Archive of SID

ORIGINAL ARTICLE
Received:2016/03/12 Accepted:2016/05/30

Using of Moisture Term in the Dynamic Modeling in Treatment Process of Hexane-Contaminated Air

Soroush Danaee (Ph.D)[1], Mohammad Hassan Fazaelipoor (Ph.D)[2], Mohammad Hossein Salmani (Ph.D)[3]

1. Young Researchers and Elites Club, Shahriar Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
3. Department of Environmental Health, Shahid Sadoughi University of Medical Science, Yazd, Iran
Email:mhsn06@ssu.ac.ir Tel:09131582878

Abstract

Introduction: An effective method for biological treatment of contaminated air to organic volatilization compounds is the biofiltration method, which the pollutant substance is transmitted by air passing through the gas phase to the biofilm phase and decomposed by microorganisms. The activity of microbial degradation is strongly influenced by the moisture content of the bed, which is the most important factor in controlling the optimal biofiltration performance. The purpose of this study is to use a term of moisture to describe the function of a model in an unstable biofilter to remove hexane from the contaminated air stream.

Methods: Firstly, a two-dimensional dynamic model of biofiltration is presented for hexane contaminated air which terms of moisture content and axial dispersion are considered in mass transfer equations. The effects of water super adsorbent including continuous increasing in the bed porosity and specific surface area were entered into the equations. The equations were discretized by Finite Volume Method for solving numerically. Then, biofiltration experiments were done in flow rate of 0.7 L/min and inlet concentration of 2 g/m^3 to determine the accuracy of model predictions.

Results: The model could present a pattern of decline in moisture content of the bed after moistening stop. Experimental data were well predicted the increasing of pollutant outlet concentration because of reduction of bed moisture by the model (SE = 0.45%) and an estimation of end point was presented for the system.

Conclusion: The modeling results indicated that consideration of moisture content term under unsteady state conditions can develop the model performance and describe biofiltration process with all its complexities.

Keywords: Dynamic modeling, Biofiltration, Moisture content, Water super adsorbent, Hexane

Conflict of interest: The authors declared that there is no Conflict interests.

This Paper Should be Cited as:
Effects of Exercise Training on Housewives Married 20-45 Years Noor City. ….J Tolooebehdasht Sci 2017; 16(2):88-97. [Persian]

www.SID.ir

Archive of SID

طلوع بهداشت

دو ماهنامه علمی پژوهشی
دانشکده بهداشت یزد
سال شانزدهم
شماره: دوم
خرداد و تیر ۱۳۹۶
شماره مسلسل: ۶۲

تاریخ وصول: ۱۳۹۵/۸/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۱

به‌کارگیری ترم رطوبت در مدل‌سازی دینامیک فرآیند تصفیه هوای آلوده به هگزان

نویسندگان:سروش دانایی[۱]،محمدحسن فضایلی پور[۲]، محمدحسین سلمانی[۳]

۱.باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد شهریار، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

۲.دانشیار مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی و پلیمر پردیس فنی مهندسی، دانشگاه یزد

۳.نویسنده مسئول: دکتری شیمی تجزیه، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی شهید صدوقی یزد تلفن تماس: ۰۹۱۳۱۵۸۲۸۷۸ Email:mhsn06@ssu.ac.ir

چکیده

مقدمه: یک روش مؤثر در تصفیه بیولوژیکی هوای آلوده به ترکیبات فرار آلی روش بیوفیلتراسیون است که با عبور هوا از درون بستر پرشده، ماده آلاینده از فاز گاز به فاز بیوفیلم منتقل‌شده و توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه می‌گردد. فعالیت میکروب‌های تجزیه‌کننده به‌شدت تحت تأثیر رطوبت بستر است که مهم‌ترین فاکتور برای کنترل عملکرد بهینه بیوفیلتراسیون به‌حساب می‌آید. هدف از این مطالعه، به‌کارگیری ترم رطوبت برای توصیف عملکرد مدلی کاربردی در بیوفیلتر ناپایا برای حذف هگزان از جریان هوای آلوده است.

روش بررسی: ابتدا یک مدل دوبعدی از بیوفیلتراسیون هوای آلوده به هگزان ارائه شد که در آن ترم‌های رطوبت بستر و پراکندگی محوری در موازنه انتقال جرم در نظر گرفته شدند. اثرات استفاده از سوپر جاذب آب نظیر افزایش مداوم تخلخل بستر و سطح ویژه آن درون معادلات وارد گردید. سپس حل عددی معادلات با روش حجم محدود انجام شد و در انتها، آزمایش‌های بیوفیلتراسیون با دبی ۰/۷ L/min و غلظت ورودی ۲g/m^3 جهت تعیین صحت پیش‌بینی‌های مدل انجام گرفت.

یافته‌ها: مدل قادر بود الگویی از افت محتوی رطوبت بستر بعد از قطع آبدهی بستر را ارائه کند. همچنین داده‌های آزمایشگاهی افزایش غلظت خروجی آلاینده به دلیل کاهش رطوبت بستر به‌خوبی توسط مدل پیش‌بینی شدند (خطای استاندارد= ۰/۴۵٪) و تخمینی از زمان نهایی ازکارافتادن سیستم ارائه شد.

نتیجه‌گیری: نتایج مدل‌سازی نشان داد که در نظر گرفتن ترم رطوبت در شرایط ناپایا می‌تواند حیطه عملکرد مدل را توسعه دهد و فرایند بیوفیلتراسیون را با تمام پیچیدگی‌های آن توصیف نماید.

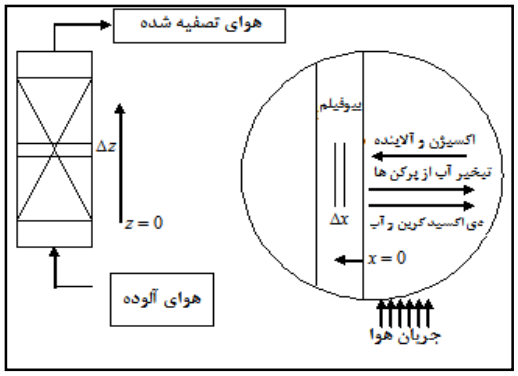
واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی دینامیک، بیوفیلتراسیون، رطوبت بستر، سوپر جاذب آب، هگزان

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

با توسعه صنعتی در طی سالیان گذشته هوا، آب‌وخاک در سطح وسیعی آلوده‌شده‌اند. از جمله آلودگی‌های زیست محیطی می‌توان به ترکیبات آلی فرار و بدبو اشاره نمود که هوای اطراف مراکز صنعتی را آلوده می‌کنند (۱). بااین‌حال، به‌تناسب افزایش سطح آگاهی عمومی در مسائل زیست‌محیطی، مطالبات عمومی گسترش‌یافته است به‌طوری‌که در سالیان اخیر، قوانین سخت‌گیرانه‌تری در جهت کنترل انتشار این ترکیبات وضع گردیده است. صنایع به‌طورمعمول از دو روش کلی کنترل انتشار آلودگی و اصلاح تجهیزات و فرآیند از طریق حذف یا بازیابی به کاهش ترکیبات آلی فرار از جریان‌های گازی می‌پردازند (۲). از میان روش‌هایی که بر مبنای حذف ترکیبات آلاینده توسعه‌یافته‌اند، بیوفیلتراسیون روشی بیولوژیکی و دوستدار محیط‌زیست است. در فرآیند بیوفیلتراسیون هوا با عبور از یک ستون که حاوی بستر میکروب‌ها است، ماده آلاینده خود را به فاز بیوفیلم منتقل می‌کند. بیوفیلم تشکیل‌شده روی ذرات بستر (پرکن) حاوی مجموعه‌ای از میکروارگانیسم‌ها است که مسئولیت تخریب آلاینده را در یک واکنش بیولوژیکی بر عهده‌دارند (۳). این پدیده به همراه سرعت نفوذ ماده آلاینده به بیوفیلم، محدودیت‌های فرآیند بیوفیلتراسیون را تشکیل می‌دهند که در مدل‌سازی این فرآیند باید مدنظر قرار گیرند. برای توسعه مدل این پژوهش، ابتدا معادلات انتقال جرم شامل آلاینده و رطوبت درون هر بخش دیفرانسیلی از سیستم برقرار می‌شود و پس از گسسته سازی با کد نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB حل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده‌شده است، هر بخش شامل دو فاز گاز و بیوفیلم است. مختصات z برای فاز گاز و x برای فاز بیوفیلم در نظر گرفته‌شده است.



شکل ۱: نمایی از مکانیسم‌های انتقال جرم درون یک بخش دیفرانسیلی

هرچند مدل‌های زیادی برای فرایند بیوفیلتراسیون ارائه‌شده‌اند در اینجا چند مدل مهمی که در سال‌های اخیر برای فرایند بیوفیلتراسیون ارائه‌شده است مطرح می‌شوند.

اسپیگنو و فاوری (۲۰۰۵) مدلی پایا برای یک بیوفیلتر حذف هگزان در حضور قارچ اسپرژیلوس نایجر ارائه کردند که در آن اثرات پراکندگی محوری در نظر گرفته شد. نتایج مدل‌سازی تطابق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل پایا و مقادیر تجربی را نشان داد. به دلیل طبیعت میکروارگانیسم به‌کاررفته، مجموعه آزمایش‌ها نتوانست تکرارپذیری نتایج در تعیین برخی پارامترهای مدل نظیر ثابت اشباعیت، نرخ رشد ویژه و بازده را تائید کند (۴). آریاگا و همکارانش (۲۰۰۹) پارامترهای بیوفیلتراسیون هگزان را با استفاده از میکروارگانیسم‌های باکتریایی و قارچی در شرایط آزمایشگاهی تعیین کردند و در ادامه کار این پارامترها را برای تعیین مدل ریاضی در شرایط پایا به کار گرفتند. مدل ارائه‌شده با در نظر گرفتن واکنش مرتبه اول

www.SID.ir

Archive of SID

به‌عنوان مرحله محدودکننده، با خطای حدود یک درصد نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی کرد. این در حالی است که خطای مدل‌سازی با واکنش مرتبه صفر با محدودکنندگی واکنش خطایی بیشتر از ۱۸ درصد داشت (۵). مورالس و همکاران (۲۰۰۳) مدلی برای توصیف کاهش آب در یک بیوفیلتر حذف تولوئن ارائه کردند تا اثر آن را روی عملکرد سیستم پیش‌بینی کنند. تبخیر درون بیوفیلتر نتیجه زیر اشباع بودن هوای ورودی و همچنین واکنش بیولوژیکی درون بیوفیلم در نظر گرفته شد. ترم تخریب در این مدل شامل دما، محتوی آب و اثرات غلظت به‌صورت توابعی جدا از هم در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در نقطه بحرانی، عملکرد بیوفیلتر در حذف آلاینده تا ۵۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. مدل، تغییرات در غلظت آلاینده، رطوبت نسبی هوا، دما و محتوی آب محیط را به‌خوبی توصیف کرد (۶). فضایلی پور (۲۰۱۲) مدلی برای بیوفیلتراسیون غیر هم‌دما ارائه نمود. در این مدل تبخیر آب و اثرات گرمای نهان تبخیر در نظر گرفته شد و تمامی متغیرها به فرم وابسته به دما به کار گرفته شدند. نتایج مدل‌سازی نشان داد دمای هوا و رطوبت در طول بیوفیلتر در جهت جریان هوا افزایش می‌یابد (۷).

یکی از علل به وجود آمدن شرایط نا پایا در بیوفیلتر، قطع ناگهانی آب دهی بستر است. تبخیر مداوم از بستر و انجام واکنش گرمازا سبب خشکی بستر می‌شود. حساسیت بالای میکروارگانیسم‌ها به محتوی آب بستر بیوفیلتر ضرورت پیش‌بینی شرایط بیوفیلتر با استفاده از مدل را بیشتر مشخص می‌کند. اکبری و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی بر روی بهبود سیستم تأمین رطوبت درون بیوفیلتر به بررسی استفاده از سوپر جاذب‌های آب پرداختند. سوپر جاذب‌های آب ترکیبات پلیمری هستند که قادر به ذخیره‌سازی آب درون خود می‌باشند و در محیطی با رطوبت کمتر قادر به آزادسازی آب ذخیره‌شده می‌باشند. نتایج نشان داد حضور سوپر جاذب روند کاهش بازده حذف را آرام‌تر کرده و عملکرد بیوفیلتر را در برابر قطع آب ناگهانی و حتی شوک غلظت مقاوم‌تر می‌کند (۸). هدف از این پژوهش، توصیف بهتر فرآیند بیوفیلتراسیون ناپایای هوای آلوده به هگزان از طریق ارائه مدلی کاربردی می باشد.

روش بررسی

فرضیات ساده کننده مدل به شرح زیر است: ۱- هوا به‌صورت گاز ایده آل و کلیه مشخصات فیزیکی ثابت فرض می‌شود. ۲-تغییرات دمایی در طول بیوفیلتر ناچیز است و تعادل گرمایی مابین فازها برقرار است. ۳-ذرات متخلخل پرکن و سوپر جاذب به شکل کروی (با قطر متوسط یکسان) در نظر گرفته می‌شود. ۴- از تغییرات غلظت در جهت شعاع صرف‌نظر شده و پراکندگی محوری در فاز گاز، با به کار گرفتن ضریب پراکندگی در معادلات منظور می گردد. ۵- بیوفیلم به‌صورت یک فاز همگن در نظر گرفته می‌شود که واکنش بیولوژیکی با رابطه Monod درون آن انجام می شود. همچنین اثر ترم رطوبت در واکنش مستقل از غلظت و از طریق ضریبی اعمال می‌گردد. ۶- به دلیل ضخامت کم بیوفیلم نسبت به ذرات پرکن (در این پژوهش پرلیت و سوپر جاذب ذرات پرکن درون بستر هستند)، مختصات دکارتی برای معادلات در نظر گرفته می‌شود. ۷- مقاومت در فاز گاز و فصل مشترک دو فاز ناچیز است، درنتیجه غلظت آلاینده در فصل مشترک گاز/ بیوفیلم در تعادل بوده و از قانون هنری تبعیت می‌کند. ۸- تبادل رطوبت مابین ذرات سوپر جاذب و پرکن تنها از طریق هوا صورت می‌پذیرد.

www.SID.ir

Archive of SID

۹- فرآیند خروج آب از سوپر جاذب به‌صورت تبخیر از سطح یک قطره با قطر هم‌اندازه آن مدل می‌شود. همچنین نرخ فرآیند تبخیر و انتقال به هوا از طریق ضریب انتقال جرم توصیف می‌شود. ۱۰- تخلخل بستر در طول فرآیند متغیر است. تغییرات این ترم به سبب خروج آب از خلل و فرج ذرات پرکن و نیز کوچک شدن قطر ذرات سوپر جاذب اتفاق می‌افتد. این پدیده علاوه بر افزایش تخلخل، کاهش سطح سوپر جاذب را نیز به همراه دارد (۹،۱۰).

بر اساس این فرضیات، معادلات مدل با برقراری موازنه‌های جرم و رطوبت بنا شدند (۷). جهت بهبود کارایی مدل، چندین تغییر در این معادلات صورت گرفت که ازجمله آن‌ها می‌توان به وارد نمودن ترم‌های تغییرات بازمان در معادلات آلاینده و رطوبت، تغییر در تخلخل بستر و در نظر گرفتن پراکندگی محوری اشاره نمود. در کنار این معادلات، دو معادله توصیف‌کننده میزان آب موجود در پرکن و سوپر جاذب در هر بخش به کار گرفته‌شده است که به‌صورت معادله ۱ و ۲ معرفی شدند.

$$\frac{\partial m_p}{\partial t} = -K_c a_p \left(H^* - H_g\right) \qquad (۱)$$

$$t = 0, m_p = m_{p0}$$

$$\frac{\partial m_s}{\partial t} = -K_c a_s \left(H^* - H_g\right) \qquad (۲)$$

$$t = 0, m_s = m_{s0}$$

که در آن‌ها $a_p(m^{-1})$ و $a_s(m^{-1})$ به ترتیب معرف سطح ویژه انتقال جرم آب در پرکن و سوپر جاذب، $m_p(kgH_2O/m^3air)$ و $m_s(kgH_2O/m^3\ air)$ به ترتیب بیانگر ذخیره آب پرلیت و سوپر جاذب در بیوفیلتر و $m_{p0}(kg\ H_2O/m^3\ air)$ و $(kg\ H_2O/m^3\ air)$ ذخیره آب پرلیت و سوپر جاذب در ابتدای شرایط نا پایا هستند. همان‌طور که در بخش فرضیات بیان شد، سطح ویژه سوپر جاذب در هر تکرار زمانی متغیر بوده حال‌آنکه سطح ویژه پرکن ثابت فرض می‌شود.

همچنین با توجه به داده‌های معمول معرفی‌شده برای دو محصول پرلیت (به‌عنوان ماده پرکن) و سوپر جاذب، محاسبات میزان جذب آب این ذرات برای تعیین ذخیره آب اولیه ستون در ابتدای شرایط نا پایا انجام شد. پارامترهای به‌کاررفته در این پژوهش، توسط برازش داده‌های منابع مختلف (۴،۵) و یا محاسبه آنها به دست آمد. داده‌های اولیه نیز از منابع (۵،۸) استخراج شدندکه تمامی این داده ها مربوط به بیوفیلترهای تصفیه هگزان تحت شرایط پایا می باشند. از این داده ها در تعیین صحت پیش‌بینی‌های مدل در دوحالت‌پایا و ناپایا استفاده شد.

همچنین آزمایش‌های تجربی بیوفیلتراسیون هوای آلوده به هگزان نیز در دو فاز انجام شد. در فاز اول آزمایش‌ها، تاثیر استفاده از سوپرجاذب (پرلیت) در نرخ تبخیر درون یک بیوفیلتر بررسی شد. بدین منظور نرخ تبخیر از دو بستر متفاوت، یکی پرلیت و دیگری مخلوط پرلیت و سوپر جاذب موردبررسی قرار گرفت. برای این کار، دو ستون کوچک ۵ سانتی‌متری از بسترها پر شد.

در یک دوره ۷ روزه با وزن کردن در زمان‌های مختلف (معمولاً یک‌روزه) درصد کاهش آب نسبت به حالت اولیه اندازه‌گیری شد. دبی جریان ۰/۷ L/min برای هردو ستون ثابت بود. نتایج این کار تخمین خوبی از میزان تبخیر در بیوفیلتر ارائه داد.

فاز دوم، آزمایش‌های بیوفیلتراسیون است که مسیر عملکرد بیوفیلتر به سه بازه زمانی تقسیم شد. اولین بازه زمانی مربوط به افزایش تدریجی رشد میکروبی و تشکیل بیوفیلم درون بستر

www.SID.ir

Archive of SID

است. در این بازه به‌طورکلی منحنی بازده حذف شیب صعودی دارد.

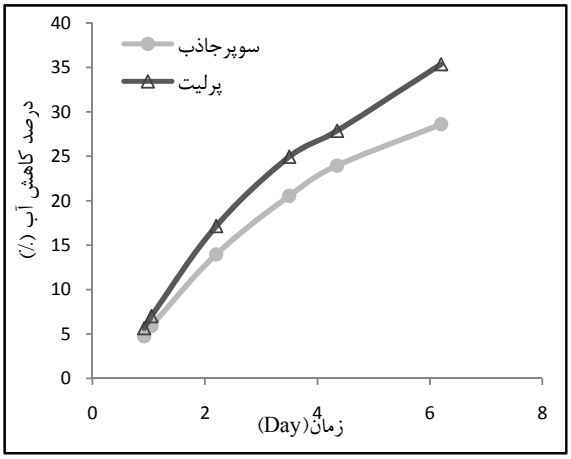
بازه دوم مربوط به زمانی است که بیوفیلترها به حداکثر رشد میکروبی رسیده‌اند که منحنی بازده حذف در بیشینه خود به‌صورت افقی ادامه پیدا می‌کند. در بازه سوم که حذف آب زنی (محلول معدنی محیط کشت) بستر انجام می‌شود.

ستون مورداستفاده در این پژوهش، ستون شیشه‌ای استوانه‌ای شکل با قطر ۰/۰۵ متر و ارتفاع بستر ۰/۵ متر بود. از این ستون دو عدد کاملاً مشابه ساخته شد. بستر یکی از دو بیوفیلتر از پرلیت تشکیل‌شده و در بستر دیگری مخلوطی از پرلیت و سوپر جاذب آب به‌کاررفته است. برای این مخلوط مقدار ۲/۳ درصد خشک سوپر جاذب (با توجه به پژوهش انجام‌شده در تعیین بهترین نسبت) انتخاب شد (۸). این کار بستری یکنواخت با نسبت پرلیت به سوپر جاذب ۳ :۱ تشکیل داد. بسترها به مدت ۲۴ ساعت در محلول معدنی محیط کشت میکروبی قرار گرفتند. درنتیجه با جذب محلول، سوپر جاذب‌ها متورم شده و به قطر برابر با پرلیت رسیدند. بسترهای تهیه‌شده درنهایت به درون ستون‌ها ریخته شده و مجموعه بیوفیلتر آماده تلقیح میکروبی شد. آب زنی بستر تا زمان رسیدن به حالت‌پایا به‌طور مداوم و بافاصله یک روز انجام شد. با برقراری شرایط پایا در غلظت خروجی بیوفیلترها، آب زنی بستر به‌طور کامل قطع گردید.

یافته‌ها

ابتدا نتایج آزمایش‌ها بیوفیلتراسیون ارائه می‌گردد و در ادامه، نتایج پیش‌بینی داده‌های بیوفیلتراسیون پایا (استخراج‌شده از مقالات) تحلیل می‌گردد. پس از تائید مدل پایا، به بررسی مدل نا پایا و مقایسه آن با داده‌های تجربی پرداخته می‌شود.

بر اساس آزمایش‌های اولیه انجام‌شده، در شکل ۲ تفاوت میان سرعت تبخیر سوپر جاذب و پرلیت به‌خوبی مشخص است. با انجام آزمون T برای تعیین اختلاف جفت داده‌ها بر روی نتایج حاصل از آزمایش، بافاصله اطمینان ۹۵ درصد اختلاف بین درصد کاهش آب دو بستر در محدوده ۵/۶۷۲- ۱/۷۸۱ قرار داشت.



شکل ۲: نمودار تفاوت درصد کاهش آب پرلیت و سوپر جاذب

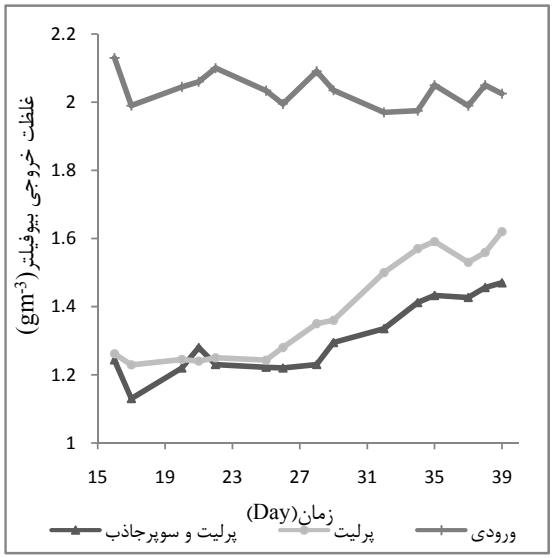
شکل ۳ نتایج داده‌های آزمایشگاهی حاصل از دو بیوفیلتر را در دبی ۰/۷L/min و غلظت ورودی g/m^3 ۲ نشان می‌دهد. زمان‌ماند ظاهری (EBCT) در بیوفیلترها برابر ۱/۴۰ دقیقه محاسبه شد. همان‌طور که گفته شد فراهم نمودن محلول معدنی تا روز ۲۵ ادامه داشته است. پس از تائید شرایط پایا در دو بیوفیلتر، حذف آبدهی بستر، منجر به شرایط نا پایا در دو بیوفیلتر شده است.

شکل ۴ تغییرات بازده حذف دو بیوفیلتر را در مدت‌زمان ۴۰ روز نشان می‌دهد. با شروع روند کاهش رطوبت در بستر بیوفیلترها، درصد حذف نیز کاهش می‌یابد که در شکل، اثر

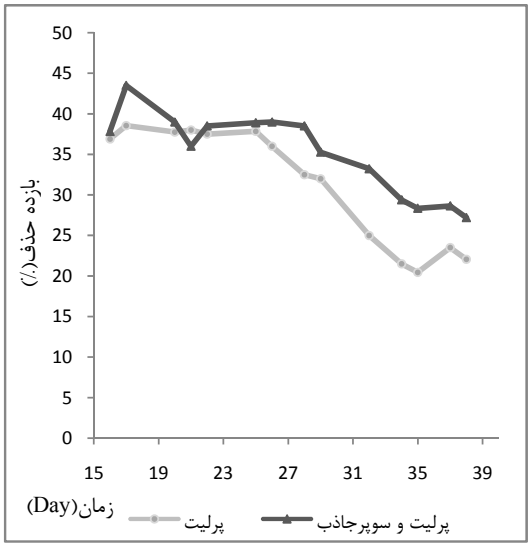
www.SID.ir

Archive of SID

حضور سوپر جاذب در بهبود عملکرد بیوفیلتر به‌خوبی مشخص است.

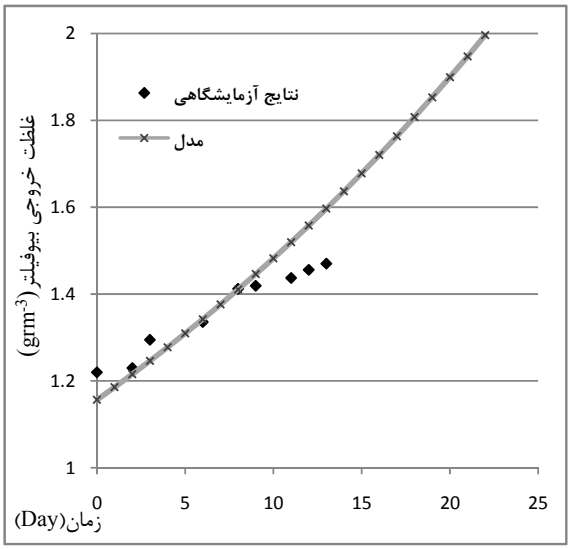


شکل ۳: تغییرات غلظت خروجی (داده‌های آزمایشگاهی) دبی ۰/۷L/min و غلظت ورودی ۲g/m^3



شکل ۴: تغییرات بازده حذف بیوفیلترهای آزمایشگاهی با زمان

شکل ۵ پیش‌بینی دینامیکی تغییرات غلظت خروجی در بیوفیلتر با بستر پرلیت و سوپر جاذب (داده‌های آزمایشگاهی شکل ۳) توسط مدل با در نظر گرفتن ترم تغییرات رطوبت بستر را ارائه می‌دهد. تفاوت در پیش‌بینی‌های مدل و داده‌های تجربی در شروع شرایط نا پایا بسیار کمتر است (۰/۱٪ خطا) اما رفته‌رفته در عمل به دلیل تغییر در برخی پارامترها نظیر سطح ویژه بیوفیلم با کاهش رطوبت بستر این تفاوت بیشتر نمایان می‌شود. میزان خطای میانگین برای پیش‌بینی این داده‌ها ۰/۴۵ درصد است.



شکل ۵: مقایسه مدل و داده‌های آزمایشگاهی بیوفیلتراسیون نا پایا با بستر حاوی سوپر جاذب و پرلیت

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج همان‌طور که در فرضیات مدل ذکر شد برای وارد شدن اثر مقاومت درونی سوپر جاذب درون معادلات، از ضریب مشخصی در معادلات مدل استفاده شد. این ضریب سبب اندکی کاهش نرخ تبخیر نسبت به حالت اشباع سطح می‌شود. با توجه به نتایج شکل ۲، این ضریب ۰/۹۵ تعیین شد (میانگین اختلاف دو نمودار ۵ درصد در نظر گرفته شد). همچنین در بررسی شکل ۳ مشخص می‌شود تحت شرایط نا پایا، غلظت در خروجی به‌تدریج زیاد می‌شود. حضور سوپر جاذب در ابتدا مقاومت خوبی را برای حفظ شرایط پایا تا سه روز اول نشان

www.SID.ir

Archive of SID

می‌دهد. بعد از روز سوم نیز سوپر جاذب روند افزایش غلظت را کندتر کرده و مانع تغییرات شدید در عملکرد بیوفیلتر می‌شود که با نتایج به‌دست‌آمده در تحقیقات گذشته مطابقت دارد (۸).

بررسی شکل ۵ نشان می دهد که تغییرات غلظت خروجی با نرخ ثابتی رو به افزایش است. این امر به دلیل افزایش تدریجی تخلخل بستر و اثر این افزایش روی کمیت‌های مختلف است. در این شکل، تطابق خوبی بین داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل و داده‌های تجربی حاصل از آزمایش مشاهده می‌شود. هرچند ثابت فرض کردن مقادیر پارامترهای مدل در طول زمان نا پایا، منجر به اندکی تفاوت در نتایج شده اما روند افزایش غلظت در طول زمان به‌خوبی مدل شده است.

پس از قطع جریان آب یک بیوفیلتر، به دلیل انجام واکنش بیولوژیکیِ تخریب آلاینده که از نوع واکنش‌های گرمازا است، سرعت تبخیر درون بستر زیاد می شود. رفته‌رفته با تبخیر رطوبت و خشکی بستر، از فعالیت میکروارگانیسم‌های مسئول تخریب ماده آلاینده کاسته شده و غلظت خروجی شروع به افزایش می‌کند. هوای تازه با رطوبت کمتر از اشباع، به‌آرامی قسمت-هایی از بستر را خشک نموده و از فعالیت می‌اندازد. این مسئله در مدل با استفاده از ε_g به‌صورت محلی درون بخش دیفرانسیلی به طرز جالبی در نظر گرفته شد. به‌طوری‌که هر بخش مقدار آب مشخصی از کل آب در دسترس بیوفیلتر را در اختیار دارد و با نرخ انتقال جرم مشخصی آب را از دست می‌دهد. این روند کاهش، بر روی ε_g محلی اثر می‌گذارد. برخی ترم‌ها در معادلات انتقال جرم نظیر ضرایب معادلات غلظت آلاینده در فازها، سطح ویژه سوپر جاذب که آن‌هم وابسته به شعاع ذرات است (سوپر جاذب با از دست رفتن آب ذخیره‌شده درون آن کوچک می‌شود) و ضریب انتقال جرم در معادله موازنه رطوبت وابسته به تغییرات ε_g هستند. تغییر ε_g باعث تغییر در این ضرایب می‌شود و اثر نهایی آن، افزایش غلظت‌ها در آن بخش است. به دلیل آنکه هر بخش، ورودی خود را از بخش قبلی می‌گیرد اثر افزایش غلظت در بخش‌های اولیه با انتقال به بخش‌های دیگر، در خروجی مشاهده می‌شود. پس از به اتمام رسیدن آب درون یک بخش دیفرانسیلی، روند کاهش آب در بخش بعدی آغازشده و به‌این‌ترتیب تا به پایان رسیدن تمام محتوای آب در بستر ادامه می‌یابد. روند افزایش، درنهایت به ازکارافتادن کامل سیستم منجر می‌شود. در این شرایط، غلظت ورودی آلاینده بدون هیچ تغییری در خروجی بیوفیلتر مشاهده می‌شود. معیار مشخص نمودن این شرایط جهت قطع اجرای کدهای برنامه MATLAB، عدم‌تغییر و برابری غلظت‌ها در ۱۰ تکرار آخر است. در حل معادلات نا پایا اگرچه خصوصیات فیزیکی مواد با تغییر رطوبت ثابت فرض شد اما با تعریف دو ضریب در معادلات، اثر کاهش رطوبت اعمال شد. مقادیر این ضرایب با نسبت میزان آب موجود در آن بخش به میزان آب اولیه تعیین شد. چون باگذشت زمان نرخ انتقال آب تحت اثر موئینگی در خلل و فرج پرلیت و مقاومت داخلی سوپر جاذب قرار می‌گیرد، این ضرایب نرخ انتقال آب از سوپر جاذب و پرلیت و میزان نفوذ آلاینده و واکنش درون بیوفیلم را کاهش می‌دهند. این امر بدان دلیل است که رفته‌رفته با کاهش محتوی رطوبت درون بستر، میکروارگانیسم‌ها از بین رفته و فعالیت خود را از دست می‌دهند. درنتیجه عملکرد بیوفیلتر به‌طور مداوم کاهش می‌یابد تا درنهایت عمل حذف آلاینده درون بیوفیلتر به‌کلی قطع می‌گردد. مدل این پژوهش توانست به‌طور مناسبی شرایط نا پایای حاکم بر بیوفیلتر

www.SID.ir

Archive of SID

و روند افزایش غلظت در آن را پیش‌بینی کند (خطای ۰/۴۵ درصد). هرچند داده‌های آزمایش‌ها تا رسیدن به غلظت ورودی موجود نیست، مدل این روند را پیش‌بینی می‌کند و درعین‌حال تخمینی از تعداد روزها (۲۳ روز) تا ازکارافتادن کامل بیوفیلتر را ارائه می‌کند. تحت شرایط عملیاتی بیوفیلتر، از زمان قطع آب دهی تا روز ۲۳ شرایط نا پایا حاکم است و پس‌ازآن غلظت خروجی به غلظت ورودی می‌رسد و بیوفیلتر به‌طور کامل از کار می‌افتد. اثر کاهش رطوبت در بخش قبلی و نتیجه آن کاهش رطوبت فاز گاز در همان بخش، به‌آرامی بر روی بخش بعدی انتقال‌یافته تا درنهایت بخش مذکور با از دست دادن کامل آب در دسترس خود از مسیر محاسبات خارج شود. در این میان، شعاع، سطح و حجم ذرات سوپر جاذب در آن بخش کم شده و مقدار ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد که محاسبات آن‌ها در مدل به‌طور کامل انجام می‌گیرد.

بر این اساس، مدل‌سازی تغییرات رطوبت در بیوفیلتر و اثر آن بر غلظت خروجی به‌خوبی توانست عملکرد نا پایای بیوفیلتر را توصیف کند. رطوبت در نرخ انتقال آلاینده به بیوفیلم مؤثر است، به‌طوری‌که کاهش رطوبت بستر علاوه بر کاهش نرخ واکنش در بیوفیلم میکروبی، جذب و نفوذ آلاینده در بیوفیلم را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج مدل‌سازی نشان داد در نظر گرفتن ترم رطوبت در شرایط نا پایا می‌تواند حیطه عملکرد مدل را توسعه دهد و فرایند بیوفیلتراسیون هوای آلوده را با تمام پیچیدگی‌های آن توصیف نماید.

تقدیر و تشکر

نویسنده این مقاله، آقای سروش دانایی (دانشجوی مقطع دکتری) از همکاری خانم مهندس ندا بدلی در پیاده سازی مدل، تشکر و قدردانی می نماید.

تضاد منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ تضاد منافعی وجود ندارد.

References

1-Mudliar S, Giri B, Padoley K, Satpute D, Dixit R, Bhatt P. Bioreactors for treatment of VOCs and odours – A review. Environmental Management 2010;91(10):39–54.

2-Khan FI, Ghoshal AK. Removal of volatile organic compounds from polluted air. Loss Prevention in the Process Industries 2000;13(5):27-45.

3-Mudliar S, Giri B, Padoley K, Satpute D, Dixit R, Bhatt P. Bioreactors for treatment of VOCs and odours–a review. Journal of Environmental Management 2010; 91(5):1039-1054.

4-Spigno G, De Faveri DM. Modeling of a Vapor-Phase Fungi Bioreactor for the Abatement of Hexane: Fluid Dynamics and Kinetic Aspects. Biotechnology and Bioengineering 2005;89(3):19-28

5-Arriaga S, Revah S. Mathematical Modeling and Simulation of Hexane Degradation in Fungal and Bacterial Biofilters: Effective Diffusivity and Partition Aspects. Canadian Journal of Civil Engineering 2009;36(19):19-25.

www.SID.ir

Archive of SID

6-Morales M, Hernaändez S, Cornabeä T, Revah S, Auria R. Effect of Drying on Biofilter Performance: Modeling and Experimental Approach. Environment and Science Technology 2003;37(9):85-92.

7-Fazaelipoor MS. Modeling temperature variations and moisture requirements in waste air biofilters under steady state conditions. Environmental Technology 2012; 33(5):7-13.

8-Akbari M.The use of water super absorbent inbiofiltration of organic-contaminated air [MSc. Thesis]. Kerman, Shahid Bahonar university, 2009. [Persian]

9-De Visscher A, Li GQ. Toluene removal biofilter modeling: Optimization and case study. Process Safety and Environmental Protection 2008; 86(4):277-282.

10-Fazaelipoor, MH. Analysis of a dual liquid phase biofilter for the removal of hydrophobic organic compounds from airstreams. Chemical Engineering Journal 2009;147(2): 110-116.

www.SID.ir