مدل‌سازی عملکرد بیوفیلتر در حذف سولفید هیدروژن از جریان هوا

فاطمه مهرآرا[۱]، محمدرضا طلایی[۲]، محمدعلی اسداللهی[۳]

چکیده

مقدمه: بیوفیلتراسیون یکی از روش‌های مؤثر در حذف آلاینده‌های گازی نظیر سولفید هیدروژن از یک جریان هوا می‌باشد. وجود یک مدل ریاضی جهت پیش‌بینی بازده جداسازی می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی این دستگاه و همچنین مطالعه فرایند بیوفیلتراسیون مفید واقع گردد. هدف از انجام این تحقیق، مدل‌سازی ریاضی عملکرد بیوفیلتر در فرایند حذف بیولوژیکی سولفید هیدروژن از جریان هوا بود. همچنین تأثیر پارامترهای مهمی مانند ضریب نفوذپذیری در بیوفیلم و ضخامت بیوفیلم بر پیش‌بینی نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

روش‌ها: برای رسیدن به اهداف فوق، معادلات حاکم که در نتیجه به کارگیری قوانین بقای جرم بر روی یک المان در فضای گاز و بیوفیلم می‌باشند، حل گردید. با حل این معادلات توزیع غلظت سولفید هیدروژن در تمامی نقاط گاز و بیوفیلم مشخص شد و با کمک این توزیع، بازده جداسازی محاسبه گردید.

یافته‌ها: این مدل قادر به پیش‌بینی تغییرات ضخامت بیوفیلم با زمان، که در اثر رشد باکتری‌ها و همچنین کنده شدن بیومس از سطح بیوفیلم رخ می‌دهد، می‌باشد. نتایج به دست آمده از مدل ریاضی توسعه‌یافته با داده‌های تجربی توافق خوبی را نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از مدل ریاضی نشان داد که بازده حذف سولفید هیدروژن با افزایش ضریب نفوذ، افزایش سطح ویژه پرکن‌ها و کاهش سرعت گاز ورودی زیاد می‌گردد. همچنین بازده حذف سولفید هیدروژن با افزایش ضخامت بیوفیلم، برای مقادیر ضخامت پایین بیوفیلم (۲۰-۵ میکرومتر)، بیشتر می‌شود. این امر نمایانگر این نکته می‌باشد که در ضخامت‌های کم بیوفیلم، سرعت واکنش کنترل‌کننده می‌باشد و مقاومت بیوفیلم تأثیر چندانی بر نرخ جداسازی ندارد. افزایش بیشتر در ضخامت بیوفیلم (۱۰۰-۲۰ میکرومتر) باعث کاهش بازده حذف سولفید هیدروزن می‌شود. به نظر می‌رسد دلیل این امر افزایش اثر تأثیر نفوذ بر نرخ انتقال جرم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بیوفیلتراسیون، مدل‌سازی ریاضی، ضخامت بیوفیلم، آلاینده، سولفید هیدروژن.

نوع مقاله: *تحقیقی*

دریافت مقاله: ۸۹/۱۰/۱۵ *پذیرش مقاله: ۹۰/۳/۷*

مقدمه

آلودگی هوا یکی از مشکلات جدی است که بشر با آن روبه‌رو است. سالانه مقادیر قابل ملاحظه‌ای از آلاینده‌های گوناگون به خصوص ترکیبات آلی فرار و معدنی نظیر سولفید هیدروژن (H_2S) از طریق صنایع مختلف به هوا منتشر می‌شوند. H_2S گازی بدبو، سمی و خورنده است و باید تولید و پخش آن در محیط زیست کنترل شود. مقدار زیادی از این گاز در فرایندهای صنعتی نظیر پالایشگاه‌های نفت، تصفیه‌خانه‌های

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. (نویسنده مسؤول)

Email: mrtalaie@eng.ui.ac.ir

۳. استادیار، گروه بیوتکنولوژی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

www.mui.ac.ir

فاضلاب، کارخانجات کاغذسازی، صنایع فراوری مواد غذایی و ... تولید می‌شوند (۱). سولفید هیدروژن در گاز طبیعی و بیوگاز نیز وجود دارد که حذف آن برای جلوگیری از خوردگی لوله‌های انتقال گاز و انتشار SO_2 در هنگام سوختن این گازها ضروری است (۲). فرایندهای متعددی بر پایه اصول فیزیکی و شیمیایی به منظور حذف H_2S از هوا و گازهای زاید صنایع توسعه پیدا کردند، ولی بسیاری از این روش‌ها نیازمند افزودن مواد شیمیایی، مصرف انرژی و هزینه بالا می‌باشند. به این ترتیب نیاز به جایگزینی یک روش جدید، جهت کنترل آلاینده‌های هوا با قیمت پایین و بازدهی بالا احساس می‌گردد. در میان روش‌های جدید، بیوفیلتراسیون که با استفاده از روش‌های بیولوژیکی، آلاینده‌ها را تجزیه می‌کند، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های قدیمی کنترل آلاینده‌های هوا باشد (۳).

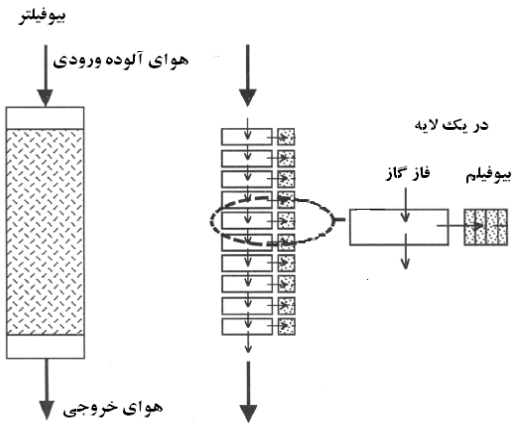
استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی، کمک قابل توجهی به درک صحیح فرایند بیوفیلتراسیون و توسعه روش‌های ساده طراحی سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی می‌نماید. در میان محققانی که به مدل‌سازی فرایند بیوفیلتراسیون پرداختند، یک توافق عمومی در خصوص مکانیسم عملکرد انواع بیوفیلترها وجود دارد. بر اساس این مکانیسم، هوای آلوده با سرعت کم از درون بیوفیلتر عبور داده می‌شود و در این میان آلاینده‌های موجود به اعماق بیوفیلم نفوذ می‌کنند. میکروارگانیسم‌های درون بیوفیلم آلاینده‌ها را توسط واکنش‌های زیستی به ترکیبات بی‌خطر تبدیل می‌کنند. بسیاری از بیوفیلترها به شکل هوازی هستند. بنابراین اکسیژن و مواد مغذی که در آب یا بیوفیلم حل شده، به میکروارگانیسم‌ها می‌رسد. آلاینده‌ها در طی این واکنش‌ها به آب، دی اکسید کربن و توده زیستی تبدیل می‌شوند (۴). از نتایج به دست آمده از مدل‌سازی بیوفیلترها، در طراحی آن‌ها استفاده می‌شود. رفتار بیوفیلتر نیز تحت شرایط مشخص پیش‌بینی می‌گردد. Ottengraf و Van Den Oever توانایی بیوفیلترها را برای حذف آلاینده‌های آلی از هوا نشان دادند (۵). همچنین برای اولین بار مدلی ریاضی برای فرایند بیوفیلتراسیون ارایه نمودند. مدل میکروسینتیک Ottengraf و Van Den Oever هنوز به عنوان مرجع پایه برای بسیاری از مدل‌ها به کار می‌رود (۵). Shareefdeen و همکاران مدل Ottengraf را به نحوی اصلاح کردند که با واقعیت همخوانی بیشتری داشته باشد (۶). در این مدل متانول و اکسیژن سوبسترا را مؤثر بر سرعت واکنش در نظر گرفته شدند و نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی مربوط به حذف متانول مقایسه شدند. Alonso و همکاران مدلی را برای شبیه‌سازی بیوفیلتر در تصفیه تولوئن ارایه کردند (۷). در این مدل محاسبات با توجه به ابعاد آکنه‌های کربن فعال و محیط متخلخل انجام شد. تغییرات ضخامت بیوفیلم نیز با گذشت زمان در مدل اعمال گردید. امان ا... و همکاران نیز تصفیه هوای آلوده با ترکیبات آلی فرار در یک بیوفیلتر تحت شرایط گذرا و پایدار عملیاتی را با یک مدل ریاضی شرح دادند (۸). همچنین اثر پارامترهای مختلف نظیر عدد پکلت، ضخامت بیوفیلم، ضریب جذب گاز- جامد، سطح ویژه بستر و ... را بر روی سیستم، مورد بررسی قرار دادند. Baquerizoa و همکاران یک مدل دینامیکی را برای حذف آمونیاک به وسیله فرایند بیوفیلتراسیون ارایه دادند (۹). این مدل ریاضی بر پایه معادلات موازنه جرم برای فازهای گاز، مایع، بیوفیلم و جامد توسعه داده شده است. در این کار از سینتیک‌های زیست زدایش پیچیده شامل بازدارندگی و محدودیت اکسیژن استفاده شده است. به دلیل پیچیدگی مکانیسم‌های مختلف موجود در بیوفیلتر، مدل‌سازی آن مشکل است. بیشتر مدل‌ها نیز با در نظر گرفتن فرضیات ساده ارایه می‌شوند. مدل‌های مختلف در فرضیاتی مانند درجه، نوع سینتیک و شکل بیوفیلم با هم تفاوت دارند. در این تحقیق به منظور شناخت هرچه بهتر سیستم‌های بیوفیلتراسیون، مدل‌سازی فرایند بیوفیلتراسیون برای حذف آلاینده سولفید هیدروژن از جریان گاز، مورد مطالعه قرار گرفت. در این مدل‌سازی علاوه بر در نظر گرفتن عدم یکنواختی در بیوفیلم، تغییرات ضخامت بیوفیلم با زمان نیز در نظر گرفته شد.

۱- مدل ریاضی

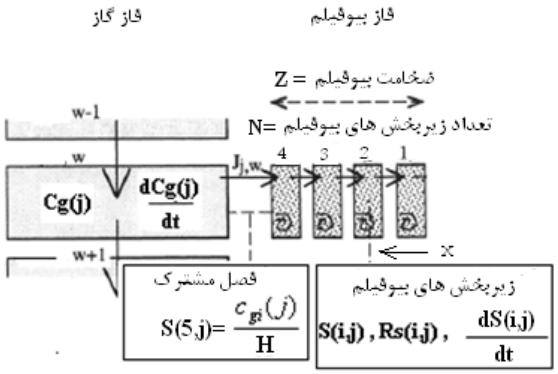
برای توسعه مدل، بیوفیلتر به صورت یک بیوراکتور با بستر ثابت در نظر گرفته شد. جریان گاز آلوده وارد بستر می‌شود. سولفید

www.mui.ac.ir

هیدروژن موجود در آن به عنوان آلاینده به سمت منطقه واکنش (بیوفیلم) که بر روی سطح ذرات پرکن قرار دارد، نفوذ می‌کند. سپس آلاینده به درون بیوفیلم نفوذ می‌کند. همزمان با نفوذ، توسط میکروارگانیسم‌ها مصرف می‌شود. به این ترتیب در بیوفیلتر دو فاز وجود خواهد داشت. فاز گاز که ماده آلاینده به همراه آن وارد بیوفیلتر می‌شود و فاز بیوفیلم که واکنش در آن انجام می‌گیرد که این فاز حاوی میکروارگانیسم‌ها است. ضخامت بیوفیلم تشکیل شده بر روی سطح ذرات پرکن با زمان تغییر می‌کند که این تغییرات تابعی از نرخ رشد، از بین رفتن میکروارگانیسم‌ها و همچنین کنده شدن قطعاتی از بیوفیلم به علت نیروهای برشی ناشی از عبور جریان گاز بر روی سطح بیوفیلم می‌باشد. جریان درون ستون بیوفیلم به صورت قالبی در نظر گرفته می‌شود. ستون بیوفیلتر مطابق شکل ۱ به چندین قطعه تقسیم می‌شود. در داخل هر قطعه دو بخش فاز گاز و بیوفیلم بررسی می‌شود. فاز بیوفیلم هم به چند قسمت با فرض این که در هر قسمت اختلاط کامل وجود دارد، تقسیم می‌شود. سپس به کمک قوانین بقا، معادله انتقال جرم آلاینده در هر یک از بخش‌های فاز نوشته می‌شود. رفتار بیوفیلتر با حل معادلات توزیع غلظت آلاینده در فاز گاز و بیوفیلم، پیش‌بینی خواهد شد. جزییات فرایندهایی که برای آلاینده در هر بخش اتفاق می‌افتد، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار کلی بیوفیلتر برای مدل‌سازی



شکل ۲: جزییات مدل برای یک بخش از ستون بیوفیلتر

فرضیاتی که در این مدل‌سازی در نظر گرفته شده است، شامل موارد زیر می‌باشند.

۱- در هر بخش از ستون بیوفیلتر که در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است، اختلاط کامل می‌باشد.

۲- مقاومت فصل مشترک فاز گاز- بیوفیلم ناچیز در نظر گرفته می‌شود.

۳- غلظت‌های تعادلی در فصل مشترک گاز- بیوفیلم از قانون هنری پیروی می‌کنند.

۴- ذرات بستر کاملاً با بیوفیلم پوشیده شدند و جذب آلاینده درون ذرات بستر ناچیز فرض می‌شود.

۵- میزان دانسیته توده فیلم میکروبی ثابت فرض می‌شود.

۶- اکسیژن برای واکنش زیستی محدودکننده نیست. این فرض با توجه به این که هوا به طور مداوم از ستون بیوفیلتر عبور می‌کند و غلظت ماده آلاینده ورودی به ستون بیوفیلتر به نسبت پایین می‌باشد، منطقی به نظر می‌رسد.

۷- واکنش زیستی تنها در لایه‌های بیوفیلم که بر روی سطح ذرات بستر قرار دارند، اتفاق می‌افتد.

۸- شدت واکنش زیستی وابسته به غلظت آلاینده در بیوفیلم می‌باشد و با سینتیک میکائیلیس- منتن بیان می‌شود.

۹- ثوابت سینتیکی با زمان ثابت می‌باشند.

www.mui.ac.ir

۱۰- ضخامت بیوفیلم، در طول بستر با زمان تغییر می‌کند و تغییرات آن در مدل وارد می‌شود.

۲- معادلات حاکم

در ادامه به معرفی معادلات حاکم بر مدل پرداخته می‌شود.

۳-۱- موازنه جرم آلاینده بر روی فاز گاز

موازنه جرم برای غلظت آلاینده در فاز گاز در لایه w از ستون بیوفیلتر مطابق معادله (۱) و شار نفوذی آلاینده درون بیوفیلم مطابق معادله (۲) می‌باشد.

$$\frac{dc_g(j)}{dt} = \frac{F_g^{\,w}}{V\varepsilon}\left(c_g(j-1) - c_g(j)\right) - \frac{A}{\varepsilon} J_g(j) \qquad (۱)$$

$$J_g(j) = -D_{eff}\left(\frac{dS(i,j)}{dx}\right)_{x=Z(j)} = D_{eff}\frac{S(N+1,j) - S(N,j)}{\Delta x} \qquad (۲)$$

شرایط اولیه و مرزی معادله غلظت آلاینده در فاز گاز در معادلات (۳)، (۴) و (۵) آورده شده است.

$$c_g(j) = c_{gin}, t = 0 \qquad (۳)$$

$$c_{gi}(j) = H.S(N+1, j) \qquad (۴)$$

$$K_g\left(c_g(j) - c_{gi}(j)\right) = -D_{eff}\frac{S(N,j) - S(N+1,j)}{\Delta x} \qquad (۵)$$

$$\Delta x = \frac{Z(j)}{N} \qquad (۶)$$

۳-۲- موازنه جرم آلاینده بر روی فاز بیوفیلم

موازنه جرم برای غلظت آلاینده درون بیوفیلم و بر روی یک زیر بخش N، مطابق معادله (۷) می‌باشد.

$$\frac{dS(i,j)}{dt} = D_{eff}\left(\frac{d^2S(i,j)}{dx^2}\right) - R_{S_{i,j}} \qquad (۷)$$

سرعت مصرف آلاینده توسط میکروارگانیسم در بیوفیلم با رابطه Michaelis-Menten، مطابق معادله (۸) می‌باشد.

$$R_{S_{i,j}} = \frac{R_m S(i,j)}{K_S + S(i,j)} \qquad (۸)$$

شرایط اولیه و مرزی معادله غلظت آلاینده در بیوفیلم در معادلات (۹)، (۱۰) و (۱۱) آورده شده است.

$$S(i,j) = 0, t = 0 \qquad (۹)$$

$$S(N+1, j) = \frac{c_{gi}(j)}{H} \qquad (۱۰)$$

$$\frac{dS(1,j)}{dx} = 0 \qquad (۱۱)$$

بر اساس نتایج Alonso و همکاران، رابطه تغییرات ضخامت بیوفیلم با زمان مطابق معادله (۱۲) در نظر گرفته می‌شود (۷). در این معادله Z(j) نماینده ضخامت بیوفیلم در نقاط مختلف ستون بیوفیلتر می‌باشد.

$$\frac{dZ(j)}{dt} X_f = \left(D_{eff}\frac{dS(i,j)}{dx}\bigg|_{x=Z(j)+dZ}\right) Y - Z(j) X_f^{\,b} \qquad (۱۲)$$

$$Z(j) = Z0, t = 0 \qquad (۱۳)$$

۳-۳- روش حل معادلات

برای به دست آوردن توزیع غلظت ماده آلاینده در هر یک از فازهای موجود در بیوفیلتر معادلات (۱)، (۷) و (۱۲) باید به صورت همزمان حل شوند. برای حل معادلات حاکم از روش اختلاف محدود استفاده شد. برنامه حل معادلات، به کمک زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده است.

www.mui.ac.ir

یافته‌ها

از حل معادلات، توزیع غلظت سولفید هیدروژن در فاز گاز و بیوفیلم به دست می‌آید. با کمک غلظت سولفید هیدروژن در خروجی بیوفیلتر می‌توان بازده حذف آلاینده در بیوفیلتر را مطابق معادله (۱۳) محاسبه نمود.

$$\text{Removal efficiency\%} = \text{RE\%} = \frac{\left(c_{gin} - c_g(w)\right)}{c_{gin}} * 100 \qquad (۱۳)$$

برای بررسی دقت نتایج حاصل از حل مدل ریاضی و همچنین وجود یک معیار آزمایشگاهی مناسب، از تحقیقات انجام شده توسط Duan و همکاران استفاده گردید (۱۰). به این ترتیب تمامی متغیرهای عملیاتی از این مقاله استخراج شدند و در حل معادلات به کار رفتند. در جدول ۱ مقادیر این متغیرهای عملیاتی آورده شده است.

نتایج حاصل از حل معادلات مدل به صورت خطوط ممتد در کلیه نمودارها نشان داده شده است. داده‌های آزمایشگاهی Duan و همکاران به صورت نقاط پراکنده بر روی نمودارهای موجود در نمودارهای ۱، ۲ و ۳ ترسیم شدند و با نتایج به دست آمده از مدل، قابل مقایسه می‌باشند (۱۰). با توجه به نتایج حاصل که در نمودارها نشان داده شده است، می‌توان افزایش میزان بازدهی حذف آلاینده را با گذشت زمان و همچنین با کاهش غلظت ورودی آلاینده مشاهده نمود. تطابق نزدیک داده‌های آزمایشگاهی با یافته‌های ناشی از حل مدل، بیانگر دقت مدل ارایه شده می‌باشد.

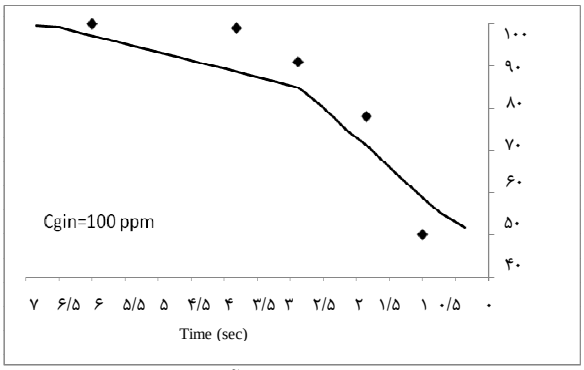
۳-۱- بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد بیوفیلتر

در این بخش با استفاده از مدل ارایه شده، اثر پارامترهای عملیاتی بر روی بازده حذف آلاینده در بیوفیلتر مورد بررسی قرار گرفت. نمودارهای ۴ و ۵ نتایج مدل را برای اثر ضخامت بیوفیلم بر روی بازده حذف آلاینده نشان می‌دهند.

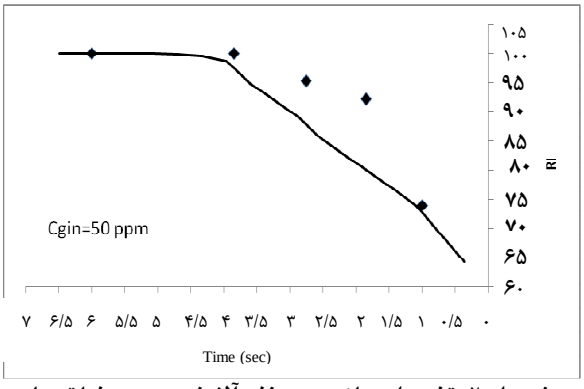
جدول ۱: مقادیر پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مورد استفاده در مدل‌سازی (۱۰)

نماد	مقدار	پارامتر
مساحت سطح ویژه	۱۵۰	$A\ (m^2m^{-3})$
دبی گاز ورودی	۴۵	$F_g\ (m^3h^{-1})$
حجم بیوفیلتر	۱	$V\ (m^3)$
ضخامت اولیه بیوفیلم	۲۳×۱۰^{-۶}	$Z_0\ (m)$
تخلخل بستر بیوفیلتر	۰/۵	ε
ضریب نفوذ آلاینده در بیوفیلم	$۵/۷۹۶\times۱۰^{-۶}$	$D_{eff}\ (m^2h^{-1})$
سرعت حذف بیشینه ماده آلاینده در بیوفیلم	۲۷/۷	$R_m\ (gm^{-3}h^{-1})$
ثابت میکائیلیس- منتن	۲۰/۱	$K_s\ (gm^{-3})$
ثابت هنری	۰/۳۸۷	H
ضریب انتقال جرم گاز- بیوفیلم	۱۲۱۵	$K_g\ (mh^{-1})$
ضریب نابودی بیوفیلم	$۶/۸\times۱۰^{-۳}$	$b\ (h^{-1})$
ضریب بازده تبدیل سوبسترا (آلاینده) به بیومس	۰/۵	$Y\ (mg/mg)$
دانسیته بیوفیلم	$۶/۴\times۱۰^{۳}$	$X_f\ (g.m^{-3})$

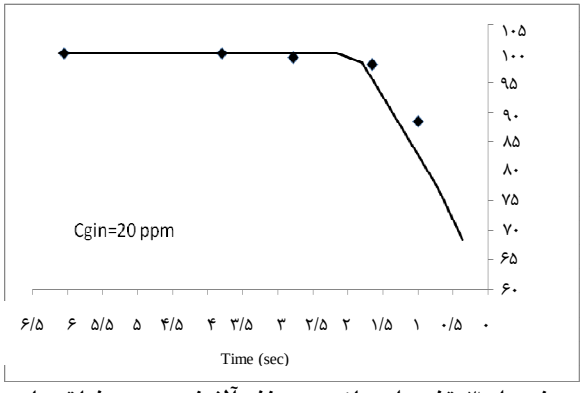
www.mui.ac.ir



نمودار ۱: تغییرات بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر با گذشت زمان (Cgin = ۱۰۰ ppm)



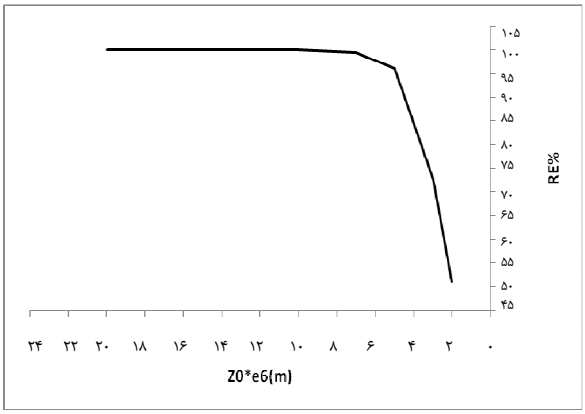
نمودار ۲: تغییرات بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر با گذشت زمان (Cgin = ۵۰ ppm)



نمودار ۳: تغییرات بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر با گذشت زمان (Cgin = ۲۰ ppm)

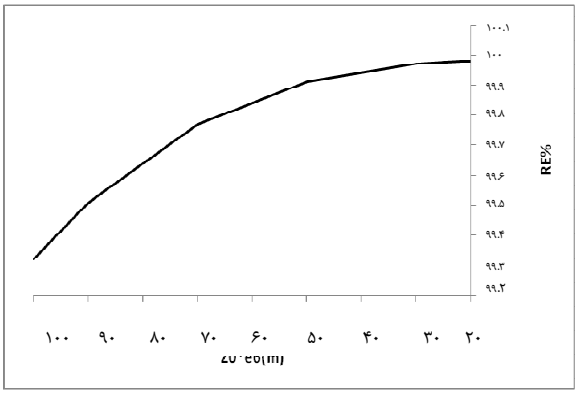
البته در این مدل باید ضخامت بیوفیلم در طول بستر بیوفیلتر، ثابت در نظر گرفته شود. در سایر موارد، تغییرات ضخامت بیوفیلم با زمان در مدل وارد می‌شود. همان طور که در نمودارها دیده می‌شود، برای ضخامت‌های بیوفیلم کمتر از ۲۰ میکرومتر با افزایش در ضخامت بیوفیلم، بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر افزایش می‌یابد؛ اما در ضخامت‌های بالاتر از ۲۰ میکرومتر با افزایش در ضخامت بیوفیلم، بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر کاهش می‌یابد. ضخامت بیوفیلم یکی از پارامترهای مهمی است که بر روی بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر اثر می‌گذارد. افزایش بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر با افزایش ضخامت بیوفیلم در ضخامت‌های کمتر از ۲۰ میکرومتر نشان‌دهنده این است که در ضخامت‌های پایین بیوفیلم، واکنش کنترل کننده سیستم است. بنابراین در این حالت با افزایش در ضخامت بیوفیلم منطقه واکنش افزایش و در نتیجه بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد در ضخامت‌های بیوفیلم بالاتر از ۲۰ میکرومتر، نفوذ کنترل کننده سیستم است. در این صورت با افزایش در ضخامت بیوفیلم نفوذ آلاینده به درون بیوفیلم مشکل‌تر می‌شود و در نتیجه کاهش بازده حذف آلاینده در بیوفیلتر مشاهده می‌شود.

نمودار ۶، نتایج مدل را برای اثر ضریب نفوذ آلاینده در بیوفیلم، بر روی بازدهی حذف آلاینده نشان می‌دهند. با افزایش ضریب نفوذ آلاینده در بیوفیلم، آلاینده راحت‌تر درون بیوفیلم نفوذ می‌کند و توسط میکروارگانیسم‌ها مصرف می‌شود. در نتیجه بازده حذف آلاینده افزایش می‌یابد. نتایج مدل نیز با این تفسیرها مطابقت دارد.

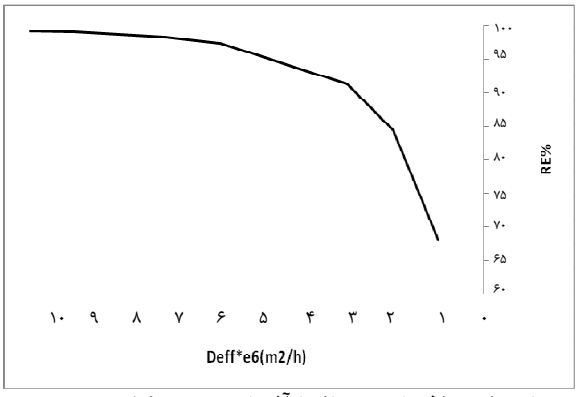


نمودار ۴: اثر ضخامت بیوفیلم (۲۰-۲ میکرومتر) بر روی بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر

www.mui.ac.ir



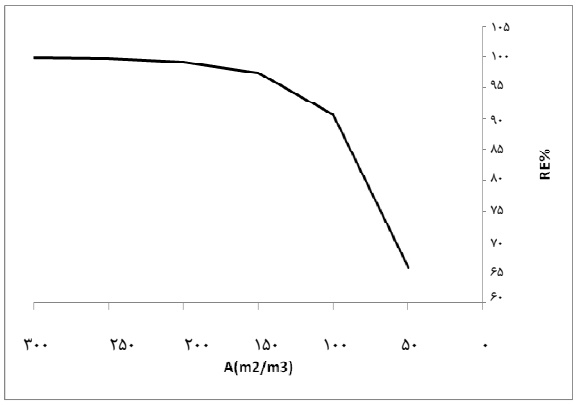
نمودار ۵: اثر ضخامت بیوفیلم (۱۰۰-۲۰ میکرومتر) بر روی بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر



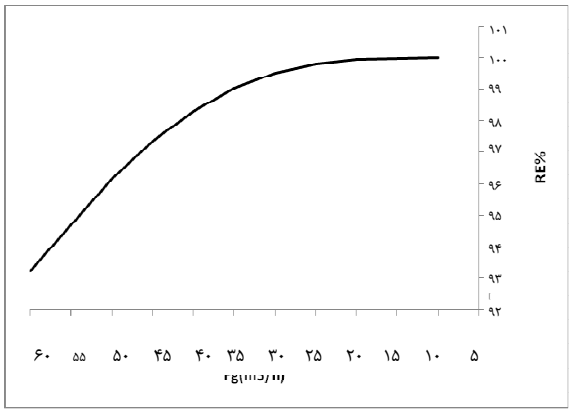
نمودار ۶: اثر ضریب نفوذ آلاینده در بیوفیلم بر روی بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر

نمودار ۷ اثر سطح ویژه پرکن‌ها را بر روی بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر نشان می‌دهد. همان طور که در این نمودار دیده می‌شود، با افزایش سطح ویژه پرکن‌ها، بازده حذف آلاینده در بیوفیلتر افزایش می‌یابد. با افزایش سطح ویژه پرکن‌ها، سطح مشترک فاز گاز و بیوفیلم زیاد می‌شود و سطح انتقال جرم افزایش می‌یابد. بنابراین بالا رفتن شدت انتقال جرم از فاز گاز درون منطقه واکنش زیستی می‌شود، این روند توجیه‌پذیر است. (از این رو با افزایش شدت انتقال جرم به درون منطقه واکنش زیستی، بازده حذف آلاینده افزایش می‌یابد).

نمودار ۸ اثر تغییر دبی گاز ورودی را بر روی بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر نشان می‌دهد. افزایش سرعت ورودی گاز یا بالا رفتن دبی گاز ورودی به سیستم موجب کاهش زمان ماند گاز و بالا رفتن غلظت آلاینده در خروجی از سیستم می‌شود. در نتیجه بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر کاهش می‌یابد. نتایج مدل نیز گویای این مطلب هستند.



نمودار ۷: اثر سطح ویژه پرکن‌ها بر روی بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر



نمودار ۸: اثر تغییرات دبی گاز ورودی بر روی بازدهی حذف آلاینده در بیوفیلتر

بحث

در این تحقیق عملکرد یک بیوفیلتر با در نظر گرفتن تغییرات ضخامت بیوفیلم با گذشت زمان برای حذف آلاینده سولفید هیدروژن، مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گرفت. مدل ریاضی حل شد. نتایج حاصل از آن با داده‌های تجربی

www.mui.ac.ir

ارایه شده در مقالات مقایسه گردید. نتایج حاصل از مقایسه، نشان‌دهنده دقت مدل ارایه شده می‌باشد. همچنین تأثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد بیوفیلتر در این مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل ریاضی نشان می‌دهند که بازده حذف سولفید هیدروژن با افزایش ضریب نفوذ، افزایش سطح ویژه پرکن‌ها و کاهش سرعت گاز ورودی زیاد می‌گردد. همچنین بازده حذف سولفید هیدروژن با افزایش ضخامت بیوفیلم، برای مقادیر ضخامت پایین بیوفیلم (۲۰-۵ میکرومتر)، بیشتر می‌گردد. این امر نمایانگر این نکته می‌باشد که در ضخامت‌های کم بیوفیلم، سرعت واکنش کنترل‌کننده می‌باشد و مقاومت بیوفیلم تأثیر چندانی بر نرخ جداسازی ندارد. اما افزایش بیشتر در ضخامت بیوفیلم (۱۰۰-۲۰ میکرومتر) باعث کاهش بازده حذف سولفید هیدروزن می‌شود. به نظر می‌رسد دلیل این امر افزایش اثر نفوذ بر نرخ انتقال جرم می‌باشد.

فهرست علایم و نشانه‌ها

$C_g(j)$: غلظت آلاینده در فاز گاز ($g.m^{-3}$)

C_{gin}: غلظت ورودی آلاینده در فاز گاز ($g.m^{-3}$)

$C_{gi}(j)$: غلظت گازی تعادلی آلاینده در فصل مشترک گاز- بیوفیلم ($g.m^{-3}$)

$S(i,j)$: غلظت آلاینده در فاز بیوفیلم ($g.m^{-3}$)

$S_0(i,j)$: غلظت اولیه آلاینده در فاز بیوفیلم ($g.m^{-3}$)

K_g: ضریب انتقال جرم آلاینده بین گاز و بیوفیلم ($m.h^{-1}$)

K_s: ثابت اشباع در رابطه شدت حذف آلاینده (ثابت میکائیس- منتن) ($g.m^{-3}$)

A: مساحت سطح ویژه ($m^2.m^{-3}$)

H: ثابت هنری

F_g: دبی گاز ورودی (m^3)

D_{eff}: ضریب نفوذ آلاینده در بیوفیلم ($m^2.h^{-1}$)

V: حجم بیوفیلتر (m^3)

$Z(j)$: ضخامت بیوفیلم در نقاط مختلف بیوفیلتر (m)

Z_0: ضخامت اولیه بیوفیلم (m)

ε: تخلخل بستر

t: زمان (h)

N: تعداد بخش‌های عمق بیوفیلم

W: تعداد بخش‌های ارتفاع بیوفیلتر

x: موقعیت در عمق بیوفیلم (m)

X_f: دانسیته بیوفیلم ($g.m^{-3}$)

Y: ضریب بازده تبدیل سوبسترا (آلاینده) به بیومس (mg biomass/mg H_2S)

b: ضریب نابودی بیوفیلم (h^{-1})

R_m: سرعت حذف بیشینه ماده آلاینده در بیوفیلم ($gm^{-3}h^{-1}$)

References

1. Shareefdeen ZM. Development of a biofilter media for removal of hydrogen sulphide. Global Nest Journal 2009; 11(2): 218-22.
2. Tang KMGW. Biooxidation of sulphide under denitrifying conditions in an immobilized cell bioreactor [MSc Thesis]. Saskatoon: University of Saskatchewan; 2008.
3. Devinny JS, Deshusses MA, Webster TS. Biofiltration for air pollution control. London: Lewis Publishers; 1999.
4. Devinny JS, Ramesh J. A phenomenological review of biofilter models. Chemical Engineering Journal 2005; 113(2-3): 187-96.

www.mui.ac.ir

5. Ottengraf SP, Van Den Oever AH. Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter. Biotechnol Bioeng 1983; 25(12): 3089-102.

6. Shareefdeen Z, Baltzis BC, Oh YS, Bartha R. Biofiltration of methanol vapor. Biotechnol Bioeng 1993; 41(5): 512-24.

7. Alonso C, Suidan MT, Sorial GA, Smith FL, Biswas P, Smith PJ, et al. Gas treatment in trickle-bed biofilters: biomass, how much is enough? Biotechnol Bioeng 1997; 54(6): 583-94.

8. Amanullah MD, Farooq S, Viswanathan S. Modeling and Simulation of a Biofilter. Industrial and Engineering Chemistry Research 1999; 38(7): 2765-74.

9. Baquerizoa G, Gamisansa X, Gabrielb D, Lafuente J. A dynamic model for ammonia abatement by gas-phase biofiltration including pH and leachate modelling. Biosystems Engineering 2007; 97(4): 431-40.

10. Duan H, Koe LC, Yan R, Chen X. Biological treatment of H(2)S using pellet activated carbon as a carrier of microorganisms in a biofilter. Water Res 2006; 40(14): 2629-36.

www.mui.ac.ir

The Mathematical Modeling of Biofilter Performance in Hydrogen Sulfide Removal from Air Streams

Fatemeh Mehrara[1], Mohammad Reza Talaie[2], Mohammad Ali Asadolahi[3]

Abstract

Background: Biofiltration is one of the most effective methods for pollutant removal from a gas stream. An accurate mathematical model to predict removal efficiency can be applied in design and optimization of such equipment and also in investigating biofiltration process.

The objective of this study was to develop a mathematical model for predicting biofiltration process performance in hydrogen sulfide removal from a gas stream and also examining the influence of several main parameters such as biofilm diffusivity and biofilm thickness on the predicted results.

Methods: In order to achieve the goals, the governing equations expressing mass conservation for a differential control volume in both gas and biofilm phases were solved. Hydrogen sulfide concentration distributions in gas and biofilm phases were determined by solving these equations**.**

Findings: The presented model is capable of predicting the variation of biofilm thickness through time due to bacteria growth and biofilm surface abrasion. The results from the expanded mathematical model were well in agreement with empirical data.

Conclusion: The results revealed that hydrogen sulfide removal efficiency increases by increments in packing specific surface area and biofilm diffusivity along with decreasing entering gas velocity. In addition, the results of the model showed that increasing biofilm thickness tends to raise the removal efficiency for biofilm thickness of less than 5 micrometer. This fact reveals that the reaction rate is the rate-controlling step for lower biofilm thickness and the biofilm-diffusion resistance does not affect mass transfer rate significantly. However, further increasing biofilm thickness (to more than 20 micrometers) causes hydrogen sulfide removal efficiency to decrease. It can be attributed to magnifying the influence of biofilm diffusion on mass transfer rate.

Key words: Biofiltration, Mathematical Modelling, Hydrogen Sulfide, Pollutant, Biofilm.

1- MSc Student, Department of Chemical Engineering, School of Technology, The University of Isfahan, Isfahan, Iran.
2- Associate Professor, Department of Chemical Engineering, School of Technology, The University of Isfahan, Isfahan, Iran. (Corresponding Author), Email: mrtalaie@eng.ui.ac.ir
3- Assistant Professor, Department of Biotechnology, School of Technology, The University of Isfahan, Isfahan, Iran.

www.mui.ac.ir