

## بررسی کارایی فرایند الکترو-ازوناسیون در تجزیه‌ی دترجنت آنیونی سدیم دودسیل بنزن سولفانات (SDBS) از محیط‌های آبی

محمد رضا سمرقندی<sup>۱</sup>، امیر شعبانلو<sup>۲</sup>، صبا مجیدی<sup>۳</sup>، یوسف پور عشق<sup>۴</sup>، جمال مهرعلی پور<sup>۵\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، دکترای تخصصی مهندسی بهداشت محیط و عضو مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، عضو کمیته‌ی تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، عضو کمیته‌ی تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

<sup>۴</sup> دانشجوی دکترای تخصصی مهندسی بهداشت محیط، عضو کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

<sup>۵</sup> کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، عضو کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

\*نشانی نویسنده مسؤول: همدان، دانشگاه علوم پزشکی، دانشکده بهداشت، جمال مهرعلی پور

E-mail: Jamalmehralipour@yahoo.com

وصول: ۹۳/۸/۲۵، اصلاح: ۹۳/۹/۱۲، پذیرش: ۹۳/۱۲/۹

### چکیده

**زمینه و هدف:** فرایند الکتروازوناسیون دارای توانایی مطلوبی در حذف آلاینده‌های آلی مقاوم می‌باشد. این فرایند، تلفیقی از فرایند ازن زنی و جریان الکتریسته در راستای تولید رادیکال هیدروکسیل و حذف آلاینده می‌باشد. هدف از این مطالعه، بررسی کارایی فرایند الکتروازوناسیون در تجزیه‌ی دترجنت آنیونی سدیم دودسیل بنزن سولفانات از محیط‌های آبی بود.

**مواد و روش‌ها:** در این مطالعه‌ی تجربی از راکتور نیمه پیوسته مجهز به چهار الکتروود گرفت با مساحت ۱۲۰ سانتی متر مربع استفاده شد. تاثیر پارامترهای pH (3-11)، غلظت ازن ورودی (۳۰-۶ mM/s)، آمپر (۱۶-۸۵ mA/cm<sup>2</sup>)، غلظت اولیه SDBS (۰/۳-۰/۲ mM/L) و دوز رباینده رادیکال (ترت بوتانول=۰/۲ mM/L) مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری غلظت SDBS با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (DR5000) و با استفاده از روش ارایه شده در کتاب استاندارد متد صورت گرفت.

**یافته‌ها:** نتایج به دست آمده، بیانگر کارایی مناسب این فرایند در حذف SBDS و COD است. در شرایط بهینه که شامل pH=3، جریان الکتریکی برابر ۸۵ mA/cm<sup>2</sup>، دبی ازن ورودی برابر ۳۰ mM/s و غلظت اولیه SDBS برابر ۲ صدم mM/L در مدت زمان ۵۰ دقیقه بود، کارایی بیش از ۹۹ درصد به دست آمد. با تغییر پارامترها از حالت بهینه، کارایی فرایند کاهش یافت. میزان کارایی فرایند در حذف COD در مدت زمان ۸۰ دقیقه به ۷۷ درصد رسید. حضور ترت بوتانول به عنوان رباینده تاثیر کارایی فرایند را به ۸۰ درصد کاهش داد.

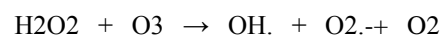
**نتیجه‌گیری:** فرایند الکتروازوناسیون به عنوان یکی از گزینه‌های فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، دارای توانایی کاهش بار آلودگی آلی صنایع حاوی ترکیبات دترجنتی می‌باشد و به عنوان فرایند دوستدار محیط زیست تلقی می‌شود.

**واژه های کلیدی:** ازن زنی، جریان الکتریکی، سدیم دودسیل بنزن سولفانات، محیط‌های آبی.

## مقدمه

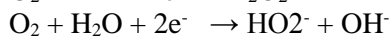
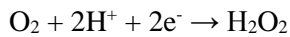
عوامل سطحی مولکول‌های دو قطبی با یک سر آب دوست و یک دم آب گریز می‌باشند. این ترکیبات باعث افزایش حلالیت ترکیبات هیدروفوبیک در محلول‌های آبی می‌شود (۱). عوامل سطحی به چهار گروه آنیونی، کاتیونی، غیریونی و آمفوتریک تقسیم می‌شوند. عوامل سطحی آنیونی، دارای بیشترین کاربرد هستند. در این گروه آلکیل بنزن سولفات (LAS) به تنهایی حدود ۲/۵ میلیون تن در سال تولید می‌شود. در این خانواده سدیم دودسیل بنزن سولفات (SDBS) دارای بیشترین مصرف است (۲).

SDBS دارای کاربرد گسترده‌ای در صنایع تثبیت کلوئیدها، شست‌وشوی فلزات، تولید مواد شوینده و فلوتاسیون مواد معدنی دارد (۳). روش‌های متداولی جهت حذف عوامل سطحی از منابع آبی شامل: اکسیداسیون شیمیایی و الکتروشیمیایی، فرایندهای غشایی و تهنشینی شیمیایی و تجزیه‌ی فوتوکاتالیستی و جذب و روش بیولوژیکی می‌باشد (۴). یکی از فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) فرایند ازن زنی توأم با حضور رادیکال‌های اکسیدکننده است. فرایند توأم ازن و پراکساید هیدروژن باعث افزایش سرعت تجزیه‌ی مولکول ازن و تولید رادیکال هیدروکسیل می‌گردد. کاربرد همزمان این دو ماده باعث افزایش خاصیت سینرژیستی در معدنی سازی ترکیبات آلی می‌شود. این خاصیت سینرژیستی به دلیل واکنش مولکول ازن با هیدروژن پراکساید و تولید رادیکال‌های قوی هیدروکسیل می‌باشد (رابطه‌ی ۱) (۵).



این فرایند در کنار مزایای بسیار زیاد، به دلیل اضافه نمودن دستی پراکساید هیدروژن دارای یکسری ایرادات همچون خطرات بالای این ترکیب بسیار فعال در حین حمل و نقل و استفاده می‌باشد. اگر بتوان هیدروژن پراکساید را در محل تولید نمود، بسیار مطلوب خواهد

بود. بدین منظور از روش الکتریکی در راستای تولید پراکساید هیدروژن استفاده می‌شود (۶). الکترودهای مورد استفاده در بخش کاتد، می‌توانند به صورت الکتریکی اکسیژن را به هیدروژن پراکساید و مشتقات آن تبدیل نمایند (رابطه ۲ و ۳) (۷).



سپس هیدروژن پراکساید تولید شده به صورت الکتریکی با ازن موجود در محفظه واکنش داده و تولید رادیکال هیدروکسیل می‌نماید. این فرایند یک ترکیب ساده بین فرایند ازن زنی و فرایند الکترولیز می‌باشد که دارای قابلیت بالایی در حذف آلاینده‌ها نسبت به فرایندهای ازن زنی و الکترولیز دارد (۵). از جمله مزایای این روش می‌توان به تولید الکتریکی ازن و پراکساید هیدروژن به صورت کنترل شده و عدم نیاز به مواد شیمیایی مانند پراکساید هیدروژن یا کاتالیست اشاره نمود.

همچنین راهبری ساده و قابل کنترل دارد و نیازمند تنظیم pH نمی‌باشد. در نهایت هیچگونه لجنی تولید نمی‌کند و فرایندی دوستدار محیط زیست می‌باشد (۸). در سال ۲۰۱۳، ونگ و همکارانش، میزان کارایی فرایند الکتروپراکسون در تجزیه‌ی آلاینده‌های آلی مقاوم در شیرابه‌ی محل دفن را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه به صورت الکتریکی هیدروژن پراکساید از مولکول اکسیژن تولید شد. در مدت زمان چهار ساعتی واکنش، فرایند الکتروپراکسون توانست ۸۷ درصد از کل TOC را حذف نماید. درحالی‌که در فرایند ازن زنی ساده و پراکسون و الکتروفنتون تنها ۴۵، ۶۵ و ۷۱ درصد از TOC در شرایط مشابه حذف شد. نتایج نشان می‌دهد که فرایند الکتروپراکسون روش مناسب به‌عنوان روشی جایگزین برای فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته می‌باشد (۸). در سال ۲۰۱۳ یوان و همکارانش، کارایی فرایند الکتروپراکسون در حذف رنگ متیلن بیلو را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که ترکیب فرایند الکتروشیمیایی و ازن زنی متداول، باعث تولید رادیکال هیدروکسیل به

تعیین مقدار سورفاکتانت‌های آنیونی متیلن بیلو [Methylene Blue Active Substances] (MBAS) میزان مقادیر COD براساس روش Closed و اندازه‌گیری TOC براساس روش ارایه شده در مرجع آزمایش‌های آب و فاضلاب و با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل DR5000 ساخت شرکت HACH اندازه‌گیری شد (۹). طبق روش اشاره شده‌ی فوق در اندازه‌گیری SDBS، حداکثر پیک ایجادی در طول موج ۶۵۲ نانومتر می‌باشد.

### یافته‌ها

**تعیین تاثیر pH محیط و زمان واکنش بر کارایی فرایند:** در این بخش از مطالعه، تاثیر pH محیط بر کارایی فرایند مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله، pH اولیه‌ی محیط ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ در نظر گرفته شد. از آنجایی که pH محیط در فرایند مورد مطالعه دستخوش تغییرات می‌شود، بنابراین در طی انجام فرایند pH محیط، کنترل و توسط اسید سولفوریک ۱ مولار و سدیم هیدروکسید ۱ نرمال در pH مد نظر ثابت نگه داشته شد.

مقادیر غلظت اولیه SDBS ۲ درصد mM/L، غلظت ازن ورودی ۳۰ mM/s، غلظت سولفات سدیم برابر ۰/۵ mM/L و جریان الکتریکی ۸۵ mA/cm<sup>2</sup> بود. نتایج این بخش از مطالعه در نمودار ۱ ارایه شده است. جهت تعیین زمان بهینه‌ی فرایند نمونه برداری از زمان شروع فرایند تا ثابت شدن کارایی حذف، صورت گرفت. نتایج بیانگر کارایی نزدیک فرایند در pH های مختلف می‌باشد.

**تعیین تاثیر میزان جریان الکتریکی بر کارایی فرایند:** مقادیر غلظت SDBS برابر ۲ درصد mM/L، غلظت ازن ورودی برابر ۳۰ mM/s، غلظت سولفات سدیم برابر ۰/۵ mM/L و pH برابر ۳ لحاظ گردید. نتایج این بخش بصورت نمودار ۲ ارایه شده است.

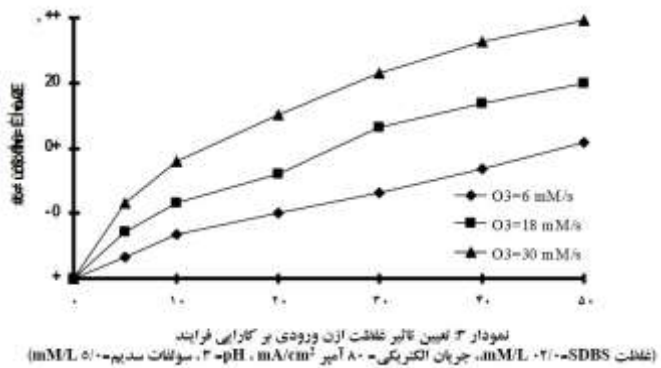
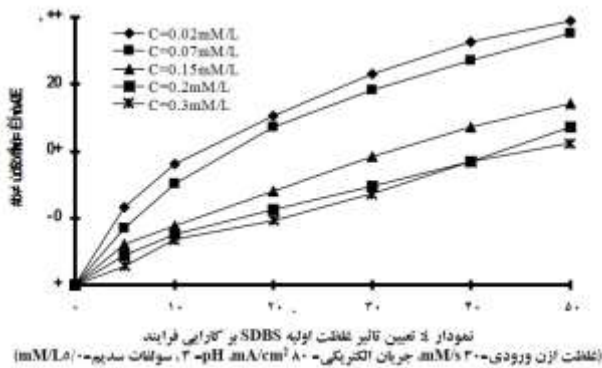
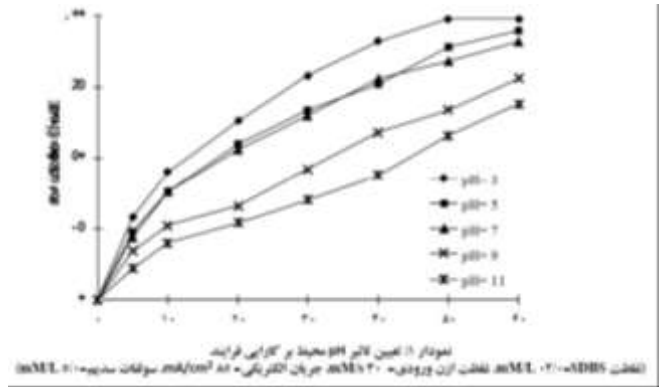
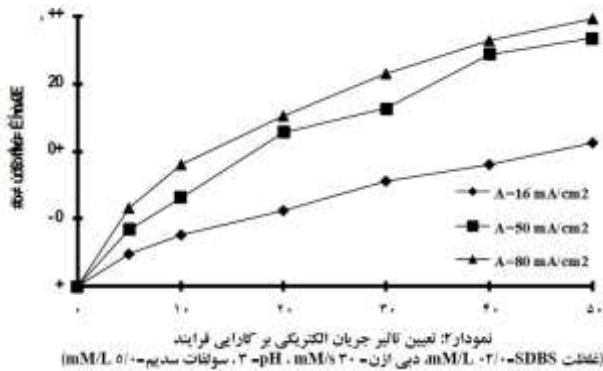
**تعیین تاثیر غلظت ازن ورودی بر کارایی فرایند:** در این بخش غلظت SDBS برابر ۲ درصد mM/L،

صورت الکتریکی می‌شود که ترکیب آن با مولکول ازن خاصیت سینرژیستی دارد. میزان حذف TOC برای فرایند الکتروپراکسون و ازن زنی ساده به ترتیب ۹۳ و ۲۲ درصد پس از مدت زمان ۲ ساعته است (۶). هدف از این مطالعه بررسی کارایی فرایند الکترو-ازوناسیون در تجزیه دترجنت آنیونی سدیم دودسیل بنزن سولفات (SDBS) از محیط‌های آبی بود.

### مواد و روش‌ها

**مواد و وسایل مصرفی:** در این مطالعه پودر SDBS با درجه‌ی خلوص ۹۹/۶ درصد، سدیم هیدروکسید، اسید سولفوریک، سولفات سدیم، پتاسیم پرسولفات، بافر سولفات، ریجنت دترجنت و تولوئن از شرکت‌های مرک و سیگما آلدریج تهیه شد. وسایل مورد استفاده شامل pH متر دیجیتال ساخت شرکت HACH، میکسر، اکسیژن ساز مدل پورسا ساخت کشور فرانسه، دستگاه مولد گاز ازن مدل ۷-۹-۱۱۰۷۵ ساخت شرکت ARDA کشور فرانسه با توان تولید ازن تا ۳۰ mM/s، مولد جریان الکتریکی مستقیم (DC) با توان تولید جریان تا ۸۵ mA/cm<sup>2</sup> مدل P405 ساخت شرکت ADAK چین و گاز شوی یک لیتری ساخت شرکت DURAN آلمان که در زیر هود با تهویه‌ی مناسب مورد بهره برداری قرار گرفت، بود. تصویر شماتیک پایلوت مورد استفاده در شکل ۱ ارایه شده است.

**تعیین تاثیر پارامترهای مورد مطالعه:** در این بخش از مطالعه، تاثیر پارامترهای زمان واکنش، pH محیط (۳-۱۱)، غلظت اولیه SDBS (۰/۲-۰/۳ mM/L)، میزان غلظت ورودی ازن (۶-۳۰ mM/s) و میزان جریان الکتریکی مستقیم (۱۶-۸۵ mA/cm<sup>2</sup>) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در بخش دیگر مطالعه‌ی سینتیک فرایند، اثر هم افزایی پارامترها، تاثیر حضور رابنده‌ی رادیکال و میزان کارایی فرایند در حذف COD تعیین شد. غلظت SDBS بر اساس روش شماره‌ی C ۵۵۴۰ تحت عنوان



ترت بوتانول در غلظت ۰/۲ میلی‌مول بر لیتر نیز باعث کاهش کارایی فرایند به ۸۰ درصد شده است.

#### تعیین کارایی فرایند در حذف COD و TOC:

در این بخش از مطالعه، ابتدا میزان COD و TOC حاصل از SDBS با غلظت ۰.۲۲ درصد میلی‌مول در لیتر تعیین شد و در ادامه، کارایی فرایند در حذف این پارامترها مورد سنجش قرار گرفت. نتایج مربوط به کارایی فرایند در حذف COD و TOC در نمودار ۵ ارائه شده است.

#### بحث

از پارامتر تاثیرگذار بر فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته؛ pH محیط است. سرعت واکنش‌های شیمیایی به pH محیط بستگی دارد. در فرایندهای AOPs تغییرات pH از طریق تولید رادیکال‌های اکسیدکننده بر میزان اکسیداسیون تاثیرگذار است (۱۱،۱۰). در فرایند الکتروپراکسون در ابتدای فرایند، pH محیط طبق واکنش‌های صورت گرفته در محیط و تولید یون

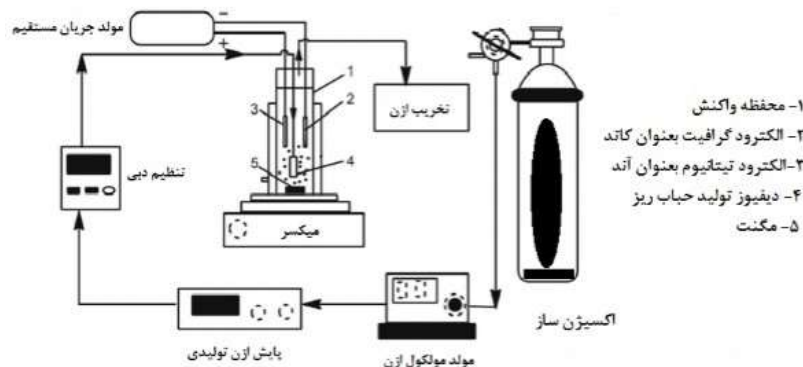
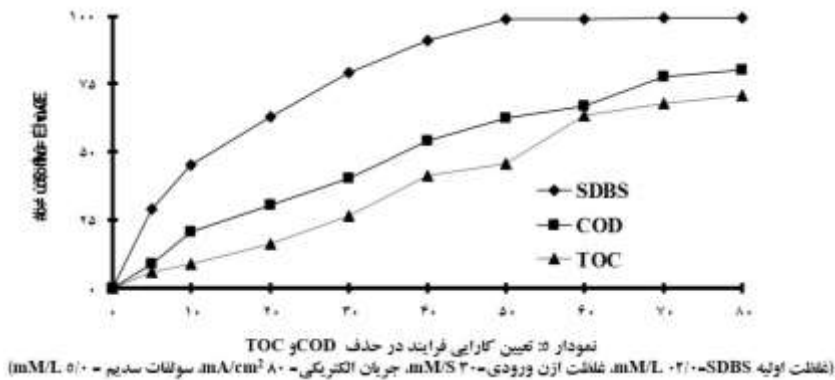
غلظت سولفات سدیم برابر ۰/۵ mM/L، جریان الکتریکی ۸۰ mA/cm<sup>2</sup> در نظر گرفته شد. نتایج این بخش در نمودار ۳ ارائه شده است.

#### تعیین تأثیر غلظت اولیه SDBS بر کارایی فرایند:

در این بخش، غلظت ازن ورودی برابر ۸۰ mM/s، جریان الکتریکی برابر ۸۰ mA/cm<sup>2</sup>، غلظت سولفات سدیم برابر ۰/۵ mM/L در نظر گرفته شد. نتایج این بخش از مطالعه در نمودار ۴ ارائه شده است.

#### تعیین تأثیر اثر هم افزایی و حضور رباینده

رادیکال بر کارایی فرایند: در این بخش از مطالعه، پس از تعیین شرایط بهینه پارامترها، اثرگذاری فرایند ازن زنی ساده و فرایند الکترولیز به صورت جداگانه در شرایط بهینه و همچنین حضور ترت بوتانول به عنوان شاخص رباینده‌ی رادیکال مورد بررسی قرار گرفت. درحالی‌که در شرایط بهینه فرایند ۹۹ درصد از SDBS در فرایند الکترو-ازوناسیون حذف شد، اما در فرایند ازن زنی ساده و فرایند الکترولیز در شرایط بهینه فرایند به ترتیب ۴۹ و ۱۶ درصد از SDBS اولیه را حذف می‌نماید. حضور

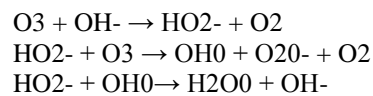


واکنش شده و میزان واکنش با  $H_2O_2$  و  $HO_2^-$  کاهش می‌یابد و در نتیجه رادیکال هیدروکسیل کمتری تولید می‌شود. از سویی دیگر، به دلیل کاهش ازن محلول و افزایش میزان  $HO_2^-$  نسبت به ازن در محیط، با آلاینده در عنوان رادیکال اسکاونجر عمل کرده و با آلاینده در مصرف رادیکال هیدروکسیل رقابت می‌نماید (رابطه‌ی ۶) (۱۴). مهمترین نکته‌ای که درباره این فرایند می‌توان اشاره نمود این است که کارایی فرایند، در محدوده‌ی گسترده‌ی pH بسیار مطلوب است و از آنجایی که پساب‌های صنایع دارای pH متنوعی هستند، بنابراین می‌توان از این فرایند در تصفیه‌ی این پساب‌ها استفاده نمود. طبق مطالعات صورت گرفته توسط وانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ بر روی حذف TOC حاصل از رنگ اسیدی نارنجی ۲ مشخص شد که کارایی فرایند الکترو پراکسون در pH ۳ و ۷ بالاتر از pH ۱۰ می‌باشد و در این pH ها کارایی حذف TOC به ترتیب ۹۷، ۹۳ و ۷۷ درصد می‌باشد (۵). همچنین مطالعه‌ی ژانوزین و همکارانش در سال ۲۰۱۳ بر روی تثبیت شیرابه زباله بیانگر تاثیرگذاری

هیدروژن در سطح الکتروود کاتد به سمت pH بسیار اسیدی پیش رفت. بنابراین برای تعیین تاثیر pH محیط همواره در طی فرایند هیدروکسید سدیم به محیط اضافه شد تا pH در نقطه مورد نظر ثابت شود (۱۲، ۵). نتایج بیانگر نزدیک بودن کارایی فرایند در حذف SDBS در pH های ۵، ۳ و ۷ بود که در این pH ها کارایی بالا درصد به دست آمد. اما با افزایش pH در محیط فرایند، کارایی کاهش یافت. طبق مطالعات صورت گرفته در فرایند ازن زنی متداول، با افزایش pH محیط به محدوده‌ی قلیایی، مولکول ازن با یون هیدروکسیل در محیط واکنش داده و تولید ترکیب  $HO_2^-$  می‌نماید (رابطه ۴). سپس این ترکیب طبق رابطه‌ی ۵ با مولکول ازن واکنش داده و تولید رادیکال هیدروکسیل می‌گردد (۱۳).

اما در فرایند الکتروپراکسون به دلیل تولید الکتروشیمیایی  $H_2O_2/HO_2^-$  (رابطه‌ی ۳ و ۲)، تشکیل  $HO_2^-$  از واکنش بین یون هیدروکسیل با مولکول ازن (طبق رابطه‌ی ۶) به عنوان یک واکنش جانبی محسوب می‌شود که باعث کاهش غلظت ازن محلول در محیط

pH بر کارایی فرایند و همخوانی نتایج مطالعه با این مطالعه دارد (۱۵).



با افزایش میزان جریان الکتریکی ورودی به محفظه‌ی واکنش، کارایی فرایند افزایش یافت. دلیل این امر به افزایش تولید الکتریکی  $H_2O_2$  در سطح الکترو کاتد بر می‌گردد و متعاقباً میزان رادیکال هیدروکسیل بیشتری از واکنش بین ازن و  $H_2O_2$  تولید می‌شود.

نکته‌ای که قابل توجه است این است که میزان افزایش کارایی فرایند از ۱۶ میلی آمپر بر سانتی متر مربع به ۵۰ آمپر بسیار بیشتر از میزان افزایش کارایی از ۵۰ به ۸۰ میلی آمپر بر سانتی مترمربع می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان اینگونه توصیف نمود که میزان توانایی واکنش بین پراکساید هیدروژن و گاز ازن به دلیل محدودیت میزان انحلال گاز ازن در محلول کم است. از سویی نتایج نشان می‌دهد که فرایند تولید پراکساید هیدروژن به صورت الکتروشیمیایی، فرایندی افزایشی با گذشت زمان است. بنابراین فاکتور تولید پراکساید هیدروژن، عامل کندشدن افزایش کارایی نیست و آنچه محدودکننده‌ی این موضوع است، محدودیت انتقال مولکول ازن از فاز گازی به فاز محلول می‌باشد (۱۵). همچنین در صورت انحلال پایین ازن در محلول، پراکساید هیدروژن کمتری به رادیکال هیدروکسیل تبدیل می‌شود و پراکساید هیدروژن دست نخورده در محلول باقی می‌ماند و از آنجایی که پراکساید هیدروژن اکسید کننده قوی نمی‌باشد، کارایی فرایند کاهش می‌یابد (۱۶). در سال ۲۰۰۵، کیشیمو (۱۷) و همکارانش گزارش کردند که در فرایند ازوناسیون و الکترولیز با الکترودهای استیل، فرایند تحت تاثیر جریان الکتریکی کمتر از ۱۰ آمپر بر مترمربع می‌باشد، اما آنچه عامل اصلی در محدودیت فرایند می‌باشد، توانایی محدود انتقال مولکول ازن از فاز گازی به فاز محلول به دلیل محدودیت در انحلال ازن می‌باشد.

بر اساس تئوری انتقال جرم، افزایش میزان دبی ورودی ازن به محفظه واکنش باعث افزایش غلظت ازن محلول در محیط می‌گردد و از آنجایی که ازن دارای نقش دوگانه به‌عنوان عامل تولیدکننده‌ی رادیکال‌های اکسیدکننده‌ی هیدروکسیل از واکنش با پراکساید هیدروژن (رابطه ۱) و اکسیداسیون مستقیم توسط خود مولکول ازن می‌باشد، انتظار می‌رود با افزایش دبی ازن ورودی به راکتور باعث افزایش کارایی فرایند شود (۱۸).

مطالعه‌ای که توسط وانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ بر روی رنگ‌بری رنگ اسید نارنجی ۲ صورت گرفته است، مشخص نمود که با افزایش دبی ازن از ۳۵ به ۱۱۸ میلی گرم در لیتر باعث افزایش کارایی حذف از ۸۰ به ۹۸ درصد شد (۵). همچنین نتایج مطالعه‌ی گانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ بر روی حذف ایوبروفن با فرایند الکتروپراکسون مشخص کرد که افزایش غلظت ازن از ۱۰ به ۴۰ میلی گرم در لیتر باعث افزایش کارایی حذف و افزایش کارایی حذف TOC شده است (۱۲).

همانگونه که مشخص است غلظت SDBS در مقادیر مختلف در محیط یافت می‌شود. بنابراین تعیین تاثیر غلظت اولیه‌ی آلاینده بر کارایی فرایندها از جمله فرایند مورد مطالعه و انتخاب روش مناسب بر اساس غلظت اولیه و کارایی فرایند امری ضروری است. بدیهی است که با افزایش غلظت آلاینده در محیط باعث مصرف بیشتر مواد اکسیدان مانند رادیکال هیدروکسیل و مولکول ازن می‌شود. کاهش راندمان حذف با افزایش میزان حضور آلاینده را می‌توان اینگونه تفسیر نمود که در شرایطی که تمامی پارامترها از قبیل میزان ازن ورودی، میزان جریان الکتریکی و به تبع آن میزان پراکساید هیدروژن و رادیکال هیدروکسیل تولیدی و زمان واکنش ثابت است، در این حالت غلظت اولیه آلاینده، به‌عنوان مصرف‌کننده‌ی عوامل اکسید کننده افزایش می‌یابد در نتیجه فرایند تجزیه‌ی آلاینده در غلظت‌های بالا به دلیل حضور بیشتر آلاینده در محیط به‌صورت کامل صورت

حضور این عوامل باعث مصرف رادیکال‌های اکسیدکننده و در نتیجه ایجاد رقابت با آلاینده مورد بررسی شد.

ترکیب ترت بوتیل به‌عنوان مصرف‌کننده بسیار قوی رادیکال‌های اکسیدکننده است که نسبت به سایر عوامل رباینده‌ی رادیکال با سرعت بالاتری ( $M^{-1} S^{-1}$ )  $K_{OH}^{[z,rad]} = 5 \times 10^8$  وارد واکنش می‌گردد. در پی واکنش ترت بوتیل الکل با رادیکال‌های اکسیدکننده، ترکیبات واسطی تولید خواهد شد که خود موجب خاتمه یافتن واکنش‌های زنجیره رادیکالی می‌گردد. در حضور عوامل رباینده رادیکال، به علت وجود عوامل مداخله‌گر، ازن قادر به واکنش با گروه‌های هیدروکسیل نخواهد بود و در نتیجه واکنش‌های بعدی جهت تولید رادیکال‌های فعال مختل و کارایی حذف ماده‌ی آلی مورد نظر کاهش خواهد یافت (۲۲). نتایج حاصل از مطالعه‌ی ما و همکاران (۲۳) در سال ۱۹۹۹، حذف آرتزین توسط فرآیند ازن زنی کاتالیزوری در حضور اکسید منگنز به عنوان بیانگر کاهش میزان حذف آرتزین در حضور ترت بوتیل الکل به عنوان عوامل رباینده رادیکال می‌باشد. به طوری که در مدت زمان ۵ دقیقه و در حضور ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر ترت بوتانول، کارایی حذف آرتزین از ۱۰۰ درصد به ۴۲ درصد کاهش یافته است. نتایج این بررسی نشان داد که عوامل رباینده‌ی رادیکال مانع از تشکیل رادیکال‌های فعال خواهد شد. یکی از روش‌های ساده، کم هزینه و در عین حال سریع در راستای تعیین میزان معدنی سازی در طی فرایند، آزمایش COD است.

این آزمایش مشخص می‌کند که فرایند تا چه میزان باعث انجام کامل فرایند معدنی سازی و انجام کامل فرایند می‌شود. همچنین استفاده از آزمایش دقیق TOC می‌تواند به تعیین موثر بودن کارایی فرایند کمک بسیاری نماید. در این مطالعه به دلیل ساختار خاص SDBS مورد مطالعه و حضور حلقه‌های آروماتیک در ساختمان این ترکیب بدیهی است که کارایی فرایند در حذف COD و TOC کمتر و با سرعت کندتری صورت گیرد که نتایج

نمی‌گیرد و باعث کاهش راندمان و تولید محصولات حد واسط می‌گردد. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه با نتایج مطالعه‌ی آدرین و همکارانش در سال ۲۰۱۱ و هوآنگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ بر روی حذف CIP با فرایند ازن زنی کاتالیزوری همخوانی دارد و در این مطالعات نیز بالاترین کارایی فرایندها در پایین‌ترین مقدار CIP مشاهده شد (۲۰، ۱۹). در این مطالعه پارامترهای ازن به‌عنوان عامل اکسیدکننده مستقیم و عامل فعال سازی رادیکال هیدروکسیل و فرایند الکترولیز به‌عنوان عامل اکسیداسیون آندی و تولید پراکساید هیدروژن و رادیکال هیدروکسیل، به‌عنوان اصلی‌ترین پارامترهای تاثیر گذار بر فرایند محسوب می‌شوند. نتایج نشان داد که هر یک از پارامترها به‌صورت مجزا دارای راندمان خیلی پایین‌تری نسبت به استفاده توأم پارامترها می‌باشند. مطالعه‌ای که میزوتانی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ انجام داده‌اند مشخص نمود که کارایی فرایند ازن زنی ساده و فرایند الکترولیز به‌صورت جداگانه در حذف ۱-۴ دی اکساین به‌عنوان شاخص ترکیبات آلی بسیار پایین‌تر از هنگامی است که دو فرایند با هم ادغام می‌شوند (۲۱). همچنین در مطالعات رحمانی و همکاران هم افزایش پارامترهای دخیل بر مطالعه کارایی فرایند اکسیداسیون پیشرفته الکتروشیمیایی با استفاده از پرسولفات در تخریب رنگ اسید بلوی ۱۱۳ از محیط‌های آبی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که فرایند الکترو/پرسولفات با حضور الکترولیت دارای بالاترین کارایی در حذف این رنگ دی آزو می‌باشد (۲۴).

مکانیسم عمل در فرایند الکترولیز، اکسیداسیون آندی بر پایه‌ی تولید پراکساید هیدروژن می‌باشد، ولی این ترکیب در صورت عدم تبدیل به رادیکال هیدروکسیل، اکسیدکننده‌ی ضعیفی می‌باشد و کارایی فرایند ناچیز خواهد بود (۵). حضور رباینده‌ی رادیکال در فرایندهای AOPs یکی از مواردی است که باید مورد بررسی قرارگیرد. نتایج بیانگر این موضوع است که

مانند لجن و انجام اکسیداسیون کامل، باعث حذف آلاینده‌ی آلی مقاوم SDBS شد. همانگونه که نتایج نشان می‌دهد به دلیل کارایی بالا در pH گسترده و عدم نیاز به تنظیم دقیق pH و همچنین راهبری و کنترل آسان فاکتورهای تاثیرگذار بر فرایند مانند جریان الکتریکی و دبی ازن ورودی از این روش می‌توان برای حذف و بی‌خطر سازی پساب‌های واقعی حاوی این‌گونه ترکیبات استفاده نمود.

### تشکر و تقدیر

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی دانشجویی با عنوان بررسی کارایی فرایند الکتروازوناسیون در تجزیه SDBS از محیط‌های آبی مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی همدان در سال ۱۳۹۴ است که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی همدان اجرا شده است که نویسندگان مقاله از عنایات مسئولان دانشگاه تشکر و قدردانی می‌کنند.

ارایه شده در بخش نتایج، مؤید این مطلب است. در اکثر مطالعات انجام شده، میزان حذف COD و TOC به صورت پارامتر اصلی یا در کنار حذف آلاینده مورد بررسی قرار گرفته است که در راستای تعیین میزان قابلیت فرایند در معدنی سازی و کم‌خطر سازی می‌باشد. از این جهت می‌توان به مطالعات وانگ، یوان، گوانگ اشاره نمود. نتایج به‌دست آمده در تمامی مطالعات نشان داده که سرعت حذف COD و TOC کندتر از سرعت تجزیه و حذف آلاینده مورد مطالعه بوده است که اندازه‌گیری این پارامترها در مطالعات مذکور بیانگر اهمیت بالای بحث معدنی سازی توسط فرایندهای مورد مطالعه است و نتایج ارایه شده در این مطالعه و سایر مطالعات، بیانگر بالای فرایند در معدنی سازی در مدت زمان طولانی‌تری نسبت به حذف آلاینده می‌باشد (۱۲, ۶, ۵).

امروزه، حضور ترکیبات آلی مقاوم از جمله SDBS، به مشکل زیست محیطی مهمی تبدیل شده است. فرایند الکتروازوناسیون، فرایندی دوستدار محیط زیست می‌باشد که با کارایی بالا و عدم تولید محصولات جانبی

### References

1. Bautista-Toledo MI, Rivera-Utrilla J, Méndez-Díaz JD, Sánchez-Polo M, Carrasco-Marín F. Removal of the surfactant sodium dodecylbenzenesulfonate from water by processes based on adsorption/bioadsorption and biodegradation. *J Colloid Interface Sci.* 2014;418:113-9.
2. Wen SY, Ma ZQ, Ma ML, Chen SY, Li L, Jiang J. Degradation of Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate by Bentonite, TiO<sub>2</sub>, and TiO<sub>2</sub>-Bentonite. *Materials Science Forum.* 2013; 743-4: 823-30.
3. Cursino ACT, da Silva Lisboa F, dos Santos Pyrrho A, de Sousa VP, Wypych F. Layered double hydroxides intercalated with anionic surfactants/benzophenone as potential materials for sunscreens. *J Colloid Interf Sci.* 2013;397:88-95.
4. Tripathi SK, Tyagi R, Nandi BK. Removal of Residual Surfactants from Laundry Wastewater: A Review. *J Disper Sci Technol.* 2013;34(11):1526-34.
5. Bakheet B, Yuan S, Li Z, Wang H, Zuo J, Komarneni S, et al. Electro-peroxone treatment of Orange II dye wastewater. *Water Res.* 2013;47(16):6234-43.
6. Yuan S, Li Z, Wang Y. Effective degradation of methylene blue by a novel electrochemically driven process. *Electrochem Commun.* 2013;29:48-51.
7. Wang Y, Li X, Zhen L, Zhang H, Zhang Y, Wang C. Electro-Fenton treatment of concentrates generated in nanofiltration of biologically pretreated landfill leachate. *J Hazard Mater.* 2012;229-30:115-21.
8. Li Z, Yuan S, Qiu C, Wang Y, Pan X, Wang J, et al. Effective degradation of refractory organic pollutants in landfill leachate by electro-peroxone treatment. *Electrochim Acta.* 2013;102:174-82.
9. American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. 2012.



10. Rahim Pouran S, Abdul Raman AA, Wan Daud WMA. Review on the application of modified iron oxides as heterogeneous catalysts in Fenton reactions. *Journal of Cleaner Production*. 2014;64:24-35.
11. Samarghandi MR, Shabanloo A, Poureshghe Y, Mehralipour J. Performance of electrocoagulation process in cyanide removal from synthetic wastewater by AL electrodes and using MgO as a coagulant aid. *J Sabzevar Univ Med Sci*. 2014;21(2):252-62.[persian]
12. Li X, Wang Y, Yuan S, Li Z, Wang B, Huang J, et al. Degradation of the anti-inflammatory drug ibuprofen by electro-peroxone process. *Water Res*. 2014;63:81-93.
13. Scheurer M, Godejohann M, Wick A, Happel O, Ternes TA, Brauch H-J, et al. Structural elucidation of main ozonation products of the artificial sweeteners cyclamate and acesulfame. *Environ Sci Pollut R*. 2012;19(4):1107-18.
14. Jin X, Peldszus S, Huck PM. Reaction kinetics of selected micropollutants in ozonation and advanced oxidation processes. *Water Res*. 2012;46(19):6519-30.
15. Niu J, Ding S, Zhang L, Zhao J, Feng C. Visible-light-mediated Sr-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> photocatalysis of tetracycline: Kinetics, mechanisms and toxicity assessment. *Chemosphere*. 2013;93(1):1-8.
16. Sirés I, Brillas E. Remediation of water pollution caused by pharmaceutical residues based on electrochemical separation and degradation technologies: a review. *Environ Int*. 2012;40:212-29.
17. Kishimoto N, Morita Y, Tsuno H, Oomura T, Mizutani H. Advanced oxidation effect of ozonation combined with electrolysis. *Water Res*. 2005;39(19):4661-72.
18. Cussler EL. Diffusion: mass transfer in fluid systems: Cambridge university press; 2009.
19. Sui M, Xing S, Sheng L, Huang S, Guo H. Heterogeneous catalytic ozonation of ciprofloxacin in water with carbon nanotube supported manganese oxides as catalyst. *Journal of hazardous materials*. 2012;227:227-36.
20. Prieto A, Möder M, Rodil R, Adrian L, Marco-Urrea E. Degradation of the antibiotics norfloxacin and ciprofloxacin by a white-rot fungus and identification of degradation products. *Bioresource technology*. 2011;102(23):10987-95.
21. Kishimoto N, Nakagawa T, Okada H, Mizutani H. Effect of separation of ozonation and electrolysis on effective use of ozone in ozone-electrolysis process. *Ozone: Science & Engineering*. 2011;33(6):463-9.
22. Li W, Lu S, Qiu Z, Lin K. Clofibric acid degradation in UV254/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process: Effect of temperature. *J Hazard Mater*. 2010;176(1-3):1051-7.
23. Ma J, Graham NJ. Degradation of atrazine by manganese-catalysed ozonation: Influence of humic substances. *Water Res*. 1999;33(3):875-93.
24. Rahmani A, Mehralipour J, Shabanloo N, Zaheri F, Poureshghe Y, Shabanloo A. Performance Evaluation of Advanced Electrochemical Oxidation Process With the Using Persulfate in Degradation of Acid Blue 113 from Aqueous Solutions. *J Sabzevar Univ Med Sci*. 2014;21(5):797-807.[persian]

# Performance Evaluation of Electro-Ozonation Process (EOP) in SDBS Degradation in Aqueous Media

**Mohammadreza Samarghandi,**

Department of Environmental Health Engineering and Research Center for Health Science, Faculty of Health, Hamadan. University of Medical Science, Hamadan, Iran.

**Amir Shabanloo,**

M.Sc. of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Hamadan University of Medical Science, Hamadan, Iran.

**Saba Majidi,**

M.Sc. student of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Hamedan University of Medical Science, Hamadan, Iran.

**Yusef Poureshgh,**

Ph.D. Student of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Hamadan University of Medical Science, Hamadan, Iran.

**\*Jamal Mehralipour,**

M.Sc. of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Hamadan University of Medical Science, Hamadan, Iran.

Received:16/11/2014, Revised:03/12/2014, Accepted:28/02/2015

## Correspond Author:

Jamal Mehralipour,  
Hamadan, Medical Science  
University of Hamadan,  
E-mail:  
Jamalmehralipour@yahoo.com

## Abstract

**Background & Objectives:** Electro-Ozonation process (EOP) has a good potential for the removal of persistent organic pollutants. This process is a combination of ozonation process and electricity for producing hydroxyl radical and removal of pollutants. The purpose of this study was to evaluate the EOP for SDBS degradation in aqueous media.

**Materials & Methods:** In this experimental study, a semi-batch reactor with four graphite electrodes of 120 cm<sup>2</sup> area was used. The effects of pH (3-11), the inlet of ozone (6-30 mM / s), current density (16-85 mA/cm<sup>2</sup>), the initial concentration of SDBS (0.02-0.3 mM/L) and radical scavenger dose (0.2 mM/L) were studied. SDBS concentration measured by spectrophotometer (DR5000) by instructions provided in the standard method book.

**Results:** The results indicate the high efficiency of this process in the removal of SBDS and COD. In optimum conditions of pH = 3, current 85 mA/cm<sup>2</sup>, ozone flow rate 30 mM/s and initial SDBS concentration 0.02 mM/L, more than 99% removal was observed in 50 min. By changing the parameters of the optimum conditions, the process performance was decreased. High efficiency of COD removal in this process was obtained in 80 min. Influence of TBA in solution was the efficiency decrease of process to 80 %.

**Conclusion:** Electro-ozonation process as an advanced oxidation process can reduce organic pollution industry and can be considered as an environmentally friendly process.

**Key Words:** Ozonation, Electrical current, SDBS, Aqueous media