

فرآیند حذف پاراتولوئیک اسید به روش اکسیداسیون پیشرفته از پساب خروجی تولید

ترفتالیک اسید در صنایع تولید الیاف نساجی

رضا اسمعیلی سلمی^۲، میلاد آب نیکی^۱، زهرا رحمانی^۱، پروش رضایی بهبهانی^۲، بهزاد شیرکوند هداوند^{۱*}

^۱ گروه رزین و افزودنی‌ها، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوری های نوین، پژوهشگاه رنگ، تهران

^۲ دانشکده فنی و مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آبادان، خوزستان

shirkavand@icrc.ac.ir

چکیده

در سالهای اخیر، فرآیند فوتوکاتالیزوری نیمه‌رسانا، افزایش چشمگیری به عنوان یک فناوری ارزان قیمت، دوستدار محیط زیست و پایدار داشته است. از این روش موسوم به طرح صفر در صنعت آب و فاضلاب نام برده می‌شود. قابلیت فناوری اکسیداسیون پیشرفته به طور گسترده برای حذف ترکیبات آلی پایدار و میکروارگانیزم‌ها از آب می‌باشد. در حال حاضر بازیابی ذرات کاتالیست پس از تصفیه آب مانع اصلی جهت تجاری‌سازی این فرآیند می‌باشد. در این تحقیق ترکیب اوزون با اشعه فرابنفش در حضور دی‌اکسیدتیتانیم و همچنین تاثیر دما بر واکنش در یک راکتور ناپیوسته جهت جداسازی پاراتولوئیک اسید از پساب خروجی واحد تولید ترپتالیک اسید مورد بررسی قرار گرفته است که در حالت اکسیداسیون پیشرفته بدون دی‌اکسیدتیتانیم بازده حذف پاراتولوئیک اسید ۱۹٫۴ درصد بوده است و همچنین با افزایش دمای نمونه بدلیل کاهش حلالیت گاز اوزون به ۱۰ درصد کاهش یافت و همچنین در حضور دی‌اکسیدتیتانیم بازده حذف کاهش یافته و به ۸ درصد رسید.

واژه کلیدی: پاراتولوئیک اسید، اشعه فرابنفش، اکسیداسیون پیشرفته، الیاف پلیمری، دی‌اکسیدتیتانیم

The process of removing paratoleic acid by advanced oxidation process from the effluent of terephthalic acid production in textile fiber production industries

Reza Esmaili Salmi², Milad Abniki¹, Zahra Rahmani¹, Parivash Rezaei Behbahani², Behzad Shirkavand Hadavand^{1*}

¹ Department of Resins and Additives, Institute for Color Science and Technology

² Faculty of Chemical Engineering and Technology, Islamic Azad University, Abadan Branch, Khuzestan

shirkavand@icrc.ac.ir

Abstract

In recent years, the semiconductor photocatalytic process has a great potential as a low-cost, environmentally friendly and sustainable technology, which is known as zero design in the water and wastewater industry. The ability of advanced oxidation technology is widely used to remove stable organic compounds and microorganisms from water. Currently, the recovery of catalyst particles after water treatment is the main obstacle to the commercialization of this process. In this research, the combination of ozone with ultraviolet rays in the presence of titanium dioxide and also the effect of temperature on the reaction in a discontinuous reactor to separate paratoleic acid from the effluent of the terephthalic acid production unit have been investigated. and also with the increase of the sample temperature due to the decrease in the solubility of ozone gas, it decreased to 10% and also in the presence of titanium dioxide, the removal efficiency decreased and reached 8%.

Keywords: Paratoleic acid, ultraviolet rays, advanced oxidation, polymer fibers, titanium dioxide

۱- مقدمه

امروزه استفاده از پلیمرها، و ترکیبات کربنی کاربرد بسیار فراوان در صنایع گوناگون اعم از دارویی، جاذبها، کامپوزیتها، رزینها و تولید یاف در صنعت نساجی پیدا کرده است [۴-۱]. یافهای مصنوعی پرکاربرد در صنایع نساجی یاف پلی پروپیلن، یاف پلی استر، نایلون، و یاف آکرلیک هستند [۵ و ۶]. در سالهای اخیر، فرآیندهای بسیاری برای حذف آلایندههای محیط زیستی شامل فلزات سنگین، پسابهای حاوی دارو و رنگزهای شیمیایی و غیره استفاده شده است [۷-۱۰]. فوتوکاتالیزوری نیمه‌رسانا، پتانسیل زیادی به عنوان یک فناوری ارزان قیمت، دوستدار محیط زیست و پایدار دارای پتانسیل زیادی می‌باشد که موسوم به طرح صفر در صنعت آب و فاضلاب می باشد. قابلیت فناوری اکسیداسیون پیشرفته به طور گسترده برای حذف ترکیبات آلی پایدار و میکروارگانسیمها از آب می‌باشد در حال حاضر ریکاوری ذرات کاتالیست پس از تصفیه آب مانع اصلی جهت تجاری سازی این فرآیند می‌باشد. پیشرفت‌های اخیر در زمینه تحقیق و توسعه فوتوکاتالیزورهای مهندسی، سیستم‌های راکتور نوری و بهینه‌سازی‌های فرآیند و مدل‌سازی فرآیندهای اکسیداسیون نوری را برای تصفیه پساب را بیان می‌کند. برخی از توانایی‌های بالقوه و تجاری راکتور کاتالیزوری نوری، بخصوص راکتورهای غشای کاتالیزوری نوری مورد بحث قرار گرفته‌اند. برای اولین بار، شرح می‌دهیم که چگونه از روش بهینه‌سازی چند متغیره برای تعیین پارامترهای بهینه

عملیاتی به منظور افزایش عملکرد فرآیند و بازدهی اکسیداسیون نوری استفاده می‌شود. بحث مختصری در مورد روش ارزیابی چرخه حیات برای بهبود فناوری کاتالیزوری نوری به عنوان یک فرآیند تصفیه پساب جایگزین ارائه شده است. این تحقیق، بررسی علمی و تکنیکی، اطلاعات مفیدی به دانشمندان و مهندسان فعال در این زمینه، ارائه می‌دهد. روش‌های معمول دیگر برای تصفیه پسابها مانند ته‌نشینی، فیلتراسیون، فناوری‌های شیمیایی و غشایی شامل هزینه‌های عملیاتی بالا هستند و می‌توانند آلاینده‌های ثانویه سمی به اکوسیستم وارد کنند [۱۱-۲۱]. این آلاینده‌های سمی هستند و به دلیل افزایش آگاهی‌های زیست‌محیطی قوانین مورد توجه قرار گرفته‌اند و کنار گذاشته شده‌اند. کلردار کردن یک فرآیند متداول و گسترده برای فرآیند ضد عفونی کردن است. ضد عفونی کردن محصولات جانبی تولید شده در اثر کلردار شدن سبب افزایش جهش ژنتیکی در بدن انسان و سرطان‌زایی انسان می‌باشند. بررسی‌های گروه‌های تحقیق و توسعه در زمینه تصفیه آب به فناوری نوین تصفیه آب منجر شده است. منطق فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته بر اساس گونه‌های بسیار واکنش‌گر مثل O_3 ، O_2 ، H_2O_2 ، OH می‌باشد. و برای تبدیل ترکیبات آلی نسوز و عوامل بیماری‌زا به حالت طبیعی می‌باشد و محصولات تولیدی، خاصیت ضد عفونی

دارند. در میان روش‌های اکسیداسیون پیشرفته، کاتالیز شدن ناهمگن با بکار بردن کاتالیزورهای نیمه‌رسانا (ZnO , TiO_2 , CdS , Fe_2O_3 , GaP و ZnS) بازدهی مناسبی در تخریب محدوده گسترده‌ای از مواد آلی مقاوم ناشناخته به ترکیبات بسیار زیست تخریب پذیر نشان داده‌اند و در نهایت آنها را به دی‌اکسید کربن بی‌ضرر و آب تبدیل کرده است. در میان کاتالیزورهای نیمه‌رسانا، دی‌اکسید تیتانیوم در زمینه تحقیق و توسعه فناوری کاتالیز شدن نوری توجه زیادی را به خود جلب کرده است. دی‌اکسید تیتانیوم فعال‌ترین کاتالیزور نوری تحت انرژی فوتون $390 < \lambda < 300$ نانومتر است و پس از سیکل‌های کاتالیزوری تکراری پایدار می‌ماند، درحالی‌که CdS یا GaP برای تولید محصولات سمی تخریب می‌شوند [۲۲-۲۴]. در این مقاله به حذف پاراتولوئیک اسید به عنوان ماده اولیه پلی‌اتیلن ترفتالات پرداختیم که کاربردی از مواد پلیمری در صنعت نساجی به عنوان الیاف پلیمری می‌باشد.

۲- تجربیات

۲-۱- مواد

در این مطالعه پساب خروجی واحد خالص‌سازی ترفتالیک‌اسید از واحد پتروشیمی شهید تندگویان تهیه گردید. دی‌اکسیدتیتانیوم (TiO_2) از نوع آاناتاز از شرکت

تیتانجین و ساخت کشور چین تهیه شد. آب اکسیژنه ۳۵ درصد از شرکت مرک آلمان تهیه شد.

۲-۲- دستگاه و طراحی فرآیند

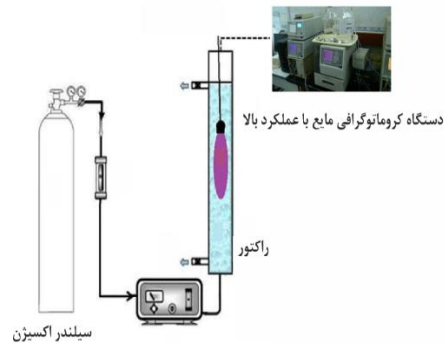
در این طرح مطالعاتی گاز ورودی به وسیله‌ی کپسول ۲۰ لیتری اکسیژن و کمپرسور هوا با فشار یک بار و جریان ۲ لیتر بر دقیقه وارد مولد اوزون می‌شوند. گاز خروجی از مولد اوزون وارد یک راکتور فلزی با درپوش فلزی می‌شود. گاز از قسمت تحتانی وارد راکتور شده و پس از عبور از یک نازل وارد پایین‌ترین سطح مایع درون راکتور می‌شود. جهت از بین رفتن گاز باقیمانده خروجی، وارد محلول KI می‌شود. گاز اکسیژن ورودی در یک سیلندر ۲۰ لیتری (در فشار ۱۵۰ بار در ابتدای فرآیند) توسط یک تنظیم‌کننده فشار دو مرحله‌ای به فشار ۱ تا ۲ بار می‌رسد و شدت جریان آن توسط جریان‌سنج با شیر تنظیم سلونویدی روی یک لیتر در دقیقه تنظیم می‌شود ولی به دلیل خطرات استفاده از اکسیژن و نیاز به تجهیزات خاص، فرآیند تولید اوزون توسط ورودی هوا انجام شد. به این طریق که یک کمپرسور رفت و برگشتی در فشار یک بار جریان هوای ورودی را تامین کرده است. در خروجی کمپرسور یک فیلتر رطوبت‌گیر از جنس تترا کلریدکربن برای جذب رطوبت ناشی از فشرده شدن هوا تعبیه شده است. میزان جریان گاز بعد از فیلتر رطوبت‌گیر به وسیله جریان‌سنج کنترل می‌شود که میزان آن روی ۲ لیتر بر دقیقه تنظیم شده

پساب مورد مطالعه حاوی مواد آلاینده ذکر شده در جدول شماره ۱ بوده است که دمای محلول 20°C و مقدار pH آن برابر ۴ بوده است.

است. در این مطالعه از لامپ UV-C با طول موج ۲۵۳ نانومتر با توان ۵ وات و ساخت شرکت فیلیپس هلند استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری مقدار پاراتولوئیک اسید از دستگاه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا مدل E ۶۰۰ ساخت امریکا^۲ همانطور که در شکل ۱ آورده شده، استفاده شده است. ابتدا نمونه را طبق روش در داخل محفظه نمونه‌بردی خودکار^۳ قرار داده و سپس رایانه دستگاه را روشن نموده و سپس در قسمت کنترلر دستگاه، پارامترهای ترکیب^۴، گازدایی^۵، دما^۶ و نرخ جریان^۷ را تنظیم شد.

جدول ۱- مشخصات پساب خروجی واحد خالص سازی اسید

نوع آلاینده	درصد اجزا
ترفتالیک اسید	0.28
۴-کربوکسی بنزالدئید	0.02
پاراتولوئیک اسید	0.2
آب	99.5



شکل ۱- طرحی از فرآیند انجام آزمایش

روش کار بدین صورت بوده که، ابتدا یک لیتر از پساب مورد مطالعه را به راکتور تزریق می‌نماییم و سپس خروجی دستگاه اوزون‌ساز را بر روی ۲ لیتر بر دقیقه تنظیم می‌کنیم و لامپ UV روشن شده و و هر ۲۰ دقیقه به مقدار ۱۰ میلی لیتر از راکتور نمونه‌گیری شده است.

۲-۳- روش آزمایش

۲-۳-۲- انجام آزمایش در دمای ۸۶ درجه سانتیگراد و بدون حضور اکسیدتیتانیم

۲-۳-۱- آزمایش در دمای ثابت و بدون حضور

اکسیدتیتانیم

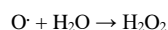
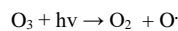
^۴Sparge
^۵Temperature
^۶Flow Rate

^۲WATERS Company
^۳Auto Sampler
^۴Composition



شکل ۳- پساب قبل از آزمایش

با توجه به اینکه عملیات جداسازی پاراتولوئیک اسید از طریق اکسیداسیون پیشرفته انجام می‌شود پس نقش یک اکسیدکننده بسیار تعیین کننده می‌باشد. در این واکنش از اوزون به عنوان اکسیدکننده استفاده شده است که اوزون به دو روش سبب اکسیداسیون ترکیبات آلی شده است که شامل اکسیداسون مستقیم توسط اوزون و اکسیداسیون توسط رادیکال‌های آزاد تولیدی می‌باشد. اوزون گازی است که در محل و از طریق اکسیژن اتمسفری و یا اکسیژن فشرده تولید می‌شود غلظت اوزون تولیدی از اکسیژن و هوای اتمسفری به ترتیب ۵ و ۱ درصد می‌باشد. واکنشی که جهت تخریب پاراتولوئیک اسید استفاده شده است استفاده از رادیکال‌های آزاد تولیدی می‌باشد. به این ترتیب اوزون به سادگی نور UV را جذب می‌کند وقتی که اوزون نور UV را جذب می‌کند به O_2 و اتم اکسیژن تحریک شده تجزیه می‌شود و اکسیژن اتمی با آب واکنش داده و تولید پرکسید هیدروژن می‌شود. نحوه انجام واکنش در معادله ۱ نشان داده شده است :



در این مرحله از آزمایش دمای پساب را تا ۸۶ درجه بر سانتیگراد افزایش داده شد و با همان شرایط قبلی اقدام به انجام آزمایش گردید [۲۵].

۲-۳-۳- انجام آزمایش در حضور دی‌اکسیدتیتانیم

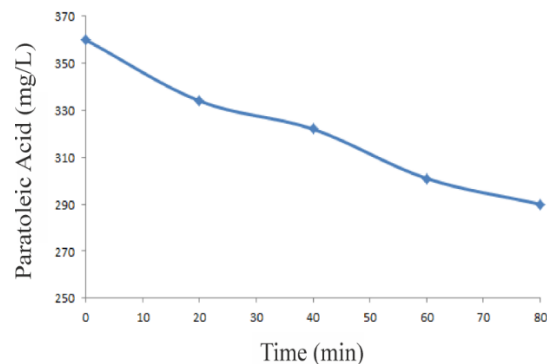
در این مرحله از آزمایش عمل اکسیداسیون در حضور ۱ گرم دی‌اکسیدتیتانیم با همان شرایط انجام آزمایش گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش در دمای ثابت و بدون حضور

اکسیدتیتانیم

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۲ با گذشت زمان ۸۰ دقیقه، مقدار پاراتولوئیک اسید به ۲۹۰ میلی‌گرم برلیتر کاهش یافته است.



شکل ۲- تغییرات مقدار پاراتولوئیک با زمان در دمای ثابت

همچنین تغییرات مقدار پاراتولوئیک اسید در زمان ۰ و ۸۰ دقیقه در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

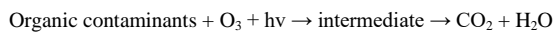


فتولیز اوزون سبب تولید پراکسید هیدروژن می شود بنابراین فرآیند UV/O₃ شامل تمام سازوکارهای تخریب مواد آلی در حضور O₃/H₂O₂ و UV/H₂O₂ می باشد. این ترکیبات رادیکالی قادر به شکستن پیوندها بین اتمهای پاراتولوئیک اسید شده و سبب تشکیل قطعات کوچکتر و نابودی ساختار پاراتولوئیک اسید می شود. فرآیند UV/O₃ بسیار پیچیده تر از سایر فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته می باشد زیرا رادیکال های آزاد از طریق مسیرهای واکنش متفاوتی تولید می شود. واضح است که تحت این شرایط سیستم رفتار شیمیایی هر دو سیستم UV/O₃ و UV/H₂O₂ را خواهد داشت. جهت تشکیل هر مول فرآیند به ترتیب به ۱,۵ و ۰,۵ و ۰,۵ مول از O₃ و UV و H₂O₂ نیاز است. دو پارامتر مهم در طراحی سیستم اکسیداسیون پیشرفته که از UV استفاده می کنند عبارتند از دوز UV و غلظت اوزون با پراکسید هیدروژن مورد استفاده می باشد.

۱- اوزون طی عمل فتولیز به اکسیژن و اکسیژن تحریک شده تبدیل می شود.

۲- اکسیژن اتمی با آب واکنش داده و تبدیل به پراکسید هیدروژن می شود.

۳- پراکسید هیدروژن طی عمل فتولیز در حضور UV به رادیکال آزاد هیدروکسیل تبدیل می شود. سپس رادیکال هیدروکسیل با پاراتولوئیک اسید واکنش داده و در نهایت به آب و دی اکسید کربن تبدیل می شود (معادله ۲).



معادله ۲

با توجه به نتایج بدست آمده حاصل از آزمایشات، بیشترین تخریب پاراتولوئیک اسید در گذشت ۸۰ دقیقه از شروع آزمایش حادث شده است که در این مرحله بیشترین مقدار رادیکال آزاد جهت انجام اکسیداسون تولید شده است.

۳-۲- انجام آزمایش در دمای ۸۶ درجه سانتیگراد و

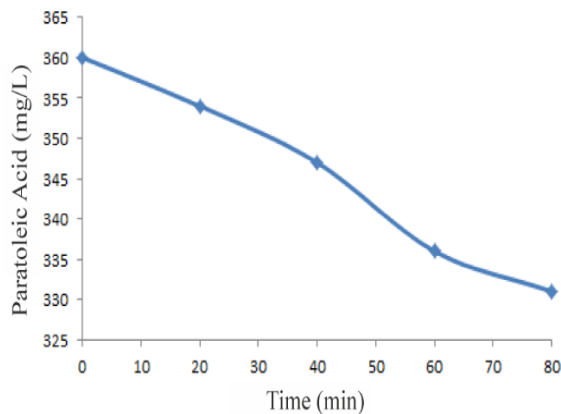
بدون حضور اکسیدتیتانیم

نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۵ آورده شده است:



دوز UV عبارت است از توان تابشی لامپ UV به ازای حجم آب تصفیه شده با واحد KWh/1000gal می باشد. در عمل توان مورد نیاز از لامپ در فتولیز اوزون در محدوده وات در حالیکه توان لازم جهت فتولیز H₂O₂ در محدوده کیلووات است. با توجه به مطالب اشاره شده در فوق به طور خلاصه می توان گفت که جهت تخریب پاراتولوئیک اسید مکانیسم زیر انجام می شود :

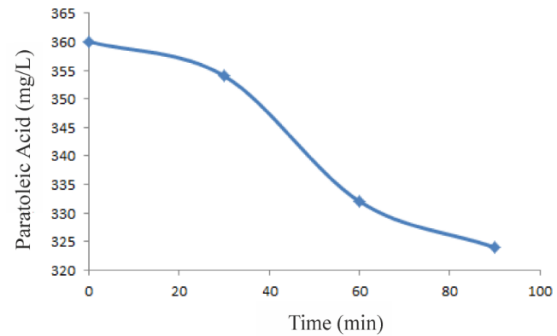
با توجه نتایج حاصله از آزمایش اکسیداسیون در حضور ۱ گرم دی اکسید تیتانیم که در جدول ۴ و شکل ۶ نشان داده شده است. پس از گذشت ۸۰ دقیقه به ۳۳۱ میلی گرم بر لیتر رسیده است که نسبت به مقایسه با نتایج از آزمایشات قبلی اصلا مناسب نمی باشد.



شکل ۶- تغییرات پاراتولوئیک نسبت به زمان در حضور ۱ گرم دی اکسید تیتانیم

با توجه به مطالعات مشابه انتظار میرفت که بازده حذف پاراتولوئیک در حضور TiO_2 بیشتر باشد. اما این امر اتفاق نیافتاده است. اکسیداسیون بسیاری از آلاینده‌ها به ویژه گونه های آلی، نیازمند نیمه رساناهایی است که ترجیحا پتانسیل نوار کاهشی در لایه ظرفیت آن‌ها مثبت تر باشد. به این ترتیب حفرات ایجاد شده دارای انرژی کافی به منظور اکسیداسیون ترکیبات آلی از طریق رادیکال های هیدروکسیل تولیدی خواهند داشت. با این وجود بعضی از نیمه رساناها مانند ZnO و CdS پایداری کافی در محیط های آبی ندارند. از طرف دیگر پتانسیل احیا نیمه رسانا باید در دامنه گپ انرژی H_2O و O_2

شکل ۴- پساب بعد از آزمایش



شکل ۵- تغییرات پاراتولوئیک نسبت به زمان در دمای ۸۶ درجه سانتیگراد و بدون حضور اکسید تیتانیم

همانطور که در نمودار مشخص است با افزایش دما میزان تخریب پاراتولوئیک اسید به طور چشمگیری کاهش یافته است ولی با توجه به اینکه مشاهدات نشان دهنده کاهش دمای نمونه در روند آزمایش بوده و بعد از گذشت زمان و در انتهای آزمایش به ۳۸ درجه سانتیگراد رسیده است. تفسیر این موضوع بدین صورت است که هنگامی که دما افزایش می یابد حرکت مولکول های گاز بیشتر می شود و بنابراین احتمال اینکه ذرات گاز حل شده در مایع به فاز گازی انتشار یابند بیشتر می شود و ذرات گاز موجود کم تر حل خواهند شد و بازده پایین تر می آید. پس افزایش دمای نمونه تزریقی به راکتور باعث افزایش دمای اوزون می گردد که این افزایش دما باعث کاهش حلالیت اوزون در آب شده و در کل باعث کاهش تولید رادیکال های آزاد هیدروکسیل می شود و باعث کاهش تخریب پذیری پاراتولوئیک اسید شده است.

۳-۳- انجام آزمایش در حضور دی اکسید تیتانیم

باشد. TiO_2 یک ترکیب غیر آلی می باشد که دارای سه ساختار کریستالی آناتاس، روتیل و بروکیت می باشد. مهمترین خصوصیات آن شامل پایداری شیمیایی و حرارتی، مقاوم به شکست شیمیایی و نیز دارا بودن مشخصات مکانیکی قوی می باشد.

TiO_2 یک کاتالیست بسیار فعال می باشد که تحت تابش فوتون هایی با طول موج کمتر از ۳۹۰ نانومتر پایدار باقی می ماند. مرحله آغاز فرآیندهای فتوکاتالیستی تحریک باند ظرفیت نیمه رسانا توسط فوتون هایی با انرژی کافی می باشد. این اتفاق سبب تولید جفت های الکترون - حفره می شود. در نبود مصرف کننده الکترون، ترکیب مجدد الکترون - حفره در طی نانو ثانیه اتفاق افتاده و انرژی به شکل گرما آزاد می شود. بنابراین حضور مصرف کننده های الکترون جهت طولانی کردن زمان ترکیب مجدد الکترون حفرات و انجام فرآیند فتوکاتالیست ضروری است تا سبب کاهش بازده در انجام فرآیند نشود.

۴- نتیجه گیری

پساب خروجی واحد خالص سازی حاوی مواد آلی می باشد که وجود اینگونه مواد آلی باعث افزایش مقدار COD پساب خروجی می شود که ورود اینگونه آلاینده و سرریز آن به محیط nanotubes as an effective carrier for lansoprazole release. Biomedical Physics & Engineering Express, 2023

[2] Abniki, M., B. Shirkavand Hadavand, and F. Najafi, Fabrication of Layered Hydroxide Composite

زیست بسیار مضر و خطرناک می باشد و مستلزم آن می باشد که قبل از تخلیه پساب های صنعتی به محیط زیست تا حد امکان از مقدار آلاینده ها کم و یا آنها را به مواد غیرسمی تبدیل نماییم. در این تحقیق هدف تخریب پاراتولوئیک اسید و جداسازی آن از پساب خروجی می باشد که طی این تحقیق ماده ذکر شده از طریق اکسیداسیون پیشرفته و از طریق اوزون زنی و تابش اشعه فرابنفش جهت فتولیز اوزون و تولید یون هیدروکسیل جهت انجام عمل اکسیداسیون بکار گرفته شد. برای این منظور در آزمایش اول عملیات اکسیداسیون بدون حضور دی اکسیدتیتانیم در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد انجام و مقدار ۲ لیتر بر دقیقه اوزون به راکتور تزریق شد که در نهایت بعد از گذشت ۸۰ دقیقه مقدار پاراتولوئیک اسید از ۳۶۰ ppm به ۲۹۰ ppm رسید که ۱۹,۵ درصد کاهش مشاهده شده است. در مرحله دوم دمای پساب تا ۸۶ درجه سانتیگراد افزایش داده شد و شرایط قبل پا بر جا بود. که نتیجه آن چندان مطلوب نبوده و مقدار پاراتولوئیک اسید از ۳۶۰ ppm به ۳۲۴ ppm رسید که ۱۰ درصد کاهش داشته است که مطلوب نمی باشد. همچنین در پایان انجام فرآیند با حضور ۱ گرم از دی اکسیدتیتانیم انجام شد که نتایج نشان دهنده کاهش بازده حذف پاراتولوئیک اسید بوده است.

۵- منابع:

[1] Abniki, M., et al., Development of p-amino acetanilide functionalized multi-walled carbon

[18] Pourshamsi, T., F. Amri, and M. Abniki, A comprehensive review on application of the syringe in liquid-and solid-phase microextraction methods. *Journal of the Iranian Chemical Society*. 18, 245-264, 2021

[19] Moghimi, A. and M. Abniki, Removal and measurement of bromocresol purple dye in aqueous samples by β -cyclodextrin-modified magnetic carbon nanotube with dispersive solid-phase extraction technique. *Journal of Color Science and Technology*. 15, 301-315, 2022.

[۲۰] زحمتکش، س. و. م. خواجه مهریزی، رنگبری پساب

رنگزای مستقیم قرمز ۲۳ توسط روش نور ماوراء بنفش / دی

اکسیدتیتانیوم / بتا سیکلو دکسترین- β (UV/ TiO₂)

(CD) علوم و فناوری نساجی و پوشاک. ۶، ۲۵-۳۰، ۲۰۱۷

[۲۱] تهرانی بقا، ع.ر. و ح. نیک کار، مقایسه فرایندهای

مختلف اکسایش پیشرفته بر پایه ازندهی و پرتودهی

فرابنفش برای تصفیه پساب حاوی مواد رنگزای واکنش پذیر.

علوم و فناوری نساجی و پوشاک. ۴، ۳۵-۴۲، ۲۰۱۴.

[22] Jing, B., et al., Flow line of density functional theory in heterogeneous persulfate-based advanced oxidation processes for pollutant degradation: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 53, 483-503, 2023.

[23] Rodríguez-Chueca, J., J. Carbajo, and P. García-Muñoz, Intensification of Photo-Assisted Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: A Critical Review. *Catalysts*. 13, 401, 2023.

[24] Atalay, S., et al., Review on catalysis in advanced oxidation processes. *Novel Catalysts in Advanced Oxidation of Organic Pollutants*, 35-58, 2016.

[25] Tekin, G., Application of advanced oxidation and novel biological methods for the treatment of terephthalic acid plant wastewater, 2015, Fen Bilimleri Enstitüsü.