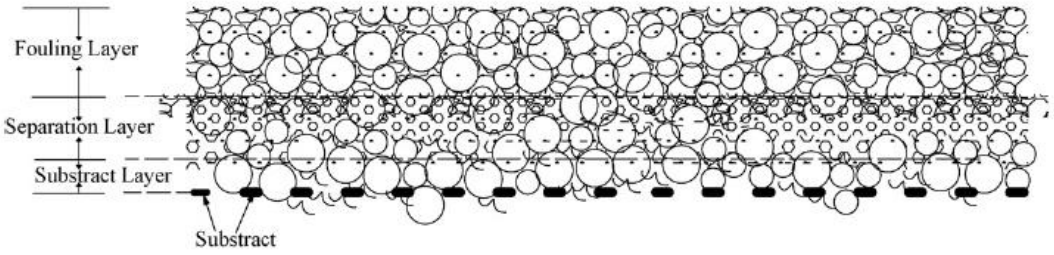
مرحله اول: شکل‌گیری غشا، تشکیل زیر لایه [۱] است. مقاومت غشا در این مرحله شیب نزولی پیدا می‌کند. به دلیل وجود روزنه‌های درشت بر روی سطح غشا، ذرات لجن کوچک و ذرات محلول و کلوئیدی می‌توانند از سطح غشا عبور کنند در حالی که لخته‌های لجن چسبیده به سطح غشا توسط جریان متقاطع از سطح غشا جدا می‌شوند. در این حالت لجن با اندازه ذرات مشابه با اندازه منافذ غشا بر روی روزنه‌های سطح غشا باقی می‌مانند.

مرحله دوم: تشکیل لایه جداسازی [۲] است. در این مرحله مقاومت غشا شروع به افزایش می‌کند و میزان این افزایش با سرعت بیشتری توسعه می‌یابد. در این حالت لجن فعال علاوه بر این که بر روی سطح غشا تجمع می‌یابد بر روی سطح رسوب قبلی نیز قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه ضخامت لایه تشکیل شده از لجن بر روی سطح غشا بسیار نازکتر از لایه مرزی هیدرودینامیکی جریان متقاطع بوده اثر جریان متقاطع بر روی لجن مشهود نیست. لجن تک لایه‌ای تشکیل شده معروف به لایه جداسازی است در مرحله آغازین مقدار زیادی از ذرات محلول، کلوئیدی و ذرات ریز لجن می‌توانند از لایه جداسازی عبور نمایند، که به راحتی می‌توان بروز این پدیده را از وجود ذرات ریز لجن و مصرف اکسیژن [۳] بالای جریان خروجی شناسایی نمود. با پیشرفت عملیات فیلتراسیون و با تجمع هرچه بیشتر محتویات لجن بر روی فضاهای خالی موجود در لایه جداسازی شیارها و روزنه‌های این لایه در اندازه‌های کوچکتر شکل گرفته و در نتیجه توانایی غشا دینامیکی برای نگهداری ذرات، کلوئیدها، ویروس‌ها و حتی ذرات ریز محلول بهبود می‌یابد. این مرحله را می‌توان به گرفتگی کامل که در واقع نشست ذرات بر روی شیارها است نسبت داد در این حالت ذرات بر روی یکدیگر قرار نگرفته و فقط بر روی روزنه‌های موجود در سطح غشا جا می‌گیرند.

مرحله سوم: از شکل‌گیری غشا دینامیکی، لایه گرفتگی [۴] تشکیل می شود. در این مرحله میزان افزایش مقاومت غشا سریع‌تر بوده و مقاومت غشا در انتهای این مرحله به مقدار بیشینه خود می‌رسد. با توجه به این که شیارهای تشکیل شده در مرحله جداسازی به اندازه کافی ریز است قابلیت نگهداری ترکیبات لجن را در پشت خود دارد لذا لایه لجن به واسطه انباشت ذرات کلوئیدی، لجن و مواد محلول می‌تواند تشکیل شود.

---
[1] Substrate Formation
[2] Separation Layer
[3] Chemical Oxygen Demand (COD)
[4] Fouling Layer

مرحله آخر: مرحله تشکیل کیک فیلتراسیون[1] است. در این مرحله سرعت گرفتگی غشا کاهش می‌یابد و به یک حالت پایدار نزدیک می‌شود. از آنجایی که ضخامت غشا دینامیکی در این مرحله بیشتر از لایه مرزی هیدرودینامیکی است جریان متقاطع نقش مهمی را در فرایند تشکیل غشا دینامیکی ایفا نموده و رسوب ذرات کاهش می‌یابد. در این مرحله عامل مهم دیگری که در مقاومت غشا تاثیرگذار بوده فشردگی لایه است. این اثر می‌تواند مقاومت فیلتراسیون را افزایش داده و باعث کاهش تراوایی شود. لازم به گفتن است که لایه‌های لجن در تمامی مراحل به علت فشار جریان عبوری غشا (TMP[2]) متراکم شده ولی اثر این تراکم لایه لجن در این مرحله مشهودتر است[۹و۸]. شکل۳ نمایی از ساختار غشا دینامیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- ساختار غشای دینامیکی به صورت شماتیک[۸]

۳. عوامل موثر بر عملکرد غشاهای دینامیکی در بیوراکتور

عوامل گوناگونی مانند مواد تشکیل دهنده‌ی غشای دینامیکی، ویژگی‌های لجن، شرایط عملیاتی و شکل ماژول غشا بر عملکرد غشاهای دینامیکی موثر هستند.

ویژگی‌های *توده* لجن: ویژگی‌های لخته‌های لجن ازمهم‌ترین پارامترهای موثر بر نفوذپذیری[3] و کیفیت خروجی از غشای دینامیکی است. شرایط عملیاتی مانند غلظت مواد جامد معلق (MLSS)[4]، زمان ماند لجن(SRT)[5]، نسبت خوراک به میکروارگانیسم (F/M)[6] و تنش به کار رفته شامل شدت هوادهی، سرعت جریان مماسی از عوامل موثر بر خواص فیلتراسیون لخته‌های لجن در بیوراکتورهای غشایی هستند[۱۰]. افزایش غلظت لجن از یک طرف سبب سریع‌تر تشکیل شدن غشای دینامیکی می‌شود و از طرف دیگر غلظت ذرت جامد معلق SS[7] در خروجی بیشتر شده و شار خروجی کاهش می‌یابد[۲].

برای مثال آزمایش‌هایی در چهار ماه با غلظت‌های ۳۵۰۰ و ۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر انجام شده و خروجی با کیفیت خوبی حاصل شد. در حالی که شار خروجی از غشای تشکیل شده با غلظت بیشتر، ۴۲ L/m^2h و با غلظت کمتر، ۱۲۵ L/m^2h بود. در تحقیقی دیگر نیز کاهش قابل ملاحظه‌ی شار با افزایش غلظت لجن مشاهده شد. میزان آبگریزی لجن از عوامل موثر بر زمان تشکیل غشای دینامیکی است. با افزایش آبگریزی نسبی لجن زمان لازم برای تشکیل غشای دینامیکی بر سطح بستر نگهدارنده آب گریز کاهش می‌یابد.

تجمع مواد پلیمری خارج سلولی (EPS)[8] محصولات محلول میکروبی (SMP)[9] در غشای دینامیکی نقش مهمی را در تشکیل غشا بر عهده دارند. این دو ماده سبب چسبیدن ذرات لجن به یکدیگر می‌شوند. ذرات لجن حاوی مقادیر بیشتر EPS و SMP به بستر نگهدارنده می‌چسبند و سبب تشکیل غشای دینامیکی می‌شوند در نتیجه از عبور بقیه ذرات جلوگیری می‌کنند[۱۱].

---

[1] Filtration Cake
[2] Trans-Membranre Pressure
[3] Permeability
[4] Mixed Liqour suspended solids
[5] Soid Retention Time
[6] Feed to Microorganism
[7] Suspended Solids
[8] Extracellular Polymeric Substances
[9] Soluble Microbial Products

مواد تشکیل دهنده: انتخاب بستر نگهدارنده جهت تشکیل غشاهای دینامیکی بسیار مهم است. اندازه منافذ بستر نگهدارنده تاثیر زیادی بر نگهداشت ماده‌ی مورد نظر توسط غشاهای دینامیکی دارد[۱۲]. داشتن مقاومت مکانیکی در مقابل فشار اعمال شده در مدت زمان طولانی و ارزان بودن از ویژگی‌های بستر نگهدارنده خوب است. اندازه منافذ بستر نگهدارنده بر سرعت تشکیل غشای دینامیکی و شار خروجی از غشا تاثیرگذار است. بنابراین باید اندازه منافذ بستر نگهدارنده و اندازه ذرات تشکیل دهنده‌ی غشای دینامیکی با هم در نظر گرفته شوند تا بهترین عملکرد جداسازی انجام شود. معمولا اندازه منافذ بستر نگهدارنده از غشاهای میکرو و اولترا بزرگ‌تر است. کیفیت خروجی در مرحله اول فیلتراسیون به دلیل خارج شدن ذرات از منافذ بستر نگهدارنده پایین است[۱۳]. کیفیت خروجی از غشاهای دینامیکی تشکیل شده بر سه بستر نگهدارنده با اندازه‌ی منافذ ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ میکرومتر را بررسی شد. بهترین کیفیت خروجی از غشای تشکیل شده بر فیلتر ۱۰۰میکرومتر حاصل شد. و در تحقیقات دیگری نشان داده شد که تشکیل لایه‌ی کیک روی فیلتر با اندازه منافذ ۶۰-۷۰ میکرومتر بیوراکتور بی‌هوازی امکان ناپذیر است[۱۴و ۹]. اثر اندازه‌ی ذرات لجن را بر زمان تشکیل غشای دینامیکی خودساخته و مقاومت فیلتراسیون بررسی کردند. و کاهش زمان لازم جهت تشکیل غشای دینامیکی و کاهش مقاومت فیلتراسیون را با افزایش اندازه ذرات مشاهده شد[۱۵و ۱۱].

شکل ماژول غشا و نوع عملیات: غشای تشکیل شده بر سه ماژول صفحه‌ای عمودی، لوله‌ای عمودی و لوله‌ای افقی با بستر نگهدارنده‌ی فیلتری را بررسی کردند. ضخامت غشای تشکیل شده بر فیلتر لوله‌ای بستر دو برابر فیلتر صفحه‌ای بود. آزمایش‌ها در شرایط تقریباً یکسانی از اندازه و شکل لخته‌های لجن انجام شد. در هر سه سیستم به حذف بالا و پایداری از آلاینده‌های آلی دست یافتند. طبق گزارش‌ها تفاوت قابل توجهی بین عملکرد غشای دینامیکی به صورت غوطه‌ور و خارجی در بیوراکتور غشایی بی‌هوازی مشاهده نشد[۱۴].

شرایط عملیاتی: ویژگی‌های فیلتراسیون و کیفیت خروجی از بیوراکتورهای غشایی دینامیکی هوازی با SRT های ۱۰ و ۳۰ روز و بی‌نهایت مورد بررسی قرار داده شد. پایین‌ترین عملکرد حذف TOC و فیلتراسیون در راکتور با SRT بی‌نهایت مشاهده شد. توده زیستی چسبناک داخل بیوراکتور لایه ضخیمی از لجن روی فیلتر ایجاد کرده بود. غلظت متوسط لجن داخل این بیوراکتور ۲-۳ برابر بیشتر از بیوراکتورهای دیگر بود و این امر سبب کاهش نسبت خوراک به میکروارگانیسم در داخل این بیوراکتور شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تجمع مواد حاصل از فساد باکتری‌ها در لجن پیر سبب پایین آمدن عملکرد فیلتراسیون می‌شود[۱۷]. افزایش نسبت خوراک به میکروارگانیسم سبب افزایش تعداد لخته‌ها با اندازه متوسط و بزرگ می‌شود در حالی که تعداد لخته‌های کوچک کم می‌شود. این امر سبب بهبود کیفیت خروجی می‌شود[۱۸].
برخلاف آنچه تاکنون بیان شده است با افزایش SRT از ۲۰ به ۶۰ روز مقاومت ویژه‌ی کیک کاهش یافت. با کاهش نسبت خوراک به میکروارگانیسم می توان گرفتگی غشا را کاهش داد. همچنین مشاهده شد که با افزایش SRT (بیشتر از ۶۰ روز)، زمانی که غلظت مواد جامد معلق به بیشتر از mg/L ۵۰۰۰ رسید، مقدار مواد پلیمری خارج سلولی که یکی از عوامل مهم گرفتگی غشا است کاهش یافت. کاهش مواد پلیمری خارج سلول مرتبط با کاهش نرخ تشکیل مواد میکروبی یا افزایش تجزیه‌ی EPS به عنوان سوبسترا برای میکروارگانیسم‌ها در شرایطی که نسبت غذا به میکروارگانیسم کم می‌باشد است[۱۹]. گاهی شدت زیاد هوادهی منجر به تخریب لایه غشای دینامیکی می‌شود. در تحقیقات مشاهده شد گاها با افزایش شدت هوادهی، کدورت خروجی از فیلتر افزیش می‌یابد[۹].

لایه غشای دینامیکی: لایه غشای دینامیکی در نگهداشت مواد داخل بیوراکتور بسیار موثر است. لایه غشای دینامیکی دارای دو زیر لایه‌ی کیک و ژل است. زیر لایه کیک حاوی لخته‌های لجن که بصورت غیرفشرده بهم چسبیده‌اند، است. بنابراین به راحتی به وسیله دمیدن هوا جدا می‌شوند. درحالی که زیر لایه ژل که بیشتر حاوی EPS است به شدت به سطح فیلتر می‌چسبد و به سختی شسته می‌شوند. لایه غشای دینامیکی پس از شست‌وشوی فیزیکی خیلی سریع‌تر از ابتدای فرایند تشکیل می‌شود. پس از شست وشوی لایه ژل که به شدت به بستر نگهدارنده چسبیده است، سطح مناسبی را برای تشکیل لایه کیک ایجاد می‌شود. به علاوه، لایه ژل به دلیل داشتن تشابه ساختاری با غشاهای مرسوم نقش مهمی در نگهداشت ذرات بسیار ریز دارد. دو عمل مهم توسط لایه کیک انجام می‌شود: بهبود کیفیت خروجی توسط جداسازی لخته‌های بزرگ و جلوگیری از تماس مستقیم لایه ژل با ذرات بزرگ. همچنین حضور میکروارگانیسم‌ها در لایه کیک سبب انجام فعالیت‌های بیولوژیکی در این لایه می‌شوند. بیشتر نتایج نشان داده‌اند که لایه کیک عامل اصلی مقاومت در بیوراکتورهای هوازی است و هوادهی با دوره زمانی مشخص از زیر غشا بر ای شست وشوی غشای دینامیکی کافی است[۱۶و ۹و ۲].
تشکیل غشای دینامیکی بر سطح فیلتر کیفیت جداسازی را افزایش می‌دهد. به همین دلیل غشای دینامیکی به عنوان غشای ثانویه در کنار غشای اصلی در نظر گرفته می‌شود. جایگزین غشاهای میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون با بسترهای نگهدارنده‌ی ارزان فیلتراسیون به طور موثری سبب افزایش شار در

فشار کمتر و هزینه‌ی مناسب می‌شود. شار و MLSS از عوامل مهم در گرفتگی غشاها محسوب می‌شوند. با افزایش MLSS کیفیت خروجی از غشای دینامیکی تشکیل شده بهبود می‌یابد. و همچنین تشکیل غشا با MLSS بالاتر فشردگی لایه غشا را افزایش می‌دهد که باعث گرفتگی می‌شود.
با افزایش شار عملیاتی غشای دینامیکی فشرده‌تری تشکیل می‌شود، که این فشردگی از یک سو سبب بهبود کیفیت خروجی می‌شود و از سوی دیگر تمایل به گرفتگی را افزایش می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

تشکیل مناسب غشای دینامیکی برسطح فیلتر کیفیت جداسازی را افزایش می‌دهد. به همین دلیل غشای دینامیکی به عنوان غشای ثانویه در کنار غشای اصلی در نظر گرفته می‌شود. با کنترل رشد غشای دینامیکی بر سطح فیلتر می توان گرفتگی در این غشاها را کاهش داد. جایگزینی غشاهای میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون با بسترهای نگهدارنده‌ی ارزان فیلتراسیون (غشای دینامیکی) به طور موثری سبب افزایش شار در فشار کمتر، کاهش مصرف انرژی، افزایش کیفیت خروجی و هزینه‌ی مناسب عملیاتی می‌شود. شرایط عملیاتی و تشکیل مناسب لایه غشای دینامیکی از عوامل موثر بر عملکرد مناسب بیوراکتورغشایی دینامیکی می‌باشد، به طوری که با کنترل این عوامل می‌توان به حذف بهتر آلاینده‌ها دست یافت.

۵. مراجع

1. F0lund, B., Palmgren, R., Keiding, K., Halkjeer, N .P ., “Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin”, Water Research, 1996, 30(11)1749-1758.

2. Chu, H., Cao, D., Jin, W., “Characteristics of bio-diatomite dynamic membrane process for municipal wastewater treatment”, Journal of Membrane Science,2008, 325 (275) 271-276.

3. Wang, W., Jung, Y.J., iso, Y., Yamada, T., Min, K.S., “ Excess sludge reduction performance of an aerobic SBR process equipped with a submerged mesh filterunit”, Process Biochem, 2006, 41(26)745-751.

4. Liang, S., Qu, L., Meng, F., Han, X., & Zhang, J. (2013). Effect of sludge properties on the filtration characteristics of self-forming dynamic membranes (SFDMs) in aerobic bioreactors : Formation time , filtration resistance , and fouling propensity. *Journal of Membrane Science*, *436*, 186–194.

5. Yu, Z., Chu, H., Cao, D., Ma, Y., Dong, B., & Wei, Y. (2012). Pilot-scale hybrid bio-diatomite / dynamic membrane reactor for slightly polluted raw water puri fi cation. *DES*, *285*, 73–82.

6. Mehrnia, M. R. (2014). Formation of pre-coating dynamic membrane on mesh filter by cross-flow filtration of PAC – water suspension in a bioreactor : experimental and modeling. Desalination and Water Treatment, 911118, 1–11.

7. Chu, H. qiang, Cao, D. wen, Jin, W., & Dong, B. zhi. (2008). Characteristics of bio-diatomite dynamic membrane process for municipal wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, *325*(1), 271–276.

8. Ye, M., Han-min, Z., Feng-lin,Y., “ Experimental study on application of the boundary layer theory for estimating steady aeration intensity of pre-coated dynamic membrane bioreactors”, Desalination, 2008, 230 (8) 100—112.

9. Ye, Y., Le Clech, E., Chen, V., “Fouling mechanisms of alginate solutions as model extra cellular polymeric substances”, Desalination, 2005, 175 (5) 7–20.

10. Park, H., Choo, K.H., Lee, C.H., "Flux enhancement with powdered activated carbon addition in the membrane anaerobic bioreactor", Separation and Purification Technology, 1999, 34 (19), 2781–2792.

11. Liang, S., Qu, L., Meng, F. Han, X., Zhang, J., " Effect of sludge properties on the filtration characteristics of self forming dynamic membrane (SFDMs) in aerobic . bioreactors: Formation time, filtration resistance, and fouling propensity", J. Membr. Sci, 2013, 436(25)86-194.

12. Igawa, M., Serio, M., Takabashi, A., Yamabe, T., " Reverse osmosis by dynamic membranes. Desalination", Water Sci. Technol, 1977, 22(5)281-289.

13. Zhang, X., Wang, Z., Wu, Z., Lu, F., Tong, J., Zang, L., "Formation of dynamic membrane in an anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment", Chemical Engineering Journal, 2010, 165 (4)175 – 183.

14. Jeison, D., van Lier, J.B., "Cake formation and consolidation: main factors governing the applicable flux in anaerobic submerged membrane bioreactors(AnSMBR) treating acidified wastewaters". Sep. Purif. Technol, 2008, 56(2)71-78.

15. Ersahin, M., Ozgun, H., Dereli, R., Ozturk, I., Roest, K., Van lier, J., " A review on dynamic membrane filtration: Materials, applications and future perspectives", Chemical Engineering Journal,2012, 45(23) 25-46.

16. Chu, L., Li, S., "Filtration capability and operational characteristics of dynamic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment", Separation and Purification Technology, 2006,51 (47)173–179.

17. Alavi Moghaddam, M.R., Satoh, H., Mino, T., 2002. Effect of important operational parameters on performance of coarse pore filtration activated sludge process.Water Sci. Technol. 46 (9), 229-236 .

18. Fuchs, W., Resch, C., Kernstock, M., Mayer, M., Scoeberl, P., Braun, R., 2005.Influence of operational conditions on the performance of a mesh filter activated sludgeprocess. Water Res. 39 (4), 803-810.

19. Ahmed, Z., Cho, J., Lim, B.R., Song, K.G., Ahn, K.H., 2007. Effects of sludge retention time on membrane foulingand microbial community structure in a membrane bioreactor. J. Membr. Sci. 287 (2), 211-218.