



سال ششم، شماره ۲۲
بهار ۱۳۹۴، صفحات ۱۲-۵

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

تأثیر قطر راکتور ازون - سونولیز و ارتفاع مایع در تخریب فنول تحت سونولیز ۲۴ کیلوهرتز

یاسر نظافت ملکی

گروه شیمی کاربردی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

عزیز شهریسا*

گروه شیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(دریافت مقاله فروردین ۱۳۹۴ و تایید خرداد ۱۳۹۴)

چکیده

در این تحقیق، تأثیر قطر راکتور و ارتفاع مایع در تخریب فنول در راکتور ازون-سونولیز ۲۴ کیلوهرتز با ازون بررسی شد. در کار تحقیقاتی انجام شده حذف فنول با استفاده از فرآیندهای ازونولیز-سونولیز و فرآیندهای ترکیبی ازونولیز-سونولیز مورد بررسی قرار گرفت. در فرآیند حذف ازونولیز و سونولیز در قطر و ارتفاع متفاوت انجام گرفته و سرعت حذف فنول با استفاده از اندازه گیری غلظت به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر اثر بخشی بیش تر ازونولیز نسبت به سونولیز بوده و هم چنین با افزایش دبی و شدت فرآیندهای مذکور شدت حذف فنول افزایش می یابد. شرایط بهینه حاصل در هر یک از روش های فوق در شرایط ترکیبی استفاده شد. نتایج به دست آمده دلالت بر افزایش راندمان ۳۰ درصدی در حذف فنول در فرآیند ترکیبی نسبت به فرآیند منفرد سونولیز دارد.

کلیدواژه: ازون، سونولیز، فنول، تخریب، کوپل ازون سونولیز

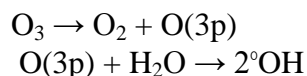
مقدمه

پساب‌های فنولی صنایع مختلف که در طبیعت رهاسازی می‌شوند اثرات زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری در طبیعت ایجاد می‌کنند بنابراین حذف و از بین بردن سمیت این مواد چالش بزرگی برای محققان ایجاد کرده است. بنابراین برای دست یافتن به این مهم یک روش سریع و با بازدهی بالا نیازمند است. فرآیند ازونولیز کوپل شده با سونولیز علاوه بر افزایش توان اکسایشی، باعث کاهش زمان واکنش و در نتیجه افزایش درصد تخریب ترکیبات سمی موجود در پساب می‌شود. در کار پژوهشی اخیر برای دست یافتن به نتایج مطلوب پارامترهای ذیل مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- ۱- بررسی کارایی روش ازوناسیون ترکیب شده با سونولیز در حذف فنول و مقایسه آن با روش‌های ازوناسیون و سونولیز به تنهایی.
- ۲- بررسی تأثیر ارتفاع راکتور بر واکنش حذف فنول در روش ازوناسیون ترکیب شده با سونولیز.
- ۳- بررسی تأثیر قطر راکتور بر واکنش حذف فنول در روش ازوناسیون ترکیب شده با سونولیز.
- ۴- بررسی چگونگی تأثیر pH بر واکنش حذف فنول در روش ازوناسیون ترکیب شده با سونولیز.
- ۵- بررسی تأثیر دز ازون تزریقی بر واکنش حذف فنول در روش ازوناسیون ترکیب شده با سونولیز.
- ۶- بررسی تأثیر قدرت امواج فراصوتی ورودی بر کارایی حذف فنول با روش ازوناسیون ترکیب شده با سونولیز.

۷- بررسی تأثیر غلظت اولیه فنول بر کیفیت حذف انجام شده با روش ازوناسیون ترکیب شده با سونولیز.
فنل یا هیدروکسی بنزن یکی از هیدروکربن‌های آروماتیک سمی است. این ماده و مشتقات آن در صنایع متعددی از جمله ساخت رزین، پلاستیک، چسب، لاستیک، فولاد، آلومینیوم، کاغذ، صنعت چوب، سموم حشره‌کش، قارچ‌کش، علف‌کش و صنایع مختلف دیگری دارد و از طریق دفع غیر-

بهداشتی فاضلاب صنایع مذکور باعث آلودگی محیط‌زیست و به خصوص منابع آب می‌شود. این ماده و دیگر ترکیبات آروماتیک از آلاینده‌های متداول پساب‌ها در صنایع شیمیایی هستند. بنابه پایداری حلقه آروماتیک، حذف آن‌ها مشکل بوده و شرایط ویژه‌ای را طلب می‌کند. برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی فنل روش‌های مرسوم شیمیایی و بیولوژیکی مقاوم هستند و لذا روش‌های اکسیداسیون پیشرفته اخیرا به عنوان گزینه ایمن اسب برای تصفیه پساب‌های این مواد مطرح شده است [۱]. این روش‌ها مبتنی بر تولید رادیکال‌های هیدروکسیل با واکنش‌پذیری بالا است. تعدادی از روش‌های اکسیداسیون پیش رفته مانند ازوناسیون، پروکسید، پلاسمای غیرحرارتی، O_3/H_2O_2 ، O_3/UV ، $UV/O_3/H_2O_2$ برای تصفیه پساب‌های صنعتی مطالعه شده است [۲]، [۳]، [۴]، [۵].
اوزوناسیون ترکیب شده با سونولیز نیز یکی از روش‌های مطمئن در تصفیه پساب‌های صنعتی است [۶]، [۷]. در این روش امواج صوتی در محدوده‌ی بالای شنوایی حباب‌های کاویتاسیونی تولید می‌کنند که شکافت آن‌ها دما و فشار زیادی تولید می‌کند. حین فروپاشی بخار آب و گاز محبوس در داخل حباب به رادیکال‌های زیادی از جمله هیدروکسیل تبدیل می‌شود [۵]. هنگامی که اوزون به سیستم سونولیز اضافه می‌شود، پرتوافکنی التراسونیک انتقال جرم و حلالیت اوزون را افزایش داده و از طریق واکنش‌های زیر باعث تولید OH اضافی می‌شود:



انرژی صوتی، به صورت مستقیم یا به طور مستقیم از طریق مبدل به یک سیستم راکتور سونوشیمیایی اعمال می‌شود که به طور موثر کاویتاسیون‌های صوتی ایجاد کرده و رادیکال‌های آزاد برای تجزیه آلاینده‌ها تولید می‌کند. با این حال برای تقویت عملکرد کلی، انتقال حداکثر مقدار انرژی صوتی به محیط واکنش از حائز اهمیت است. اصلی‌ترین مانع در انتقال انرژی عدم تطابق امپدانس صوتی بین مبدل و مایع است. برای این مسئله عوامل زیادی از جمله جنس راکتور،

نیتر و بوتیل فنول نمی باشد و درصد بسیار کمی از تخریب را به همراه دارد. استفاده از امواج فرابنفش نیز به تنهایی قادر به تخریب آلاینده دی نیتر و بوتیل نمی باشد و درصد بسیار کمی از تخریب را به همراه دارد. افزایش غلظت پراکسید هیدروژن نیز میزان درصد تخریب در محلول را افزایش می دهد. اما بعد از مقدار بهینه آب اکسیژنه که برابر با ۲/۳ میلی لیتر در نمونه آزمایش بود به علت افزایش بیش از حد رادیکال های هیدروکسیل و پدیده جاروب^۲ مقدار تخریب کاهش یافت. او مشاهده کرد که افزایش نانو ذرات دی اکسید تیتانیم نیز میزان تخریب آلاینده دی نیتر و بوتیل را در روش های تلفیقی افزایش می دهد. می توان گفت که دی اکسید تیتانیم بیش تر در روش تلفیقی استفاده از التراسونیک - فرابنفش - پراکسید هیدروژن و دی اکسید تیتانیم ایفای نقش می کند و زمان تخریب را به میزان بسیار بالا افزایش می دهد. نمودار TOC^۱ نیز برای روش تلفیقی استفاده از التراسونیک - فرابنفش - نانو ذرات دی اکسید تیتانیم و پراکسید هیدروژن در حذف ترکیبات آلی و معدنی کردن این ترکیبات و تبدیل آن ها به ترکیبات غیر مضر موفقیت بسیار بالایی را نشان داد. طبق یافته های او بالاترین میزان تخریب در pH برابر ۶/۵ به دست آمد که در واقع pH خود محلول بود. هم چنین در بررسی اثر امواج فراصوت نتایج نشان داد که با افزایش قدرت امواج فراصوت میزان تخریب این آلاینده نیز افزایش پیدا می - کند [۲۰].

بعد از مقدار بهینه آب اکسیژنه که برابر با ۲/۳ میلی لیتر در نمونه آزمایش بود به علت افزایش بیش از حد رادیکال های هیدروکسیل و پدیده جاروب (Sweeping) مقدار تخریب کاهش یافت.

فرکانس مدولاسیون مبدل، ارتفاع مایع، نوع اعمال فراصوت (مستقیم یا غیرمستقیم)، دمای کاری و حالت فیزیکی و شیمیایی آلاینده ها تأثیر می گذارند. در مورد راکتورهای سونوشیمیایی آزمایشگاهی از روش اعمال غیر مستقیم ذرات استفاده می شود. در این روش مبدل در داخل آب فروبرده می شود. در این حالت قطر راکتور و ارتفاع مایع متغیر است. بنابراین برای رسیدن به عملکرد بهینه مطالعات در زمینه راندمان واکنش در شرایط واکنش، شرایط قطر و ارتفاع مایع بسیار مهم است. از این رو در این تحقیق سعی می شود عمل کرد راکتور شیمیایی را با در نظر گرفتن تغییرات قطر راکتور و ارتفاع مایع برای تخریب فنول بررسی شود. هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای ترکیباتی شامل دو یا چند حلقه ای آروماتیک متصل هستند. این ها به صورت ایزومرهای مختلفی یافت می شوند [۸]، [۹]. این ترکیبات در محیط اغلب به صورت مخلوط های پیچیده ای حضور دارند و به صورت منفرد نبوده و از این جهت آلاینده با قدرت پایداری بالا می باشند [۱۰]، [۱۱]. این ترکیبات قابلیت آلوده سازی محیط زیست را دارا می باشند. حتی این ها در مقابل تجزیه بیولوژیکی مقاوم بوده و تنها به مقدار جزئی تحت فرآیند بیولوژیکی حذف می کردند. فنول یا هیدروکسی بنزن یکی از مهم ترین ترکیبات آروماتیک قابل یافت و نشت در صنعت پالایش و پتروشیمی بوده که قابل انتشار ناخواسته در محیط تولید نیز می باشد.

علیخانی در سال ۲۰۱۱ به مطالعه تخریب سونوفتوکاتالستی ریز آلاینده دی نیتر و بوتیل فنول در حضور پراکسید هیدروژن از پساب پرداخت [۲۰]. نتایج حاصله نشان داد که استفاده از روش تلفیقی التراسونیک - نانو ذرات دی اکسید تیتانیم - پرتوهای فرابنفش و پراکسید هیدروژن راندمان را به ۹۹/۴ درصد افزایش داده و این به این معنی است که این روش تلفیقی در افزایش راندمان تخریب و کاهش زمان تخریب بسیار موثر بوده است. هم چنین گزارش کرد که فرآیند التراسونیک به تنهایی قادر به تخریب آلاینده دی

^۱Total Organic Carbon

^۲ Sweeping

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده

از مواد نوع آزمایشگاهی مرکب جهت فنول و نیز تنظیم شرایط شیمیایی استفاده شده است. جهت تهیه نمونه‌ها و محلول‌ها از آب مقطر دو بار تقطیر شده استفاده گردید.

تجهیزات مورد استفاده

دستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲

آورده شده است.

جدول ۲: تجهیزات به کار رفته در انجام این تحقیق

نوع دستگاه	مدل	تولید کننده
اسپکتروفتومتر ^۱	DR5000-15V	HACH (آمریکا)
اکسیژن‌ساز	Oxy600	Bitmos GmbH (آلمان)
ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱	PCB100-3	KERN PCB (آلمان)
pH سنج	WTW-3110	آلمان
ژنراتور تولید ازون	LAB 802	شرکت دونالی (ایران)
سانتری فوژ	CE0148	شیمی فان (ایران)
هم‌زن مغناطیسی	ZMS74	زاگ شیمی (ایران)

روش کار آزمایش با استفاده از دستگاه

ازونژنراتور و اکسیژن ساز

کلیه آزمایشات در بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری انجام گرفت. بدین صورت که جهت انجام آزمایشات ۲۵۰ میلی‌لیتر از محلول ۵۰ mg/L فنول را تهیه کرده و درحالی که مگنتی داخل محلول بود و هم‌زن مغناطیسی همراه با دیفیوزر (جهت همگن کردن) آن را به حرکت درآوردیم، تحت ازوناسیون قرار دادیم.

روش کار آزمایش با استفاده از دستگاه التراسونیک

در روش کار آزمایش‌های با استفاده از دستگاه التراسونیک همه این آزمایش‌ها پس از تهیه محلول ۵۰ mg/l، بشر حاوی محلول در داخل آب یخ قرارداد شده و از افزایش شدید دمای محلول در دقایق اولیه آزمایش جلوگیری شد. سپس بشر حاوی محلول همراه با ظرف حاوی یخ در دستگاه التراسونیک قرار داده شد. از اولین لحظه شروع کار دستگاه، دمای محلول به وسیله دماسنج کنترل شده و در طول آزمایش -ها دمای محلول با افزودن یخ کنترل شد. لازم به ذکر است چون در این آزمایش‌ها خود دستگاه کار هم زدن محلول را انجام می‌داد نیازی به استفاده از هم زن مغناطیسی نبود.

روش استفاده از دستگاه‌ها زون و التراسونیک (کوپل)

در آزمایشات بعد اثر تلفیقی فنول با امواج التراسونیک، ازون در حضور محلول‌های آبی مورد بررسی قرار گرفت. در این روش با استفاده از دستگاه التراسونیک و ازون، بشر حاوی محلول داخل ظرف یخ قرارداد شده و از اولین لحظه شروع کار دستگاه، دمای محلول بوسیله دماسنج در دمای ۲۵°C کنترل شد و از افزایش شدید دمای محلول در دقایق اولیه آزمایش جلوگیری شد. مدت آزمایش‌ها که معمولاً ۳۰ دقیقه طول کشید در زمان‌های ۳، ۶، ۹ و ... ۳۰ دقیقه نمونه برداری انجام شد. در این دسته از آزمایش‌ها محلول به وسیله سرنگ برداشته و توسط اسپکتروفتومتر UV-Vis جذب آنها اندازه گیری شد. لازم به ذکر است چون در این آزمایش‌ها خود دستگاه کار هم زدن محلول را انجام می‌داد نیازی به استفاده از هم‌زن مغناطیسی نبود.

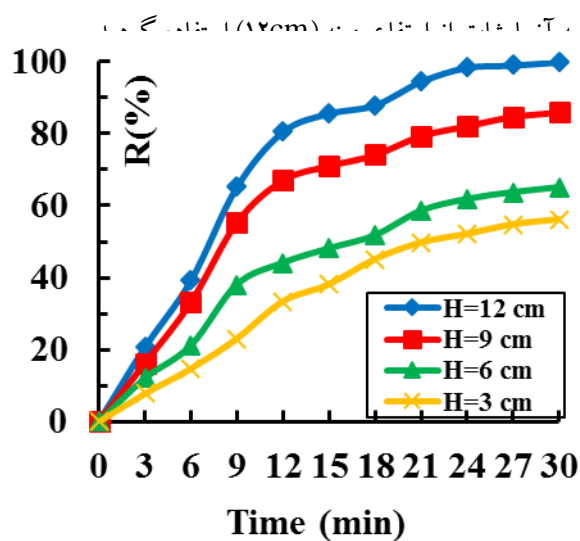
یافته‌ها

انتخاب نوع فرآیند مناسب در میزان حذف آلاینده بسیار حائز اهمیت است. به همین خاطر، انواع فرآیند تحت شرایط آزمایش قرار گرفت. مقدار متوسط pH اولیه نمونه‌های مزبور

^۱Spectrophotometer

^۲Generator

با توجه به شکل ۲ می‌توان دریافت هنگامی که ارتفاع از ۳ به ۱۲ تغییر می‌یابد، یک اثر افزایشی در حذف مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت در سیستم‌های ازوناسیون/سونولیز، ارتفاع معمولاً در سرعت حذف اثر مثبت دارد. دلیل این امر این است که هر چه ارتفاع ظرف بیشتر می‌شود سبب پایداری و ماندگاری بیشتر ازون در محلول شده و درصد تخریب را بالاتر می‌برد [۱۶]، [۱۷]. به همین دلیل در

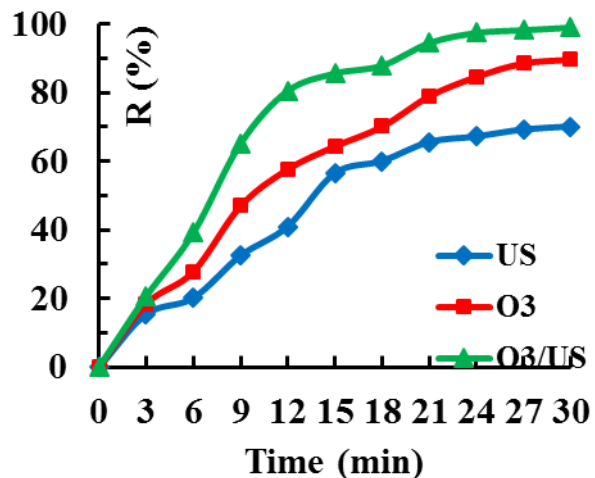


شکل ۲: تأثیر ارتفاع راکتور بر روی میزان حذف فنول درصد حذف فنول. شرایط: pH=۱۱، جریان گاز حاوی ازون با دبی ۵L/min استفاده شده، فرآیند تلفیقی O₃/US، قطر راکتور ۶cm، میزان التراسونیک، ۲۴KHz.

در این مطالعه، محلولی با غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر، در قطرهای ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ تحت شرایط آزمایش قرار گرفت. جریان گاز حاوی ازون با دبی ۵L/min، به سیستم تزریق شد. فرآیندی که برای بررسی این پارامتر استفاده شده است، فرآیند تلفیقی O₃/US بوده است. ارتفاع راکتور ۱۲cm و شدت التراسونیک، ۴۰۰W در نظر گرفته شد. مدت زمان فرآیند ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد که در طول این مدت، طی بازه‌های زمانی مختلف نمونه برداری انجام گرفت.

با توجه به شکل ۴ می‌توان دریافت هنگامی که قطر راکتور از ۶ به ۱۲ تغییر می‌یابد، یک اثر افزایشی در حذف مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت در سیستم‌های

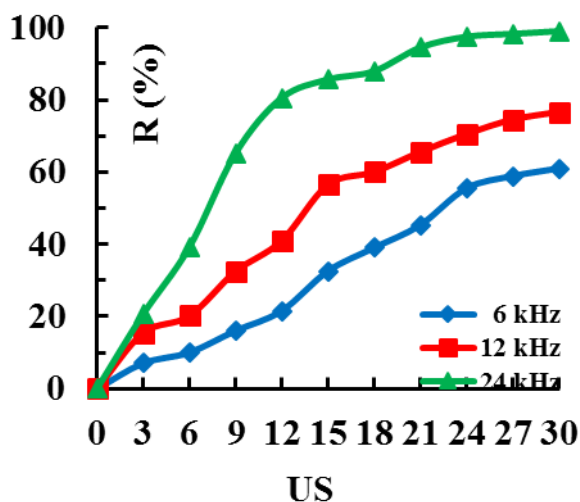
در حدود ۱۱ بوده است. غلظت فنول، ۵۰mg/L انتخاب شد. جریان گاز حاوی ازون با دبی ۵L/min، به سیستم تزریق شد. شدت التراسونیک، ۲۴KHz در نظر گرفته شد. ارتفاع راکتور، ۱۲cm و قطر راکتور ۶cm در نظر گرفته شد. مدت زمان فرآیند ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد که در طول این مدت، طی بازه‌های زمانی مختلف نمونه برداری انجام گرفت.



شکل ۱: تغییرات انواع فرآیندها به صورت تابعی از زمان واکنش بر حسب درصد حذف فنول. مقدار pH اولیه در حدود ۱۱، غلظت فنول، ۵۰mg/L، ارتفاع راکتور ۱۲cm و قطر راکتور ۶cm، جریان گاز حاوی ازون با دبی ۵L/min، شدت التراسونیک، ۲۴KHz.

در این قسمت، محلولی با غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر، در ارتفاع‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ سانتی متر تحت شرایط آزمایش قرار گرفت. جریان گاز حاوی ازون با دبی ۵L/min، به سیستم تزریق شد. فرآیندی که برای بررسی این پارامتر استفاده شده است، فرآیند تلفیقی O₃/US بوده است. قطر راکتور ۶cm و شدت التراسونیک، ۲۴KHz در نظر گرفته شد. مدت زمان فرآیند ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد که در طول این مدت، طی بازه‌های زمانی مختلف نمونه برداری انجام گرفت. در شکل ۱ سه نوع فرآیند اکسیداسیون پیشرفته (سونولیز، ازوناسیون، سونولیز-ازوناسیون) در PH یکسان مقایسه شده است.

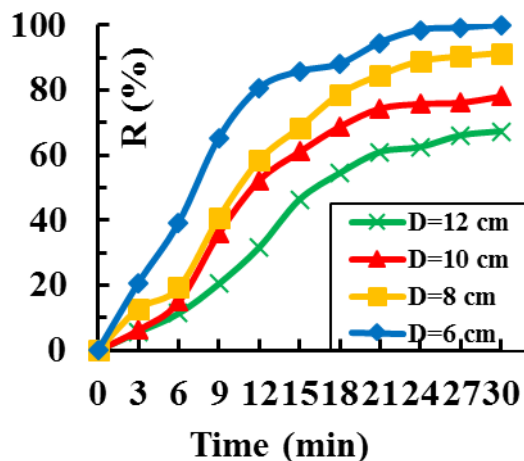
نظر می‌رسد حداکثر حذف محلول، در مدت ۳۰ دقیقه، برای شدت التراسونیک ۱۲۴KHz اتفاق می‌افتد. دلیل این است که در شرایط عملیاتی یکسان، هرچه شدت التراسونیک افزایش می‌یابد، میزان تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و در کنار آن، سرعت حذف محلول را افزایش می‌دهد. به عبارتی سرعت حذف ماده در آزمایش‌هایی با شرایط یکسان و با میزان بالاتر، در مقایسه با شدت التراسونیک پایین‌تر بیشتر می‌باشد [۱۴]، [۱۵]. به عبارت دیگر، طبق معادله به دست آمده هر چه قدر قدر شدت التراسونیک بیشتر باشد، میزان تولید رادیکال هیدروکسیل نیز بیشتر شده و در نتیجه راندمان حذف محلول نیز افزایش می‌یابد [۱۶].



شکل ۴: تأثیر شدت التراسونیک بر روی میزان حذف درصد حذف فنول. مقدار متوسط pH اولیه نمونه‌ها هم‌بزرگ بود در حدود ۱۱، غلظت فنول، ۵۰ mg/L، جریان گاز حاوی ازون‌بادی ۵ L/min، ارتفاع راکتور ۱۲ cm و قطر راکتور ۶ cm، فرآیند یکپارچه استفاده شد. فرآیند تلفیقی O₃/US.

شکل ۵ نیز راندمان حذف فنول را در مدت زمان ۳۰ دقیقه در شدت التراسونیک مختلف توسط فرآیند تلفیقی O₃/US نشان می‌دهد.

ازوناسیون/سونولیز، قطر راکتور معمولاً در سرعت حذف اثر منفی دارد. دلیل این امر این است که در ارتفاع ثابت، هر چه قطر ظرف بیشتر می‌شود، حجم محلول بیشتر شده و به دلیل ثابت بودن میزان دبی ازون و شدت التراسونیک، مقدار کم‌تری از فنول توسط رادیکال‌های هیدروکسیل حذف می‌شوند و در نتیجه درصد تخریب کاهش می‌یابد [۱۸]، [۱۹]. به همین دلیل در بقیه آزمایشات از قطر بهینه (۶ cm) استفاده گردید.



شکل ۳: تأثیر قطر راکتور بر روی میزان حذف درصد حذف فنول.

pH=۱۱، جریان گاز حاوی ازون‌بادی ۵ L/min،

فرآیند یکپارچه استفاده شد. فرآیند تلفیقی O₃/US، ارتفاع ۱۲ cm و میزان التراسونیک، ۲۴ KHz.

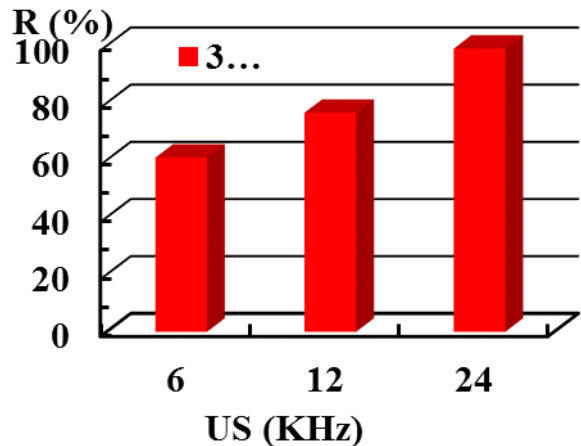
در این مطالعه، شدت التراسونیک نیز تحت شرایط آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. مقدار متوسط pH اولیه نمونه‌های مزبور در حدود ۱۱ بوده است. غلظت فنول، ۵۰ mg/L انتخاب شد. جریان گاز حاوی ازون با دبی ۵ L/min به سیستم تزریق شد. فرآیندی که برای بررسی این پارامتر استفاده شده است، فرآیند تلفیقی O₃/US بوده است. ارتفاع راکتور، ۱۲ cm و قطر راکتور ۶ cm در نظر گرفته شد. مدت زمان فرآیند ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد که در طول این مدت، طی بازه‌های زمانی مختلف نمونه‌برداری انجام گرفت. همان‌طور که از نمودار شکل ۴ ملاحظه می‌شود، با افزایش شدت التراسونیک، به دلیل آن که میزان تولید رادیکال در یک زمان ثابت افزایش می‌یابد، میزان بیشتری از فنول تخریب می‌گردد [۱۲]، [۱۳]. در مورد آزمایش‌های مربوط به شدت التراسونیک ۶، ۱۲ و ۲۴ KHz، به

پیدا می‌کند، مشخص شد که قدرت امواج التراسونیک تأثیر بسزایی در فرآیند تخریب داشت.

❖ مشاهده شد که بالا ترین میزان تخریب در pH برابر ۱۱ به دست می‌آید (شرایط شیمیایی قلیایی).

منابع

- [1] Fang, Herbert H.P., 1997, and On-Chim Chan, Toxicity of phenol towards anaerobic biogranules., *Water research*, 31.9: 2229-2242.
- [2] Berlan, J., et al, 1994, Oxidative degradation of phenol in aqueous media using ultrasound., *Ultrasonics Sonochemistry*, 1.2 (1994): S97-S102.
- [3] He, Zhiqiao, et al., 2008, Mineralization of CI Reactive Blue 19 by ozonation combined with sonolysis: performance optimization and degradation mechanism., *Separation and Purification Technology*, 62.2: 376-381.
- [4] Esplugas, Santiago, et al, 2002, Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation., *Water Research*, 36.4, 1034-1042.
- [5] Khadhraoui, M., et al., 2009, Discoloration and detoxification of a Congo Red dye solution by means of ozone treatment for a possible water reuse., *Journal of hazardous materials*, 161.2: 974-981.
- [6] He, Zhiqiao., et al., 2007, CI Reactive Black 5 decolorization by combined sonolysis and ozonation., *Ultrasonics Sonochemistry*, 14.3: 298-304.
- [7] Thangavadivel, Kandasamy, et al, 2013, Influence of sonochemical reactor diameter and liquid height on methyl orange degradation under 200kHz indirect sonication., *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1.3: 275-280.
- [8] Arslan, I., Balcioğlu, I. A., Bahnemann, D. W., 2000, Advanced chemical oxidation of reactive dyes in simulated dyehouse effluents by ferrioxalate-Fenton/UV-A and TiO₂/UV-A processes., *Dyes Pigments*, 47: 207-218.
- [9] Zhou, M., He J., 2007, Degradation of azo dye by three clean advanced oxidation processes: wet oxidation, electrochemical oxidation and wet electrochemical oxidation: a comparative study., *Electrochim. Acta.*, 53: 1902-1910.
- [10] Zylla, R., Sojka-Ledakowicz J., Stelmach, E., Ledakowicz, S., 2006, Coupling of membrane filtration with biological methods for textile wastewater treatment., *Desalination*, 198: 316-325.
- [11] Plum, A., Braun, G., Rehorek, A., 2003, Process monitoring of anaerobic azo dye degradation by high-performance liquid chromatography-diode array detection continuously coupled to membrane filtration sampling modules., *J. Chromatogr., A*, 987: 395-4
- [12] Guinea, E., Arias, C., Cabot, P. L., Garrido J. A., Rodríguez, R. M., Centellas, F., Brillas E., 2008, Mineralization of salicylic acid in acidic aqueous medium by electrochemical advanced oxidation processes using platinum and boron-doped diamond as anode and cathodically generated hydrogen peroxide., *Water Res.*, 42: 499-511.
- [13] Zhang, G., Yang, F., Gao, M., Fang, X., Liu, L., 2008, Electro-Fenton degradation of azo dye using polypyrrole/anthraquinonedisulphonate composite film modified graphite cathode in acidic aqueous solutions., *Electrochim. Acta*, 53: 5155-5161.
- [14] Liu, H., Wang, C., Li X., Xuan, X., Jiang, C., Cui, H. N., 2007, A novel electro-Fenton process for water treatment: reaction-controlled pH adjustment and performance assessment., *Environ. Sci. Technol.*, 41: 2937-2942.
- [15] Martinez, S. S., Bahena, C. L., 2009, Chlorbromuron urea herbicide removal by electro-Fenton reaction in aqueous effluents, *Water Res.*, 43: 33-40.



شکل (۵): راندمان حذف فنول بر حسب تغییرات مقادیر مختلف

التراسونیک غلظت فنول، ۵۰ mg/L، مقدار pH

اولیه در حدود ۱۱، فرآیند تلفیقی O₃/US، ارتفاع راکتور ۱۲ cm و قطر راکتور ۶ cm، جریان گاز حاوی ازون بادبی ۵ L/min.

بحث و نتیجه گیری

- ❖ در این مطالعه تخریب فنول با روش‌های ازون، سونولیز و کوپل آن‌ها با یکدیگر انجام گرفت.
- ❖ نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که از لحاظ درصد حذف فنول، فرآیند تلفیقی O₃/US میزان حذف مطلوبی دارد.
- ❖ مزایای فرآیند تلفیقی ازون/سونولیز برای تصفیه پساب مورد نظر، عبارتند از:
- تخریب بهتر فنول
 - زمان کم مورد نیاز برای تخریب
 - افزایش قابلیت انحدام مواد آلی پساب
- ❖ ماده آلاینده با روش التراسونیک نیز تخریب شد، ولی سرعت تخریب خیلی کم‌تر از فرآیند ازون بود.
- ❖ در این مطالعه مشخص شد که در قطر ثابت، ارتفاع راکتور تأثیر مثبتی روی راندمان حذف دارد.
- ❖ هم‌چنین مشخص شد که در ارتفاع ثابت، قطر راکتور تأثیر منفی روی راندمان حذف دارد.
- ❖ با بررسی پارامترهای عملیاتی از جمله اینکه با افزایش قدرت امواج التراسونیک میزان تخریب نیز افزایش

- [16] Panizza, M., Oturan, M. A., 2011, Degradation of Alizarin Red by electro-Fenton process using a graphite-felt cathode., *Electrochim. Acta*; 56: 7084-7087.
- [17] Ting W.-P., Lu M.-C., Huang Y.-H., 2009, Kinetics of 2,6-dimethylaniline degradation by electro-Fenton process, *J. Hazard. Mater.*, 161: 1484-1490.
- [18] Isarain-Chavez E., Cabot, P. L., Centellas, F., Rodriguez, R. M., Arias, C., Garrido, J. A., Brillas, E., 2011, Electro-Fenton and photoelectro-Fenton degradations, of the drug beta-blocker propranolol using a Pt anode: identification and evolution of oxidation products., *J. Hazard. Mater.*, 185: 1228-1235.
- [19] Wang, Q., Lemley, A. T., 2001, Kinetic model and optimization of 2,4-D degradation by anodic Fenton treatment., *Environ. Sci. Technol.*, 35: 4509-4514.
- [20] Roma, M., 2011, Removal of ciprofloxacin from water using adsorption, UV photolysis and uV/H_2O_2 degradation. *Acta. Chemica.*, Vol. 12, 1125-1129.
- [21] علی خانی، م، ۲۰۱۱، تخریب سونوفتوکاتالیستیرتز آلاننده ی دینیترو بوتیل فنل در حضور پر اکسید هیدروژن از پساب، پایان نامه کارشناسی ارشد گروه شیمی کاربردی، دانشگاه آزاد اهر