

مطالعه کارایی فرآیند بیوالکتروشیمیایی دارای الکترودهای استیل اسفنجی و کربن پارچه‌ای به منظور حذف فنل در محیط‌های آبی

سمیه دهقانی (Ph.D Candidate)، عباس رضایی* (Ph.D)، زهره مقیسه (Ph.D Student)، بتول محب راد (Ph.D Candidate)
گروه بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

سابقه و هدف: ترکیبات فنلی، مواد شیمیایی صنعتی بوده که به دلیل مخاطرات زیست محیطی و بهداشتی، مورد توجه ویژه قرار دارند. در این مطالعه، کاربرد سیستم بیوالکتروشیمیایی تک محفظه‌ای دارای الکترودهای کربن پارچه‌ای و استیل اسفنجی با بستر ثابت برای حذف فنل بررسی گردید.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر، یک مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی بود که در راکتور پلکسی گلاس با حجم موثر یک لیتر و به صورت ناپیوسته انجام گرفت. پس از راه‌اندازی راکتور و پایدار شدن عمل‌کرد سیستم، پارامترهای موثر بر فرآیند شامل نسبت C/N، غلظت اولیه فنل، میزان جریان اعمالی و زمان واکنش سنجش گردید. هم‌چنین تغییرات هدایت الکتریکی، pH و پتانسیل اکسیداسیون احیا (EC/pH/ORP) طی انجام واکنش بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که با افزایش میزان جریان اعمالی از ۲ میلی‌آمپر به ۶ میلی‌آمپر (ولتاژ مصرفی ۰/۹ تا ۱/۲ ولت) کارایی فرآیند تجزیه بیوالکتروشیمیایی فنل از ۶۵٪ به ۹۶٪ افزایش یافت و در C/N برابر با ۵ راندمان حذف ۱۰۰٪ فنل حاصل گردید. مقدار انرژی و توان مصرفی سیستم به ترتیب در محدوده $0/14-0/01$ و $0/23-0/02$ محاسبه گردید.

نتیجه‌گیری: آزمایشات انجام شده نشان‌دهنده کارایی موثر بیوراکتور الکتروشیمیایی دارای الکترودهای استیل اسفنجی و کربن پارچه‌ای به دلیل رسانایی بالای الکترودها، دارا بودن سطح موثر بیشتر جهت تشکیل بیوفیلم، کاهش دانسیته جریان مورد بهره‌برداری و انرژی مصرفی به منظور حذف فنل از محیط‌های آبی می‌باشد. کارایی این راکتور می‌تواند برای حذف سایر ترکیبات آلی دیر تجزیه‌پذیر نیز بررسی شود.

واژه‌های کلیدی: فرآیند بیوالکتروشیمیایی، فنل، بیوالکتروود، کربن پارچه‌ای، استیل اسفنجی

مقدمه

ترکیبات فنلی از جمله مواد شیمیایی صنعتی بوده که مخاطرات زیست محیطی و بهداشتی زیادی را دارا می‌باشد [۱]. فنل از طریق جذب پوستی، استنشاق بخار، یا گوارشی می‌تواند ایجاد سمیت کند [۲]. صنایع بسیاری مانند صنایع تولید زغال سنگ، پالایشگاه‌ها، حشره‌کش‌ها، پلاستیک، مواد منفجره و علف‌کش‌ها حاوی ترکیبات فنلی می‌باشند [۳]. در

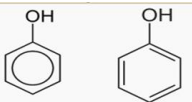
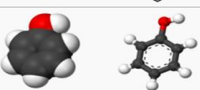
پالایشگاه‌های نفت، غلظت این ترکیبات در پساب در محدوده $4500-10$ mg/L گزارش گردیده است [۴]. ترکیبات فنلی در لیست آلاینده‌های دارای تقدم سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا قرار دارند [۵]. لذا EPA استانداردهایی را برای آب‌های معدنی و آشامیدنی (مقدار ۰/۵ ppb) و برای خروجی فاضلاب به آب‌های سطحی (۰/۵ ppm) و به سیستم فاضلاب رو (۱ ppm) تعیین کرده است [۳]. تاکنون

در بیوراکتورهای الکتروشیمیایی، علاوه بر پارامترهای راهبری و محیطی، پیکربندی راکتور به منظور بهبود کارایی فرآیند دارای اهمیت می‌باشد [۱۹]. در این راستا طراحی بیوراکتور دارای الکترودهای سیلندری/صفحه‌ای استیل اسفنجی/کربن پارچه‌ای بدون کاربرد غشای گران‌قیمت می‌تواند مبادله آسان‌تر بین بیوالکترودها و سوبسترا را میسر سازد. از طرف دیگر، نیازی به اصلاح الکترودها [۲۰، ۱] جهت تامین اهداف مذکور نمی‌باشد. این پژوهش، با هدف بررسی کارایی سیستم بیوالکتروشیمیایی تک محفظه‌ای دارای الکترودهای سیلندری/صفحه‌ای استیل اسفنجی به عنوان بیوآند و کربن پارچه‌ای به عنوان بیوکاتد به منظور کاهش فنل در محیط‌های آبی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی مورد استفاده. تمام مواد و محلول‌های شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش شامل: نوترینت‌های میکروبی، اسیدفسفریک، هیدروکسید آمونیم، آمینواتنی‌پایرن، پتاسیم فری سیانید و بافر فسفات دارای درجه خلوص بالا بوده (تهیه شده از شرکت مرک) و در آب مقطر تهیه گردید. فنل مورد استفاده نیز با درصد خلوص ۹۹٪ (مرک) بوده که ساختار و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و ساختار فنل [۲۱]

	خصوصیات	
	فرمول مولکولی	C6H6O
	جرم مولی	۹۴،۱۱g/mol
	شکل ظاهری	جامد کریستالی سفید رنگ
	چگالی	۱،۰۷g/cm ³
	دمای ذوب	۴۰،۵ درجه سانتی‌گراد
	دمای جوش	۱۸۱،۷°C
	اسیدی (pKa)	۹،۹۵

فرآیندهای مختلفی برای حذف باقی‌مانده‌های فنلی از محیط‌های آبی مورد بررسی قرار گرفته است. تجزیه بیولوژیکی فنل به دلیل مقبولیت زیست محیطی، دستیابی به محصولات نهایی پایدار و مقرون به صرفه بودن مورد توجه ویژه قرار دارد [۶، ۱]. Colvin و Rozich گزارش کردند که استفاده از سودوموناس آئروژینوزا بیش‌ترین تجزیه فنل را ممکن می‌سازد [۷]. در این فرآیندها، باکتری می‌تواند تحت شرایط هوازی و بی‌هوازی از فنل به عنوان منبع کربن و انرژی استفاده کند [۸]. تجزیه در شرایط هوازی در مدت زمان کوتاه‌تری انجام می‌شود [۱۰، ۹]. از طرفی، کاربرد بیومس با بستر ثابت دارای عمل‌کرد پایدارتری در تجزیه بیولوژیکی، تولید لجن کم‌تر، و تحمل بالاتر در برابر شوک حاصل از فنل می‌باشد [۱۱، ۸]. امروزه سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی به عنوان فن‌آوری نوین در تولید هم‌زمان الکتریسیته و تصفیه فاضلاب مورد توجه است [۱۲]. در این سیستم‌ها، از میکروارگانیسم‌ها به منظور انجام واکنش اکسیداسیون و یا احیا [۱۳] و از جریان الکتریکی مستقیم برای افزایش راندمان تجزیه بیولوژیکی استفاده می‌شود [۱۵، ۱۴]. در حال حاضر کاربرد فرآیندهای بیوالکتروشیمیایی با استفاده از جریان الکتریکی با ولتاژ کم به منظور تصفیه آلاینده‌های آلی در حال افزایش است. در خصوص آلاینده‌های هیدروکربنی نفتی مثل فنل به دلیل حلالیت زیاد و محدود شدن روشی مانند الکتروکینتیک، فرآیند بیوالکتروشیمیایی کاربرد زیادی پیدا کرده است [۱۶].

کربن پارچه‌ای از جمله الکترودهای دارای سطح موثر زیاد بوده که می‌تواند موجب بهبود عمل‌کرد سیستم بیوالکتروشیمیایی شود [۱۷]. این منسوجات در محلول‌های مختلف پایدار و در گستره دمایی بالا کارایی دارند [۱۸]. استیل اسفنجی (steel wool) نیز به دلیل دارا بودن رسانایی بالا، هزینه کم، سطح موثر زیاد جهت تشکیل بیوفیلم، کاهش دانسیته جریان مورد بهره‌برداری، و انرژی مصرفی کم و در نتیجه نرخ بالای اکسیداسیون می‌تواند به‌عنوان یک گزینه موثر باشد.

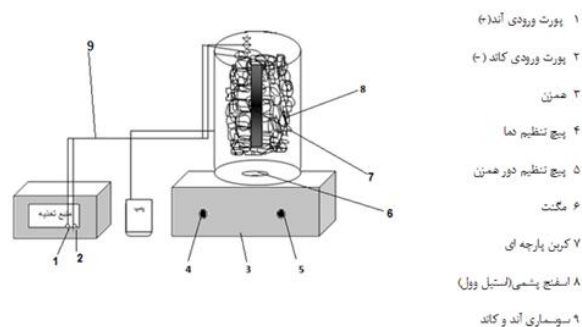
پس از تشکیل بیوفیلم، تطابق جمعیت باکتریایی با جریان الکتروسیسته و پایدار شدن عمل کرد سیستم، پارامترهای موثر بر فرآیند شامل نسبت C/N ۶-۱، غلظت اولیه فنل 300 mg/L -۵۰، میزان جریان اعمالی ۱۰-۲ میلی آمپر و زمان واکنش ۲۴-۳ ساعت بررسی گردید. هم‌چنین تغییرات هدایت الکتریکی، pH و پتانسیل اکسیداسیون- احیا (EC/pH/ORP) طی انجام واکنش مورد بررسی قرار گرفت و میزان انرژی مصرفی و توان مصرفی نیز محاسبه گردید. کلیه آزمایشات به صورت ۲ بار تکرار در دمای آزمایشگاه (26 ± 1) درجه سانتی‌گراد) و با تنظیم pH در محدوده خنثی انجام گرفت.

روش اندازه‌گیری غلظت فنل. جهت حذف تداخل ناشی از کدورت‌های احتمالی موجود در نمونه، ابتدا نمونه توسط دستگاه سانتریفیوژ (مدل universal 320r Hettich) با دور 5000 rpm به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس غلظت فنل باقی‌مانده مطابق با دستورالعمل استاندارد متود (روش رنگ‌سنجی) اندازه‌گیری شد [۲۲]. جذب نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتر (مدل UV-9200UV/VIS Spectrophotometer) در طول موج 500 nm بعد از مدت زمان ۱۵ min قرائت شد و غلظت فنل باقی‌مانده محاسبه گردید.

نتایج

تأثیر نسبت C/N . به منظور بررسی تأثیر نسبت C/N در کارایی تجزیه فنل توسط بیوراکتور الکتروشیمیایی، آزمایش‌های مورد نظر در محدوده نسبت‌های C/N برابر با ۶-۱ انجام گردید (شکل ۲). نتایج نشان داد که امکان دستیابی به حذف کامل فنل در دوره زمانی ۱۰ ساعت و C/N برابر با ۵ فراهم می‌باشد. کارایی فرآیند بیوالکتروشیمیایی در نسبت‌های C/N : ۱:۱، ۲:۱، ۳:۱، ۴:۱، ۵:۱ و ۶:۱ در زمان واکنش ۱۰ ساعت، به ترتیب برابر با ۹۵٪، ۹۸٪، ۹۹٪ و ۹۹٪ و ۵۶٪ مشاهده گردید.

مشخصات بیوراکتور الکتروشیمیایی. راکتور مورد استفاده در این مطالعه، راکتوری استوانه‌ای شکل از جنس پلکسی‌گلاس با قطر حدود ۸cm، ارتفاع ۳۰ cm و حجم موثر ۱ لیتر حاوی الکترودهایی از جنس کربن پارچه‌ای و استیل اسفنجی بود که به وسیله یک نگهدارنده ثابت گردید. الکتروده کربن پارچه‌ای دارای عرض ۲cm و ارتفاع موثر ۲۱ cm سطح مقطع 42 cm^2 ، و الکتروده استیل اسفنجی دارای قطر ۵cm و فاصله بین الکترودها ۱ cm بود. جهت همگن کردن محتویات راکتور از همزن مغناطیسی (Heidolph, MR3001)، جهت هوادهی از پمپ (HAILEA) با دبی خروجی کم‌تر از 3 L/min و تناوب زمانی ۳۰ دقیقه استفاده گردید. منبع تغذیه جریان الکتریکی نیز به منظور تامین جریان مستقیم به سیستم به کار گرفته شد. شماتیک راکتور مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

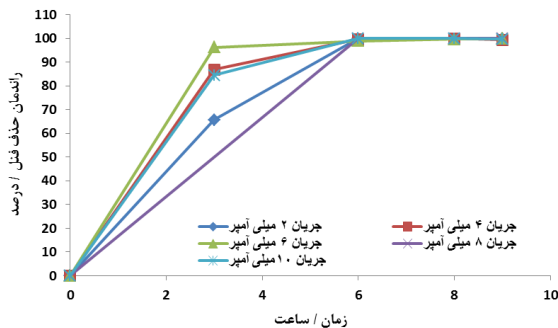


شکل ۱. شماتیک بیوراکتور الکتروشیمیایی

روش انجام کار. این پژوهش یک مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی بود که به صورت جریان منقطع (Batch) در بیوراکتور الکتروشیمیایی انجام گردید. لجن مورد استفاده در این پژوهش از تصفیه خانه فاضلاب شهری تهیه شد و به مدت یک ماه به صورت کومتابولیسیم، عملیات خودهی انجام گردید. در این راستا جهت تامین نوترینت‌های مورد نیاز از محیط کشت حاوی CaCl_2 ، KH_2PO_4 ، Na_2HPO_4 ، NH_4Cl ، NaHCO_3 ، MgSO_4 و NaCl استفاده شد. بعد از ثابت شدن میزان حذف فنل، ۲۰٪ از حجم راکتور توسط لجن مزبور تلقیح گردید (مقدار MLSS اولیه حدود 2600 mg/L بود).

نشان داد. طی انجام واکنش، روند تغییرات صورت گرفته در هدایت الکتریکی (EC)، pH و پتانسیل اکسیداسیون-احیا (ORP) نیز ارزیابی گردید که در شکل ۴ قابل ملاحظه می‌باشد.

تاثیر جریان الکتریکی اعمالی. مطالعه تاثیر شدت جریان‌های اعمالی (۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ mA) در تجزیه بیولوژیکی فنل بر پایه رشد چسبیده در بیوالکتروود یکی از اهداف اصلی انجام مطالعه بود. همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود با افزایش میزان جریان اعمالی از ۲ mA به ۶ mA (ولتاژ مصرفی ۱/۲۷ تا ۰/۹۷) کارایی تجزیه بیولوژیکی فنل در طی زمان واکنش ۳ ساعت از ۶۵٪ (در جریان ۲ mA) به ۹۶/۲۶٪ (در جریان ۶ mA) افزایش یافت. با افزایش بیش‌تر میزان جریان الکتریکی از ۶ mA به ۱۰ mA اگرچه هم‌چنان روند حذف فنل با گذشت زمان افزایشی بود اما نسبت به زمان واکنش مشابه (۳ ساعت) در سایر جریان‌های اعمالی به سیستم، ریزش بیوفیلم و کاهش کارایی فرآیند مشاهده گردید.



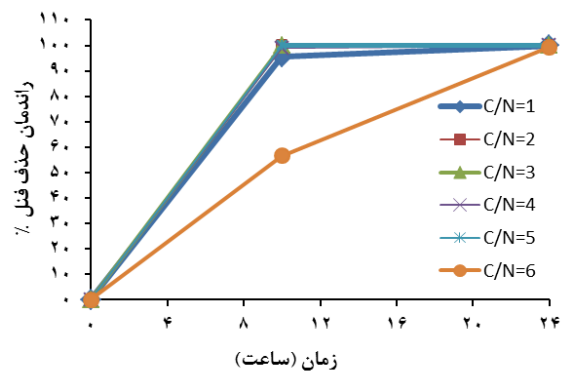
شکل ۵. تاثیر تغییرات جریان الکتریکی اعمالی در راندمان حذف فنل در طی بازه زمانی مورد آزمایش (T=۲۶ °C, pH=۷, C0= ۲۵۰ mg/L)

میزان انرژی و توان مصرفی در سیستم مورد مطالعه. به منظور محاسبه مقدار انرژی مصرفی در بیوراکتور الکتروشیمیایی مورد مطالعه از معادله ۱ استفاده گردید:

معادله ۱:

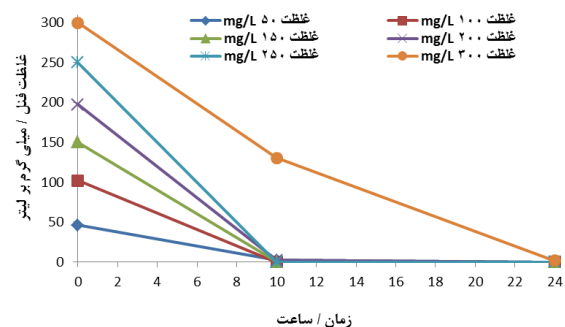
$$E = \frac{vIt}{V}$$

که در این رابطه، E= انرژی الکتریکی مصرفی (KWh/m³)؛ v= ولتاژ اعمال شده؛ I= شدت جریان (A)؛ t=

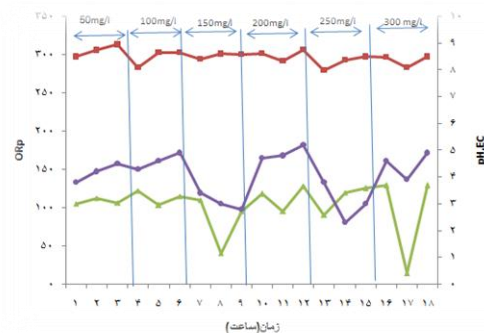


شکل ۲. بررسی تاثیر تغییرات نسبت C/N در راندمان حذف فنل در بیوراکتور الکتروشیمیایی (T=۲۶°C, pH=۷, I=۲ mA)

تاثیر غلظت اولیه فنل. غلظت اولیه فنل در محدوده غلظت‌های ۵۰-۳۰۰ mg/L مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۳).



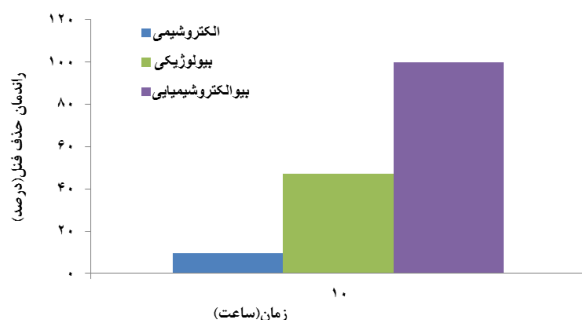
شکل ۳. تغییرات غلظت فنل نسبت به زمان در بازه زمانی مورد آزمایش (T=۲۶°C, pH=۷, I=۲ mA)



شکل ۴. تغییرات پارامترهای هدایت الکتریکی (EC)، pH و پتانسیل اکسیداسیون-احیا (ORP) در طی دوره زمانی مورد آزمایش (pH=۷, T=۲۶°C)

راندمان حذف فنل در غلظت‌های ۵۰ mg/L تا ۲۵۰ mg/L و زمان واکنش ۱۰ ساعت، در محدوده ۹۵٪ تا ۱۰۰٪ مشاهده گردید. با افزایش غلظت اولیه فنل تا ۳۰۰ mg/L راندمان حذف در مدت زمان مشابه (۱۰ ساعت)، روند کاهشی را

الکتروشیمیایی و بیولوژیکی به عنوان کنترل‌های سیستم بیوالکتروشیمیایی (در شرایط مشابه) مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۷). همان‌طور که مشاهده می‌شود راندمان حذف فنل در سیستم‌های الکتروشیمیایی، بیولوژیکی و بیوالکتروشیمیایی به ترتیب برابر با ۹٪، ۴۷٪ و ۱۰۰٪ حاصل گردید.



شکل ۷. سهم هر یک فرآیندهای بیولوژیکی / الکتروشیمیایی / بیوالکتروشیمیایی در راکتور مورد بررسی

بحث و نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، قابلیت اکسیداسیون فنل با کاربرد الکترو استیل اسفنجی (steel wool) و ایجاد زنجیره انتقال الکترون با قرار دادن کاتد مناسب (کربن پارچه‌ای) بدون کاربرد غشا و الکترودهای اصلاح شده در سیستم بیوالکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. الکترودهای استیل اسفنجی و کربن پارچه‌ای مورد استفاده در این بیوراکتور، بستر مناسبی برای چسبیدن و رشد بیوفیلم بود. ماهیت، ساختار و رسانایی بالای الکترو آند (استیل اسفنجی) می‌تواند نقش مهمی در انتقال الکترون، استقرار جرم سلولی و دستیابی به راندمان بالای حذف فنل داشته باشد. هم‌چنین، مطالعات انجام شده نشان داد که کاربرد الکترو کربن پارچه‌ای در دانسیته توان 0.0712 W/m^3 و دانسیته جریان 0.844 A/m^3 راندمان بالای حذف هم‌زمان کربن و نیتروژن را حاصل می‌سازد [۲۳]. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده گردید امکان دستیابی به حذف کامل فنل در دوره زمانی ۱۰ ساعت در C/N برابر با ۵ فراهم بود. در حقیقت افزایش نسبت C/N و غلظت فنل موجب گردیده که میکروارگانیسم‌های موجود در

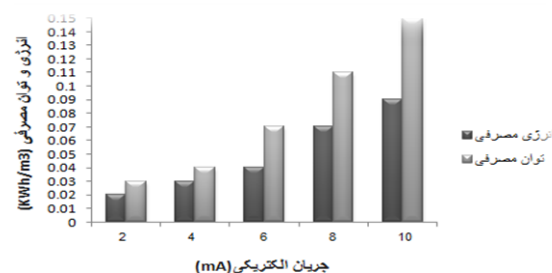
زمان واکنش (h) و $V =$ حجم فاضلاب تصفیه شده (L) می‌باشد.

مقدار توان مصرفی نیز از معادله ۲ محاسبه شد:

معادله ۲:

$$EC = \frac{VIt}{\Delta COD \times V}$$

که در این رابطه، $E =$ توان مصرفی (W)؛ $v =$ ولتاژ اعمال شده؛ $I =$ شدت جریان (A)؛ $t =$ زمان واکنش (h)؛ $V =$ حجم فاضلاب تصفیه شده (L) و $\Delta COD =$ مقدار نهایی COD ورودی COD می‌باشد. شکل ۶، مقادیر انرژی و توان مصرفی را در بیوراکتور الکتروشیمیایی مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقدار انرژی و توان مصرفی سیستم به ترتیب در محدوده $0.14 - 0.23 \text{ kWh/m}^3$ و $0.01 - 0.02 \text{ kWh/m}^3$ محاسبه گردید. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد مقدار انرژی مصرفی به شدت جریان‌های اعمالی و مقدار ولتاژ در بازه زمانی در نظر گرفته شده بستگی دارد و با افزایش مقدار جریان و ولتاژ مصرفی، افزایش می‌یابد. مقدار توان مصرفی بیوراکتور مورد مطالعه نیز با توجه به شرایط راهبری سیستم با افزایش جریان و ولتاژ مصرفی افزایش یافت.



شکل ۶. میزان انرژی و توان مصرفی در سیستم بیوالکتروشیمیایی مورد مطالعه ($T=26^\circ\text{C}$, $\text{pH}=7$, $\text{C}_0=250 \text{ mg/L}$)

مطالعه سهم هر یک فرآیندهای بیولوژیکی / الکتروشیمیایی / بیوالکتروشیمیایی در بیوراکتور مورد مطالعه به منظور بررسی سهم هر یک از فرآیندهای بیولوژیکی / الکتروشیمیایی / بیوالکتروشیمیایی در کارایی حذف فنل و مطالعه تاثیر سیستم ترکیبی بیوالکتروشیمیایی، دو سیستم

میزان مصرف انرژی الکتریکی، جریان ۲mA به عنوان جریان مناسب به منظور ایجاد تحریک باکتریایی در نظر گرفته شد. در مطالعه حاضر، انرژی و توان مصرفی در بیوراکتور الکتروشیمیایی، با سایر فرآیندهای بر پایه الکتروشیمی مقایسه گردید. مقادیر محاسبه شده در پژوهش حاضر نسبت به مطالعه انجام گرفته توسط El-Ashtoukhy و همکاران با کاربرد روش انعقاد الکتریکی [۳] و مصرف انرژی ۱۶/۳۲ kWh/g-۰/۰۶۶، میزان بسیار کمتری را دارا بود. El-Ashtoukhy و همکاران، به منظور کاهش مقدار انرژی مصرفی در فرآیند حذف فنل، غلظت کلرید سدیم را تا مقادیر ۱g/L (در شرایط بهینه) افزایش دادند در حالی که در مطالعه حاضر با کاربرد غلظت ۰/۲g/L کلرید سدیم حذف کامل فنل حاصل گردید. همان‌طور که در نمودار ۶ مشاهده گردید راندمان حذف فنل در سیستم‌های کنترلی بیوالکتروشیمیایی شامل سیستم الکتروشیمیایی و بیولوژیکی، به ترتیب برابر با ۹٪ و ۴۷٪ بود که نشان‌دهنده کارایی و عمل‌کرد بسیار مطلوب فرآیند تلفیقی بیوالکتروشیمیایی به منظور حذف فنل می‌باشد. Ailijiang و همکاران، میزان تجزیه بیولوژیک توسط بیوفیلیم‌های با حامل‌های رسانا را در زمان واکنش ۱۰ ساعت و جریان ۲ میلی‌آمپر ۸۰-۹۱٪ گزارش کردند. رسانا بودن حامل‌های بیوفیلیم باعث انتقال جریان مستقیم و تحریک رشد بیوفیلیم گردید [۱]. این امر می‌تواند علت کارایی مناسب الکترودهای دارای رسانایی بالا مانند استیل اسفنجی (در مطالعه حاضر) باشد. بررسی حذف فنل با به کارگیری فرآیند بیولوژیکی با استفاده از راکتور ناپیوسته بستر متحرک (MSBR) نشان داد که راندمان حذف در میزان بارگذاری $83/4 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ فنل، به میزان ۲۸٪ بود [۲۸]. هم‌چنین گزارش گردید فرآیند اکسیداسیون الکتروشیمیایی فنل با استفاده از الکترودهای Ti/PbO_2 در دمای 50°C با اختلاف پتانسیل ۵ ولت در $\text{pH}=2$ ، قادر به حذف کامل فنل با غلظت ۲۵۰mg/L می‌باشد [۲۹]. در مطالعه‌ای دیگر، کاربرد ۱۲ درصدی کاتالیست Mn منجر به تجزیه و تبدیل ۷۰٪ فنل گردید [۲۰]. این در حالی است که در پژوهش حاضر، بیوراکتور الکتروشیمیایی مورد

بیوراکتور محصولات محلول میکروبی (SMPs) را ترشح و انتقال جریان و حذف ترکیب از سیستم افزایش یابد [۲۴]. اما در نسبت‌های بالاتر از مقدار بهینه، فنل به عنوان یک آلاینده اثر مهارکنندگی و سمیت بر روی میکروارگانیسم‌های موجود در سیستم داشته و کارایی انتقال الکترون کاهش یافت. بنابراین راندمان سیستم در نسبت C/N:۶ و غلظت فنل ۳۰۰mg/L در بازه زمانی ۱۰ ساعته کاهش یافت. اکسیداسیون و تجزیه فنل در آند (به عنوان دهنده الکترون) موجب بروز تغییراتی در هدایت الکتریکی محلول گردید که در نمودار ۳ به شکل نوساناتی طی دوره زمانی مورد آزمایش مشاهده شد.

با توجه به نمودار ۴ افزایش جریان الکتریکی از مقدار ۴mA به ۲mA (ولتاژ مصرفی ۱/۲۷ تا ۰/۹۷) موجب بهبود کارایی تجزیه بیولوژیکی فنل از ۶۵٪ به ۹۶٪ گردید. این بدان علت است که اعمال جریان الکتریکی در محدوده ۲-۶mA موجب تحریک رشد میکروارگانیسم‌های فعال در سیستم شده که بهبود عمل‌کرد و افزایش راندمان را موجب گردیده است. افزایش جریان به مقادیر بالاتر (۸mA)، به دلیل ایجاد اثر نامطلوب بر سیستم، ریزش بیوفیلیم و کاهش رشد میکروبی موجب کاهش راندمان حذف گردید. مطالعات انجام شده نیز نشان‌دهنده افزایش فعالیت باکتریایی در جریان‌های اعمالی پایین بود [۲۵]. هم‌چنین گزارش گردید که جریان پایین الکتریکی، در تغییر ترکیب غشا و فعالیت متابولیکی باکتری اثرات منفی نداشت [۲۶]. در سیستم مورد مطالعه، ولتاژ اعمالی جهت تحریک رشد میکروبی (در جریان بهینه) مقدار کمی را دارا بود. این امر به دلیل رسانایی بالای الکترودهای مورد استفاده به‌عنوان آند و کاتد بود که انتقال الکترونی بین الکترودها و جمعیت میکروبی سیستم را افزایش داد [۱]. هم‌چنین خالص نبودن جمعیت میکروبی در سیستم مورد پژوهش و کاربرد مخلوط میکروبی، باعث افزایش راندمان در مدت زمان کوتاه شد که مطابق با مطالعه Cheela و همکاران بود [۲۷]. با توجه به دستیابی به حذف کامل فنل طی زمان واکنش ۶ ساعت، در جریان اعمالی ۲mA و با در نظر گرفتن

[2] Bruce RM, Santodonato J, Neal MW. Summary review of the health effects associated with phenol. *Toxicol Ind Health* 1987; 3: 535-368.

[3] El-Ashtoukhy E, El-Taweel Y, Abdelwahab O, Nassef E. Treatment of petrochemical wastewater containing phenolic compounds by electrocoagulation using a fixed bed electrochemical reactor. *Int J Electrochem Sci* 2013; 8: 1534-1550.

[4] Al-Khalid T, El-Naas MH. Aerobic biodegradation of phenols: a comprehensive review. *Crit Rev Environ Sci Technol* 2012; 42: 1631-1690.

[5] Yadav DK, Joshi A, Harjit J. Determination of Phenolic Compounds in Vegetables by Spectrophotometric Method. *Environments* 2016; 16: 17.

[6] Senthilvelan T, Kanagaraj J, Panda RC, Mandal A. Biodegradation of phenol by mixed microbial culture: an eco-friendly approach for the pollution reduction. *Clean Technol Environ Policy* 2014; 16: 113-126.

[7] Rozich AF, Colvin RJ. Effects of glucose on phenol biodegradation by heterogeneous populations. *Biotechnol Bioeng* 1986; 28: 965-971.

[8] Basha KM, Rajendran A, Thangavelu V. Recent advances in the biodegradation of phenol: a review. *Asian J Exp Biol Sci* 2010; 1: 219-234.

[9] Gregory KB, Lovley DR. Remediation and recovery of uranium from contaminated subsurface environments with electrodes. *Environ Sci Technol* 2005; 39: 8943-8947.

[10] Wick LY, Shi L, Harms H. Electro-bioremediation of hydrophobic organic soil-contaminants: A review of fundamental interactions. *Electrochim Acta* 2007; 52: 3441-3448.

[11] Jiang L, Ruan Q, Li R, Li T. Biodegradation of phenol by using free and immobilized cells of *Acinetobacter* sp. BS8Y. *J Basic Microbiol* 2013; 53: 224-230.

[12] Bajracharya S, Sharma M, Mohanakrishna G, Benneton XD, Strik DP, Sarma PM, et al. An overview on emerging bioelectrochemical systems (BESs): Technology for sustainable electricity, waste remediation, resource recovery, chemical production and beyond. *Renewable Energy*. 2016.

[13] Hamelers HV, Ter Heijne A, Sleutels TH, Jeremiasse AW, Strik DP, Buisman CJ. New applications and performance of bioelectrochemical systems. *Appl Microbiol Biotechnol* 2010; 85: 1673-1685.

[14] Liu S, Song H, Wei S, Liu Q, Li X, Qian X. Effect of direct electrical stimulation on decolorization and degradation of azo dye reactive brilliant red X-3B in biofilm-electrode reactors. *Biochem Engin J* 2015; 93: 294-302.

[15] She P, Song B, Xing X-H, Van Loosdrecht M, Liu Z. Electrolytic stimulation of bacteria *Enterobacter dissolvans* by a direct current. *Biochem Engin J* 2006; 28: 23-29.

[16] Friman H, Schechter A, Nitzan Y, Cahan R. Phenol degradation in bio-electrochemical cells. *Int Biodeter Biodegrad* 2013; 84: 155-160.

[17] Mashkour M, Rahimnejad M. Effect of various carbon-based cathode electrodes on the performance of microbial fuel cell. *Biofuel Res J* 2015; 2: 296-300.

[18] Frackowiak E, Beguin F. Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors. *Carbon* 2001; 39: 937-950.

[19] Mousavi S, Ibrahim S, Aroua MK, Ghafari S. Development of nitrate elimination by autohydrogenotrophic bacteria in bio-electrochemical reactors—A review. *Biochem Engin J* 2012; 67: 251-264.

[20] Zeyoudi M, Altenaiji E, Ozer LY, Ahmed I, Yousef AF, Hasan SW. Impact of continuous and intermittent supply of electric field on the function and

مطالعه، قادر به حذف کامل غلظت مشابه فنل در دمای 26 ± 1 درجه سانتیگراد، اختلاف پتانسیل بسیار کم تر و pH حدود ۸ می باشد.

در مجموع می توان چنین نتیجه گیری کرد که کاربرد سیستم های بیوالکتروشیمیایی (به منظور حذف آلاینده ها با تلفیقی از تصفیه بیولوژیکی و الکتروشیمی) نه تنها جریان بالای برق مصرفی در روش الکتروشیمی و زمان طولانی خودهی و کارایی کم تر سیستم های بیولوژیکی (در شرایط مشابه) را ندارد بلکه می توان با انرژی و توان مصرفی کم تر و حتی در مواردی تولید انرژی در سیستم، در عین دستیابی به راندمان مطلوب تصفیه، هزینه های فرآیند تصفیه را کاهش داد. البته این در حالی است که در سیستم مورد استفاده، الکترودهای گران قیمت و اصلاح شده به کار برده نشود. در مطالعه انجام شده به منظور حذف آلاینده های کلردار با استفاده از فرآیندهای ترکیبی همراه با تکنولوژی الکتروشیمی کاربرد الکترودهای گران قیمت و با عمل کرد کوتاه مدت گزارش گردید [۳۰]. آزمایشات انجام شده نشان دهنده کارایی موثر بیوراکتور الکتروشیمیایی دارای الکترودهای استیل اسفنجی و کربن پارچه ای به دلیل رسانایی بالای الکترودها، دارا بودن سطح موثر بیشتر جهت تشکیل بیوفیلم، کاهش دانسیته جریان مورد بهره برداری و انرژی مصرفی به منظور حذف فنل از محیط های آبی بود. کارایی این راکتور می تواند برای حذف سایر ترکیبات آلی دیر تجزیه پذیر نیز مورد بررسی قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از گروه مهندسی بهداشت محیط دانشکده علوم پزشکی دانشگاه تربیت مدرس اعلام می نمایم.

منابع

[1] Ailijiang N, Chang J, Liang P, Li P, Wu Q, Zhang X, Huang X. Electrical stimulation on biodegradation of phenol and responses of microbial communities in conductive carriers supported biofilms of the bioelectrochemical reactor. *Bioresour Technol* 2016; 201: 1-7.

- [26] Acuña AJ, Pucci OH, Pucci GN. Electrobioremediation of hydrocarbon contaminated soil from patagonia argentina. *New Technol Oil Gas Industry* 2012; p: 29-48.
- [27] Cheela SV, Kumar SG, Padma D, Subbarao CV. Biodegradation of phenol using pure and mixed Culture Bacteria. 2015.
- [28] Moussavi G, Mahmoudi M, Barikbin B. Biological removal of phenol from strong wastewaters using a novel MSBR. *Water Res* 2009; 43: 1295-1302.
- [29] Saratale RG, Hwang KJ, Song JY, Saratale GD, Kim DS. Electrochemical oxidation of phenol for wastewater treatment using Ti/PbO₂ electrode. *J Environ Eng* 2015; 142: 04015064.
- [30] Cong VH, Sakakibara Y, Komori M, Kishimoto N, Watanabe T, Mishima I, et al. Recent developments in electrochemical technology for water and wastewater treatments. *J Water Environ Technol* 2016; 14: 25-36.
- microbial community of wastewater treatment electro-bioreactors. *Electrochimica Acta* 2015; 181: 271-279.
- [21] De Silva CL. Removal of Phenol from Oil/Gas Wastewater by Catalytic Supercritical Water Treatment: Ohio University; 2016.
- [22] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Twentieth ed 1995.
- [23] Sun H, Xu S, Zhuang G, Zhuang X. Performance and recent improvement in microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal: A review. *J Environ Sci* 2016; 39: 242-248.
- [24] Huang B, Feng H, Wang M, Li N, Cong Y, Shen D. The effect of C/N ratio on nitrogen removal in a bioelectrochemical system. *Bioresour Technol* 2013; 132: 91-98.
- [25] Olszanowski A, Piechowiak K. The use of an electric field to enhance bacterial movement and hydrocarbon biodegradation in soils. *Polish J Environ Stud* 2006; 15: 303-309.

Performance of bioelectrochemical process using steel wool and carbon cloth electrodes to remove phenol in the aquatic environment

Somayyeh Dehghani (Ph.D Candidate), Abbas Rezaee (Ph.D)*, Zohreh Moghiseh (Ph.D Student), Batoul Mohebrad (Ph.D Candidate)

Dept. of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: 27 Sep 2016; Accepted: 19 Nov 2016)

Introduction: Phenolic compounds are industrial chemicals that they are interested in due to the many health and environmental concerns. The aim of this study was to examine bio-electrochemical system performance to remove phenol from synthetic wastewater using a carbon cloth (as a bio-cathode) and steel wool (as a bio - anode) electrodes with a fixed bed.

Materials and methods: The present study was an experimental study in laboratory scale. It was carried out in batch mode using 1 liter plexiglass reactor. After starting up the system, effective parameters on process efficiency, including the C/N ratio, initial phenol concentration, applied current and reaction time were evaluated. Also, electrical conductivity, pH and redox potential (EC /pH /ORP) were studied during the reaction.

Results: The results showed that with increasing the applied current from 2 mA to 6 mA (0.9 to 1.2 V), the bioelectrochemical degradation efficiency was promoted from 65% to 96.26%. The phenol removal was obtained 100% in C/N=5. The energy and power consumption were calculated 0.01- 0.14KWh/m³ and 0.02-0.23, respectively.

Conclusion: The experiments indicated the efficient removal of phenol in wastewater by electrochemical bioreactor using carbon cloth (as bio-cathode) and steel wool (as bio-anode) electrodes. This efficiency was due to the high bioelectrodes conductivity, more surface area for biofilm formation, operating current density and power consumption reduction. The performance of this reactor can also be considered to eliminate other biodegradable organic compounds.

Keywords: Bio-electrochemical process, Phenol, Bio-electrode, Carbon cloth, Steel wool

* Corresponding author. Tel: +98 21 82883575

rezaee@modares.ac.ir