

حذف فورفوران از فاضلاب با استفاده از راکتور بیولوژیکی سیکی (CBR)

دکتر مصطفی لیلی (PhD)^۱ - *دکتر سیدغلامرضا موسوی (PhD)^۲ - دکتر کاظم ندافی (PhD)^۳
*نویسنده مسئول: گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

پست الکترونیک: moussavi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۰۷/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۲۱

چکیده

مقدمه: فورفوران، ترکیب شیمیایی سمی است که دارای منابع تولید و مصرف فراوانی است. مهم ترین صنایع مصرف کننده آن نفت و پتروشیمی و پالایشگاه های نفت، لاستیک و پلاستیک سازی و نیز کاغذسازی است. بنابراین فورفوران در پساب حاصل از این صنایع وجود خواهد داشت.

هدف: حذف آلایندهی فورفوران از فاضلاب صنایع با استفاده از روش راکتور بیولوژیکی سیکی (CBR).

مواد و روش ها: در این تحقیق، حذف فورفوران از فاضلاب با استفاده از یک روش بیولوژیکی توسعه یافته انجام گرفت که اصلاحی از روش راکتور منقطع متوالی (SBR) محسوب می شود. فاضلاب حاوی فورفوران وارد CBR شد و تأثیر متغیرهای مهم بهره برداری مثل غلظت فورفوران و زمان های ماند هیدرولیکی (HRT) بر کارایی راکتور در حذف فورفوران مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج: CBR قادر است بیش از ۹۹٪ فورفوران و ۷۶٪ از اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) معادل را در بارگذاری آلی فورفوران تا ۲/۳۸ g/L.d در HRT بهینه ی ۱۲/۱ ساعت حذف نماید. میاتکین کلی حذف فورفوران و COD در طول دوره ی راهبری CBR به ترتیب برابر ۹۷/۲٪ و ۸۲/۱٪ تعیین شد.

نتیجه گیری: با توجه به نتایج موفقیت آمیز و رضایت بخش به دست آمده در مقایسه با سایر مطالعات، روش معرفی شده در این مطالعه می تواند برای تصفیه ی فورفوران موجود در فاضلاب صنایع مورد استفاده قرار بگیرد.

کلید واژه ها: تصفیه آب / فاضلاب / فرمالدئید

مجله دانشگاه علوم پزشکی گیلان، دوره بیست و دوم، ویژه نامه بهداشت محیط، صفحات: ۵۹-۵۱

مقدمه

از فورفوران در صنایع تولید پلاستیک و کاغذ نیز استفاده می شود. هم چنین از آن به عنوان ماده ی واسط شیمیایی در تولید حلال انتخابی فوران و تترافوران استفاده می شود که به طور گسترده در صنعت پالایش نفت و روغن کاربرد دارد (۵-۲). بنابراین فورفوران در پساب حاصل از این صنایع به مقدار زیادی می تواند وجود داشته باشد. به عنوان مثال، غلظت فورفوران در پساب حاصل از صنایع ساخت لاستیک و پلاستیک، تولید فورفوران و پالایشگاه های نفت به ترتیب ۱۷۰۰ mg/L (۶)، ۶۰۰ mg/L (۷) و ۵۰۰ mg/L (۳) گزارش شده است.

فورفوران یک ترکیب شیمیایی سمی است که می تواند باعث ایجاد مشکلات عدیده ای برای انسان و محیط زیست شود. مواجهه ی حاد با فورفوران می تواند باعث آسیب به ریه ها،

تعداد بسیاری از آلاینده های شیمیایی آلی سنتتیک و بعضاً نوپدید با مقادیر زیادی، روزانه از طریق جریان های فاضلاب وارد محیط زیست و منابع آب های طبیعی می شوند. در کشور ما نیز این ترکیبات منابع تولید متنوع و مختلفی دارند. بنابراین به طرق مختلف می توانند تولید و وارد منابع آبی پذیرنده یا محیط زیست شوند. برخی از این آلاینده های تولید شده (مثل فنل ها و فورفوران)، غیر قابل تجزیه بوده و یا برای سیستم های بیولوژیکی سمی و بازدارنده هستند (۱ و ۲).

فورفوران یک ترکیب حلقوی بوده که به صورت مایع بی رنگ و روغنی با بویی شبیه بوی بادام تلخ وجود دارد. فورفوران موارد مصرف و بنابراین منابع تولید گسترده ای دارد. فورفوران و مشتقات آن، مانند الکل فورفوریل را به تنهایی و یا با فنل، استون و یا اوره، برای تولید رزین های جامد استفاده می کنند.

۱. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

۲. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پزشکی، تهران، ایران

۳. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

فورفوریل الکل را بررسی کرد. در این تحقیق گزارش شد که غلظت‌های بالای فورفورال می‌تواند برای میکروارگانیسم‌ها سمی بوده و به عنوان بازدارنده‌ی رشد محسوب شود. در غلظت‌های پایین فورفورال، میکروارگانیسم‌ها در طول مدت ۵ روز توانستند فورفورال را به طور کامل تجزیه کنند. محصول نهایی فعالیت میکروارگانیسم‌ها و تقریباً به همان اندازه‌ی استوکیومتری، فورفوریل الکل بود. برخی مشکلاتی که در ارتباط با سیستم‌های بی‌هوازی وجود دارد، شامل حساسیت آن‌ها نسبت به حضور ترکیبات سمی، مشکلات راهبری و تولید بو، عدم تولید محصولات نهایی کاملاً معدنی شده و ... می‌باشد.

روش‌های بیولوژیکی به خاطر مزایایی که دارند، مثل کارایی بالا، صرفه‌ی اقتصادی، دوست‌دار محیط زیست، انعطاف‌پذیری در راهبری و نگهداری و ... (۱۹) به عنوان گزینه‌ی ترجیحی در تصفیه‌ی فاضلاب‌های حاوی مواد قابل تجزیه‌ی بیولوژیکی محسوب می‌شوند. ولی فورفورال یک ترکیب سمی برای میکروارگانیسم‌ها است (۲۰۸ و ۲۱) و مانع فعالیت متابولیکی آن‌ها به خصوص در غلظت‌های بالا می‌شود.

با توجه به مشکلات مربوط به فورفورال و نواقص برخی از روش‌های ذکر شده و نیز با توجه به بررسی متون انجام شده، مطالعه‌ی مشابهی که بتواند از قابلیت‌های فرآیندهای هوازی بیولوژیکی برای تجزیه‌ی فورفورال استفاده کرده باشد، یافت نشد. لذا در این تحقیق، روش جدیدی ارایه شده‌است که در آن از یک روش توسعه یافته‌ی بیولوژیکی که پیش‌تر توسط همین محققین برای حذف فنل از فاضلاب معرفی شده بود، برای تجزیه‌ی بیولوژیکی فورفورال استفاده شد. در این مطالعه، از راکتور بیولوژیکی سیکلی (CBR) که از انواع اصلاح‌شده‌ی سیستم‌های راکتورهای منقطع متوالی (SBR) متعارف است، استفاده شد. از مهم‌ترین تفاوت‌های CBR و SBR این است که در CBR تزریق فاضلاب به صورت پیوسته انجام می‌گیرد. بنابراین، از مزایای آن می‌توان به امکان تصفیه‌ی فاضلاب‌های حاوی ترکیبات سمی و بازدارنده از طریق حذف شوک بارهای آلی و هیدرولیکی در یک تانک متمرکز، جانمایی کمتر و راهبری ساده اشاره کرد (۱۹ و ۲۲).

کبد، کلیه‌ها و طحال شود. هم‌چنین در مواجهه طولانی مدت می‌تواند باعث ایجاد تومور و جهش‌زایی نیز بشود (۱۰-۸).

برای حذف فورفورال از فاضلاب، از روش‌های فیزیکی، شیمیایی، فیزیکوشیمیایی (جذب) و بیولوژیکی (عمدتاً سیستم‌های بی‌هوازی) استفاده شده‌است (۱، ۶، ۳، ۱۵-۱۱). به عنوان نمونه، Anbia و همکاران (۱۶) در سال ۲۰۰۹، و Singh و همکاران (۱) در سال ۲۰۰۹ مطالعاتی را در مورد جذب فورفورال به ترتیب، توسط جاذب‌های با منافذ نانو و کربن فعال انجام دادند و پیشنهاد کردند که فرآیند جذب می‌تواند به عنوان یک فرآیند تصفیه‌ای مؤثر برای حذف فورفورال استفاده شود. Ouassila R M و همکاران در سال ۲۰۱۰ استفاده از آرگانوبنتونیت برای حذف فورفورال در سیستم‌های جذبی را بررسی کردند. در این مطالعه، تأثیر متغیرهای مختلف مثل دما و زمان تماس و pH بر راندمان حذف بررسی شد (۱۵). مهم‌ترین چالش در استفاده از جاذب‌ها این است که در فرآیندهای جذب، صرفاً انتقال فاز صورت می‌گیرد و معمولاً تغییری در ساختار ترکیب آلاینده اتفاق نمی‌افتد.

Borghei و همکاران در سال ۲۰۰۸ کارایی روش‌های مختلف فوتواکسیداسیون در تجزیه‌ی فورفورال را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در بین روش‌های بررسی شده، فرآیند UV / H_2O_2 در حضور یون‌های Fe^{+2} / Fe^{+2} مؤثرترین روش بود. دُزازه‌ی H_2O_2 ، pH، دما و توان ورودی UV به عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر تجزیه‌ی فورفورال نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت (۹). استفاده از روش‌های مبتنی بر UV در فاضلاب دارای محدودیت‌هایی مثل تقاضای انرژی بالای آن و نیز ناکارآمدی آن در حضور ترکیبات آلی و جامدات معلق است که مانع عبور آن می‌شوند.

در سال ۲۰۱۲، Leili و همکاران، استفاده از سیستم‌های ازن‌زنی تنها و ازن‌زنی کاتالیزوری در حذف فورفورال از محیط‌های مائی را بررسی کردند و توانستند فورفورال را با راندمان ۸۰ درصد حذف و معدنی‌سازی نمایند (۱۸). Boopathy (۱۹) در سال ۲۰۰۹ تبدیل متابولیکی فورفورال تحت شرایط بی‌هوازی توسط گونه‌های متانوکوکوس به

برای اندازه‌گیری و سنجش غلظت اولیه و نهایی فورفورال از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Unico-UV 2100 UV/Vis و تعیین ماکزیمم طول موج جذبی استفاده شد. از طول موج برابر ۲۷۷ nm برای قرائت استفاده شد که از این محدوده‌ی طول موج، برای اندازه‌گیری فورفورال به‌روش اسپکتروفتومتری، در مطالعات دیگر نیز استفاده شده‌است (۱۱ و ۶،۳).

مراحل راهبری راکتور به صورت گام به گام انجام گرفت و در هر مرحله تأثیر یکی از متغیرها بر کارایی حذف مطالعه شد. در ۱۰ روز ابتدایی راه‌اندازی راکتور، غلظت فورفورال در فاضلاب سنتتیک به تدریج تا حدود 300 mg/L افزایش پیدا کرد و میزان دبی روزانه نیز $3/8 \text{ L/d}$ تنظیم شد. طی دوره‌ی راه‌اندازی راکتور، هم میزان تجزیه‌ی فورفورال و هم میزان حذف COD توسط آن اندازه‌گیری شد.

پس از خودهی باکتری‌های با غلظت‌های پایین، به تدریج غلظت آلاینده افزایش پیدا کرد و پس از رسیدن به راندمان حذف بالا در غلظت حدود 600 mg/L و در رژیم پیوسته‌ی تغذیه (حدود روز ۲۰) و زمان هوادهی ۶ ساعت، فاز اصلی مطالعه شروع شد که در ابتدا اثر زمان ماند هیدرولیکی (HRT) مورد مطالعه قرار گرفت. پس از انتخاب مقدار بهینه‌ی HRT، تأثیر متغیر بعدی یعنی تغییرات بارگذاری آلی (غلظت آلاینده‌ی ورودی) بررسی شد.

تأثیر مهم‌ترین متغیرهای راهبری سیستم‌های بیولوژیکی از جمله غلظت آلاینده‌ی فورفورال و زمان ماند هیدرولیکی نیز در این تحقیق مطالعه شد.

مواد و روش‌ها

راکتور بیولوژیکی مورد استفاده، یک جار شیشه‌ای استوانه‌ای شکل با قطر داخلی 20 cm ، ارتفاع 36 cm و کل حجم 11 لیتر بود (شکل شماره ۱). از یک پمپ هوا به همراه دیفیوزر برای تأمین هوای مورد نیاز میکروارگانیسم‌ها به مقدار حداقل 3 mg/L استفاده شد. بر روی جار ۴ عدد شیر نصب شد: ۲ عدد در کف (یک عدد برای تغذیه‌ی فاضلاب سنتتیک و یک عدد برای لوله‌ی ورود هوا)، یک عدد در قسمت میانی جار برای تخلیه‌ی جریان روئی و بالاخره یک عدد در قسمت فوقانی به عنوان شیر اطمینان سایر متعلقات شامل یک عدد پمپ تزریق فاضلاب، شیر تخلیه‌ی خودکار، تایمر برقی، فلومتر سنجش میزان جریان هوا، مخزن فاضلاب خام و پساب حاصل از راکتور بود. هوای مورد نیاز از طریق حباب‌ساز هوایی که در ابتدای راکتور تعبیه شده بود، وارد سیستم گردید که علاوه بر تأمین هوا، اختلاط مورد نظر در سیستم را نیز باعث می‌شد (دمنده‌ی هوای HAILEA, Model ACO-318). به منظور پخش بهتر هوا در داخل راکتور از یک حباب‌ساز هوا (دیفیوزر) و برای تنظیم شدت جریان هوای ورودی، از روتامتر در مسیر هوادهی استفاده شد.



شکل ۱. راکتور بیولوژیکی سیکلی

غلظت ورودی در حدود 600 mg/L ثابت نگه داشته شد (تمام آزمایش‌ها در دمای آزمایشگاه انجام گرفت). برای مقایسه‌ی سطوح مختلف و انتخاب سطح بهینه‌ی هر یک از متغیرها از نرم‌افزار SPSS و آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) استفاده شد. حالت بهینه وقتی در نظر گرفته شد که هم راندمان حذف، بالا و قابل قبول بوده و هم اختلاف معنی‌داری با سطح بعدی نداشته باشد. با داشتن سطح بهینه‌ی این مرحله، در گام بعدی اثر تغییرات غلظت (یا بارگذاری آلی) نیز طبق روش ذکر شده بررسی و مقدار بهینه‌ی آن انتخاب شد.

جدول ۱. مراحل و شرایط کاری راکتور بیولوژیکی

ردیف	هدف	شرایط	
		زمان ماند هیدرولیکی (h)	غلظت فورفورال (mg/L)
۱	راه‌اندازی CBR	۲۵/۴	۳۰۰
۲	اثر زمان ماند هیدرولیکی	۲۵/۴-۱۰/۵	۶۰۰
۳	اثر تغییرات غلظت	بهینه	۳۰۰-۱۵۰۰

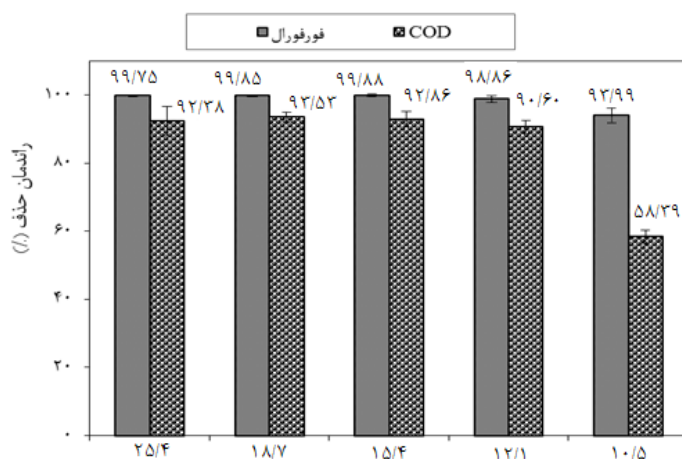
داده‌های اندازه‌گیری مربوط به هر یک از سطوح و راندمان‌ها در طول دوره‌ی راهبری، وارد نرم افزار SPSS شد و آزمون One Way ANOVA بر روی داده‌ها انجام گرفت. مطابق جدول ۲ و شکل ۲ و نتایج آزمون آماری، در HRT های ۱۰/۵ و ۱۲/۱ ساعت با بقیه‌ی HRT ها، راندمان حذف فورفورال اختلاف معنی‌دار داشت ($P < 0/05$)، ولی در زمان ماند هیدرولیکی سطح ۱۵/۴ ساعت با سطح ۱۸/۷ ساعت ($P = 0/838$) و $P = 0/983$ ساعت ۲۵/۴ اختلاف معنی‌دار نبود. در مورد حذف COD نیز برای HRT ۱۰/۵ و ۱۸/۷ ساعت با سایر سطوح HRT اختلاف معنی‌دار مشاهده شد ($P < 0/05$)، ولی در مورد سایر سطوح اختلاف معنی‌دار نبود. در این بخش هر چند که سطح زمان ماند هیدرولیکی ۱۲/۱ ساعت با HRT ۱۵/۴ اختلاف معنی‌دار وجود داشت، ولی به دلیل اختلاف کم راندمان از دیدگاه طراحی، فنی و مهندسی اقتصادی از مقدار HRT ۱۲/۱ ساعت به عنوان مقدار بهینه برای مرحله‌ی بعد استفاده شد.

برای بررسی تأثیر محدوده‌های (سطوح) مختلف متغیرهای مورد نظر (زمان ماند هیدرولیکی و غلظت فورفورال) بر کارایی عملکرد راکتور، جدولی تنظیم (جدول شماره ۱) و تأثیر آن‌ها در مراحل مختلف ارزیابی شد. در طول دوره‌ی راهبری، آزمایش‌های مربوط به غلظت‌های ورودی و خروجی و راندمان راکتور روزانه و متغیرهای راهبری دیگر (مثل خاصیت ته‌نشینی لجن، غلظت جرم فعال بیولوژیکی راکتور و ...) نیز بر حسب مورد به صورت دوره‌ای انجام گرفت. روش طراحی آزمایش به صورت بررسی یک عامل در هر زمان (One Factor at Time, OFAT) بود. برای انجام، در گام اول زمان ماند هیدرولیکی بهینه انتخاب شد و در طی آن

نتایج

پس از آن که راکتور به حالت پایدار در راه‌اندازی و حذف فورفورال رسید، فاز اصلی مطالعه یعنی بررسی تأثیر زمان ماند هیدرولیکی و تغییرات غلظت به شرح زیر بررسی شد:

اثر زمان ماند هیدرولیکی: در این قسمت از مطالعه، تأثیر زمان‌های ماند هیدرولیکی در محدوده‌ی ۱۰/۵ تا ۲۵/۴ ساعت بر عملکرد راکتور بیولوژیکی سیکلی، طی یک دوره‌ی ۱۷۴ روزه مورد بررسی قرار گرفت. میانگین‌های حذف فورفورال و COD در زمان‌های ماند هیدرولیکی در شکل شماره ۲ و سایر یافته‌های به دست آمده در این بخش از مطالعه، در جدول شماره ۲ نشان داده شده‌است. سطوح مورد نظر برای بررسی تأثیر HRT بین ۱۰/۵ تا ۲۵/۴ ساعت (به ترتیب معادل با دبی $11/4 \text{ L/d}$ و $3/8 \text{ L/d}$) قرار داشت. همان گونه که در جدول ۲ و شکل شماره ۲ مشاهده می‌شود، حداقل مقدار حذف فورفورال در هیچ‌یک از زمان‌های ماند هیدرولیکی به کمتر از ۹۰ درصد نمی‌رسد. برای COD نیز حداقل مقدار حذف اندازه‌گیری شده برابر $56/32\%$ بود.



زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)

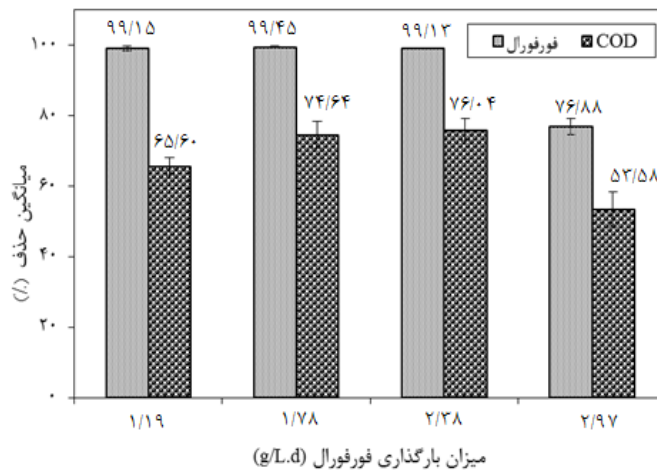
شکل ۲. میانگین راندمان‌های حذف فورفورال و COD در زمان‌های ماند هیدرولیکی مختلف (شرایط آزمایش: غلظت فورفورال ورودی: ۶۰۰ mg/L؛ زمان سیکل هوادهی: ۶ ساعت)

جدول ۲. یافته‌های مطالعات اثر زمان ماند هیدرولیکی

حذف COD			حذف فورفورال			نتایج
حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	HRT (ساعت)
۹۶/۵۵	۸۲/۷۶	۹۲/۳۸	۱۰۰	۹۹	۹۹/۷۵	۲۵/۴
۹۵/۴۰	۹۰/۸۰	۹۳/۵۳	۹۹/۹۰	۹۸/۵۸	۹۹/۷۵	۱۸/۷
۹۵/۴۰	۹۷/۹۳	۹۲/۸۶	۹۹/۹۲	۹۸/۵۰	۹۹/۷۸	۱۵/۴
۹۳/۶۸	۸۶/۳۱	۹۰/۶۰	۹۹/۸۲	۹۷/۵۰	۹۸/۷۴	۱۲/۱
۶۰/۹۲	۵۶/۳۲	۵۸/۳۹	۹۷/۱۷	۹۰	۹۳/۹۹	۱۰/۵

۵۳/۸٪ اندازه‌گیری شد. طول دوره‌ی بارگذاری متفاوت بود؛ زیرا وقتی بارگذاری تغییر داده می‌شد که یک حالت ثابت در عملکرد راکتور مشاهده شود. بنابراین، طول دوره‌ی راهبری برای بارگذاری‌های ۱/۱۹، ۱/۷۸، ۲/۳۸ و ۲/۹۷ گرم بر لیتر در روز به ترتیب برابر ۶۵، ۲۰، ۲۲ و ۲۱ روز بود. آنالیز آماری واریانس یک‌طرفه نتایج این بخش نشان داد که بین راندمان حذف فورفورال در سطح بارگذاری آلی ۲/۹۷ g/L.d با سایر سطوح اختلاف معنی‌دار وجود داشت ($P < 0/05$)، ولی در بین سطوح دیگر، اختلاف معنی‌دار نبود. برای حذف COD نیز این آنالیز انجام گرفته و نتایج آن نشان داد که بین سطوح بارگذاری آلی ۲/۳۸ g/L.d و ۱/۷۸ g/L.d اختلاف معنی‌دار وجود نداشت ($P = 0/361$)، ولی در بین سایر سطوح، این اختلاف معنی‌دار بود ($P < 0/05$).

اثر غلظت یا میزان بارگذاری آلی فورفورال: در بخش دیگر مطالعه و پس از انتخاب HRT بهینه‌ی ۱۲/۱ ساعت، تأثیر میزان بارگذاری آلی (فورفورال) در سطوح ۲/۹۷ g/L.d - ۱/۱۹ (معادل با غلظت ۶۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) بر عملکرد راکتور بیولوژیکی طی یک دوره‌ی ۱۴۲ روزه مورد مطالعه قرار گرفت. طی مدت ذکر شده، زمان ماند هیدرولیکی و سایر شرایط راهبری راکتور در محدوده‌ی بهینه حفظ شد. نتایج و یافته‌های این بخش در شکل ۳ و جدول ۳ نشان داده شده‌است. با توجه به داده‌های به دست آمده مشاهده می‌شود که راندمان حذف فورفورال در تمام بارگذاری‌ها بیش از ۹۹ درصد است، به جز در بارگذاری ۲/۹۷ g/L.d که مقدار آن در حدود ۷۷٪ اندازه‌گیری شد. در مورد راندمان‌های حذف COD نیز، میانگین‌های حذف بالای ۶۵٪ در تمام بارگذاری‌ها بود، به جز در بارگذاری ۲/۹۷ g/L.d که مقدار آن برابر



شکل شماره ۳: میانگین راندمان‌های حذف فورفورال و COD در بارگذاری‌های آلی مختلف (شرایط آزمایش: $HRT = 12/1$ ؛ سیکل هوادهی: ۶ ساعت)

جدول شماره ۳: یافته‌های مطالعات اثر بارگذاری آلی

نتایج بارگذاری فورفورال (g/L.d)	حذف فورفورال			حذف COD		
	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر
1/19	99/15	95/83	99/50	65/60	61/49	68/39
1/78	99/45	98/46	99/79	74/64	67/86	77/86
2/38	99/13	98/71	99/35	76	70	80
2/97	76/88	73/33	83/33	53/85	48/40	60/80

بحث و نتیجه‌گیری

حذف آلاینده‌ها را با راندمان‌های بالا و در مدت زمان کوتاهی داشته باشند و در غیر این صورت، اندازه‌ی واحدها و هزینه‌های تحمیل شده توسط آن مقرون به صرفه نخواهد بود (۲۳). بنابراین، هرچند که از نظر آماری اختلاف بین راندمان حذف در HRT ۱۲/۱ و ۱۵/۴ ساعت معنی‌دار است، ولی از نظر مهندسی و اختلاف کم درصد راندمان حذف بین این دو سطح، انتخاب زمان ماند هیدرولیکی ۱۲/۱ ساعت کاربردی‌تر و مقرون به صرفه‌تر است. هر چند در زمینه‌ی استفاده از روش‌های بیولوژیکی برای حذف فورفورال، مطالعاتی انجام گرفته‌است، ولی در بررسی متونی که انجام گرفت، تنها از سیستم‌های بیولوژیکی بی‌هوازی استفاده شده‌است (۷ و ۲۰) که روش هوازی معرفی شده در این مطالعه چند برتری در مقایسه با روش‌های بی‌هوازی دارد: اول آن‌که زمان‌های ماند مورد نیاز این روش در مقایسه با روش‌های بی‌هوازی کمتر است. به عنوان مثال در مطالعه‌ای که Boopathy (۲۰۰۹) انجام داد، زمان مورد نیاز برای متابولیته شدن فورفورال به فورفوریل الکل، ۵ روز بیان شد (۱۹) و در مقایسه با زمان به

اثر زمان ماند هیدرولیکی در هر تغییر زمان ماند هیدرولیکی، دوره‌ی راهبری راکتور بسته به مدت زمان رسیدن به حالت پایدار در راندمان حذف فورفورال و COD متغیر بود. همان‌گونه که در جدول ۳ و شکل ۳ نشان داده شد نتایج به دست آمده در این بخش از مطالعه بسیار مطلوب بوده و راندمان‌های حذف بالایی هم برای فورفورال ($>98\%$) و هم برای COD ($>90\%$) ثبت شد، به جز در زمان ماند ۱۰/۵ ساعت که راندمان‌های حذف فورفورال و COD به ترتیب ۴٪ و ۳۱/۶٪ افت داشتند. در تمام زمان‌های ماند هیدرولیکی استفاده شده (به جز ۱۰/۵ ساعت)، دوره‌ی استفاده شده برای تجزیه‌ی فورفورال کافی بوده است. در هر مرحله از تغییر HRT ، هر چند کاهش موقتی در عملکرد راکتور در حذف فورفورال مشاهده شد، ولی طی ۲-۳ روز، این کاهش عملکرد بهبود پیدا کرد و مجدداً راندمان راکتور افزایش یافت. فرآیندهای تصفیه‌ی بیولوژیکی فاضلاب، گزینه‌های تصفیه‌ای با صرفه‌ی اقتصادی به‌شمار می‌روند؛ به شرط آن‌که توانایی

محصولات واسطه تبدیل نشده است. با افزایش میزان بارگذاری به $2/97 \text{ g.L.d}$ (معادل 1500 mg/L از فورفورال)، راندمان حذف فورفورال و COD کاهش قابل توجهی در مقایسه با سایر سطوح بارگذاری آلی نشان داد ($P < 0/05$). بنابراین، مقدار بارگذاری ذکر شده ممکن است به عنوان مقدار بحرانی برای راکتور تحت شرایط راهبری بیان شده باشد. یعنی این که اگر بارگذاری های بیش از مقدار بحرانی مورد استفاده قرار بگیرد، سمیت ایجاد شده توسط فورفورال، مانع فعالیت بهینه باکتری ها می شود و احتمالاً محصولات واسطه ای تشکیل خواهد شد که در داخل پساب حضور پیدا خواهند کرد (۲۳).

به منظور بررسی و تأیید این که پس از کاهش میزان بارگذاری نسبت به مقدار بحرانی، عملکرد راکتور مجدداً بهبود پیدا کرده است و شوک بار آلی نمی تواند باعث اختلال عملکرد آن به صورت دائم شود و می تواند بارگذاری های کمتر از حد بحرانی را مجدداً با راندمان های بالاتری تصفیه نماید، مقدار بارگذاری به $1/98 \text{ g.L.d}$ کاهش داده شد و پس از ۱۱ روز راندمان های حذف فورفورال و COD به ترتیب به بیش از ۹۸٪ و ۸۰٪ رسید. این نکته تأییدکننده آن است که شرایط بازدارندگی ایجاد شده مرتفع گردیده است. بنابراین راکتور مورد استفاده در این تحقیق در مقایسه با غلظت ها و بارگذاری های بحرانی مورد استفاده در سایر مطالعات، توانست مقادیر بالاتری را بپذیرد. پس از این نظر نیز، نتایج تحقیق حاضر، جالب توجه و با ارزش است.

به طور کلی نتیجه گیری می شود که توانایی بالای سیستم مورد استفاده در این مطالعه برای حذف غلظت های بالای فورفورال در زمان های ماند هیدرولیکی نسبتاً کوتاه، در مقایسه با سایر روش های استفاده شده، بر ارزش این مطالعه افزوده، از لحاظ اقتصادی و فنی نیز امکان استفاده از آن را برای تصفیه فاضلاب صنایع ممکن می سازد.

نویسندگان اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافی ندارند.

دست آمده در این مطالعه (۱۲/۱ ساعت در حالت بهینه)، حدود ۱۰ برابر بیشتر است که خود نیاز به فضای بیشتر جهت ساخت تجهیزات تصفیه ای را ایجاب می کند (۲۴). مزیت دیگر روش معرفی شده، به دست آمدن راندمان های بالایی از حذف COD در این تحقیق است که خود نشانه ای معدنی شدن کامل فورفورال به محصولات نهایی و یا تثبیت زائدات آلی است (۲۴)؛ در حالی که در روش های بی هوازی مانند مورد مذکور معمولاً بر اثر تجزیه، ترکیباتی (مثل فورفوریل الکل) حاصل می شوند (۱۸ و ۲۰) که هنوز به عنوان محصول پایانی نبوده و ممکن است به روش های تکمیلی جهت بی خطر سازی و تثبیت کامل نیاز داشته باشند.

اثر میزان بارگذاری آلی فورفورال

یافته های به دست آمده از این بخش از تحقیق نشان داد که با افزایش بارگذاری آلی در محدوده $1/19 - 2/38 \text{ g.L.d}$ ، هم چنان فورفورال با راندمان بالایی ($> 99\%$) حذف شد، ولی وقتی که بارگذاری به $2/97 \text{ g.L.d}$ افزایش داده شد، راندمان حذف فورفورال در حدود ۲۲٪ کاهش پیدا کرد (شکل ۳ و جدول ۳) که از نظر آماری، این اختلاف معنی دار است ($P < 0/05$). برای راندمان های حذف COD نیز الگوی مشابهی مشاهده شد و در بالاترین حد بارگذاری استفاده شده ($2/97 \text{ g.L.d}$)، نسبت به بارگذاری های پایین تر در حدود ۱۱ درصد افت راندمان وجود داشت.

به هر حال، حد بالایی بارگذاری فورفورال که به طور موفقیت آمیزی توسط راکتور معرفی شده در این مطالعه حذف شد، بیشتر از مقادیری است که توسط سایر محققین و با استفاده از روش هایی مثل جذب (۱)، فوتواکسیداسیون (۳ و ۲۵)، و روش های بیولوژیکی (۲۰) مورد تصفیه قرار گرفته است. با توجه به این که تا بارگذاری $2/38 \text{ g.L.d}$ حذف فورفورال بیش از ۹۹٪ و نیز مقدار حذف COD بالا بوده است (بیش از ۷۶٪)، می توان نتیجه گرفت که سهم بیشتر فورفورالی که به عنوان منابع انرژی به مصرف باکتری ها رسیده و متابولیزه شده است، به طور کامل تجزیه شده و به

منابع

1. Singh S, Srivastava VC, Mall ID. Fixed-bed Study for Adsorptive Removal of Furfural by Activated

Carbon. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2009;332(1):50-6.

2. Hoydonckx HE, Van Rhijn WM, Van Rhijn W, De Vos DE, Jacobs PA. Furfural and Derivatives. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. USA: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2000.
3. Borghei SM, Hosseini SN. Comparison of Furfural Degradation by Different Photooxidation Methods. CHEM ENG J 2008;139(3):482-8.
4. Richard A P. Furfural. In: **Editor-in-Chief:** Philip W, Editor. Encyclopedia of Toxicology. 2nd edition. New York: Elsevier 2005: 394-7.
5. Presto AA, Granite EJ, Karash A. Further Investigation of the Impact of Sulfur Oxides on Mercury Capture by Activated Carbon. Industrial & Engineering Chemistry Research 2007;46(24):8273-6.
6. Sahu AK, Mall ID, Srivastava VC. Studies on the Adsorption of Furfural from Aqueous Solution Onto Low-Cost Bagasse Fly Ash. Chemical Engineering Communications 2007;195(3):316-35.
7. Wirtz RA, Dague RR. Anaerobic Treatment of a Furfural-production wastewater. Waste Management. 1993;13(4):309-15.
8. Philip W, Bruce A, Ann de P, Shayne G. Encyclopedia of Toxicology Continues its Comprehensive Survey of Toxicology. 2nd Edition. USA: Academic Press; 2005.
9. Faramarzpour M, Vossoughi M, Borghei M. Photocatalytic Degradation of Furfural by Titania Nanoparticles in a Floating-bed Photoreactor. CHEM ENG J 2009;146(1):79-85.
10. Furfural Safety Data Sheet, According to EC Directive 1907/2006/EC of the Commission of the European Communities. 2009.
11. Sahu AK, Srivastava VC, Mall ID, Lataye DH. Adsorption of Furfural from Aqueous Solution onto Activated Carbon: Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic Study. Separation Science and Technology 2008;43(5):1239-59.
12. Zhang Y, Han B, Ezeji TC. Biotransformation of Furfural and 5-hydroxymethyl Furfural (HMF) by Clostridium Acetobutylicum ATCC 824 During Butanol Fermentation. New Biotechnology 2012;29(3):345-51.
13. Hristozova TS, Angelov A, Tzvetkova B, Paskaleva D, Gotcheva V, Gargova S, Pavlova K. Effect of Furfural on Carbon Metabolism key Enzymes of Lactose-assimilating yeasts. Enzyme and Microbial Technology. 2006; 39(5):1108-12.
14. Mebrek OR, Derriche Z. Removal of Furfural from Aqueous Solutions by Adsorption Using Organobentonite: Isotherm and Kinetic Studies. Adsorption Science & Technology 2010; 28(6):533-45.
15. Arts JHE, Muijser H, Appel MJ, Frieke Kuper C, Bessems JGM, Woutersen RA. Subacute (28-day) Toxicity of Furfural in Fischer 344 rats: a Comparison of the oral and Inhalation route. Food and Chemical Toxicology 2004;42(9):1389-99.
16. Anbia M, Mohammadi N. A Nanoporous Adsorbent for Removal of Furfural from Aqueous Solutions. Desalination 2009; 249(1):150-3.
17. Leili M, Moussavi G, Naddafi K. Degradation and Mineralization of Furfural in Aqueous Solutions Using Heterogeneous Catalytic Ozonation. Desalination and Water Treatment 2013:1-9.
18. Boopathy R. Anaerobic Biotransformation of Furfural to Furfuryl Alcohol by a Methanogenic Archaeobacterium. Int Biodeterior Biodegradation 2009;63(8):1070-2.
19. Moussavi G, Heidarizad M. Biodegradation of Mixture of Phenol and Formaldehyde in Wastewater Using a Single-basin MSCR process. J Biotechnol 2010;150(2):240-5.
20. Boopathy R, Belay N, Voskuilen G. Anaerobic Transformation of Furfural by Methanococcus Deltae DeltaLH. Appl Environ Microbiol 1997;63(5):2092-4.
21. Modig T, Lidén G, Taherzadeh MJ. Inhibition Effects of Furfural on Alcohol Dehydrogenase, Aldehyde Dehydrogenase and Pyruvate Dehydrogenase. Biochem J 2002;363(3):769-76.
22. Irvine RL, Ketchum Jr LH, Asano T. Sequencing Batch Reactors for Biological Wastewater Treatment. Crit Rev Environ Sci Tech. 1989;18(4):255-94.
23. Moussavi G, Mahmoudi M, Barikbin B. Biological Removal of Phenol from Strong Wastewaters Using a Novel MSBR. Water Research 2009;43(5):1295-302.
24. Tchobanoglous G, Burton FL. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th edition. USA: McGraw Hill; 2003:1408.
25. Chun-li K, Xiao-jian T, Xin-qian J, Ping G, Fu-min Q, Xue-yu L. Degradation of Furfural by UV/O₃ Technology. CHEM RES CHINESE U 2009; 25(4):451-4.

The Removal of Furfural from Wastewater Using Cyclic Biological Reactor

Leili M.(PhD)¹- *Moussavi GH.(PhD)²- Naddafi K.(PhD)³

*Corresponding Address: Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Email: moussavi@modares.ac.ir

Received: 20 Jul/2013 Accepted : 01 Oct/2013

Abstract

Introduction: Furfural is a toxic chemical with a lot of production and consumption resources. The most important consumer industries include oil and petrochemical industries, oil refineries, rubber and plastics, and paper industries. Thus, furfural would exist in the effluents of such industries.

Objective: The removal of Furfural from industrial wastewater using cyclic biological reactor (CBR).

Materials and Methods: In this study, the removal of furfural from wastewater using a developed biological method as a modification of conventional sequential batch reactor (SBR) was assessed. Wastewater containing furfural was injected into the biological reactor and the effect of various important operational parameters such as furfural concentration and hydraulic retention time (HRT) on reactor performance in furfural removal mineralization was evaluated.

Results: The CBR is capable of removing more than 98% of furfural and 76% of equivalent chemical oxygen demand (COD) at organic loading rate up to 2.38 g/L.d in the optimum hydraulic retention time of 12.1 h. The overall average furfural and COD removal during CBR operation periods were 97.7% and 82.1%, respectively.

Conclusion: As the results show, the method introduced in this study can be used more effectively, compared to other methods, for the treatment of furfural present in the industrial wastewater.

Conflict of interest: non declared

Keywords: Furfuraldehyde/ Sewage /Water Purification

Journal of Guilan University of Medical Sciences, Supplement 1, 2014, Pages:51-59

Please cite this article as: Leili M, Moussavi GH, Naddafi K. The Removal of Furfural from Wastewater Using Cyclic Biological Reactor. J of Guilan University of Med Sci 2014; 22(Supplement 1):51-59

1. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

2. Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran [SID.ir](http://www.sid.ir)