

بررسی کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون در حذف کربن آلی کل از فاضلاب‌های صنعتی

مهدی احمدی مقدم^۱، هدی امیری^۲

نویسنده مسئول: اهواز، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور، دانشکده بهداشت، گروه بهداشت محیط Hoda.Amiri@gmail.com

پذیرش: ۸۹/۰۱/۱۸

دریافت: ۸۸/۱۰/۲۳

چکیده

زمینه و هدف: فنل و فرمالدهید از جمله مواد اصلی تشکیل دهنده فاضلاب صنایع تولید کننده رزین هستند. به علت سمیت این ترکیبات، وجود آنها در واحدهای تصفیه بیولوژیکی مانع از عملکرد طبیعی جمعیت های میکروبی می شود. در نتیجه بر فرایندهای تصفیه بیولوژیکی تاثیر منفی می گذارند. هدف از این مطالعه بررسی فرایند الکتروکواگولاسیون در حذف *TOC* از فاضلاب صنایع تولید رزین فنل - فرمالدهیدی با استفاده از الکترودهای آلومینیومی است.

روش بررسی: این مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی است که به صورت پایلوت اجرا گردید. نمونه فاضلاب پس از تنظیم مقایر *pH*، هدایت الکتریکی و شدت جریان مورد نظر به درون راکتور حاوی چهار عدد الکترودهای آلومینیومی وارد شد. الکترودها به یک دستگاه منبع تغذیه الکتریکی با جریان مستقیم ($V = 40 - 0$ ، $A = 3 - 0$) متصل شدند. نمونه ها پس از گذشت مدت زمان معین، از میانه راکتور جهت اندازه گیری *TOC* جمع آوری شدند. نمونه های جمع آوری شده با استفاده از دستگاه آنالیز *TOC* اندازه گیری شدند.

یافته ها: نتایج حاکی از آن بود که شرایط بهینه جهت حذف *TOC*، شدت جریان $75 A/m^2$ ، *pH* طبیعی فاضلاب (۴) و هدایت الکتریکی $3 ms/cm$ است. در این شرایط میزان انرژی مصرفی $22/5 kWh/m^3$ بعد از ۶۰ دقیقه زمان واکنش بوده است.

نتیجه گیری: این مطالعه نشان داد که فرایند الکتروکواگولاسیون در پیش تصفیه فاضلاب های صنایع تولید رزین فنل - فرمالدهیدی می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: الکتروکواگولاسیون، فاضلاب های صنعتی، کربن آلی کل

۱- دکترای بهداشت محیط، استادیار دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز

مقدمه

تصفیه موثر انواع فاضلاب‌ها به ویژه فاضلاب‌های صنعتی به منظور حفظ محیط زیست اهمیت ویژه‌ای دارد. امروزه به دلیل گسترش روزافزون صنایع شیمیایی به ویژه برپایه مواد نفتی، پالایش نفت خام و تولید فراورده‌های مربوط و نیاز گسترده به آب در فرایند تولید، انواع پساب‌های خطرناک حاوی ترکیباتی چون هیدروکربورها، چربی و روغن، فنل، سولفید هیدروژن و غیره به طبیعت وارد می‌شوند. هیدروکربن‌های نفتی را می‌توان به چهار دسته طبقه‌بندی کرد: ترکیبات اشباع‌شده، آروماتیک، آسفالتن (فنل، اسیدهای چرب، کتون‌ها، استرها و پرفیرین‌ها) و رزین‌ها (پیریدین‌ها، کینولین‌ها، کاربازول‌ها، سولفوکسیدها و آمیدها) (۱). تعداد، تنوع و پیچیدگی ترکیبات شیمیایی مصنوعی در حال گسترش می‌باشد و استفاده از این ترکیبات در همه‌ی جنبه‌های زندگی کنونی و مدرن نفوذ کرده و مرسوم شده است. یک گروه عمده از این ترکیبات، رزین‌های فنولیک است. رزین‌های فنولیک، پلیمرهای چند بعدی هستند که در نتیجه چگالش فرمالدهید و فنول حاصل می‌شوند و در نهایت فاضلابی حاوی مواد فنولیک، فرمالدهید و اوره تولید خواهد شد (۲). فنل و فرمالدهید از جمله مواد اصلی تشکیل‌دهنده فاضلاب صنایع تولیدکننده رزین می‌باشد. مقدار فنل در این فاضلاب‌ها 600 تا 2000 mgL^{-1} و مقدار فرمالدهید 500 تا 1300 mgL^{-1} گزارش شده است (۳). فرمالدهید به علت ویژگی‌های واکنش‌پذیری بالا، بی‌رنگ بودن، پایداری، خلوص بالا و قیمت پایین آن، به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این ترکیب به عنوان ماده عمل‌آورنده مواد پلاستیکی، ساخت رزین‌های مصنوعی، عامل کاهنده حجم، بازدارنده خوردگی، ضد عفونی‌کننده، مایعات عطری، فارچ‌کش و ماده نگه‌دارنده استفاده می‌شود (۴). نگرانی اصلی مواجهه مکرر با فرمالدهید تحریک بافت‌ها و سرطان است. در افراد آسیب‌پذیر، فرمالدهید می‌تواند باعث ایجاد آسم و آماس پوست شود. اثرات مضر

بر روی سیستم اعصاب مرکزی مانند افزایش شیوع سردرد، افسردگی، تغییرات وضعیت روانی و بی‌حوصلگی، بی‌خوابی، زودرنجی، کم‌توجهی، اختلال در چالاکتی، حافظه و تعادل در نتیجه تماس طولانی مدت مواجهه با فرمالدهید گزارش شده است (۵و۴). فنل نیز یکی از مهم‌ترین مواد شیمیایی صنعتی نگران‌کننده محیط زیست است که به طور وسیعی در بسیاری از صنایع بزرگ مانند صنایع تولیدکننده زغال‌کک، پالایشگاه‌ها، تولید رزین، دارویی، حشره‌کش‌ها، رنگ‌ها، پلاستیک‌ها، ساخت مواد منفجره و سوخت و علف‌کش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین در فاضلاب این صنایع نیز موجود می‌باشد. ترکیبات فنلی از منابع طبیعی در اثر تجزیه مواد آلی و یا از طریق زغال‌چوب وارد محیط زیست می‌شوند (۶و۵). ترکیبات فنولیک و فنل به طور بالقوه عامل سرطان‌زای انسان‌ها بوده و حتی در غلظت‌های پایین نیز به طور قابل توجهی برای سلامتی نگران‌کننده است. اثرات سوناشی از فنل از طریق نفوذ در غشای سلولی و ورود به سیتوپلاسم و آسیب سلول‌های حساس ایجاد می‌گردد و باعث ایجاد مشکلات جدی برای سلامت انسان‌ها و محیط زیست می‌شود. سمیت حاد ناشی از فنل باعث ایجاد اختلالات جدی در سیستم گوارش، آسیب به کلیه‌ها، کبد، نقص در عملکرد دستگاه گردش خون، ادم ریه‌ها و تشنج می‌شود. فنل در مقادیر بالا و کشنده از طریق پوست جذب بدن می‌شود. سمیت مزمن ناشی از ترکیبات فنولیک و فنل باعث اختلال در سیستم خواب، آسیب به پانکراس و کلیه‌ها می‌شود (۷). تصفیه بیولوژیکی، جذب با استفاده از کربن فعال، روش‌های استخراج حلال، اکسیداسیون شیمیایی و روش‌های الکتروشیمیایی از جمله روش‌های تصفیه پساب‌های حاوی ترکیبات فنل و فرمالدهید است. اگرچه به علت سمیت این ترکیبات، وجود آنها در واحدهای تصفیه بیولوژیکی مانع از عملکرد طبیعی جمعیت‌های میکروبی می‌شوند. مشکلات ناشی از روش‌های بالا از قبیل هزینه بالا، بهره‌وری کم و تولید محصولات جانبی سمی باعث شده

از طریق حباب های هیدروژن تولید شده در کاتد و یا از طریق ته نشینی، از سطح مایع حذف شوند (۱۳ و ۱۴). آرایش یک راکتور الکتروکواگولاسیون ممکن است با الکترودهای یک قطبی (Mono-polar) با آرایش سری یا موازی و یا دو قطبی (Bi-polar) باشد. یک راکتور الکتروکواگولاسیون با الکترودهای یک قطبی و آرایش موازی شامل جفت صفحات فلزی هادی می باشد که بین دو الکتروده موازی و یک منبع تغذیه DC قرار گرفته است. در صورتی که در آرایش سری هر جفت از الکترودهای قربانی، خود به صورت دوتایی به یکدیگر متصل شده اند و هیچ گونه اتصالی بین آنها با الکترودهای بیرونی وجود ندارد. در این آرایش الکترودهای یک قطبی با سل های در حالت سری از نظر الکتریکی مشابه یک سل مجزا با الکترودهای فراوان و در اتصال با هم می باشد (۱۵). الکتروکواگولاسیون فاضلاب با استفاده از الکترودهای آلومینیومی توسط برخی محققین گزارش شده است. تجزیه الکترولیتی آند آلومینیومی سبب تولید گونه های منومریک کاتیونی نظیر Al^{3+} و $Al(OH)_2^+$ در pH پایین می شود که در pH مناسب ابتدا به $Al(OH)_3$ تغییر شکل داده و در نهایت بر اساس واکنش های زیر به $Al(OH)_3$ پلیمریزه می شوند:

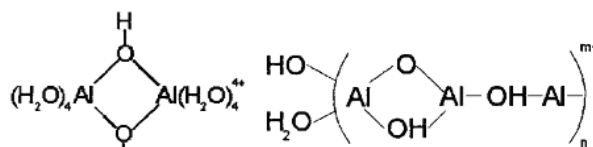


با این حال بسته به pH محیط آبی گونه های یونی دیگر نظیر $Al(OH)_2^{2+}$ ، $Al(OH)_4^-$ و $Al(OH)_4^+$ نیز ممکن است در سیستم تشکیل شوند. ساختار کمپلکس های هیدروکسید آلومینیوم (Al^{3+}) در شکل ۱ نمایش داده شده است. این کمپلکس های کاتیونی هیدروکسید باردار ژلاتینی می توانند سبب حذف آلاینده ها از طریق مکانیسم جذب سطحی و خنثی سازی بار شوند که نقش مهمی را در فرایند انعقاد

است که از روش های الکتروشیمیایی و بیولوژیکی به علت آثار مضر کم بر محیط زیست بیش تر مورد استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر واکنش های الکتروشیمیایی وابستگی کمی به شرایط فاضلاب داشته و تا زمانی که منبع انرژی الکترودها تامین می شود، می توانند ادامه یابد. از این رو جهت تصفیه ترکیبات آلی مقاوم در برابر تجزیه بیولوژیکی، روش های شیمیایی تجزیه ممکن است گزینه بهتری باشد (۸، ۹ و ۱۰). Rajkumar و Palanivelu ترکیبات فنلی را با استفاده از الکترودهای $Ti/TiO_2-RuO_2-FeO_2$ و با آرایش یک قطبی موازی تصفیه نمودند. نتایج این محققین حاکی از آن بود که فرایند الکتروکواگولاسیون در تصفیه فاضلاب های صنعتی حاوی مواد آلی مقاوم در مقابل تجزیه بیولوژیکی موثر می باشد (۸). Nafaa و Lotfi در مطالعه ای رنگ زدایی و حذف ترکیبات فنلی از فاضلاب کارخانه زیتون را با استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون و الکترودهای آلومینیومی با آرایش یک قطبی مورد بررسی قرار دادند و در این ارتباط ۷۶ درصد حذف COD، ۹۱ درصد حذف پلی فنل ها و حذف ۹۵ درصد رنگ سیاه را تنها در طی ۲۵ دقیقه زمان واکنش گزارش نمودند (۱۱). حذف لیگنین فنل ناشی از پساب ماشین کاغذ سازی با استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون نیز توسط Ugurlu و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه با استفاده از الکتروده آلومینیوم با آرایش یک قطبی موازی حذف لیگنین ۸۰٪، حذف فنل ۹۸٪، حذف BOD ۷۰٪ و حذف COD ۷۵٪ بعد از ۷/۵ دقیقه گزارش شده است (۱۲). فرایند الکتروکواگولاسیون با اکسیداسیون آندهای قربانی تولید شده توسط الکترودهای آهن و آلومینیوم (به ترتیب یون های Fe^{2+} و Al^{3+}) شروع می شود. در ادامه فرایند، یون های فلزی با یون های هیدروکسید ناشی از الکترولیز آب در اطراف کاتد، ترکیب شده و تولید هیدروکسیدهای فلزی را می دهد که باعث ناپایداری آلاینده ها و یا جامدات معلق و تشکیل فلاک می گردد. فلاک های تشکیل شده می تواند بر اساس دانسیته با استفاده از فرایند شناورسازی

شیمیایی بازی می کند (۱۴).

مختلف pH (۴ مقدار طبیعی فاضلاب)، ۷ و ۱۰)، شدت جریان (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ آمپر/مترمربع) و (۴۰ ولت)، هدایت الکتریکی (مقدار طبیعی فاضلاب (۱/۵۴) و (۳ mS/cm) و زمان واکنش (۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه) انجام شد. به منظور تنظیم هدایت الکتریکی از کلرید سدیم (۰/۵ نرمال) دستگاه هدایت سنج (Jenway، ۴۲۰۰) و تنظیم pH مورد نظر از هیدروکسید سدیم (۰/۱ نرمال) استفاده شد. پس از گذشت مدت زمان تعیین شده برای انجام فرایند، جهت اندازه گیری pH و TOC اقدام به نمونه برداری از محلول موجود در راکتور گردید. نمونه برداری تقریباً از میانه راکتور و به حجم ۲۰ میلی لیتر جهت انجام آزمایش ها صورت گرفت. سپس نمونه ها از صافی واتمن شماره ۴۲ عبور داده شد و توسط دستگاه آنالیز TOC مدل SHIMADZU، V-CSH اندازه گیری شد.



شکل ۱: ساختار کمپلکس های هیدروکسید آلومینیوم

این پژوهش یک مطالعه تجربی - کاربردی بوده و به منظور امکان سنجی کاربرد فرایند الکتروکواگولاسیون در حذف TOC از فاضلاب صنایع تولید رزین با استفاده از الکترودهای آلومینیوم طراحی و اجرا گردیده است. هدف از این مطالعه بررسی تاثیر شدت جریان، pH و هدایت الکتریکی در زمان های واکنش مختلف بر حذف TOC می باشد.

مواد و روش ها

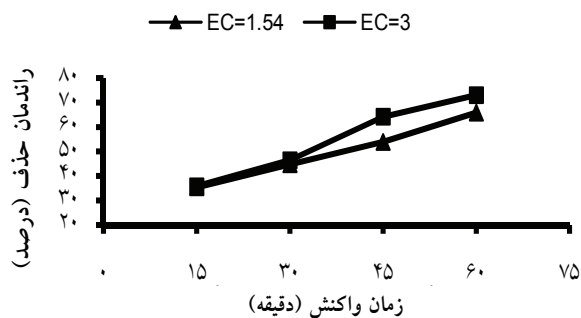
نمونه های مورد بررسی در این مطالعه از فاضلاب صنعت تولید رزین قزوین تهیه گردید و در ظرف های پلاستیکی در دمای ۴ °C نگه داری شد. تمامی ترکیبات شیمیایی از جمله اسید سولفوریک، کلرید سدیم، هیدروکسید سدیم و اسید هیدروکلریک از نوع مرک مورد استفاده قرار گرفتند. تجهیزات مربوط به واحد انعقاد الکتریکی (الکتروکواگولاسیون) شامل یک مخزن به شکل مکعب مستطیل با ابعاد ۱۵×۱۰×۱۵ سانتی متر (طول×عرض×ارتفاع) از جنس پلی اکسی گلاس و با حجم موثر یک لیتر بوده که چهار عدد صفحه فلزی از جنس آلومینیوم با ابعاد حدودی ۰/۲×۱۲×۱۲ سانتی متر و با فاصله ۱/۵ سانتی متر در داخل مخزن قرار گرفتند. صفحات فلزی به صورت یک در میان به قطب مثبت و منفی (یک قطبی موازی) به یک منبع تغذیه جهت تبدیل جریان برق شهری (AC) به جریان مستقیم (DC) متصل شدند. این صفحات بعد از هر بار استفاده با اسید هیدروکلریک (۱۵ wt. %) شست و شو داده شد. در هر بار آزمایش مخزن با یک لیتر از فاضلاب مورد نظر پر شده و به منظور بررسی تاثیر عوامل مختلف بر میزان کارایی این روش در حذف TOC فاضلاب، آزمایش ها در مقادیر

یافته ها

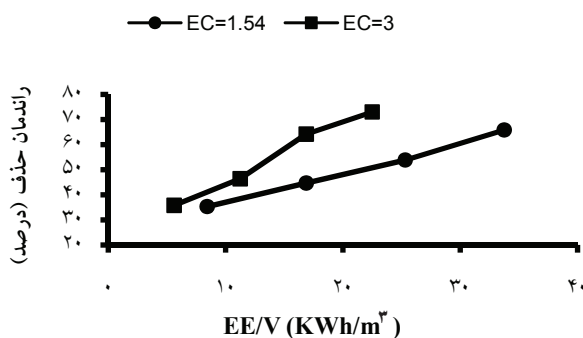
در مطالعه حاضر، فرایند انعقاد الکتریکی (الکتروکواگولاسیون) با استفاده از الکترودهای آلومینیومی به عنوان یک فرایند تصفیه برای حذف TOC از فاضلاب صنعت تولید رزین مورد استفاده و راندمان حذف در شرایط مختلف شدت جریان، هدایت الکتریکی، pH و در زمان های واکنش مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش ها سه بار تکرار شده و سپس میانگین داده ها با حدود اطمینان ۹۵٪ گزارش شده است. تاثیرگذاری پارامترها بر راندمان حذف TOC با استفاده از آزمون آماری آنالیز واریانس یک طرفه مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی های فاضلاب مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: ویژگی های فاضلاب صنعت تولید رزین

پارامتر	واحد	مقادیر
pH	غلظت یون هیدروژن	۴
هدایت الکتریکی	mS/cm	۱/۵۴
COD	mg/L	۴۰۰۰
TOC	mg/L	۲۳۷۷۶



شکل ۵: درصد حذف TOC در طی فرایند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترود های آلومینیومی در EC و زمان های تماس مختلف (غلظت اولیه TOC ۲۳۷۷۶ mg/L ، شدت جریان = ۷۵ آمپر/متر مربع و pH=۴ (طبیعی))

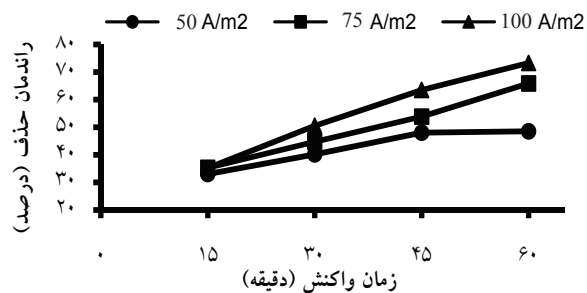


شکل ۶: مقایسه انرژی الکتریکی مورد نیاز به ازای حجم فاضلاب مصرفی (EE/V) و درصد حذف TOC با استفاده از الکترود های آلومینیومی در هدایت الکتریکی های مختلف (غلظت اولیه TOC ۲۳۷۷۶ mg/L ، شدت جریان = ۷۵ آمپر/متر مربع و pH=۴ (طبیعی))

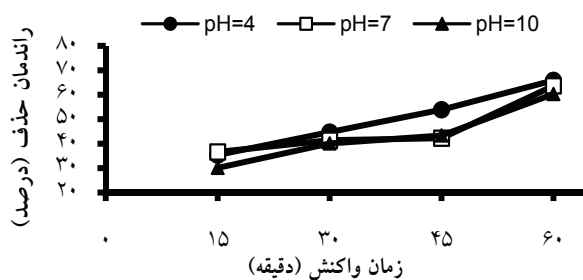
بحث و نتیجه گیری

نتایج مربوط به تاثیر شدت جریان بر حذف TOC در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش شدت جریان درصد حذف TOC نیز افزایش می یابد. بعد از ۶۰ دقیقه حداکثر درصد حذف (۷۴٪) در شدت جریان 100 A/m^2 حاصل شد. در حالی که پس از ۶۰ دقیقه زمان واکنش در شدت جریان 50 A/m^2 درصد حذف TOC برابر با ۴۸ درصد می باشد. که این بر اساس قانون فارادی با افزایش شدت جریان حلالیت الکترودهای آند نیز افزایش می یابد. در نتیجه هیدروکسیدهای آلومینیوم تولیدی میزان

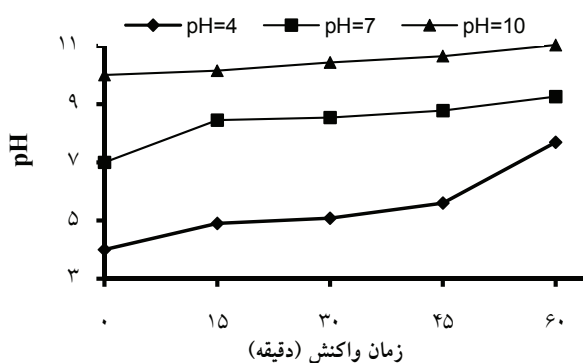
در ادامه راندمان حذف TOC در شرایط مختلف (شدت جریان، pH و هدایت الکتریکی) مورد بررسی قرار گرفته و در شکل های ۲ تا ۴ آورده شده است. هم چنین تاثیر هدایت الکتریکی بر میزان برق مصرفی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۷: درصد حذف TOC با استفاده از الکترود های آلومینیومی در شدت جریان و زمان های تماس مختلف (غلظت اولیه TOC ۲۳۷۷۶ mg/L و pH=۴ (طبیعی) و EC=۱/۵۴ (طبیعی))



شکل ۸: درصد حذف TOC با استفاده از الکترود های آلومینیومی در pH و زمان های تماس مختلف (غلظت اولیه TOC ۲۳۷۷۶ mg/L ، شدت جریان = ۷۵ آمپر/متر مربع و EC=۱/۵۴ (طبیعی))



شکل ۹: تغییرات pH با استفاده از الکترود های آلومینیومی و زمان های تماس مختلف (غلظت اولیه TOC ۲۳۷۷۶ mg/L ، شدت جریان = ۷۵ آمپر/متر مربع و EC=۱/۵۴ (طبیعی))

$Al(OH)_4$ می باشد (۱۴). تاثیر هدایت الکتریکی بر راندمان حذف TOC در فرایند الکتروکواگولاسیون در دو محدوده طبیعی و دو برابر مقدار طبیعی ($1/54$ mS/cm و ۳) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵). بدین منظور از کلرید سدیم جهت افزایش هدایت الکتریکی و به منظور کاهش انرژی الکتریکی مصرفی استفاده شد. افزایش جریان الکتریکی ناشی از افزودن کلرید سدیم علاوه بر تجزیه ترکیبات موجود در فاضلاب، باعث تسریع در برخی از واکنش ها مانند تولید H_2 در اطراف کاتد می شود. طبق شکل ۵ با افزایش هدایت الکتریکی، راندمان حذف TOC در ۳۰ دقیقه اول تقریباً یکسان ولی با افزایش زمان تماس راندمان حذف نیز افزایش می یابد. به طوری که در هدایت الکتریکی 3 mS/cm بعد از ۴۵ دقیقه ۶۴ درصد از TOC حذف می شود درحالی که در هدایت الکتریکی $1/54$ mS/cm بعد از ۶۰ دقیقه ۶۶ درصد از TOC حذف گردید. هم چنین وجود یون های کلرید باعث حذف لایه های اکسید شده غیر فعال از سطح الکتروود شده و در نتیجه تماس هیدروکسیدهای آلومینیوم با محلول را افزایش داده و راندمان حذف فنل را افزایش می دهد (۱۶). نتایج پژوهش عبدالوهاب و همکارانش وابستگی هدایت الکتریکی و راندمان حذف فنل را نشان داده و با افزایش کلرید سدیم، راندمان حذف فنل افزایش و انرژی الکتریکی مصرفی کاهش یافته است (۱۰). استانداردهای تخلیه فاضلاب به محیط زیست و هزینه برق مصرفی دو فاکتور مهم در استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون جهت تصفیه فاضلاب می باشد. محاسبه میزان برق مصرفی مورد نیاز به ازای واحد حجم فاضلاب تولیدی با استفاده از فرمول برق مصرفی (kWh/ P_s) در طول فرایند از فرمول زیر محاسبه گردیده است:

$$P_s = \frac{(U)(i)(t)}{V}$$

P_s برق مصرفی (کیلو وات ساعت در هر متر مکعب)، U اختلاف پتانسیل (ولت)، i شدت جریان (آمپر)، t مدت زمان واکنش (ساعت)، V حجم فاضلاب مصرفی (لیتر)

بیش تری از آلاینده ها را حذف کرده و میزان لجن تولیدی نیز بیش تر خواهد شد (۱۶). هم چنین با افزایش شدت جریان حباب های بیش تری تولید می شود که باعث افزایش تماس هیدروکسیدهای آلومینیوم با آلاینده شده و امکان شناورسازی لجن های تولیدی را فراهم نموده و آلاینده های بیش تری را حذف می کند (۱۷). از آنجایی که pH یکی از فاکتورهای مهم در عملکرد فرایند الکتروکواگولاسیون است (۱۸ و ۱۹). کارایی حذف TOC در سه محدوده pH (۴، ۷ و ۱۰) با غلظت اولیه 23776 mg/L، شدت جریان 75 آمپر/متر مربع و هدایت الکتریکی معادل $1/54$ mS/cm بررسی شد. همان طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، بیش ترین راندمان حذف TOC در شرایط اسیدی بوده و با افزایش pH راندمان حذف کاهش می یابد. Kobya و همکارانش نشان دادند که بیش ترین راندمان حذف COD در شرایط اسیدی می باشد و با افزایش pH راندمان حذف نیز کاهش می یابد. به طوری که در $pH=2$ با استفاده از الکترودهای آلومینیومی بالاترین راندمان (۹۳٪) حاصل شده است (۲۰). Kobya و همکارانش در پژوهش دیگری بالاترین راندمان حذف COD و کدورت را در $pH=6$ و ۴ گزارش دادند (۲۱). از آنجایی که بیش ترین درصد حذف در pH طبیعی فاضلاب خام (۴) به دست آمده که به دلیل عدم نیاز به تنظیم pH از نظر اقتصادی حایز اهمیت است. هم چنین تغییرات pH در زمان های مختلف واکنش در پساب خروجی راکتور (شکل ۴) بیانگر افزایش قابل توجه pH در شرایط اسیدی است. درحالی که در شرایط خنثی و قلیایی افزایش pH محسوس نیست. پدیده افزایش pH در شرایط اسیدی به علت تشکیل تدریجی هیدروژن در اطراف الکتروود کاتدی و در برخی موارد به دلیل آزادسازی گاز CO_2 در شرایط فوق اشباع در فاضلاب است. اگرچه تشکیل $Al(OH)_3$ در اطراف الکتروود آند باعث آزاد شدن H^+ شده و pH را کاهش می دهد و تغییر نامحسوس و گاهی کاهش pH در شرایط قلیایی ناشی از تشکیل رسوبات هیدروکسید سایر کاتیون ها و تشکیل

فاضلاب (۴) و هدایت الکتریکی 3 ms/cm است، ولی نمی توان نتیجه گیری نمود که شدت جریان، pH و هدایت الکتریکی پارامترهای تاثیرگذار در حذف TOC از این فاضلاب است، چرا که اختلاف بین راندمان حذف با پارامترهای مورد بررسی ناچیز است ($P > 0.05$). عدم وابستگی به این پارامترها از جمله مزایای الکتروکواگولاسیون محسوب می شود که امکان کاربرد آن را در گستره وسیعی از این پارامترها فراهم می نماید. این فرایند با به کارگیری الکترودهای آلومینیومی می تواند به عنوان پیش تصفیه در فرایندهای پیشرفته فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز به شماره طرح (۸۸۰۱۸-u) انجام گرفته است که بدین وسیله نویسندگان مقاله مراتب سپاس گذاری خود را اعلام می دارند. هم چنین از خانم مهندس خاکسار کارشناس ارشد و آقای مهندس اعلانژاد کارشناس بخش آزمایشگاهی اداره کل حفاظت محیط زیست استان خوزستان جهت همکاری صمیمانه شان قدردانی می نمایم.

می باشد (۲۲). در شکل ۶ انرژی الکتریکی مورد نیاز به ازای واحد حجم فاضلاب (EE/V) و درصد حذف TOC در مقادیر مختلف هدایت الکتریکی (محدوده طبیعی و دو برابر مقدار طبیعی ($1/54 \text{ ms/cm}$ و ۳) و شرایط بهینه به دست آمده از مراحل قبل مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که از این شکل استنباط می شود با افزایش هدایت الکتریکی میزان برق مصرفی نیز کاهش می یابد. به طوری که برای حذف ۶۵ درصد TOC در هدایت الکتریکی $1/54 \text{ ms/cm}$ انرژی برق مصرفی $33/75 \text{ kWh/m}^3$ بوده، درحالی که برای حذف ۷۳ درصد TOC میزان انرژی برق مصرفی $22/5 \text{ kWh/m}^3$ در هدایت الکتریکی 3 ms/cm می باشد. نتایج حاکی از آن است که هدایت الکتریکی، انرژی برق مصرفی و در نتیجه هزینه های راهبردی را تحت تاثیر قرار می دهد.

نتیجه آن که فرایند الکتروکواگولاسیون از روش های موثر در تصفیه پساب های حاوی فنل و فرمالدهید با میزان TOC بالا می باشد که با تجهیزات ساده راه اندازی می شود و به علت عدم نیاز به مواد شیمیایی، هزینه بهره برداری کم تری دارد. اگر چه نتایج حاصل از آزمایش ها نشان دادند که شرایط بهینه جهت حذف TOC، شدت جریان 75 A/m^2 ، pH طبیعی

منابع

1. Tuah PBM. The performance of phenol biodegradation by *Candida tropicalis* retl-Cr1 using batch and fed-batch fermentation techniques [dissertation]. Malaysia: Faculty of Science University Technology Malaysia; 2006.
2. Hidalgo A, Jaureguibeitia A, Prieto MB, Rodríguez-Fernández C, Serra JL, Llama MJ. Biological treatment of phenolic industrial wastewaters by *Rhodococcus erythropolis* UPV-1. *Enzyme and Microbial Technology*. 2002;31:221-26.
3. Araña J, Tello RE, Doña Rodríguez JM, Herrera MJA, González DO, Pérez PJ. Highly concentrated phenolic wastewater treatment by the photo-Fenton reaction, mechanism study by FTIR-ATR. *Chemosphere*. 2001;44:1017-23.
4. Lotfy HR, Rashed IG. A method for treating wastewater containing formaldehyde. *Water Research*. 2002;36:633-37.
5. Garrido JM, Méndez R, Lema JM. Treatment of wastewaters from a formaldehyde-urea adhesives factory. *Water Science and Technology*. 2002;42:293-300.
6. Kumaran P, Paruchuri YL. Kinetics of phenol biotransformation. *Water Research*. 1997;31:11-22.
7. Busca G, Berardinelli S, Resini C, Arrighi L. Technologies for the removal of phenol from fluid streams: A short review of recent developments. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;160:265-88.
8. Rajkumar D, Palanivelu K. Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 2004;B113:123-29.
9. Eiroa M, Kennes C, Veiga MC. Formaldehyde and urea removal in a denitrifying granular sludge blanket reactor. *Water Research*. 2004;38:3495-502.
10. Abdelwahab O, Amin NK, El-Ashtoukhy ESZ. Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 2004;163:711-16.
11. Nafaa A, Lotfi M. Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electro coagulation. *Chemical Engineering and Processing*. 2004;43:1281-87.
12. Uğurlu M, Gürses A, Doğar C, Yalçın M. The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. *Journal of Environmental Management*. 2008;87:420-28.
13. Shin SH. Combined cell of electrocoagulation and magnetic separation processes for treatment of dye wastewater. *Chemical Engineering Science*. 2004;21:806-10.
14. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*. 2004;38:11-41.
15. M Yousuf AM, Schennach R, Parga JR, Cocke DL. Electrocoagulation (EC)—science and applications. *Journal of Hazardous Materials*. 2001;84(1):29-41.
16. Guo ZR, Zhang G, Fang J, Dou X. Enhanced chromium recovery from tanning wastewater. *Journal of Cleaner Production*. 2006;14:75-79.
17. Golder AK, Samanta AN, Ray S. Removal of trivalent chromium by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*. 2007;53:33-41.
18. Chen X, Chen G, Yue PL. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*. 2000;19:65-76.
19. Adhoum N, Monser L. Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing*. 2004;43:1281-87.
20. Kobya M, Senturk E, Bayramoglu M. Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;133:172-76.
21. Kobya M, Hiz H, Senturk E, Aydinler C, Demirbas E. Treatment of potato chips

manufacturing wastewater by electrocoagulation. Desalination. 2006;190:201-211.
22. Martínez SS, Bahenab CL. Chlorbromuron urea herbicide removal by electro-Fenton

reaction in aqueous effluents. Water Research. 2009;43:33-40.

Investigation of TOC Removal from Industrial Wastewaters using Electrocoagulation Process

Ahmadi Moghadam M., *Amiri H.

Department of Environmental Health Engineering, Ahwaz Jundishapour University of Medical Sciences, Khuzestan, Iran

Received 13 January 2010; Accepted 7 April 2010

ABSTRACT

Backgrounds and Objectives: Formaldehyde and phenol are key precursors in the industrial manufacture of resins. Toxicity of these compounds prevents function of microbial populations, so they affect the biological treatments. The aim of this study was investigation of TOC removal from phenol-formaldehyde resin manufacturing wastewater by electrocoagulation using Al- electrodes.

Materials and Methods: This study is the laboratory scale experiment was conducted as a pilot. Wastewater sample was adjusted in the desired pH, electrical conductivity and current density, then it was placed in to the reactor contains four electrodes in aluminum. The electrodes were connected to a DC power supply (0-40V, 0-3A). Samples were collected for TOC determination in the middle of cell at regular time intervals. Collected samples were analyzed using TOC analyzer.

Results: The results indicated that the optimum conditions for the removal of TOC were current density 75 A/m², solution pH 4 and Conductivity 3 mS/cm. In this condition energy consumption was found 22.5 kWh m⁻³ after 60 min reaction.

Conclusion: This study shows that electrocoagulation of wastewater from phenol-formaldehyde resin manufacturing can be used as a pretreatment process.

Key words: Electrocoagulation, Industrial wastewaters, TOC

*Corresponding Author: Hoda.Amiri@gmail.com

Tel: +98 611 3738269 Fax: