Archive of SID

مجله مهندسی بهداشت محیط، زمستان ۱۳۹۹، سال ۸، شماره ۲:۲۱۲-۲۲۳

ارزیابی شرایط بهینه بهره‌برداری از بیوراکتور غشایی در تصفیه فاضلاب شهری

حمید رضا خستو[۱] ، امیرحسام حسنی [۲]،رویا مافی غلامی [۱*]، روح الله محمود خانی [۳]

۱-گروه مهندسی محیط زیست ، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران ، ایران
۲-گروه مهندسی محیط زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی و محیط زیست، ، واحد علوم و تحقیقات تهران ، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران
۳-گروه مهندسی بهداشت محیط ، واحدعلوم پزشکی تهران ، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران ، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۷/۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۲۰

چکیده

هدف: بیوراکتور غشایی (MBR) بعنوان یک فناوری نوین در تصفیه فاضلاب شهری شناخته می شود. هدف از این مطالعه، ارزیابی عملکرد این سیستم در حذف آلاینده‌ها و میزان گرفتگی غشایی در شرایط مختلف بهره‌برداری است.

مواد و روش‌ها: یک پایلوت MBR با غشای تخت و حجم مفید ۱۴۰ لیتر در تصفیه‌خانه فاضلاب اکباتان راه‌اندازی شد و برای دوره ۱۰۰ روزه بصورت پیوسته از فاضلاب واقعی و در دمای محیط تغذیه گردید. این پایلوت در شرایط بارگذاری آلی برابر ۰/۵۸، ۰/۷۱و ۱/۵۵ $kgCOD/m^3.d$ و در دو حالت هوادهی با غلظت اکسیژن محلول ۴ mg/L و۱/۵ mg/L مورد آزمایش قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد عملکرد MBR در تمامی سناریوها برای حذف پارامترهای BOD، COD و TSS تقریباً ثابت و بیش از ٪۹۶ است و اعتمادپذیری به سیستم در شرایط مختلف بهره‌برداری تایید می شود. اما حداکثر عملکرد سیستم در حذف نیتروژن و فسفر کل در شرایط با هوادهی کم امکانپذیر بوده که به ترتیب ٪۳۱ و ٪۶۶ می‌باشد و در هوادهی بالا این عملکرد حدوداً ٪۱۵ افت می‌کند. همچنین نتایج نشان داد گرفتگی غشایی با افزایش بارگذاری آلی یا کاهش اکسیژن محلول افزایش می‌یابد. حتی افت هد جریان عبوری از غشا با میزان بارگذاری آلی همبستگی خوبی (R^2=0.91) دارد.

نتیجه‌گیری: بیوراکتور غشایی یک فناوری کارآمد در حذف مواد آلی کربنی در فاضلاب شهری است و در صورت بروز شرایط مختلف بهره‌برداری مانند افت هوادهی یا افزایش بار هیدرولیکی و آلی تصفیه‌خانه عملکرد ثابتی دارد. با این وجود نیازمند فرآیند تکمیلی برای حذف ترکیبات نیتروژنی و فسفر از فاضلاب است.

کلمات کلیدی: بیوراکتور غشایی، پایلوت، تصفیه فاضلاب، فناوری، گرفتگی غشایی

*** نویسنده مسئول:** گروه مهندسی محیط زیست، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران ، ایران
ایمیل r.mafigholami@wtiau.ac.ir - شماره تماس: ۰۹۱۲۳۳۳۹۲۵۰

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

امروزه براســـاس رویکردهای توســـعه پایدار، مطالعات راهبردی بین‌المللی ۵ مجموعه فناوری را بعنوان فناوری‌های کلیدی در بخش تصفیه آب و فاضلاب معرفی می‌کنند. این ۵ مجموعه شـــامل انواع فناوری‌های مورد اســـتفاده در تصـــفیه غیرمتمرکز و ســـیار آب و فاضـــلاب، ســـامانه‌های پایش و ابزاردقیق تاسیسات آب و فاضلاب، روش‌های نوین تصفیه فاضلاب، سامانه‌های نمک‌زدایی و فناوری‌های تولید سوخت زیستی می‌شود[۱-۲]. مطابق مطالعات و بررسی‌های Reardon و همکاران (۲۰۱۳)، در برخی از کشـــورهای توســـعه یافته مانند آلمان و کشـــورهای حوزه اســـکاندیناوی ســـهم فناوری‌های متعارف نســـبت به فناوری‌های پیشـــرفته مورد اســـتفاده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری بسیار اندک است و به کمتر از ۱۰٪ می‌رســـد اما در برخی کشـــورها ســـهم فناوری‌های متعارف به فناوری‌های پیشرفته در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری بالاتر است و مثلاً این سهم در انگلستان ۷۳٪، آمریکا ۳۷٪، کانادا ٤۷٪ و ژاپن ۵۵٪ می‌باشد[۳]. این آمار نشان می‌دهد الزاماً توسعه‌یافتگی موجب استفاده از فناوری‌های پیشرفته در تصـفیه فاضـلاب نمی‌شـود و این فناوری‌ها باید به تناسـب و حسب نیاز مورد بررسی قرار گرفته و پیشنهاد شوند. حتی در برخی پژوهش‌ها پیشنهاد شده است تا طراحی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و انتخاب فناوری‌ها برای تصفیه فاضلاب و پردازش لجن متناسب با نیاز مناطق مجاور تصفیه‌خانه باشد تا استفاده مجدد از این محصولات براحتی فراهم گردد[٤].

سیستم‌های بیوراکتور غشایی (MBR) از جمله فناوری‌های نوین در تصفیه فاضلاب بشمار می‌روند که این امکان را دارا هستند تا بعنوان سامانه‌های تصفیه غیرمتمرکز فاضلاب شهری و بصـــورت پکیج مورد اســـتفاده قرار گیرند[۵]. بیورآکتورهای غشائی ترکیبی از تصفیه بیولوژیکی لجن فعال با رشد معلق و تجهیزات فیلتراســـیون غشـــائی جهت تفکیک بخش جامد از مایع مخلوط اســـت. در این ســـامانه، حوضـــچه زلال‌ســـازی در ســـامانه متعارف لجن فعال با یک غشـــاء میکروفیلتر (MF) یا اولترا فیلتر (UF) جایگزین می‌شـــود تا معمولاً با ایجاد فشـــار منفی موجب عبور آب از منافذ غشا شده و بخش جامدات در حوضـــچه باقی بماند[٦]. این فناوری ابتدا به علت روش‌های نامتعارف تولید غشا گرانقیمت بوده است. با این حال بصورت تدریجی و با افزایش تعداد فناوری، فرآیند تولیدی مقرون به صرفه‌تر شد به‌طوری‌که در طی ٤ سال (۲۰۱۳-۲۰۱۰) تعداد تصـفیه‌خانه‌های فاضـلاب مبتنی بر MBR با ظرفیت بیشـتر از ۱۰۰ هزار مترمکعب در روز از ۲ تصـــفیه‌خانه به ۳۷ مورد رسیده است[۷].

علیرغم توجه گســـترده واحدهای پژوهشـــی و تجاری به MBR در طی ســـالیان گذشـــته، به نظر می‌رســـد عملکرد این ســـامانه و بویژه میزان گرفتگی غشـــایی از شـــرایط مختلف بهره‌برداری تاثیر می‌پذیرد و این موضوع یک رویکرد پژوهشی در دنیا است. این شرایط بهره‌برداری شامل نوسانات زمان ماند هیدرولیکی (HRT) و بارگذاری آلی (OLR)، تغییرات شار یا فلاکس عبوری از غشـا، ویژگی‌های لجن مورد اسـتفاده مانند غلظت ذرات معلق (MLSS) و ســـن لجن، ویژگی‌های محیط راکتور مانند pH، میزان هوادهی و اختلاط حوضـــچه، و همچنین خصوصیات غشای مورد استفاده مانند اندازه منافذ، تخلخل، آب‌گریزی و بارسطحی است [۸-۱۰]. همچنین تحقیقات اخیر نشان داده‌اند کارایی بیوراکتور غشایی در حذف ترکیباتی مانند مواد مغذی می‌تواند با ادغام MBR با دیگر روش‌ها و توسـعه سـیسـتم‌های هیبریدی صـورت پذیرد. بعنوان مثال، اســـتفاده از محیط متخلخل ثابت در بیوراکتور غشـــایی[۱۱] یا اسـتفاده از لجن گرانوله برای حذف بهتر نیتروژن کل (TN) و فسفر کل (TP) پیشنهاد شده است[۱۲]. حتی برای بهبود قابلیت حذف نیتروژن و فسفر از فاضلاب تا ۹۵٪، بازچرخانی پساب تصـــفیه‌شـــده و همزمان اســـتفاده از توده متخلخل تیوبی نیز پیشـــنهاد شـــده اســـت[۱۳]. با این وجود همچنان پژوهش‌هایی وجود دارد که نظرات متناقضی در مورد حذف مواد مغذی در

www.SID.ir

Archive of SID

MBR ارائه می‌کنند بعنوان مثال، Khan و همکاران (۲۰۱۹) و Gurung و همکاران (۲۰۱۷) معتقدند که استفاده از MBR مستغرق می‌تواند به تنهایی موجب حذف TP به ترتیب برابر ٪۸۰ و ۹۰٪ از فاضلاب شهری شود[۱۴-۱۵]. حتی برخی از محققین بر این اعتقادند که لایه بیوفیلمی تشکیل شده در دوره گرفتگی غشا می‌تواند به‌تنهایی موجب حذف TN و TP در بیوراکتور غشایی شود و نیازی به هیبرید کردن MBR نیست[۱۶]. اما از طرفی Bezirgiannidis و همکاران (۲۰۱۷) معتقدند عملکرد MBR در حذف مواد مغذی فاضلاب شهری بدلیل عدم حضور شرایط آنوکسیک و بی‌هوازی نمی‌تواند بیشتر از ۲۵٪ باشد[۱۷]. علیرغم تمامی این مطالعات و دستیابی به راندمان بالای ۹۵٪ برای حذف برخی آلاینده‌ها مانند اکسیژن‌خواهی بیو شیمیایی (BOD)، به نظر می‌رسد عملکرد سیستم تحت شرایط مختلف بهره‌برداری و در حذف نیتروژن و فسفر مورد توافق پژوهشگران نیست و اکثر مطالعات بدلیل اینکه محدود به انجام مطالعات در مقیاس کوچک، تحت شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی یا با تغذیه از فاضلاب سنتزی بوده است، نیازمند بررسی جامع‌تری است تا این موارد را در کنار یکدیگر و در شرایط واقعی مورد سنجش قرار دهد[۱۸].

بنابراین در این پژوهش، عملکرد بیوراکتور غشایی تحت شرایط مختلف بهره‌برداری سنجیده می شود تا به این سوال پاسخ داده شود که آیا لازم است اقدامات و کنترل ویژه‌ای برای ارتقای MBR در تصفیه فاضلاب شهری در شرایط مختلف بهره‌برداری یا برای حذف مواد مغذی اتخاذ شود یا خیر. بدین منظور، یک پایلوت با استفاده از میکروفیلتر بومی ساخته شده در کشور و تحت شرایط واقعی فاضلاب شهری و سناریوهای بهره‌برداری و بدون استفاده از هرگونه روش تکمیلی یا هیبریدی مورد سنجش قرار می‌گیرد تا میزان حذف مواد آلی به همراه ترکیبات نیتروژن و فسفر کنترل شود.

مواد و روش‌ها

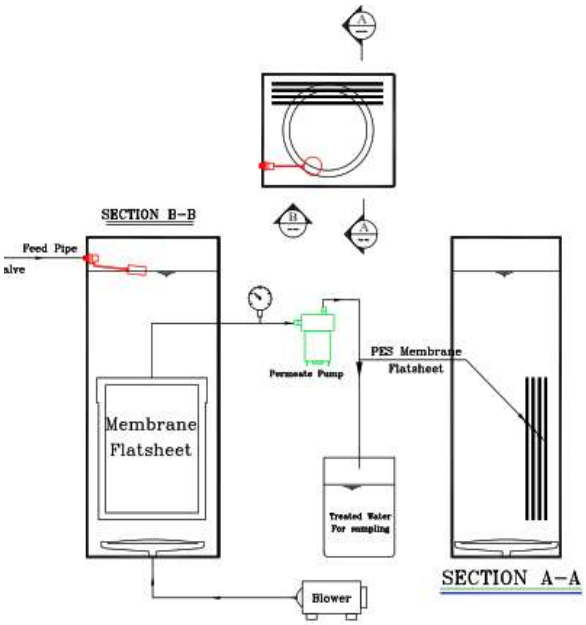
این پژوهش یک مطالعه تجربی – آزمایشگاهی است که در مقیاس پایلوت و با تزریق فاضلاب واقعی در محل تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک اکباتان در غرب شهر تهران انجام شد. در این بررسی، قابلیت حذف مواد آلی و معدنی فاضلاب و میزان گرفتگی غشا تحت شرایط مختلف بهره‌برداری از بیوراکتور غشایی (MBR) با جریان پیوسته مورد آزمون قرار گرفت و برای یک دوره سه ماهه (حدوداً یکصد روز) در سه سناریو بارگذاری آلی و دو حالت هوادهی مقایسه و کنترل شد. در این دوره سه ماهه، این فرصت فراهم شد تا نقش سناریوهای مختلف بهره‌برداری بر عملکرد سامانه در حذف مواد آلی، مواد مغذی و بر میزان گرفتگی غشایی بصورت پیوسته و بدون نیاز به خارج شدن سیستم از مدار بهره‌برداری براساس نمونه‌های اخذ شده بررسی شود.

مشخصات پایلوت:

پایلوت مورد استفاده در این پژوهش با حجم مفید ۱۴۰ لیتر به ابعاد ۴۲ سانتی‌متر طول، ۳۵ سانتی‌متر عرض و ۱۰۰ سانتی‌متر ارتفاع از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شد. فاضلاب خام برداشت شده از کانال خروجی حوض دانه‌گیری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهرک اکباتان ابتدا بصورت ۲۴ساعته وارد مخزن تغذیه به حجم ۵۰۰ لیتر شده و سپس با تنظیمات شناور بصورت ثقلی وارد پایلوت می‌شود. یک پمپ مکش پساب خروجی نیز با ظرفیت حداکثر ۸/۵ لیتر در ساعت تعبیه شده است. در این مخزن فشار سنج برای سنجش فشار جریان خروجی از غشا، بلوئر و دیفیوزر برای هوادهی زیرسطحی و شیر تخلیه و نمونه‌برداری پایلوت درنظر گرفته شده است.

www.SID.ir

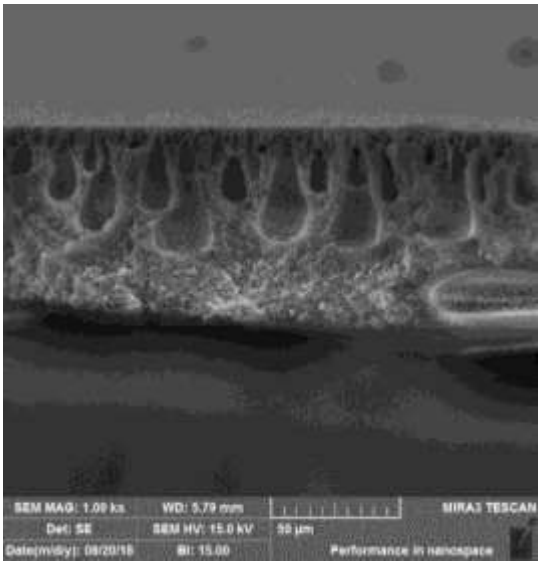
Archive of SID



شکل ۱- تصویر شماتیک پایلوت راه‌اندازی شده

غشای مورد استفاده از نوع تخت (Flat sheet) است که با استفاده از محلول پلی‌وینیلیدین فلوئورا ید (PVDF) ۱۲ ٪ ساخته شده و در کشور بصورت تجاری موجود می‌باشد. همانگونه که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، غشای ساخته شده دارای ساختار متخلخل با تخلخل انگشتی است که قطر منافذ آن بین ۲ تا ۸ میکرومتر متغیر است۱۹. مجموع مساحت دو طرف هر شیت غشایی ساخته شده ۰/۳۵ مترمربع (۷۰ سانتی‌متر طول و ۲۵ سانتی‌متر عرض) است که در مجموع ٤ عدد از آنها در پایلوت استفاده شده و در نتیجه مجموع سطح غشای آزمایش ۱/٤ مترمربع است. فشار کارکردی این غشا نیز بین ۰/۱ تا ۰/۵ بار تعیین شده است و دوره آزمایش زمانیکه به ۹۰ ٪ فشار حداکثر برسد متوقف می‌شود.

لجن مورد استفاده در مطالعات پایلوت نیز از حوضه هوادهی تصفیه‌خانه اکباتان جمع آوری شده و با غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به پایلوت تزریق شد. پس از گذشت ۲ هفته از راه‌اندازی پایلوت، شرایط بهره‌برداری از نظر حذف COD پایدار شده و مطالعات در سه سناریو بهره‌برداری برای ارزیابی عملکرد سیستم در حذف مواد مغذی در شرایط با هوادهی زیاد و کم و زمان ماند متفاوت مورد مقایسه قرار گرفت.



شکل ۲- تصویر غشای مورد استفاده با میکروسکوپ الکترونی

www.SID.ir

Archive of SID

شرایط بهره‌برداری:

پایلوت در دمای محیط در طی سه ماه فروردین تا تیرماه در دمای فاضلاب بین ۲۰ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد بهره‌برداری شد. مشخصات کیفی فاضلاب خام ورودی در طی این دوره در جدول ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش عملکرد بیوراکتور غشایی در شرایط هوادهی متفاوت با متوسط غلظت اکسیژن محلول برابر ٤ میلی‌گرم بر لیتر و ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر در راکتور به همراه تغییر زمان ماندهیدرولیکی (HRT) و در نتیجه سناریوهای مختلف بارگذاری آلی (OLR) در سه حالت، بطور متوسط برابر ۰/۵۸ ، ۰/۷۱ و کیلوگرم COD در واحد مترمکعب در شبانه‌روز، مورد بررسی قرار گرفته است. ترتیب این مراحل مطابق جدول ۲ است. در تمامی حالات مقدار pH محیط مخلوط و پساب خروجی برابر تقریبی ۷/۵ است. شایان ذکر است میزان متوسط بارگذاری آلی راکتور مقدار میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده در طی مراحل آزمایش و انجام مطالعات پایلوت است و بنابراین بارگذاری آلی حسب شرایط ورودی و بهره‌برداری حول اعداد اشاره شده نوسان دارد.

جدول ۱- مقادیر شاخص‌های کیفی فاضلاب خام تصفیه‌خانه در دوره مطالعه پایلوت

پارامتر	متوسط	حداقل ثبت شده	حداکثر ثبت شده
BOD (mg/L)	۲٦۹	۱۸۰	۳٤۳
COD (mg/L)	٥۲٥	۲۹۳	٦۲٥
TSS (mg/L)	۲۸۱	۱۹۸	۳٦۸
TDS (mg/L)	٤٥٦	۳۹٤	٥٥٤
pH	۸/۲	۷/۳	۸/۹
TP (mg/L)	٦/٥	٦/۱	۷/۲
TKN (mg/L)	٥۷	۳۸	۷٦

جدول ۲- سناریوها و شرایط بهره‌برداری از پایلوت

بازه زمانی (روز)	دوره بهره‌برداری	متوسط بارگذاری آلی (kgCOD/m3.d)	اکسیژن محلول (mg/L)	متوسط غلظت MLSS (mg/L)	نسبت مواد آلی به جامدات لجن (٪)
۱-۱٤	راه‌اندازی	۰/٥۸	٤	۱٦۸۰	۸۲
۱٤-۳٥	دوره اول (S1)	۰/٥۸	٤	۲۳۲۰	۸٥
۳٥-٦۰	دوره دوم (S2)	۰/۷۱	٤	۲٦۰۰	۷۷
٦۰-۷٥	دوره سوم (S3)	۰/۷۱	۱/٥	۳۰۸۰	۸۲
۷٥-۱۰۰	دوره چهارم (S4)	۱/٥٥	۱/٥	۳۱٦۰	۸٥

نمونه‌برداری و انجام آزمایش:

نمونه‌برداری از فاضلاب خام ورودی و پساب خروجی از بیوراکتور غشایی بصورت هفتگی با سنجش پارامترهای BOD، اکسیژنخواهی شیمیایی (COD)، جامدات معلق کل (TSS)، TN و TP به همراه مولفه‌های آمونیوم، نیتریت، نیترات و فسفات از ورودی و خروجی پایلوت انجام شد و در آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب استان تهران مطابق روش استاندارد تست گردید[۲۰]. در هر سری نمونه‌برداری، سه نمونه اخذ شد تا تکرار نتایج آزمایشگاهی میسر باشد. همچنین هر سناریوی بهره‌برداری بطور متوسط در طی دوره ۲۰ روزه بررسی شده است. بنابراین برنامه نمونه‌برداری بصورت هفتگی امکان سه تکرار را برای هر سناریو فراهم کرده است. همچنین در دوره‌های نمونه‌برداری، قرائت فشارسنج و ثبت افت هد اطراف غشا (TMP) برای شناسایی میزان احتمالی گرفتگی غشایی مطابق مطالعات پیشین انجام شده است[۲۱-۲۲]. برای سنجش پارامتر COD و ترکیبات نیتروژن و فسفر

www.SID.ir

Archive of SID

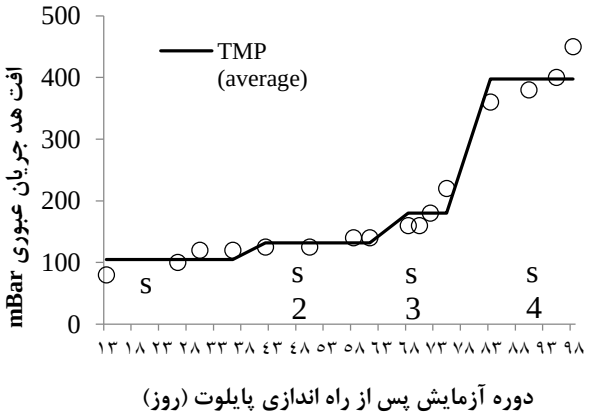
فاضلاب از دستگاه اسپکتروفوتومتر (HACH) مدل DR5000 و برای سنجش پارامتر BOD از دستگاه BOD متر مدل BODTrakTM استفادهشده است. جدول ۳ مشخصات روش آزمون و ابزار آزمایش را بطور خلاصه

جدول ۳- سناریوها و شرایط بهرهبرداری از پایلوت

آزمایش	روش آزمون	ابزار آزمایش
BOD	APHA(2005)-5210 B	**BODTrakTM**
COD	APHA(2005)-5220 D	HACH DR5000
TP	APHA(2005)-4500 P	HACH DR5000
آمونیاک	APHA(2005)-4500 NH3-F	HACH DR5000
نیترات	APHA(2005)-4500 NO3-B	HACH DR5000
نیتریت	APHA(2005)-4500 NO2-B	HACH DR5000
TSS	APHA(2005)-2540 D	Drying oven

یافتهها

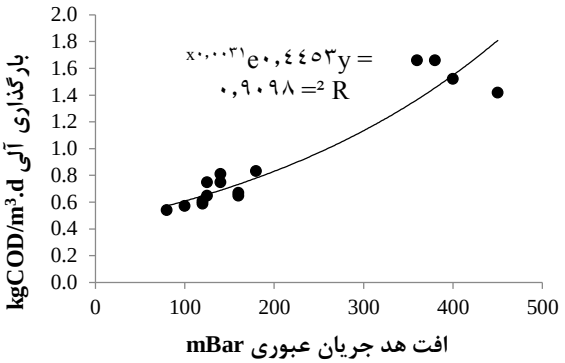
براساس نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی در شرایط مختلف بهرهبرداری از پایلوت MBR، میتوان مشاهده کرد که میزان افت فشار در گذردهی جریان از بیوراکتور غشایی میتواند با بارگذاری آلی (OLR) و میزان هوادهی در راکتور ارتباط داشته باشد. همانگونه که در نمودار ۳ مشاهده میشود، روند افزایش میزان افت فشار گذردهی جریان از غشا با جریان ثابت از ابتدای دوره مطالعات پایلوت و پس از راهاندازی آن تقریباً روند صعودی را طی میکند. این روند با توجه به دادههای مشاهداتی و ثبت شده از دبیسنجی، غلظت فاضلاب ورودی و فشارسنجی تقریباً منطبق با روند افزایش بارگذاری آلی است و تغییرات آن بصورت نمایی است. هرچند باید توجه داشت در تسریع روند افزایش گرفتگی جریان عبوری از غشا کاهش میزان هوادهی نیز بیتاثیر نبوده است. بعنوان مثال، بین دو حالت بهرهبرداری ذیل دوره دوم (S2) و دور سوم (S3) با بارگذاری متوسط ۰/۷۱ کیلوگرم COD در واحد مترمکعب در شبانهروز، کاهش هوادهی به میزان نصف شرایط اولیه و کاهش غلظت اکسیژن محلول از ٤ میلیگرم بر لیتر به حدود ۲ میلیگرم بر لیتر موجب شده است میزان افت هد جریان عبوری از غشا به میزان ۳٦٪ افزایش یابد که این مقدار برای تغییر از شرایط دوره بهرهبرداری اول (S1) با بارگذاری متوسط۰/۵۸ کیلوگرم COD در واحد مترمکعب در شبانهروز به دوره بهرهبرداری دوم فقط ۲۵٪ تغییر را در افت هد جریان عبوری از غشا در پی داشته است. در دوره چهارم بهرهبرداری (S4) که بارگذاری آلی تقریباً ۲ برابر و میزان هوادهی مجدد نصف شده است، اثر تجمعی این شرایط موجب شده تا میزان افت هد جریان عبوری از غشا تقریباً ۲/۲ برابر افزایش یابد و به شرایط گرفتگی کامل نزدیک شود. بنابراین پیشنهاد میشود بیوراکتور غشایی در شرایط بهرهبرداری با بارگذاری آلی کمتر از۱/۵ کیلوگرم COD در واحد مترمکعب در شبانهروز یعنی با حداقل زمان ماند ۸ ساعت و با هوادهی بیشتر از ۱ میلیگرم بر لیتر بهرهبرداری شود تا گرفتگی غشا برای تصفیه فاضلاب شهری در شرایط مناسب و قابل کنترل باقی بماند. در این حالت شاید لازم باشد هر ۳ ماه یکبار شستشوی غشا عملیاتی شود.



شکل ۳- میزان افت هد جریان عبوری از غشا (mBar) در طول دوره بهرهبرداری از پایلوت

www.SID.ir

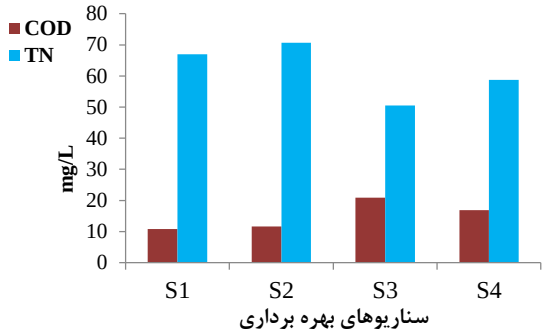
Archive of SID



شکل ٤- همبستگی بین افت هد جریان عبوری از غشا با بارگذاری آلی پایلوت

علیرغم تغییر شرایط بهره‌برداری از بیوراکتور غشایی در مقیاس پایلوت، نتایج مطالعات آزمایشگاهی از پساب تراوش شده خروجی از غشا نشان می‌دهد کیفیت این پساب حتی در شرایط بارگذاری آلی بالا، و کاهش هوادهی و تغییر محیط از شرایط هوازی به آنوکسیک، از حدود استاندارد تجاوز نمی‌کند. مقادیر غلظت BOD محلول بطور متوسط کمتر از ۸ میلی‌گرم بر لیتر بوده و متوسط غلظت TSS نمونه‌های پساب نیز کمتر از ۵ میلی‌گرم بر لیتر باقی می‌ماند. غلظت COD این پساب نیز در شرایط بهره‌برداری سناریو سوم نیز در طی دوره آزمایش کمتر از ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و بطور متوسط ۲۱ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است. با این وجود، کارایی بیوراکتور غشایی در کاهش غلظت فسفر و نیتروژن کل پساب نسبتاً کمتر از پارامترهای آلی کربنی است.

شکل ۵- متوسط نتایج آنالیز BOD، TP و TSS پساب خروجی از پایلوت در هر دوره (mg/L)

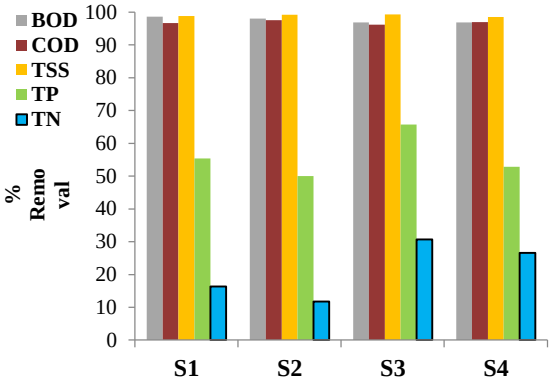


شکل ۶- متوسط نتایج آنالیز COD و TN پساب خروجی از پایلوت در هر دوره (mg/L)

نمودارهای ۵ و ٦ نشان می‌دهند که عملکرد بیوراکتور غشایی در شرایط بهره‌برداری دوره سوم (S3) در کاهش TP و TN نسبت به دو سناریو دیگر مناسب‌تر بوده است بطوریکه غلظت این پارامترها به ترتیب به کمتر از۲/۵ و ٦۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. بهبود شرایط کاهش نیتروژن و فسفر در حالت دوم ناشی از کاهش غلظت اکسیژن محلول و احتمالاً ایجاد شرایط آنوکسیک و هوازی در بیوفیلم لجن تجمع یافته بر روی غشا با شد که البته در شرایط کاهش اکسیژن محلول به کمتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر و تخریب سلولی در بلندمدت و افزایش گرفتگی غشا این عملکرد با افت همراه می‌شود. این پدیده بطور مشابه در دیگر روش‌های تصفیه فاضلاب مبتنی بر رشد لایه بیوفیلمی نیز مشاهده است[۲۳-۲٤]. با این وجود، تحت هیچ شرایطی پساب خروجی برای تخلیه پساب به منابع آب سطحی مناسب نیست و پتانسیل رشد جلبکی را به همراه خواهد داشت بنابراین نیازمند ارتقا و راهکارهای تکمیلی در این زمینه است. در این رابطه مشابه مطالعات پیشین استفاده از تصفیه تکمیلی، مانند جاذب‌های طبیعی برای کاهش بار مواد مغذی قابل پیشنهاد است[۲۲].

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷- راندمان حذف پارامترهای کیفی فاضلاب در شرایط مختلف بهره‌برداری از پایلوت (mg/L)

نمودار ۷ راندمان حذف ۵ پارامتر اصلی کیفی فاضلاب را در شرایط مختلف بهره‌برداری در بیوراکتور غشایی نمایش می‌دهد. براساس راندمان حذف BOD، COD و TSS مشخصاً عملکرد بیوراکتور غشایی با زمان ماند ۸ ساعت مناسب است اما برای ارتقای عملکرد واحد تصفیه برای کاهش بار نیتروژنی و فسفر می‌توان از واحدهای پیش‌تصفیه یا تصفیه تکمیلی مناسب یا با بهره‌گیری از شرایط بهره‌برداری آنوکسیک و بی‌هوازی بصورت بیوراکتور غشایی هیبریدی استفاده نمود.

بحث

بطور کلی ترکیبات نیتروژنی در محیط فاضلاب، با استفاده از توالی راکتورهای بیولوژیکی تحت شرایط آنوکسیک – هوازی از محیط فاضلاب حذف می‌شوند. این روش بیولوژیکی در سیستم‌های MBR می‌تواند با تنظیم زمانی شرایط هوادهی بصورت غیرپیوسته (مشابه راکتور SBR)، ایجاد راکتور پیش‌تصفیه آنوکسیک (مشابه فرآیند MLE) با امکان برگشت پساب، یا با استفاده از انواع محیط‌های رشد چسبیده (Media) معلق و ثابت در راکتور ایجاد شود[۲۲]. مزیت کلیه این رویکردها، بهره‌مندی از شرایط تلفیقی آنوکسیک – هوازی بصورت زمانی یا مکانی است تا امکان حذف نیتروژن فراهم گردد. علاوه بر این موارد، همچنین اخیراً ادعا شده است لایه بیوفیلمی ایجاد شده روی غشا، که به تدریج موجب گرفتگی آن می شود، می‌تواند در MBR ظرفیت منا سبی برای کاهش غلظت نیتروژن در پساب خروجی ایجاد نماید. بعبارتی Zheng و همکاران (۲۰۱۸) ادعا کرده‌اند با افزایش گرفتگی غشا و فشار عبوری از آن میزان کارایی MBR در حذف نیتروژن افزایش می‌یابد زیرا لایه بیوفیلمی حاوی مخلوطی از باکتری‌ها با شرایط هوازی و آنوکسیک است[۲۵]. اما باید به دو نکته در این خصوص توجه داشت. اولاً لایه بیوفیلمی ظرفیت محدودی در کاهش بار مواد مغذی دارد و اینکه به تنهایی بتواند موجب بهبود قابل ملاحظه کارایی MBR در حذف مواد مغذی در شرایط واقعی شود دور از انتظار خواهد بود. ثانیاً عملکرد MBR در تصفیه فاضلاب صرفاً به حذف مواد مغذی منتهی نمی شود بلکه در وهله نخست شامل حذف مواد آلی کربنی (BOD و COD) نیز بوده و این عملکرد به عوامل متعددی مانند مشخصات غشا، نوع و کیفیت فاضلاب ورودی، چیدمان راکتور، شرایط بهره‌برداری از راکتور (مانند زمان ماند هیدرولیکی و میزان بارگذاری آلی)، و حجم مطالعات پایلوت وابسته است. این موارد در مطالعات Mao و همکاران (۲۰۲۰) مرور شده است[۱۸]. براساس جمع‌بندی‌های صورت گرفته در این مطالعه مروری چنین نتیجه گرفته شده است که گاهی ممکن است کارایی سیستم‌های MBR در حذف مواد مغذی با اعمال برخی شرایط بهره‌برداری، مانند کاهش هوادهی، بهبود یابد اما در برخی مطالعات دیگر، عملکرد موثر سیستم در حذف همزمان مواد مغذی و بار آلی کربنی به شرایط بهره‌برداری یا تمهیدات خاص وابسته شود. بعنوان مثال، Fathali و همکاران (۲۰۱۹) در طی یک دوره سه ماهه تست پایلوت با تغذیه از فاضلاب واقعی نشان دادند که استقرار غشا تخت با سطح ویژه ۰,۱ مترمربع در حوضچه آنوکسیک (DO< 1.5 mg/L) بعد از یک راکتور هوادهی (DO> 2.5 mg/L) می‌تواند میزان حذف TN را از حدود ۲۵٪ تا ۹۰٪ افزایش دهد، اما میزان گرفتگی غشا در مدت معین بدلیل عدم

www.SID.ir

Archive of SID

وجود تنش برشی ناشی از هوادهی افزایش می‌یابد[۲۶]. از انجاییکه مطالعه مذکور در مقیاس آزمایشگاهی و تحت شرایط کنترل‌شده دمایی و با ۱۲ ساعت زمان ماند هیدرولیکی بوده است می‌توان انتظار داشت کارایی بالاتری نسبت به مطالعات کنونی برای حذف نیتروژن کل (٪۳۱) داشته باشد زیرا استفاده از فاضلاب واقعی، بهره‌برداری از پایلوت در شرایط دمای محیط و در مقیاس بزرگ، و ورود نوسانات کیفی موجب کاهش عملکرد هرگونه سیستم بیولوژیکی از جمله MBR خواهد شد. اما از طرفی روند تغییرات نتایج کیفی و میزان گرفتگی غشایی با اعمال شرایط آنوکسیک در مطالعات Fathali و همکاران (۲۰۱۹) با روند تغییرات در این مطالعه مشابهت دارد و آن را تایید می‌کند. بعبارتی، در هر دو پژوهش با کاهش هوادهی، میزان حذف مواد مغذی افزایش یافت اما میزان شار عبوری از غشا و حذف مواد آلی کربنی کاهش یافته است. این پدیده بدان علت است که شرایط آنوکسیک صرفاً ناشی از کاهش میزان هوادهی در بیوراکتور ایجاد شده است. هوادهی در سیستم‌های MBR علاوه بر اینکه انرژی مورد نیاز فعالیت‌های میکروبی برای سوخت و ساز (تنفس) را فراهم می‌کند، حباب‌های هوا از نظر هیدرولیکی یک تنش برشی بر غشای تخت وارد می‌کنند. این تنش برشی مانع رشد سریع گرفتگی روی لایه غشایی شده و عمر استفاده از غشا و دوره بهره‌برداری را افزایش می‌دهد[۶]. کاهش میزان هوادهی منجر به کاهش تنش برشی ایجاد شده روی غشا شده و بالطبع موجب افزایش سرعت گرفتگی غشا و افت عملکرد MBR در حذف مواد آلی می‌شود. بنابراین ایجاد یک توازن بین میزان حذف مواد مغذی با کاهش میزان هوادهی و حفظ عملکرد کلی MBR نیازمند مطالعات پایلوت است که این ویژگی در این مطالعه بررسی شده است. نتایج مطالعات جاری نشان می‌دهد برای افزایش کارایی MBR در حذف مواد مغذی و حفظ عملکرد سیستم در حذف سایر آلاینده‌ها، لازم است بارگذاری آلی کمتر از ۱/۵ کیلوگرم COD در واحد مترمکعب در روز درنظر گرفته شود.

رودریگز و همکاران (۲۰۱٤) در یک بررسی بطور مشابه و بصورت مقایسه‌ای نشان دادند که استفاده از سیستم هیبریدی رشد چسبیده در بیوراکتور غشایی بدلیل استفاده همزمان از شرایط هوازی، آنوکسیک و بی‌هوازی در لایه‌های بیوفیلمی قادر است میزان حذف نیتروژن کل را از شرایط متعارف ۳۸٪ به ۷۵٪ بهبود ببخشد[۲۷]. شایان ذکر است حجم پایلوت در این مطالعه ۱/۸ مترمکعب و نوع فاضلاب واقعی بوده است که در سه حالت بارگذاری آلی۰/۸ ، ۱/۱ و ۲/۲ کیلوگرم COD در مترمکعب در روز بهره‌برداری شده است. بنابراین این پژوهش از نظر شرایط بهره‌برداری و میزان حذف مواد مغذی در حالت متعارف با مطالعات حاضر همخوانی دارد اما این محقق پیشنهاد کرد برای بهبود عملکرد MBR در حذف مواد مغذی و کاهش گرفتگی غشایی لازم است راکتورهای هیبریدی بجای متعارف استفاده شود. نتایج بررسی‌های مطالعات پایلوت بیوراکتور غشایی نشان داد که این سیستم توانایی بسیار بالایی در حذف ترکیبات آلی کربنی (BOD و COD) و جامدات معلق کل (TSS) داراست و تقریباً مستقل از شرایط بهره‌برداری می‌تواند پساب با کیفیت مطلوب ارائه دهد. این اعتمادپذیری به عملکرد بیوراکتور غشایی در تصفیه فاضلاب شهری تحت شرایط مختلف بارگذاری و هوادهی حداقل برای یک دوره یک تا سه ماهه و برای لجن با سن حداکثر ۱۰۰ روزه براساس مطالعات جاری قابل تایید است. همچنین آنالیز شرایط مختلف بهره‌برداری از پایلوت نشان داد که عملکرد سیستم در حذف مواد مغذی و میزان گرفتگی غشایی از بارگذاری آلی و میزان هوادهی تاثیر می‌پذیرد که از این نظر با مطالعات پیشین تطابق دارد. میزان گرفتگی با افزایش بارگذاری آلی نسبت مستقیم دارد و کاهش هوادهی بر بهبود حذف ترکیبات نیتروژن و فسفر و افزایش گرفتگی موثر است. در این مطالعه همچنین توانایی حذف

www.SID.ir

Archive of SID

ترکیبات نیتروژن و فسفر به ترتیب حداکثر ۳۱٪ و ٦٦٪ گزارش شد که در مقایسه با نتایج مطالعات مشابه بویژه برای نیتروژن کل کمتر است. با توجه به محدودیت‌های روش متعارف بیوراکتور غشایی در حذف مواد مغذی، پیشنهاد می‌شود برای بهبود این شرایط استفاده از روش‌های تکمیلی و هیبریدی در اینگونه سیستم‌ها مدنظر قرار گیرد

نتیجه‌گیری

بیوراکتور غشایی یک فناوری کارآمد در حذف مواد آلی کربنی در فاضلاب شهری است و در صورت بروز شرایط مختلف بهره‌برداری مانند افت هوادهی یا افزایش بار هیدرولیکی و آلی تصفیه‌خانه عملکرد ثابتی دارد. با این وجود نیازمند فرآیند تکمیلی برای حذف ترکیبات نیتروژنی و فسفر از فاضلاب است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از همکاری موثر آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب استان تهران و بهره‌برداران و مدیران تصفیه‌خانه فاضلاب اکباتان برای انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را می‌نماییم

References

1. Crawford G V, Sandino J. Technology Roadmap for Sustainable Wastewater Treatment in a C-Constrained World. Water Environment Federation (WEF), 2010.

2. Frost & Sullivan. Biotechnology Mega Trends in the Water and Wastewater Industry 2015.

3. Reardon R, Davel J, Baune D, McDonald S, Appleton R, Gillette R. Wastewater Treatment Plants of the Future: Current Trends Shape Future Plans. Florida Water Resources Journal 2013; 8-14.

4. Jamshidi S. Value-added innovation in infrastructure systems, lessons learned from wastewater treatment plants. The TQM Journal 2019; 31(6): 1049-1063.

5. Yang W, Cicek N, Ilg J. State-of-the art of Membrane Bioreactors: Worldwide Research and Commercial Applications in North America. Journal of Membrane Science 2006; 270: 201-211.

6. Judd S. The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment. Technology & Engineering 2011.

7. Yoon S H. Membrane Bioreactor Processes: Principles and Applications: Taylor and Francis 2015.

8. Hai F L, Yamamoto K, Lee C H. Membrane Biological Reactors: Theory, Modeling, Design, Management and Applications to Wastewater Reuse. IWA Publishing 2018, 12.

9. Park H D, Chang I S. Lee K J. Principles of Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment: CRC Press 2015.

10. Shanahan J W, Semmens M J. Alkalinity and pH effects on nitrification in a membrane aerated bioreactor: An experimental and model analysis. Water Research 2015; 74: 10-22.

11. Mannina G, Ekama G A, Capodicia M, Cosenza A, Trapani D D, Ødegaard H. Integrated fixed-film activated sludge membrane bioreactors versus membrane bioreactors for nutrient removal: A comprehensive comparison. Journal of Environmental Management 2018; 226: 347-357.

12. Iorhemen O T, Hamza R A, Zaghloul M S, Tay J H. Simultaneous organics and nutrients removal in side-stream aerobic granular sludge membrane bioreactor (AGMBR). Water Process Engineering 2018; 21: 127-132.

13. Ratanatamskul C, Katasomboon J. Effect of sludge recirculation pattern on biological nutrient removal by a prototype IT/BF-MBR (inclined tube/biofilm-membrane bioreactor) and microbial population characteristics. International Biodeterioration & Biodegradation 2018; 124: 26-35.

14. Gurung K, Ncibi M C, Sillanpa M. Assessing membrane fouling and the performance of pilot-scale membrane bioreactor (MBR) to treat real municipal wastewater during winter season in Nordic regions. Science of The Total Environment 2017; 579: 1289-1297.

15. Khan S J, Hasnain G, Fareed H, Aim R B. Evaluation of treatment performance of a full-scale membrane bioreactor (MBR) plant from unsteady to steady state condition. Journal of Water Process Engineering 2019; 30: 100379.

www.SID.ir

Archive of SID

16. Zheng Y, Zhang W, Tang B, Ding J, Zheng Y, Zhang Z. Membrane fouling mechanism of biofilm-membrane bioreactor (BF-MBR): pore blocking model and membrane cleaning. Bioresource Technology 2018; 250: 398-405.

17. Bezirgiannidis A, Marinakis N, Ntougias S, Melidis P. Biological treatment of a low strength domestic wastewater in a membrane bioreactor. European Water 2017; 58: 83-86.

18. Mao X, Myavagh P H, Lotfikatouli S, Hsiao B S, Walker H W. Membrane Bioreactors for Nitrogen Removal from Wastewater: A Review. Journal of Environmental Engineering 2020; 146(5): 03120002.

19. Ashoubi F, Mousavi S A, Roostaazad R. Preparation of an Experimental Setup for Separation of Hydrogen Sulfide and Carbon Dioxide from Methane by Using Membrane Contactor 2014; 33(1), 21-30.

20. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th ed. American Public Health Association, Washington DC, USA 2005.

21. Hazrati H, Sajadian Z S, Jahanbakhshi N, Rostamizadeh M. Reduction of membrane fouling in MBR by ZSM-5 nano adsorbent in various sludge retention times for phenol removal. Journal of Applied Research in Water and Wastewater 2019; 6(1): 62-66.

22. Alighardashi A, Pakan M, Jamshidi S, Shariati F P. Performance evaluation of membrane bioreactor (MBR) coupled with activated carbon on tannery wastewater treatment. Membrane Water Treatment, An International Journal 2017; 8(6): 517-528.

23. Akbarzadeh A, Jamshidi S, Vakhshouri M. Nutrient uptake rate and removal efficiency of Vetiveria zizanioides in contaminated waters. Pollution 2015; 1(1): 1-8.

24. Valipour A, Taghvaei S M, Raman V K, Gholikandi G B, Jamshidi S, Hamnabard N. An approach on attached growth process for domestic wastewater treatment, Environmental Engineering & Management Journal 2014; 13(1): 145-152.

25. Zheng Y, Zhang W, Tang B, Ding J, Zheng Y, Zhang Z. Membrane fouling mechanism of biofilm-membrane bioreactor (BF-MBR): pore blocking model and membrane cleaning. Bioresource Technology 2018; 250: 398-405

26. Fathali D, Mehrabadi A R, Mirabi M, Alimohammadi M. Investigation on nitrogen removal performance of an enhanced post-anoxic membrane bioreactor using disintegrated sludge as a carbon source: An experimental study. Journal of Environmental Chemical Engineering 2019; 7: 103445.

27. Rodríguez-Hernández L, Esteban-García A L, Tejero I. Comparison between a fixed bed hybrid membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor for municipal wastewater treatment: A pilot-scale study. Bioresource Technology 2014; 152: 212-219.

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Environmental Health Engineering, February 2020; Vol. 8, No2: 212-223

Evaluating the Optimal Operating Conditions of MBR for Domestic Wastewater Treatment

Hamidreza khastoo[1], Amir Hessam hassani[2*], Roya Mafigholami[1*], Rouhallah mahmoudkhani[3]

1- Department of Environmental Engineering, West Tehran branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Department of Environmental Health Engineering, Tehran medical sciences, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: : r.mafigholami@wtiau.ac.ir
Received: 28 Sep 2020; Accepted: 8 Feb 2021

ABSTRACT

Objective: Membrane bioreactor (MBR) is known as new technology for domestic wastewater treatment. This research aims on the performance evaluation of MBR in pollutants removal and membrane fouling in different operational conditions.

Materials and methods: For this purpose, a pilot with 140 L net volume and flat-sheet membrane was started up and continuously fed with real wastewater in Ekbatan wastewater treatment plant. It has been operated for 100 days with different organic loading rates (OLR) of 0.58, 0.71 and 1.55 kgCOD/m^3.d and aeration conditions of DO>4 mg/L and DO<1.5 mg/L.

Results: The results show that MBR can remove more than 96% of BOD, COD and TSS of wastewater in all operating conditions. This performance is rather constant and verifies the high reliability of system in different operating conditions. Nevertheless, the maximum removal efficiency of total nitrogen (TN) and total phosphorous (TP) is 31% and 66%, respectively, while it degrades about 15% in aerated condition (DO>4 mg/L). In addition, membrane fouling increases whenever OLR is increased or the aeration is reduced. Actually, the trans-membrane pressure (TMP) is statistically correlated with OLR (R^2=0.91).

Conclusion: The findings reveal that MBR is an efficient technology for domestic wastewater treatment and performs rather constant in times of aeration reduction or OLR enhancement. However, it requires supplementary techniques for TN and TP removal.

Key words: Fouling, Membrane bioreactor (MBR), Pilot, Technology, Wastewater treatment.

www.SID.ir