



بازیافت آب و مواد شوینده از آب شستشو در یک محیط صنعتی

کبری وریج کاظمی^۱، ساقی محمد صالحی^۲، محمد آقاجانی^۲

عضو هیات علمی گروه فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد
تنکابن، تنکابن، ایران

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تنکابن

چکیده

جریان های آب شستشو ناشی از شستشوی تجهیزات در یک محل تولید مواد شوینده در بیشتر موارد، فاضلاب در نظر گرفته می شوند. تصفیه در محل تصفیه خانه های فاضلاب ممکن است ولی معمولاً به فناوری فرایند اکسیداسیون پیشرفته (AOP) نیاز است که از مواد شیمیایی استفاده و لجن فاضلاب را ایجاد میکند. رویکرد تصفیه جدید مبتنی بر نانوفیلتراسیون، در مقیاس صنعتی در یک سایت تولید مواد شوینده در چین ارائه شده است. آب شستشو را میتوان به جریان غلیظ و آب ناحیه ای تقسیم کرد. جریان غلیظ بیشتر شامل سورفاکتانت های ارزشمند است و ارزش بازیافت دارد. آب ناحیه ای نیز توسط فرایند MBR برای تغذیه برج های خنک کننده تصفیه می شود. در این صورت، این محل تولید، آب شستشوی فرایند را تخلیه نمی کند و همه منابع موجود در آب شستشو، یعنی هم مواد شیمیایی (مانند سورفاکتانت ها) و هم آب را بازیافت می کند.

کلمات کلیدی: استفاده مجدد از آب، بازیافت منابع، شوینده ها، نانوفیلتراسیون، MBR



۱. مقدمه

تجهیزات تولید شوینده های مایع، معمولاً دارای واحدهای تولیدی هستند که محصول در مخازن ذخیره بزرگ آنها تولید می شود، و دارای بخش های بسته بندی هستند که محصول درون بطری قرار می گیرد و سپس برای توزیع به مشتریان بسته بندی می شود. در هر دو بخش، آب شستشو در زمان فعالیت های پاکسازی و تمیزکاری ایجاد می شود. این آب طی شستشو ایجاد میشود، و برای جلوگیری از آلودگی محصول، در زمان جابجایی بین انواع محصول انجام می شود و حاوی مقادیر زیادی سورفاکتانت است که در بیشتر موارد نمی توان آن را به سیستم های فاضلاب عمومی تخلیه کرد. نوع مشابهی از آب شستشو در زمان شستشو با آب داغ ایجاد می شود که به دلیل جلوگیری از آلودگی باکتریایی شوینده های مایع انجام می شود. این آب شستشو در کل ترکیبی از آب با کیفیت اسمز معکوس (RO) تمیز و محصول شوینده است و دامنه COD آن بین 5000 تا 30000mg/l است.

امروزه، برخی از این جریان های آب شستشو در محل و قبل از تخلیه شدن تصفیه می شوند. این مورد معمولاً شامل تصفیه فیزیکی و یا AOP، تصفیه بیولوژیکی و در صورت نیاز پرداخت^۱ اضافی است. سایر جریان های شستشوی آب جمع آوری می شوند و برای تصفیه خارجی مانند اکسیداسیون آب یا سوزاندن یا بازیافت انرژی فرستاده میشوند. مواد شیمیایی و انرژی برای تبدیل آب شستشو به آبی که می توان آن را تخلیه کرد و لجنی که به شکل فاضلاب جدا می شود، اضافه می شوند. هزینه جداسازی لجن و مواد شیمیایی AOP در هر موقعیت بسیار متفاوت



است، ولی می تواند ۲۰ تا ۴۰ یورو در هر متر مکعب آب تصفیه شده باشد. سوزاندن بیرونی^۲ نیز هزینه قابل توجهی دارد.

پروژه E4WATER اروپا بر یافتن راهکارها و رویکردهای جایگزین تمرکز دارد. در این پروژه، جریان های آب شستشو به عنوان ترکیبی از آب و محصول در نظر گرفته شدند. به جای استفاده از رویکردهای تصفیه فاضلاب سنتی، فناوری غشا برای استخراج این محصول (شوینده) از آب و بازیافت آن استفاده شد. سورفاکتانت های جمع آوری شده را می توان در کاربردهای مختلف بازیافت کرد (مثلا سورفاکتانت درجه پایین برای شستشوی خودرو، پاکسازی جاده) که درآمد ایجاد می کنند. از اضافه کردن مواد شیمیایی خودداری شد چون محصول بازیافت شده را آلوده می کنند. علاوه بر بهبود محصول، جریان آب برای محقق کردن الزامات تخلیه قانونی و در مورد ایده آل برای استفاده دوباره از آب در فرایند بعد از یک مرحله پرداخت اضافی تصفیه می شود.

برای رسیدن به بهبود محصول و آب، یک رویکرد دو مرحله دنبال می شود. در مرحله اول، نانوفیلتراسیون (NF) برای تقسیم آب شستشو به جریان غلیظ با غلظت کم و زیاد استفاده شده است. اگر جریان غلیظ حاوی نیمی از غلظت شوینده محصول خالص باشد، استفاده دوباره به عنوان شوینده صنعتی درجه پایین ممکن است. در مرحله دوم، آب تصفیه شده NF (حاوی COD، BOD و مواد شوینده) در بیوراکتور غشایی هوازی (MBR) تصفیه شد تا آب تخلیه شود یا دوباره به فرایند برگردد.

استفاده از NF برای تصفیه شوینده حاوی فاضلاب در منابع شناخته شده است و برای تصفیه آب شستشوی پاکسازی در محل (CIP) به کار می

² external incineration



رود. مطابق با کار کایا و همکاران [۱،۲] و کوالسکا [۳]، NF در جداسازی مونومرهای سورفاکتانت از فاضلاب بهتر است، در حالی که میسل ها را می توان با میکروفیلتراسیون (MF) و اولترافیلتراسیون (UF) جدا کرد. آرچر و همکاران [۴] NF را برای راهکارهای مدل حاوی سورفاکتانت های آنیونی کمتر از غلظت بحرانی میسل مطالعه کردند. مطالعه آنها نشان داد که عملکرد تفکیک وابسته به ویژگی های سورفاکتانت و برهمکنش های بین سورفاکتانت و غشا است که اهمیت انتخاب مناسب غشا در هر مورد را نشان می دهد. کایا و همکاران [۲] سه غشای NF متفاوت را برای تصفیه یک محلول و محلول های سورفاکتانت ترکیبی بررسی کردند. غشای بهینه وابسته به ترکیب محلول سورفاکتانت متفاوت بود. به علاوه، کاهش جریان سریع در این مطالعه گزارش شد که با جذب سورفاکتانت ها در سطح و دیواره های حفره ایجاد شد که اهمیت رسوب در فرایند را نشان می دهد.

چون مشخص است که حضور شوینده ها رسوب غشا را تحریک می کند، سایر مولفان نیز بر این موضوع تمرکز کردند. کایا و همکاران [۱] از فرایند NF دو مرحله ای برای بازیافت محصول و استفاده دوباره از آب در مدول فاضلاب CIP استفاده کردند. اثرات pH، دما و فشار درون غشایی (TMP) بر عملکرد غشا و وقوع رسوب ارزیابی شد. بهترین نتایج در pH=5، دمای اتاق و بیشترین TMP (20bar) به دست آمد. رویکرد دو مرحله ای مشابه توسط گوندر و همکاران [۵] دنبال شد. در مطالعه بیان شده، روش تاگوچی استفاده شد تا مشخص کند کدام پارامترها با رسوب گذاری غشا بیشترین تاثیر را بر کاهش جریان دارند. pH بیشتر از نقطه ایزوالکتریک غشا، دمای اتاق و TMP کمتر (12bar) به عنوان شرایط بهینه تعریف شدند. این مورد توسط کرتسز و همکاران [۶] نیز تأیید شد، اگرچه این گروه بیان کردند که تبدالی بین جریان (بیشترین مقدار در دمای بالا) و حفظ (بیشترین



مقدار در دمای پایین)، و همین طور بین جریان (بالاترین مقدار در TMP زیاد) و تشکیل لایه ژل (بیشترین مقدار در TMP زیاد که برای جریان منفی است) وجود دارد. بنابراین در این مطالعه نیز تحقیق در بهترین شرایط برای آب شستشوی بررسی شده انجام شد.

در مقاله بازبینی سوارز و همکاران [۷]، فناوری غشا به عنوان مناسب ترین روش برای بازیافت عوامل پاکسازی توصیف شد. آنها بیان کردند که بیشتر کارهای انجام شده تا به حال بر سورفاکتانت های آنیونی و غیریونی تمرکز داشته اند، و کار بیشتری درباره شوینده های صنعتی واقعی لازم است چون شامل مواد مهم دیگری نیز هستند. به علاوه نبود داده با مقیاس بزرگتر مشاهده شد. به عنوان پاسخی به این سوال، در این مقاله همه تحقیقات درباره آب شستشوی واقعی از یکی از خطوط تولید P&G (یعنی HDL حاوی سورفاکتانت های آنیونی و غیریونی) انجام شد. P&G یکی از بزرگترین شرکت های کالای مصرفی غیرخوراکی در سراسر جهان است و انواع مختلفی از محصولات مصرفی تولید می کند که در اصل مایع هستند (شوینده های لباس، مایع ظرفشویی، پاک کننده سطوح، شامپو و غیره). در پایان مقاله، داده از مورد آزمایش صنعتی واقعی نیز گزارش شد، چون همه اطلاعات جمع آوری شده برای ساخت مجموعه تصفیه آب شستشوی سایت تولید مایع شوینده P&G در چین به کار رفت. به دلیل الزامات قانونی محلی، آب شستشو از این سایت تولید را نمی توان به سیستم فاضلاب عمومی محلی تخلیه کرد، حتی اگر تصفیه شده باشد. همه فاضلاب های مرتبط با فرایند باید دوباره به فرایند برگردند. این کار را می توان با برگرداندن آب به برج های خنک کننده (اگر $COD < 50mg/l$ ، سورفاکتانت ها $< 0.5mg/l$ و $TDS < 1000mg/l$ باشد) یا به عنوان آب فرایند (اگر آب استانداردهای آب آشامیدنی را محقق کند) انجام داد. رویکرد E4WATER برای محقق کردن این الزام محلی تخلیه مایع صفر



به وسیله ترکیب NF لوله ای و MBR با تصفیه اضافی با کربن فعال و رزین های جداسازی سورفاکتانت استفاده شد. تا جایی که می دانیم، این اولین بار است که ترکیب این روش ها در محیط صنعتی ارائه شده است.



۲. مواد و روش ها

۲,۱ نانوفیلتراسیون

آزمایشات نانوفیلتراسیون در مقیاس آزمایشگاهی انجام شدند. غشاهای لوله ای از PCI (فیلم پلی آمید با حفظ ۷۵ درصدی CaCl_2) به دلیل مزایای بیشتر که شامل تمایل کمتر به تشکیل رسوب، پاکسازی عالی و راحتی در تعویض غشا می باشند انتخاب شدند. سیستم غشای لوله ای مبتنی بر یک لوله غشایی $12.5\text{mm ID} \times 1.2\text{m}$ (طول) است که از لوله پشتیبان تشکیل می شود که به وسیله لایه غشای انتخابی در داخل پوشانده می شود. مساحت غشای لوله 0.072m^2 است و در یک پایه لوله/مدول قرار می گیرد که شامل ۱۸ لوله است. به این روش، حداکثر مساحت غشایی برابر با 1.37m^2 ایجاد می شود. این سیستم را می توان برای فشارهای عملیاتی تا حداکثر ۶۴ بار و حداکثر دماهای ۸۰ درجه سانتیگراد به کار برد.

فیلتراسیون چند مرحله ای با یک مدول حاوی ۱۸ لوله ارزیابی شد. جریان آب تمیز در شرایط توصیف شده توسط تامین کنندگان قبل و بعد از هر آزمایش اندازه گیری شد تا رسوب گذاری غشا تعیین شود. جریان اندازه گیری شد و جریان های نفوذی و تصفیه شده در بازیافت های نفوذی انتخابی نمونه گیری و آنالیز شدند. در پایان هر چرخه فیلتراسیون، ترکیبات غلیظ و تصفیه شده نمونه گیری و آنالیز شدند. این مراحل در ۳ چرخه با ورودی جدید تکرار شدند.

۲,۲ آزمایشات بیوراکتور غشایی

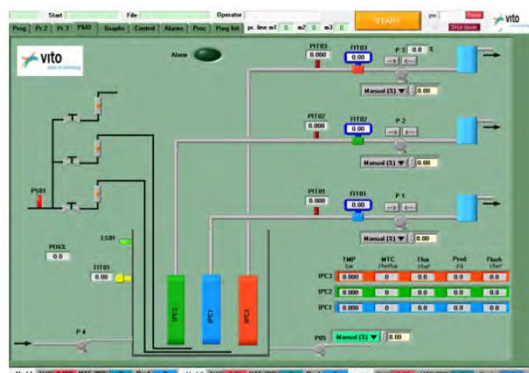
برای اجرای آزمایشات MBR، یک MBR هوازی در مقیاس کوچک استفاده شد که در آن می توان غشاهای متفاوت را به صورت همزمان آزمایش کرد. P&ID تجهیزات را می توان در شکل ۱ مشاهده کرد.



در این شرایط، اجازه عملیات ۶ پل فیلتراسیون متفاوت به صورت همزمان در یک لجن مشابه داده شد. پروتکل های فیلتراسیون برای سه پل فیلتراسیون می تواند یکسان یا متفاوت باشد. در این حالت میتوان بین اثرات غشا، و اثرات ایجاد شده توسط تفاوت های عملیاتی یا تفاوت های ایجاد شده از کیفیت لجن، تمایز ایجاد کرد. پارامترهای عملیاتی pH، دما و TMP به صورت همزمان ثبت شدند. pH را می توان با استفاده از پمپ های تزریق اسید و باز و دستگاه کنترل pH به صورت خودکار تنظیم کرد. در این مطالعه، غشای PE کلرینه کوبوتا استفاده شد. ویژگی های این غشا در جدول ۱ خلاصه شده اند.

محلول HDL ۵ درصد (مایع شوینده برای شستشوی لباس ها که در بازار موجود است) ابتدا توسط نانوفیلتراسیون تصفیه شد. محلول ورودی غلیظ شد تا وقتی بازیافت آب تصفیه شده به ۹۰ درصد رسید. بخش اول تصفیه با آب در دمای اتاق انجام شد. در پایان، نانوفیلتراسیون در دمای بالاتر انجام شد ($T \sim 40^{\circ}\text{C}$). مشخصات این آب تصفیه شده NF در جدول ۲ خلاصه شده است. این آب تصفیه شده در پایلوت MBR بیشتر تصفیه شد.

طی آزمایشات، آنالیزهای متفاوت روی جریان ورودی، جریان خروجی و لجن به مدت دو یا سه بار در هر هفته انجام شدند. یک خلاصه در جدول ۳ ارائه شده است. برای همه کارهای تحلیلی، روش های معتبر (روش های استاندارد برای آب و فاضلاب) استفاده شدند. جریان، بار لجن، زمان ماند هیدرولیکی (HRT)، جریان و فشار درون غشا (TMP) به صورت روزانه نظارت و محاسبه شدند.



شکل ۱: P&ID تجهیزات MBR در مقیاس کوچک

جدول ۱: مشخصات پنل های MBR ورقه ای صاف

کوبوتا	
PE کلرینه شده	ماده
0.2-0.4	اندازه حفره (μm)
0.116	مساحت غشا (m^2)

جدول ۲: مشخصات جریان ورودی MBR = NF نفوذی

پارامتر	واحد	میانگین	حداقل	حداکثر
pH		6.8	6.3	7.6
COD	mg/l	4084	3620	4392

جدول ۳: خلاصه ای از کار تحلیلی

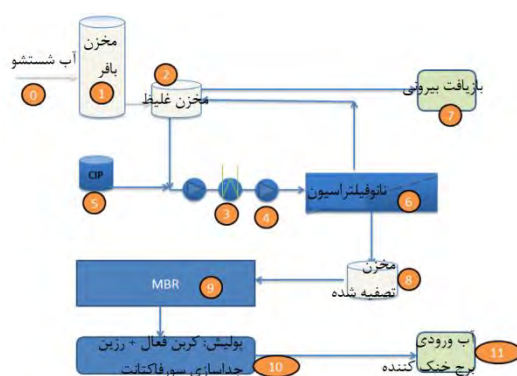
لجن	جریان خروجی	جریان ورودی	
X	X	X	pH
	X	X	COD
	X	X	BOD
	X	X	N_{total}
	X		$\text{NO}_3\text{-N}$
	X		$\text{NO}_2\text{-N}$
X			MLSS



X			MLVSS
---	--	--	-------

۲,۳ ارزیابی روند تصفیه در محیط صنعتی

بر اساس نتایج آزمایشگاهی، روند تصفیه شامل NF، MBR و یک مرحله تصفیه برای تصفیه آب شستشو از سایت تولید P&G در چین انتخاب شد. این سایت HDL تولید می کند که مایع شوینده حاوی سورفاکتانت های آنیونی و غیریونی است. این روند تصفیه به صورت شماتیک در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: تصویر شماتیک از روند تصفیه E4Water در P&G چین

آب شستشو در بخش تولید جمع آوری می شود و به مخزن بافر کارخانه تصفیه E4WATER پمپ می شود (1). یک مخزن تغلیظ در مجموعه قرار دارد (2) تا در حالت دسته ای با پرسازی پیوسته اجرا شود. با شروع کار از حالت خالی، مخزن غلیظ به وسیله مخزن بافر پر می شود. آب غلیظ از غشاهای NF (6) ۱۰۰ درصد به درون این مخزن برمی گردد. وقتی آب تصفیه شده در غشاهای NF تولید می شود، سطح درون مخزن به وسیله پرسازی پیوسته مخزن با آب جدید از مخزن بافر، ثابت نگه داشته می شود (1). در این حالت، آب غلیظ در مخزن به صورت پیوسته با آب شستشوی جدید رقیق می شود و سطح آب غلیظ در



مخزن به آهستگی افزایش می یابد. این افزایش غلظت به آرامی بر جریان آب تصفیه شده در غشاها تاثیر می گذارد. وقتی جریان آب تصفیه شده از غشا به سطح از قبل تعیین شده کاهش می یابد، آنگاه سیستم وارد حالت دسته ای می شود. اکنون پرسازی با آب جدید انجام نمی شود. غشاهای NF (6) تا حد ممکن آب تصفیه شده را جدا می کنند تا جریان به کمتر از یک مقدار بحرانی برسد. در این نقطه، غلظت مخزن به حداکثر مقدار ممکن می رسد و برای بازیافت بیرونی تخلیه می شود (7). بعد از چرخه CIP (پاکسازی در محل) با آب داغ قلیایی (5)، سیستم از حالت تخلیه دوباره راه اندازی می شود.

مبادله گرهای گرمایی (3) آب را در دمای $20-25^{\circ}\text{C}$ نگه می دارند.

مجموعه غشای NF (6) شامل ۸ مدول غشایی لوله ای موازی است (شکل ۳ را ببینید). فشارهای عملیاتی تا ۶۰ بار استفاده می شوند. جریان ورودی ثابت به وسیله پمپ های حجمی با سرعت کنترل شده حفظ می شود (4). شیر فشار برگشتی برای کنترل جریان تصفیه شده استفاده می شود.

مخزن آب تصفیه شده (8) برای جداسازی واحد غشای NF از واحد MBR استفاده می شود. واحد MBR (9) حاوی غشاهای ورقه ای صاف است و حجم آب راکتور 11m^3 است. مرحله پرداخت (10) با کربن فعال (درجه چینی محلی، جزئیات در دسترس نیستند) و رزین های جداسازی سورفاکتانت (Lewatit Up OC 1064 MD PH از شرکت Lanxess) بعد از MBR اضافه می شود تا تضمین کند آب به برج های خنک کننده برمی گردد (11).



شکل ۳: مجموعه غشای NF، چین

۳. نتایج و بحث

نانوفیلتراسیون برای آزمایشات COD به عنوان پارامتر اصلی برای ارزیابی پیشرفت و کنترل فرایند استفاده شد. آنالیز سورفاکتانت به این دلایل استفاده نشد:

- آنالیز COD را می توان به آسانی با آزمایشات Hach Lange Cuvette انجام داد که در دامنه وسیعی در دسترس هستند (Dr. Lange LCK 514 و LCK 314). سورفاکتانت های آنیونی و غیریونی را می توان به وسیله آزمایشات Hach Lange Cuvette (Dr. Lange LCK 331، 332 و 333)، ولی فقط در سطوح کم ($0-2\text{mg/l}$) تعیین کرد. سنجش جریان های سورفاکتانت زیاد نیازمند رقیق سازی قوی جریان ها است که تغییرات بسیاری ایجاد می کند.

- طی این آزمایشات، مشخص شد که دستیابی به کاهش COD مدنظر نقطه تمرکز خواهد بود و دستیابی به آن در برابر دستیابی به کاهش سورفاکتانت سخت تر است (جدول ۶ را نیز ببینید).

۳،۱ نانوفیلتراسیون

نانوفیلتراسیون برای جداسازی جریان آب شستشو به جریان بسیار غلیظ که حاوی نیمی از غلظت محصول خالص و جریان با غلظت کم می



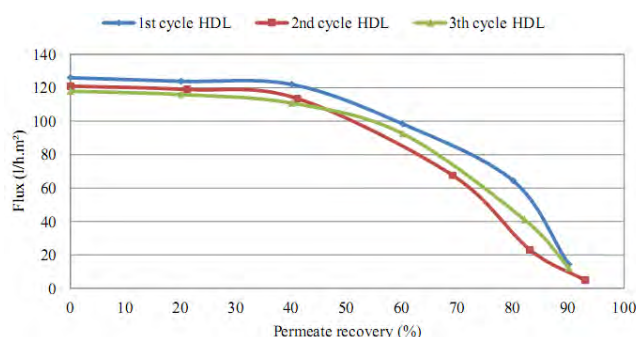
باشد، استفاده شد. همانطور که کایا و همکاران [۲] بیان کردند، انتخاب غشای مناسب برای دستیابی به جریان های زیاد، حفظ کافی و رسوب گذاری کمتر تا حد ممکن مهم است. بر اساس آزمایش غربالگری غشای اولیه، غشای لوله ای به عنوان مناسب ترین گزینه انتخاب شد. با این غشاها، فیلتراسیون های دسته ای در فشار ۳۰ بار، جریان ورودی 20l/h و دمای اتاق انجام شدند. جریان ورودی شامل ۵ درصد محصول در آب بود.

در شکل ۴، جریان آب تصفیه شده غشا به عنوان تابعی از بازیافت آب تصفیه شده ارائه می شود. ۹۰ درصد بازیافت برابر با غلظت نهایی ۵۰ درصد محصول است (با فرض اتلاف کم در غشا) که برای استفاده دوباره از آب غلیظ به عنوان شوینده درجه دوم ضروری است.

سه چرخه زیر ارائه می شوند. پیشرفت جریان در ۳ چرخه فیلتراسیون مشابه با افت جریان بعد از ۴۰ درصد بازیافت آب تصفیه شده بود. قبل و بعد از هر چرخه، یک جریان آب تمیز اندازه گیری شد. بر اساس جریان آب تمیز بدون تغیر، رسوب گذاری تشخیص داده نشد.

غلظت COD برای بازیافت های متفاوت آب تصفیه شده و جریان غلیظ نهایی اندازه گیری شد. نتایج در جدول ۴ خلاصه شده اند.

از این نتایج مشخص است که COD آب تصفیه شده باید بیشتر تصفیه شود تا استفاده دوباره در برج های خنک کننده ممکن شود (COD هدف $>50\text{mg/l}$). از طرف دیگر غلظت COD ماده غلیظ نشان می دهد که ماده غلیظ برابر با ۵۰ درصد محصول در آب است که برای استفاده دوباره کافی است.



شکل ۴: جریان NF به عنوان تابعی از بازیافت آب تصفیه شده برای ورودی HDL ۵ درصد

جدول ۴: غلظت COD (mg/l) در جریان ورودی، آب تصفیه شده و تغلیظ شده نهایی (غشای NF، ورودی HDL ۵ درصد)

چرخه ۱	چرخه ۲	چرخه ۳	
35000	30200	28100	ورودی
3460	3190	3590	آب تصفیه شده با ۲۰ درصد PR
3770	3620	3770	آب تصفیه شده با ۴۰ درصد PR
4360	4380	4210	آب تصفیه شده با ۶۰ درصد PR
5510	5900	5400	آب تصفیه شده با ۸۰ درصد PR
6790	9390	6870	آب تصفیه شده با ۹۰ درصد PR
4140	4150	4180	مخلوط آب تصفیه شده
183400	260000	231100	آب تغلیظ شده نهایی
88	86	85	ماند COD (درصد)

ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی محیط زیست و منابع طبیعی

The 6th International Conference on Environmental Engineering and Natural Resource





۳,۲ بیوراکتور غشایی

۳,۲,۱ فاز راه اندازی

برای تخلیه و یا استفاده مجدد از آب تصفیه شده با غلظت کم در واحد NF، تصفیه بیشتر ضروری بود (مشخصات جریان ورودی را در جدول ۲ را ببینید). برای رشد خوب بیولوژیکی لجن MBR، نسبت COD/N/P برابر با 100/2.5/1 توصیه می شود. محلول ورودی MBR با تزریق فسفر به شکل نمک K_2HPO_4 و نیتروژن به شکل نمک NH_4Cl استفاده شد. چون فاضلاب حاوی مواد ریزمغذی نیست، به شکل محلول ریزمغذی تجاری (Omex) در طی روزهای هفته (۵ روز در هفته) تزریق شد.

در شروع آزمایش، راکتور MBR آزمایشگاهی از لجن راکتور MBR مقیاس کامل برای تصفیه فاضلاب شهری تغذیه شد. غلظت MLSS تقریباً 10g/l~ بود. در شکل ۵، تغییر جامدات معلق لیکور ترکیبی (MLSS) و غلظت جامدات معلق فرار لیکور ترکیبی (MLVSS) ارائه شد.

در دو هفته اول آزمایش، کاهش MLSS مشخص بود. این مورد غیرمنتظره نبود، چون مشخص است که حضور (مقادیر کم) سورفاکتانت ها می تواند تشکیل کف در راکتور را تشدید کند که با مواد پلیمری خارج سلولی (EPS) تولید شده توسط میکروارگانیسم ها ایجاد می شود [۸]. بعد از دوره تطبیق دو هفته، تشکیل کف متوقف شد و غلظت لجن افزایش یافت. از روز سی ام، غلظت MLSS با جداسازی لجن اضافی به صورت منظم، ثابت نگه داشته شد (7-8g/l). بار لجن با افزایش جریان ورودی در حدود 0.2-0.3 gCOD/(gMLSS.d) ثابت نگه داشته شد. این مقدار در تناسب با بار لجن عادی برای سیستم های بیولوژیک است.

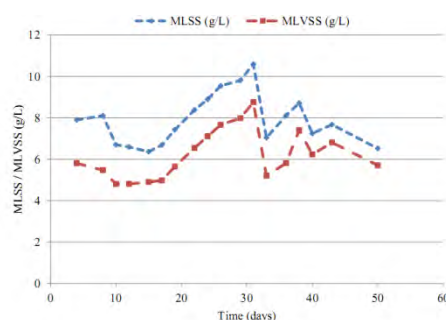


۳,۲,۲ روش فیلتراسیون غشاهای بیوراکتور غشایی

روش های فیلتراسیون مبتنی بر راهنماهای دریافت شده از تامین کنندگان بود. آرام سازی به عنوان روشی برای پاکسازی فیزیکی همه پنل های غشایی استفاده شد و با متوقف کردن نفوذ و ادامه شستشوی غشا با حباب های هوا به دست آمد. خلاصه روش فیلتراسیون استفاده شده در جدول ۵ ارائه شده است.

طرح کلی تغییر TMP و جریان برای غشای کوبوتا به شکل تابعی از زمان در شکل ۶ مشاهده می شود. طی عملیات MBR، لایه رسوبی روی غشا تشکیل شد که فشار درون غشایی بیشتر برای پایدار نگه داشتن جریان ها لازم دارد.

اگرچه بهینه سازی شرایط عملیاتی غشا برای این فاضلاب، هدف کار ما نبود، ولی مشخص شد که وقتی عملیات در جریان بیش از $17 \text{ l/m}^2\text{h}$ انجام می شود، TMP سریع افزایش یافت و فعالیت های پاکسازی لازم بود.



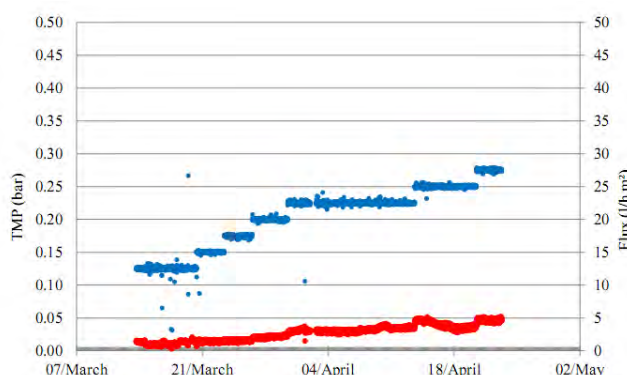
شکل ۵: تغییر غلظت MLSS و MLVSS در راکتور

جدول ۵: روش های فیلتراسیون پنل های غشای ورقه ای صاف

کوبوتا	فراهم کننده
۱۰	زمان چرخه (دقیقه)



۸	فیلتراسیون (دقیقه)
۱۲۰	آرام سازی (ثانیه)
۰,۷	سرعت جریان هوا (N) (m ³ /h)

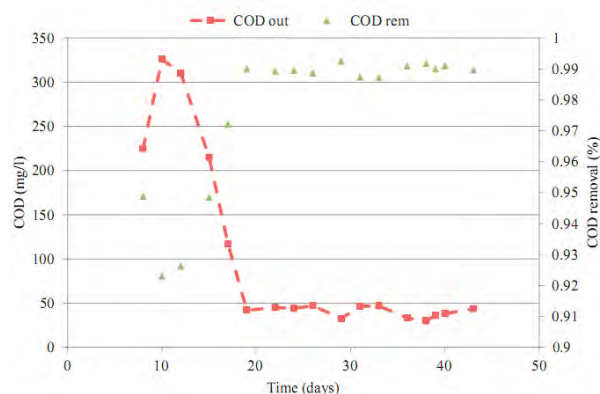


شکل ۶: TMP (قرمز) و جریان (آبی) به شکل تابع زمان برای غشای کوبوتا. (برای تفسیر مرجع رنگ در این شکل، خواننده به نسخه وب این مقاله ارجاع می شود)

۳,۲,۳ اجرای بلندمدت فرایند

بر اساس این اطلاعات، MBR حاوی غشاهای کوبوتا در جریان فیلتراسیون 15 l/m²h فعال شدند. بعد از فاز تطبیق دو هفته ای، فرایند بیولوژیک پایدار مشاهده شد. غلظت های COD نمونه های خروجی در شکل ۷ نشان داده شده است. BOD جریان خروجی کمتر از 3ppm بود و نیتریفیکاسیون کامل انجام شد.

بعد از راه اندازی و تطبیق لجن با جریان ورودی، مقادیر COD جریان خروجی کمتر از 50mg/l در میانگین بار لجن 0.2-0.3 g COD/g MLSS.d به دست آمدند که تخلیه و استفاده دوباره از جریان را ممکن می کند.

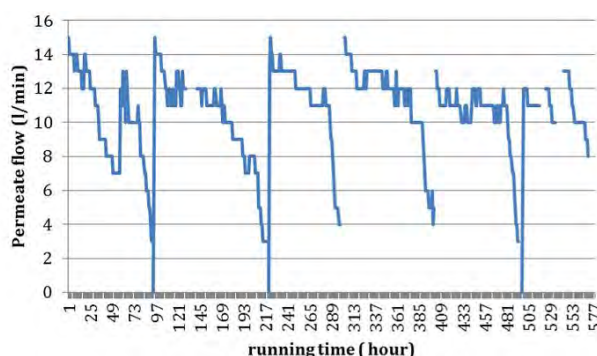


شکل ۷: غلظت COD (قرمز) جریان خروجی MBR و حذف COD (سبز) به شکل تابعی از زمان. (برای تفسیر مرجع رنگ در این شکل، خواننده به نسخه وب این مقاله رجوع کند).

۳,۳ ارزیابی مجموعه تصفیه

بعد از آنکه بطور موفقیت آمیزی احتمال استفاده از NF برای جداسازی آب شستشو HDL به یک جریان با غلظت زیاد و جریان با غلظت کم و MBR هوازی شناور برای تصفیه بیشتر از جریان با غلظت کمتر در مقیاس آزمایشگاهی، این دو فناوری در مجموعه تصفیه آب شستشو برای سایت تولید P&G در چین در نظر گرفته شدند. روند تصفیه کامل در شکل ۲ ارائه شده است.

غشای NF لوله ای در فوریه ۲۰۱۵ راه اندازی شد و از آن زمان بیش از ۳۰۰ تن آب شستشو را تصفیه کرده است. به طور میانگین، در یک دوره از ۵۰-۶۰ تن آب شستشو در یک چرخه تصفیه شد. بعد از هر چرخه، یک CIP ۳۰ دقیقه ای با آب داغ (40-50°C) + Ultrasil 67 از Ecolab انجام شد. در شکل ۸، تغییر جریان آب تصفیه شده در ۶ چرخه متوالی ارائه شده است.



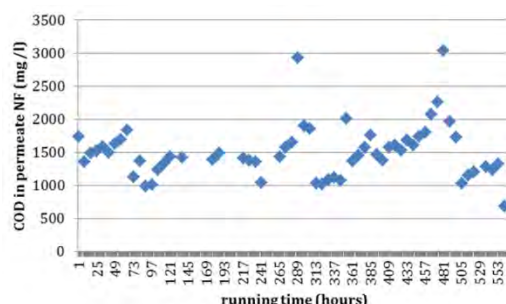
شکل ۸: جریان تصفیه شده NF به شکل تابعی از زمان

طی هر چرخه، کاهش جریان آب تصفیه شده در انتهای چرخه مشاهده شد. این کاهش با افزایش غلظت ورودی و رسوب گذاری غشا انجام شد. فشار ورودی غشا تا ۴۵ بار افزایش یافت تا جریان آب تصفیه شده ثابت بماند. حداکثر غلظت با رسیدن به فشار ۴۵ بار و جریان آب تصفیه شده کمتر از 2 l/min در نظر گرفته شد. آب غلیظ پمپ شد، پاکسازی CIP انجام شد و یک چرخه جدید شروع شد. به طور میانگین، یک دسته از ۶۰ تن آب شستشو، ۴ تن آب غلیظ ایجاد کرد. جریان غلیظ حاوی ۵۰-۳۰ درصد سطح سورفاکتانت محصول اصلی بود که در تولید شوینده درجه پایین با بازیافت بیرونی استفاده می شود.

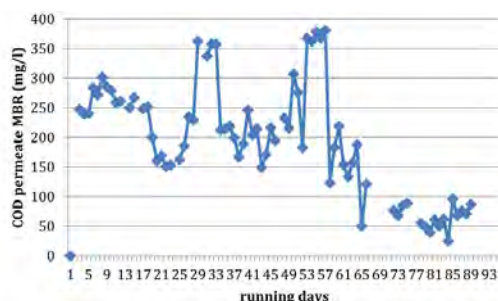
آب تصفیه شده واحد NF به عنوان جریان ورودی برای MBR استفاده شد. به دلیل رقیق سازی ثابت به وسیله رویکرد دسته ای و پرسازی، غلظت محصول در آب ورودی به غشاهای NF در بیشتر مدت کم باقی ماند که میانگین کیفیت بهتری برای آب تصفیه شده در مقایسه با آزمایشات کوچک مقیاس ایجاد کرد (شکل ۹ و جدول ۴ را ببینید). فقط وقتی سیستم در انتهای دسته در غلظت کامل قرار گرفت، غلظت های بیشتر به درون غشا پمپ شدند. این کار، پیک های کوچکی در COD جریان خروجی ایجاد کرد، ولی این تاثیر کوتاه مدت با مخزن آب تصفیه شده تعدیل شد.



واحد MBR در جولای ۲۰۱۵ راه اندازی شد. MLSS به آرامی تا دامنه 8000mg/l افزایش یافت. نسبت تغذیه/جرم در 0.1-0.2 gCOD/gMLSS.d نگه داشته شد. در ۶ ماه اول هیچ لجنی جدا نشد. بعد از آن لجن یکبار در ماه شستشو شد تا MLSS در دامنه 8-10 g/l باقی بماند. در شکل ۱۰، COD در جریان خروجی MBR به شکل تابعی از زمان ارائه شده است



شکل ۹: غلظت COD آب تصفیه شده NF به شکل تابعی از زمان



شکل ۱۰: غلظت COD آب تصفیه شده MBR به شکل تابعی از زمان

بعد از ۸۰ روز، غلظت COD بین 50 و 100mg/l متغیر بود. برای استفاده دوباره از آب نفوذی در برج های خنک کننده، COD کمتر از 50mg/l و غلظت سورفاکتانت کمتر از 0.5mg/l لازم است. بنابراین، یک مرحله تصفیه اضافی شامل کربن فعال و رزین های جداسازی سورفاکتانت (به دلایل ایمنی) به سیستم اضافه شدند، همانطور که در جدول ۶ مشخص است، کیفیت نهایی در پایان روند تصفیه برای استفاده دوباره از



آب مناسب بود. شوری و. ترکیب غیرآلی آب با جزئیات بیشتر تائید شد و مشخصات برج های خنک کننده را محقق کرد. (TDs:628mg/l، CaCO_3 :8.4mg/l، Ca^{2+} :3.26mg/l، Mg^{2+} :0.06mg/l، SO_4 :179mg/l، Cl^- :328mg/l، (TSS:7mg/l).

جدول ۶: مشخصات جریان های متفاوت در روند تصفیه

جریان	COD (mg/l)	سورفاکتانت آنیونی (mg/l)
مخزن بافر متعادل	10000-50000	800
آب تصفیه شده NF	1000-3000	30
آب تصفیه شده MBR	<100	<0.5
کیفیت نهایی بعد از تصفیه	<50	<0.5
هدف بازیافت در برج خنک سازی	<50	<0.5

۴. نتیجه گیری

این تحقیق ترکیبی از NF و MBR هوازی است که برای تصفیه آب شستشوی واقعی از خط تولید HDL از P&G آزمایش شد. آزمایشات در مقیاس آزمایشگاهی و مقیاس کامل با موفقیت انجام شدند. به وسیله NF، یک جداسازی بایک جریان با غلظت زیاد ($\text{COD} > 50000 \text{mg/l}$) و جریان با غلظت کم به دست آمد. جریان غلیظ را می توان به عنوان شوینده درجه دوم استفاده کرد، جریان با غلظت کم در MBR هوازی دوباره تصفیه شد. چون این جریان هنوز حاوی مقداری مواد شوینده است، تشکیل کف در زمان سازگاری لجن اتفاق افتاد، اما بعد از مرحله سازگاری، به یک فرایند پایدار رسید. در مقیاس آزمایشگاهی، غشاهای کوبوتا با جریان های $15 \text{ l/m}^2\text{h}$ پایدار شدند. غشاهای ورقه ای



صاف مشابه در مقیاس صنعتی استفاده شدند. در مقیاس آزمایشگاهی، کیفیت آب تصفیه شده MBR برای استفاده دوباره از آب در برج های خنک کننده کافی بود ($COD < 50 \text{ mg/l}$ و غلظت سورفاکتانت آنیونی $> 0.5 \text{ mg/l}$)، ولی در محیط صنعتی واقعی، یک مرحله تصفیه اضافی برای تضمین کیفیت کافی اضافه شد.

منابع

- [1] Y. Kaya, H. Barlas, S. Arayici, Nanofiltration of Cleaning-in-Place (CIP) waste-water in a detergent plant: effects of pH, temperature and transmembranepressure on flux behavior, Sep. Purif. Technol. 65 (2009) 117–129
- [2] Y. Kaya, C. Aydiner, H. Barlas, B. Keskinler, Nanofiltration of single and mixture solutions containing anionics and nonionic surfactants below their critical micelle concentrations (CMCs), J. Membr. Sci. 282 (2006) 401–412.
- [3] I. Kowalska, Dead-end and cross-flow ultrafiltration of ionic and non-ionic surfactants, Desalin. Water Treat. 50 (2012) 397–410.
- [4] A.C. Archer, A.M. Mendes, R.A.R. Boaventura, Separation of an anionic surfactant by nanofiltration, Environ. Sci. Technol. 33 (1999) 2758–2764.
- [5] Z.B. Gönder, Y. Kaya, I. Vergili, H. Barlas, Optimization of filtration conditions for



CIP wastewater treatment by nanofiltration process using Taguchi approach,

Sep. Purif. Technol. 70 (2010) 265–273.

[6] S. Kertész, Z. László, Z. Horváth, C. Hodúr, Analysis of nanofiltration parameters of removal of an anionic detergent, Desalination 221 (2008) 303–311.

[7] L. Suárez, M.A. Díez, R. García, F.A. Riera, Membrane technology for the recovery of detergent compounds: a review, J. Ind. Eng. Chem. 18 (2012) 1859–1873.

[8] M. Capodici, G. Di Bella, S. Nicosia, M. Torregrossa, Effect of chemical and biological surfactants on activated sludge of MBR system: microscopic analysis and foam test, Bioresour. Technol. 177 (2015) 80–86.