

امکان‌سنجی حذف ترکیبات آلی فرار از پساب با روش شناورسازی با هوای محلول

شمیم سادات اسمعیل نژاد^۱، داود کاه‌فروشان^{۲*}، اسماعیل فاتحی‌فر^۳

۱ کارشناس ارشد مهندسی شیمی، مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند
۲ دانشیار، دکترای مهندسی شیمی، مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند
۳ استاد، دکترای مهندسی شیمی، مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۱۲؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۰۴/۰۱)

چکیده

ترکیبات آلی فرار دسته‌ای از آلاینده‌های هوا هستند که به دلیل آثار زیان‌آور بر انسان، حیوانات و گیاهان، جلوگیری از انتشار این ترکیبات به محیط‌زیست امری ضروری است. در این تحقیق، امکان‌سنجی روش شناورسازی با هوای محلول در حذف بهینه تولوین به عنوان نمونه‌ای از ترکیبات آلی مورد مطالعه قرار گرفت. حذف این ترکیب از پساب با استفاده از عاری‌سازی با هوا، در یک پایلوت آزمایشگاهی بررسی و برای ارتقای عملکرد حذف، از روش شناورسازی با هوای محلول جهت تولید حباب هوا استفاده شد. تأثیر برخی متغیرها مانند آثار فشار اشباع‌کننده، دبی ورودی آب اشباع به ستون حباب و نسبت دبی ورودی پساب و آب اشباع به ستون حباب، مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج با روش طراحی آزمایش با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۴ مورد آنالیز قرار گرفت. بالاترین میزان حذف تولوین مقدار ۵۲٪ و در فشار ۵ بار، مقدار دو برابر پساب به آب اشباع و دبی آب اشباع ۰/۴ لیتر بر دقیقه به دست آمد. همچنین، با بررسی آثار دوتایی و سه‌تایی پارامترهای اصلی نسبت دبی‌ها، دبی آب اشباع وارده به ستون حباب و فشار اشباع‌ساز، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر حذف تولوین داشتند.

کلید واژه‌ها: شناورسازی با هوای محلول، ترکیبات آلی فرار، اشباع‌ساز، ستون حباب

سرآغاز

ترکیبات آلی فرار (VOC)^(۱) از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط‌زیستی هستند که بدلیل سمیت بالا باعث آلودگی آب و هوا می‌شوند. ترکیبات آلی فرار دارای فشار بخار بالا و حلالیت کم در آب هستند. بنابراین، عمده انتشار این آلاینده‌ها به هوا از طریق فاضلاب تولید شده در صنایع مختلف شیمیایی صورت می‌گیرد. از میان ترکیبات آلی فرار، بنزن، تولوین، استایرن، فرمالدهید و فنول به دلیل ایجاد سرطان در انسان و کاربرد گسترده در صنایع و محصولات خانگی از اهمیت بالاتری برخوردار هستند (Liotta, 2010; Ozturk and Yilmaz, 2006). حساسیت‌های پوستی و بیماری چشم، سردرد، خستگی، کاهش عملکرد ریه‌ها و تنگی نفس از جمله عوارض این ترکیبات است (United State Environmental Protection Agency, 2012).

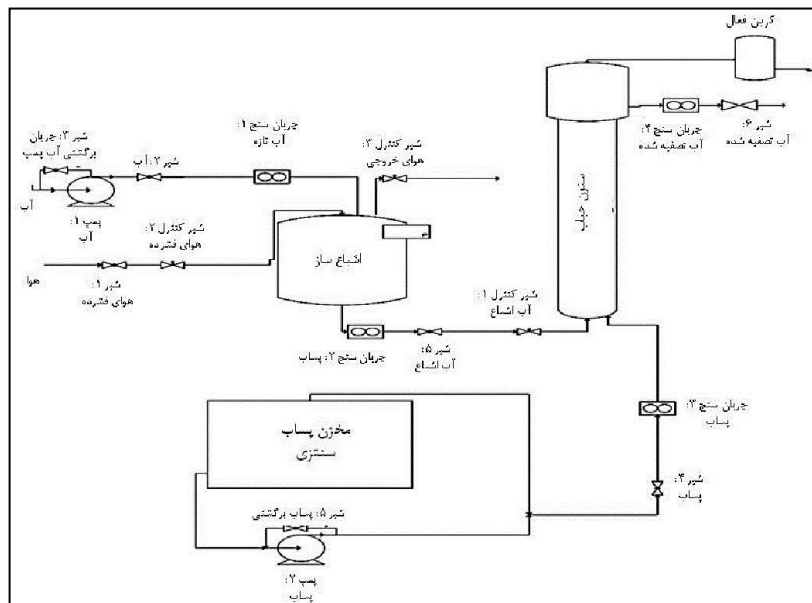
برای کنترل انتشار ترکیبات آلی فرار دو دیدگاه کلی وجود دارد که عبارتند از: اصلاح فرایند و تجهیزات^(۲) و روش‌های مکمل حذفی^(۳). در حالت اول کنترل انتشار با اصلاح تجهیزات فرایندی، مواد خام و یا تغییر فرایند انجام می‌شود. به صورت معمول، تغییر فرایند به راحتی امکان‌پذیر نیست. مواردی مانند انتشار VOC از بالای مخازن باز، نشستی سیستم‌ها و یا انتشار VOC از اتصالات و شیرها از جمله مواردی است که با اصلاح تجهیزات قابلیت کنترل آلاینده‌گی را دارد. دیدگاه دوم در ارتباط با تخریب و یا بازیافت ترکیبات VOC است. روش‌های متعددی برای حذف این ترکیبات ارایه شده است که از آن جمله می‌توان روش‌های اکسیداسیون حرارتی، اکسیداسیون کاتالیستی، جذب سطحی، سردسازی، عریان‌سازی با هوا، ازناسیون و جداسازی توسط غشا را نام برد (Khan & Ghoshal, 2000). در سال‌های اخیر، روش شناورسازی با هوای محلول به دلیل زمان ماند هیدرولیکی کم، سرعت بارگذاری بالا، هزینه‌های عملیاتی کم و کیفیت بالای جریان خروجی در تصفیه فاضلاب‌ها بسیار مورد توجه بوده است (Rubio et al., 2002). با این روش، می‌توان ترکیبات آلی فرار را قبل از وارد شدن به هوا از آب آلوده جداسازی کرد. در این تحقیق از روش عاری‌سازی با هوا برای حذف تولوین به عنوان یکی از ترکیبات فرار استفاده شده است. برای ارتقای عملکرد روش حذف بر خلاف روش‌های مرسوم عریان‌سازی بجای استفاده مستقیم از دمیدن هوا از اساس روش شناورسازی

با هوای محلول برای تولید حباب استفاده شد. همچنین، تأثیر برخی متغیرها مانند آثار فشار اشباع‌کننده، دبی ورودی آب اشباع به ستون حباب و نسبت دبی ورودی پساب و آب اشباع به ستون حباب مورد مطالعه قرار گرفت.

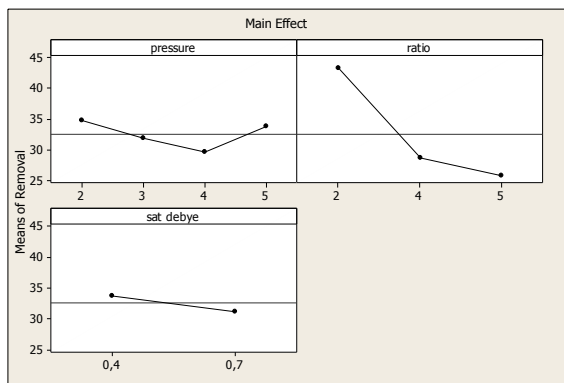
مواد و روش‌ها

پایلوت سیستم شناورسازی با هوای محلول برای حذف ترکیبات آلی فرار در دانشگاه صنعتی سهند ساخته شد و هدف آن حذف تولوین موجود در آب است. برای انجام آزمایش‌ها، از پساب سنتزی حاوی تولوین استفاده شد. تولوین مورد استفاده محصول پتروشیمی اصفهان بود. قسمت‌های اصلی پایلوت شامل اشباع‌کننده آب به ارتفاع ۸۰ و ۳۰ و قطر داخلی و خارجی ۱۹ و ۲۰ سانتی‌متر، ستون حباب اتمسفری شامل یک بخش تماس‌دهنده و یک بخش جداساز (Crossley & Mattew, 2006) که به ترتیب دارای ارتفاع ۸۰ و ۳۰ و قطر داخلی ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر و ستون کربن فعال با ارتفاع ۳۰ و قطر داخلی ۱۹ سانتی‌متر است. آب تحت فشار در اشباع‌ساز از هوا اشباع می‌شود و پس از عبور از شیر سوزنی وارد ستون حباب اتمسفری شده و به دلیل کاهش فشار ناگهانی حباب‌های ریز با قطر تقریبی ۱۰۰-۳۰ میکرون آزاد می‌شود (Rubio et al., 2002). در بخش تماس حباب‌های ریز حاصل از کاهش ناگهانی فشار، با مواد آلاینده برخورد و آلاینده توسط این حباب‌ها به بخش جداساز می‌رود. پس از آن تولوین از سطح آب، وارد هوا شده و سپس وارد ستون کربن فعال می‌شود. جهت بررسی و آنالیز در هر آزمایش، یک نمونه از پساب سنتزی و یک نمونه هم از پساب تصفیه شده (جریان خروجی محفظه بالای ستون حباب) برداشته شده و نمونه‌ها توسط کروماتوگرافی گازی مدل (Varian 3800) ساخت کشور هلند مورد آنالیز قرار گرفت. شکل (۱) نمای کلی فرایند شناورسازی با هوای محلول را نشان می‌دهد.

برای بررسی دقیق پارامترهای مؤثر در فرایند حذف از روش طراحی آزمایش با در نظر گرفتن کل فاکتورها (۴) و نرم‌افزار مینی‌ت‌ب (۵) برای تحلیل نتایج استفاده شد. در این روش، با استفاده از آنالیز واریانس می‌توان اثر پارامترها بر پاسخ را به دقت بررسی کرد (Montgomery, 1998). پارامترهای مورد نظر در این تحقیق عبارت از: فشار اشباع‌ساز، دبی ورودی آب اشباع و نسبت دبی پساب به آب اشباع بودند. جدول (۱) پارامترهای مورد



شکل (۱): نمای کلی پایلوت شناورسازی با هوای محلول



شکل (۲): تأثیر فاکتورهای اصلی بر پاسخ توسط نرم افزار مینی تب

جدول (۱): پارامترهای مورد بررسی برای سیستم حذف ترکیبات آلی فرار

ردیف	فاکتورها (پارامترهای تأثیر گذار)	تعداد سطح	مقادیر سطح
۱	فشار اشباع کننده (بار)	۴	۵ و ۴، ۳، ۲
۲	دبی ورودی آب اشباع به ستون حباب	۲	۰/۷ و ۰/۴
۳	نسبت پساب ورودی به آب اشباع (لیتر بر دقیقه)	۳	۵ و ۴، ۲

بررسی، تعداد سطوح و مقادیر هر سطر را نشان می‌دهد.

یافته‌ها

تأثیر عوامل اصلی فشار، دبی ورودی آب اشباع و نسبت دبی پساب به آب اشباع بر پاسخ (درصد حذف ترکیبات آلی) که توسط نرم افزار مینی تب ارایه شده در شکل (۲) مشاهده می‌شود. با توجه به این نتایج، در بازه‌هایی که نمودار شیب منفی دارد اثر کاهشی و برعکس در بازه‌های با شیب مثبت اثر افزایشی در میزان حذف برای پارامترها قابل مشاهده است.

اثر فشار اشباع‌ساز

با توجه به نتایج مربوط به شکل (۲)، اثر فشار اشباع‌کننده بر روی حذف ترکیبات آلی الگوی افزایش-کاهشی دارد. بدین ترتیب که با افزایش فشار از سطح ۱ به سطح ۳ (افزایش

فشار از ۲ تا ۴ بار) اثر کاهشی و برعکس با افزایش فشار از ۴ تا ۵ بار اثر افزایش در حذف مشاهده می‌شود. البته این تغییرات به نسبت شیب کمی دارند. و در شکل (۳-الف) به وضوح مشاهده می‌شوند. دلیل این امر را با توجه به روند آزمایش‌ها چنین می‌توان توجیه کرد که به دلیل دبی پایین ورودی آب به اشباع‌ساز و متغیر بودن فشار آب لوله‌کشی مورد استفاده تا کمتر از ۲ بار، در بسیاری موارد پمپ‌های آب بسیار گرم و انتقال حرارت از پمپ به آب داخل آن سبب گرم‌شدن آب ورودی به اشباع‌ساز می‌شد. با افزایش فشار به ۴ و ۵ بار این افزایش حرارت کاملاً اتفاق می‌افتاد. بنابراین، می‌توان انتظار داشت اگرچه فشار بالا رفته است اما افزایش دما باعث کاهش حلالیت گاز شده است. شکل (۲) مقدار حلالیت را بر اساس دما و فشار اشباع

اساس مطالعات پیشین، بالاترین مقدار حذف ترکیبات آلی فرار با روش شناورسازی با هوای محلول ۲۱٪ گزارش شده است. همچنین، درصدهای بالای حذف بدون نیاز به فعال‌کننده‌های سطحی در فشار ۲ و ۳ بار نسبت به سایر تحقیقات انجام گرفته مقداری قابل توجه است (Ferris & Rubio, 1999; Almuzaini et al., 1994; Ruben et al., 2009; سلطان محمدزاده و خازینی، ۱۳۸۳)

جدول (۲): غلظت هوای حل شده در آب اشباع بر اساس دما و فشار (James, 2010)

ردیف	فشار اشباع‌ساز (بار)	غلظت هوای حل شده در آب در حالت تعادل	۲۰ درجه سانتیگراد	۵ درجه سانتیگراد
۱	۴	۱۰۸	۱۴۴	
۲	۵	۱۳۰	۱۷۲	

دبی ورودی آب اشباع

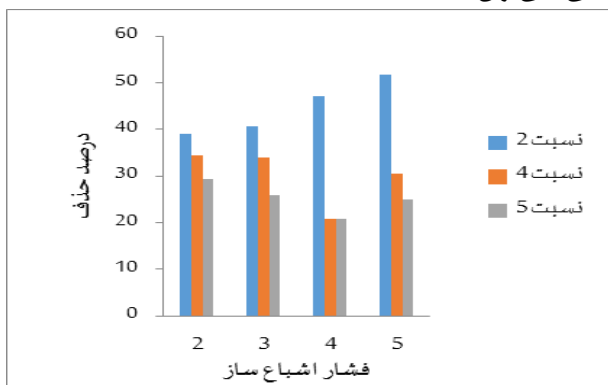
پارامتر دیگر که در بازده حذف تولوین مؤثر است، مقدار دبی ورودی آب اشباع به ستون حباب است. براساس نتایج قبلی (شکل ۲)، این تأثیر به صورت کاهشی است. با توجه به شیب کم خط می‌توان دریافت که این اثر از شدت کمتری برخوردار است. به عبارت دیگر، تغییر مقدار دبی آب اشباع از ۰/۴ به ۰/۷ لیتر بر دقیقه تغییر چشم‌گیری در افزایش و کاهش نخواهد داشت. در این حالت در رقابت بین زمان ماند و ورود حجم بالاتر حباب، به طور کلی کم شدن زمان ماند اثرگذارتر است.

همچنین، شکل (۳-ب) تأثیر نسبت دبی پساب به آب اشباع را بر روی درصد حذف تولوین نشان می‌دهد. چنانچه به ازای مقدار مشخصی از آب اشباع مقدار بیشتری از پساب وارد ستون اشباع‌ساز شود، در تمامی فشارهای ۲ تا ۵ بار سیر نزولی در درصد حذف مشاهده می‌شود. در این حالت، با افزایش دبی پساب دو پارامتر زمان ماند و انتقال جرم تحت تأثیر قرار گرفته است. با افزایش دبی پساب زمان ماند کمتر در ستون حباب وجود خواهد داشت. همچنین، درمقدار یکسان دبی آب اشباع با افزایش میزان پساب مقدار انتقال جرم هم کاهش خواهد یافت.

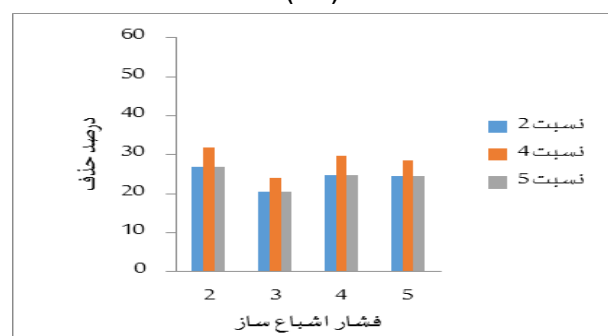
بررسی تأثیر متقابل پارامترها

جهت بررسی آثار انفرادی و متقابل پارامترهای اثرگذار بر فرایند نیاز است که مقادیر F و P مربوط به آنالیز واریانس به ترتیب

برای هوا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، حلالیت هوا در آب با دما کاهش یافته است. در دمای ۵°C و در فشار ۴ بار حلالیت بالاتری نسبت به فشار ۵ بار و دمای ۲۰°C خواهیم داشت (James, 2010). بنابراین، در شرایط متفاوت تنها با افزایش فشار نمی‌توان بازده را بالا برد و باید به دما هم توجه داشت. بازده اشباع‌ساز عامل مهم در بازده حذف تولوین است. (جدول ۲) اشباع‌ساز مورد استفاده در این پایلوت از نوع غیر پر شده است که بازدهی کمتری خواهد داشت. در این نوع اشباع‌ساز تا رسیدن به حالت تعادل و دستیابی به حلالیت مورد نظر در فشار خاص، زمان بسیار زیادی و در حدود ۴ ساعت لازم است، اگرچه پس از گذشت این زمان نیز برای رسیدن به تعادل، نظر قطعی نمی‌توان داد (Haarhoff, 1996; Rees et al., 1979).



(الف)



(ب)

شکل (۳): تأثیر فشار اشباع‌ساز بر درصد حذف. (الف) دبی آب اشباع ۰/۴ لیتر بر دقیقه. (ب) دبی آب اشباع ۰/۷ لیتر بر دقیقه نسبت دبی پساب به آب اشباع

با توجه به دلایل ذکر شده نمی‌توان تأثیر فشار بر حذف تولوین را به روشنی بیان کرد. اما، مقدار حذف ۵۲٪ در فشار ۵ بار به نسبت قابل توجه بوده و پیش‌بینی می‌شود در صورت کنترل دقیق تمامی شرایط عملیاتی بازده حذف بیشتری به دست آید. بر

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از روش عریان‌سازی با هوا برای حذف ترکیبات آلی از پساب استفاده شد. برای ارتقای عملکرد حذف از اساس روش شناورسازی با هوای محلول برای تولید ریز حباب‌ها و افزایش میزان ورود تولوین موجود در پساب به حباب هوا استفاده شد. از پارامترهای مؤثر در فرایند، اثر فشار اشباع‌ساز، دبی آب اشباع ورودی به ستون حباب و نسبت دبی پساب به آب اشباع بر روی درصد حذف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد: از فشار ۲ تا ۴ بار یک سیر نزولی و با شیب کم برای حذف تولوین وجود دارد. از فشار ۴ تا ۵ بار این سیر صعودی می‌شود. اثر افزایش نسبت پساب یک سیر نزولی در حذف تولوین را نشان می‌دهد. این مقدار از نسبت ۲ تا ۴ شیب تند و از ۴ تا ۵ شیب نزولی کندتری دارد. افزایش دبی آب اشباع ورودی به ستون حباب دارای دو اثر متقابل کاهش زمان ماند و افزایش مقدار حباب است که در تحلیل کلی داده‌ها یک سیر نزولی مشاهده می‌شود. در این حالت، با توجه به سطوح در نظر گرفته شده مقدار تفاوت زیاد نبود. نتایج این تحقیق نشان داد روش مورد استفاده از دید عملی قابل قبول بوده و با استفاده از بهینه‌سازی متغیرهای مؤثر در فرایند می‌توان به درصد حذف بالایی از میزان آلاینده‌های آلی فرار دست یافت. در این تحقیق، مقدار حذف ۵۲٪ در فشار ۵ بار به عنوان بالاترین میزان حذف برای تولوین مشاهده شد که قابل مقایسه با نتایج به‌دست آمده در سایر تحقیقات است.

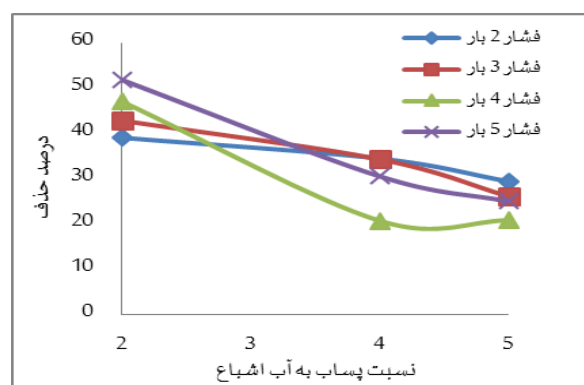
تقدیر و تشکر

از مسوولین محترم پژوهشکده محیط‌زیست، آب و توسعه پایدار و مرکز تحقیقات کاتالیست و راکتور دانشگاه صنعتی سهند همچنین مسوولین محترم آزمایشگاه مرکزی پتروشیمی تبریز صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

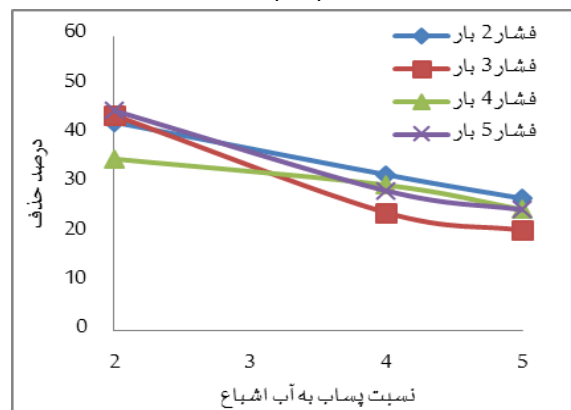
یادداشت‌ها

1. Volatile organic compound
2. Process and equipment modification
3. Add on control techniques
4. Full Factorial design
5. Minitab

برای هر اثر در دست باشد. مقدار F و P ستون‌های تشکیل‌دهنده جدول آنالیز واریانس هستند (Montgomery, 1998). بنابراین، با تشکیل جدول مربوط به آنالیز واریانس، می‌توان به تحلیل نتایج پرداخت اگر مقادیر P در محاسبات واریانس از عدد 0.05 کوچک‌تر باشد بدین معنی است که پارامتر عامل مؤثر بر پاسخ خواهد بود (Wu et al., 2010). در جدول (۳) آنالیز واریانس داده‌ها نشان داده شده است. بر اساس نتایج برای تمامی پارامترها مقادیر P از حد معین کوچک‌تر است و تمامی عوامل بر پاسخ اثرگذار می‌باشد. بنابراین، با مقایسه F به ترتیب، پارامترهای نسبت دبی پساب ورودی بر دبی ورودی آب اشباع به ستون حباب، دبی ورودی آب اشباع به ستون حباب، فشار اشباع‌ساز و تأثیر متقابل دوتایی و سه‌تایی فشار اشباع‌ساز* دبی ورودی آب اشباع به ستون حباب* نسبت دبی پساب به آب اشباع، فشار* نسبت دبی پساب به آب اشباع، نسبت دبی پساب به آب اشباع* دبی ورودی آب اشباع به ستون حباب، فشار اشباع‌ساز* دبی ورودی آب اشباع به ستون حباب* نسبت دبی پساب به آب اشباع* دبی ورودی آب اشباع به ستون حباب اثرگذار هستند.



(الف)



(ب)

شکل (۴): تأثیر نسبت بر درصد حذف (الف) دبی آب اشباع 0.7 لیتر بر دقیقه. (ب) دبی آب اشباع 0.7 لیتر بر دقیقه

جدول (۳): آنالیز واریانس داده‌های مربوط به آزمایشات

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
فشار اشباع ساز	۳	۱۸۲/۴۲	۶۰/۸۱	۵۳/۰۷	۰/۰۰
نسبت دبی پساب به آب اشباع	۲	۲۸۱۸/۱۷	۱۴۰۹/۰۸	۱۲۲۹/۷۵	۰/۰۰
دبی ورودی اشباع ساز به ستون حباب	۱	۷۵/۰۰	۷۵/۰۰	۶۵/۴۵	۰/۰۰
فشار* نسبت دبی پساب به آب اشباع	۶	۲۲۱/۳۳	۳۶/۸۹	۳۲/۱۹	۰/۰۰
فشار اشباع‌ساز* دبی ورودی آب اشباع	۳	۵۳/۸۳	۱۷/۹۴	۱۵/۶۶	۰/۰۰
نسبت دبی پساب به آب اشباع* دبی آب اشباع	۲	۳۸/۰۰	۱۹/۰۰	۱۶/۵۸	۰/۰۰
فشار اشباع‌ساز* دبی آب اشباع* نسبت دبی‌ها	۶	۳۳۱/۱۷	۵۵/۱۹	۴۸/۱۷	۰/۰۰
R ²					۰/۹۸

فهرست منابع

سلطان‌محمدزاده، ج. و خازینی، ل. ۱۳۸۳. بازده حذف بنزن در پساب‌های پتروشیمی با فلوتاسیون با هوای محلول؛ نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، تهران

AL-Muzaini, S.; Khordagui, H. & Hamoudo, M. F. 1994. Removal of VOC's From Refinery and Petrochemical Wastewater Using DAF. *Water Science and Technology*, 30 (3): pp 79-90

Crossley, I. & Matthew, T. 2006. A review of the technological developments of dissolved air flotation. *Water Supply*, 55: pp 479-491.

Feris, L.A. & Rubio, J. 1999. Dissolved air flotation performance at low saturation pressure. *Filtration and Separation*, 36(9): pp 61-65.

Haarhoff, J. 1996. A model for the prediction of the air composition in pressure saturators. *Water Research*, 30: pp 3074-3082.

James, K.E. 2010. Dissolved air flotation and me. *Water Research*, 44(7): pp 2077-2106.

Khan, F.I. & Ghoshal, A.K. 2000. Removal of volatile organic compounds from polluted air. *Loss Prevention in Process Industries*, 13: pp 527-545.

Liotta, L.F. 2010. Catalytic oxidation of volatile organic compounds on supported noble metals. *Applied Catalysis B: Environmental*; 100(3-4): pp 403-412.

Montgomery, D. 1998. *Design and analysis of experiments*. 5 ed. Jhon wiley

Ozturk, B. & Yilmaz, D. 2006. Absorptive removal of volatile organic compounds from flue gas streams. *Process Safety and Environmental Protection*, 84: pp 391-398.

Rees, A.J.; Rodman D.J. & Zabel, T.F. 1979. *Water clarification by flotation*. Water Research Centre, Medmenham, U.K.

Ruben, M.; Carlos. N. & Angeles, B. 2009. Internal treatment of process waters in paper production by dissolved air flotation with newly developed chemicals laboratory tests. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48: pp 2199-2205

Rubio, J.; Souza, M.L. & Smith R.W. 2002. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering*, 15: pp 139-155.

United State Environmental Protection Agency. 2012. An introduction to indoor air quality (IAQ) volatile organic compounds (VOCS). [Cite Oct 25th] available from <http://www.epa.gov/iaq/voc.html>

Wu, H.; Feng, T. & Chung, T.W. 2010. Studies of VOCs removed from packed-bed absorber by experimental design methodology and analysis of variance. *Chemical Engineering Journal*, 157(1): pp 1-17.