علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیستم، شماره سه ، پاییز ۹۷

پیل سوخت میکروبی: راهکاری جهت زیست پالایی و تولید انرژی

مهران جعفری [۱]

سمانه صدیقی خویدکی [۲*]

sedighi.samaneh@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۲۳ **تاریخ پذیرش:۹۴/۹/۲۴**

چکیده

زمینه و هدف: استفاده از سلول های سوختی میکروبی (MFC)، روشی جدید جهت تصفیه فاضلاب و تولید انرژی سازگار با محیط زیست می‌باشد. این تکنولوژی، انرژی شیمیایی ناشی از سوخت و ساز و فعالیت میکروارگانیسم‌های زنده را به انرژی برق تبدیل می کند.

روش بررسی: نمونه پساب خام به عنوان منبع سوبسترای پیل سوختی میکروبی از محل تصفیه خانه شهر یزد تهیه شد. این مطالعه توسط یک بیوراکتور دو محفظه‌ای با سوبسترای پساب و فلور میکروبی موجود در آن، انجام شد. محفظه ها از جنس شیشه بوده و با حجمی معادل550cc از نمونه و بافر پر شدند. در محفظه آندی، پساب توسط فلور میکروبی، تحت شرایط بی‌هوازی کاتالیز شد. در محفظه کاتدی از بافر پتاسیم فسفات جهت ثابت نگه داشتن pH محلول کاتولیت استفاده گردید. پیل سوختی در این مطالعه بدون غشا بود و انتقال یون‌های مثبت از آند به کاتد توسط سیستم پل نمکی انجام گرفت.

یافته ها: یافته‌ها نشان داد که در این راکتور، حداکثر ولتاژ تولید شده ۱ ولت بود که طی روزهای اولیه راه اندازی آن ایجاد شد. پس از آن به تدریج از مقدار ولتاژ کاسته شد و نمونه پساب تا حدودی تصفیه گردید. بیش‌ترین میزان جریان تولید شده ۲۴۸A μ بود که پس از مدتی مقدار جریان هم رو به کاهش نهاد. لذا می‌توان نقش دوگانه این راکتور را در تولید الکتریسیته و تصفیه پساب به‌خوبی تبیین نمود.

بحث و نتیجه گیری: در این پژوهش، با استفاده از پیل سوختی میکروبی برپایه پل نمکی، تصفیه پساب و در عین حال تولید انرژی الکتریسیته امکان پذیر شد.

واژه های کلیدی: تصفیه پساب، پیل سوختی میکروبی، زیست پالایی، الکتریسیته

۱- کارشناس ارشد میکروبیولوژی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اشکذر، یزد، ایران.

۲- استادیار گروه زیست شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اشکذر، یزد، ایران*(مسوول مکاتبات)

J.Env. Sci. Tech., Vol 20, No.3, Autumn, 2018

Microbial fuel cell: a strategy for bioremediation and energy production

Mehran Jafari[1]
Samaneh Sedighi Khavidak[2*]
sedighi.samaneh@yahoo.com

Admission Date:December 15, 2015 Date Received: November 14, 20165

Abstract

Background and Objective: Application of microbial fuel cells (MFC) is a new method for wastewater treatment and environmentally friendly energy production. This technology converts the chemical energy derived from metabolic activity of living organisms into electrical energy.

Method: A sample of raw wastewater was prepared as a source of microbial fuel cell substrate from the refinery of Yazd city. This study was carried out using a two-compartment bioreactor with wastewater as substrate and microbial flora. The containers were made of glass with a volume of 550 cc. In the anode chamber, under the anaerobic conditions, the wastewater was catalyzed by microbial flora. In the cathode chamber, potassium phosphate buffer was used to maintain the pH of the solution. The positive ions transferring from anode to cathode was done by positive salt bridge system.

Findings: The findings showed that the maximum voltage of 1 V was produced during the early days in this reactor. Then gradually the amount of voltage was reduced and wastewater samples were refined to some extent. The highest rate of produced flow was 248 μA, and then the flow rate was decreased. Therefore, the dual role of the reactor in electricity production and wastewater treatment can be explained.

Discussion and Conclusion: In this study, wastewater treatment and also electricity production could be performed using a microbial fuel cell based on salt bridge.

Keywords: Wastewater Treatment, Microbial Fuel Cell, Bioremediation, Electricity

1- M.Sc. of Microbiology, Islamic Azad University, Ashkzar Branch, Yazd.
2-Assistant Professor of Microbiology, Islamic Azad University, Ashkzar Branch, Yazd *(Corresponding Author).

مقدمه

نیاز گسترده انسان به منابع انرژی همواره از مسایل اساسی در زندگی بشر بوده است و تلاش برای دست‌یابی به یک منبع تمام نشدنی انرژی از آرزوهای دیرینه انسان محسوب می‌شود. انتشار مواد آلاینده حاصل از احتراق و افزایش دی‌اکسیدکربن در جو، جهان را با تغییرات روز افزونی مواجه ساخته است که افزایش دمای زمین، تغییرات آب و هوایی، بالا آمدن سطح آب دریاها و در نهایت تشدید منازعات بین‌المللی از جمله این پیامدها محسوب می‌شوند (۱).

دراین خصوص، تصفیه و بازیافت ضایعات می‌تواند به عنوان عرصه‌ای که در آن این دو هدف به صورت هم زمان اعمال می‌گردند، مطرح شود. با تعریف یک الگوی تغییر مناسب در حیطه کنترل ضایعات می توان از آن ها را به شکل مطلوب و بهینه مورد استفاده قرارداد (۲).

پیل‌های سوختی میکروبی، کاربردهای زیادی دارند. اولین و آشکارترین مورد استفاده آن‌ها، تولید الکتریسیته به عنوان یک منبع انرژی است. در واقع هر ماده آلی می‌تواند به عنوان سوبسترا در پیل سوختی استفاده شود. MFC ها می‌توانند در مراکز تصفیه فاضلاب نصب شوند و با مصرف مواد آلی پساب توسط باکتری ها، نیروی مکمل برای آن کارخانه تولید کنند. از مزیت MFC، استفاده از روشی بسیار تمیز و کارآمد برای تولید انرژی می‌باشد. آلایندگی پیل سوختی کم تر از میزان تعیین شده در مقررات است، هم چنین MFC بسیار مؤثرتر از موتورهای احتراق استاندارد، انرژی را مصرف می‌نماید. در تئوری بازده انرژی یک MFC بسیار بیش تر از ۵۰٪ می‌باشد. اگرچه از MFC در مقیاس بالا استفاده نمی‌شود، چون الکترودها در بعضی موارد تنها ۷ میکرومتر ضخامت و ۲ سانتی متر طول دارند. مزایای استفاده از MFC در این شرایط برخلاف یک باتری نرمال، استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر و عدم نیاز به شارژ مجدد می‌باشد. علاوه بر آن، به خوبی در شرایط ملایم یعنی دمای ^0C 40 – 20 و pH 7 قابل استفاده می‌باشند (۳).

یک پیل سوختی میکروبی به طور معمول از دو محفظه تشکیل شده‌است. محفظه آند بی هوازی و محفظه کاتد هوازی می‌باشد این دو محفظه توسط یک غشا از یک دیگر جدا می‌شوند. وجود اکسیژن درمحفظه آند، تولید الکتریسیته را محدود خواهد کرد. از این رو، سیستم باید به گونه‌ای طراحی شود که باکتری‌ها دور از اکسیژن نگه داشته شوند. درحقیقت غشا، کار جداسازی باکتری‌ها از اکسیژن را انجام می‌دهد. این غشا کاتیونی بوده و نسبت به پروتون خاصیت نفوذپذیری انتخابی دارد (۱). کامل کننده مدار و اتصال دهنده دو محفظه یک پل نمکی یا غشاء تبادل یون می‌باشد (۳).

مجموعه میکروبی موجود در محفظه آند، ترکیبات آلی موجود در فاضلاب را اکسید کرده و الکترون‌ها را به الکترود منتقل می کنند. الکترون‌ها از طریق یک سیستم هادی از آند به الکترود کاتد جریان می‌یابند تا جریان تولید شود، درحالی که پروتون‌های تولید شده از میان غشای تبادل پروتون نفوذ می‌کنند. سپس الکترون‌ها و پروتون‌ها در کاتد با مولکول‌های اکسیژن ترکیب می‌شوند تا آب تشکیل گردد (۱).

در کاتد هوای تزریق شده، اکسیژن محلول برای واکنش را فراهم می‌سازد (۱،۴). گستره وسیعی از مواد آلی از کربوهیدرات‌های ساده مانند گلوکز (۲)، تا ترکیبات آلی پیچیده مانند فاضلاب خانگی (۴،۵)، فاضلاب دامداری‌ها، فاضلاب صنایع شکلات‌سازی وآبجوسازی (۶)، به عنوان سوبسترا درMFC به کاربرده می‌شوند.

پیل سوختی میکروبی واسطه‌ای از نظر الکتروشیمیایی غیرفعال است و انتقال الکترون در آن‌ها توسط واسطه‌هایی مثل تیونین، متیل ویولوژن، متیل بلو، هیومیک اسید، قرمز خنثی و ... تسهیل می‌یابد. اکثر واسطه‌های موجود گران وسمی می‌باشند (۳).

پیل سوختی میکروبی کم واسطه‌ای، در انستیتوی علوم و تکنولوژی مهندسی کشور کره توسط تیمی زیر نظر Kim، Byungو Hong تهیه شده است. این پیل نیازی به واسطه ندارد ولی از باکتری های فعال الکتروشیمیایی برای انتقال

الکترون‌ها به الکترود استفاده می کند (الکترون‌ها مستقیماً از آنزیم تنفسی به الکترود حمل می‌شود). در میان باکتری‌های فعال الکتروشیمیایی، *Shewanella putrefaciens*، *Aeromonas hydrophila* و *ژئوباکتر* وگونه‌هایی از باکتری‌های تخمیرکننده مانند *کلستریدیوم بوتیریکوم* مهم‌ترین آن‌ها می‌باشند. بعضی از باکتری‌ها، که روی غشای خارجی خود دارای پیلی می‌باشند، قادر به انتقال الکترون تولیدی خود از طریق آن‌ها هستند. با توجه به جدید بودنMFC های کم واسطه، عواملی که عملیات بهینه آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند، مثل باکتری استفاده شده در سیستم، نوع غشای یونی و شرایط سیستم مانند دما، کاملاً مشخص نشده است. باکتری‌های MFC کم واسطه معمولاً آنزیم‌های اکسایش-کاهشی فعال الکتروشیمیایی مثل سیتوکروم‌ها را روی غشای خارجی خود دارند و می‌توانند با استفاده از آن‌ها الکترون‌ها را به مواد خارجی انتقال دهند (۳).

چنین مطرح می گردد که MFC می‌تواند به عنوان یک پیل میکروبی بدون واسطه شناخته شود. دراین مطالعه با به کارگیری یک سیستم پیل سوختی میکروبی بدون غشا و بر پایه پل نمکی، میزان پتانسیل الکتروژنی پساب جمع آوری شده ازنمونه های صنعتی، به همراه فرآیندهای مرتبط با تصفیه آن، مورد سنجش قرار گیرد.

مواد و روش ها

- نمونه پساب

در این مطالعه، پساب به کارگرفته شده به عنوان منبع سوبسترای پیل سوختی میکروبی از محل تصفیه خانه شهر یزد تهیه گردید. این نمونه حاوی پساب خام ورودی به تصفیه خانه بود. این نمونه بیش ترین ترکیبات آلی را به عنوان منبع سوبسترای میکروارگانیسم دراختیار میکروارگانیسم‌ها قرار داد.

- نحوه ی طراحی پیل

این مطالعه توسط یک بیوراکتوردو محفظه‌ای با سوبسترای پساب و فلور میکروبی مستقر در آن انجام شد. در محفظه آندی، پساب توسط میکروارگانیسم ها کاتالیز می شد. این بخش تحت شرایط بی هوازی قرار داده شد تا گیرنده نهایی الکترون جهت تولید جریان الکتریسیته به جای اکسیژن، گرافیت غوطه ور در محفظه باشد (شکل۱). محفظه ها از جنس شیشه بوده و با حجمی معادل 550cc از نمونه و بافر پر شدند (شکل ۲). در محفظه کاتدی از بافر پتاسیم فسفات جهت ثابت نگه داشتن pH محلول کاتولیت استفاده شد. پیل سوختی در این مطالعه بدون غشا (membrane-less) بود و انتقال یون-های مثبت از آند به کاتد توسط سیستم پل نمکی انجام گرفت.

شکل ۱- گرافیت ها

Figure 1. graphites

شکل ۲- پیل سوخت میکروبی

Figure 2. Microbial Fuel Cell

- تهیه پل نمکی(Salt bridge)

جهت انتقال یون های H^+ تولید شده طی اکسیداسیون سوبسترا از محفظه آندی به سمت محفظه کاتدی از پل نمکی پتاسیم کلرید (KCl) استفاده شد که طی آن سوبسترا (پساب) تجزیه شده وجریان الکتریکی نیز تولید خواهد شد. برای این منظور مقدار ۵ گرم پتاسیم کلراید پس از توزین، درمحلول ۵٪ آگار افزوده گردید به طوری که پل نمکی با غلظت ۱ مولار تهیه شد.

- طرز کار پیل سوختی میکروبی

پس از تهیه و ساخت قطعات و ترکیبات مورد نیاز جهت راه اندازی MFC، مقدار ۵۵۰cc از نمونه پساب در محفظه آندی قرار داده شد. مقدار مشابه از بافر فسفات نیز در محفظه کاتدی افزوده گردید و این دو محفظه توسط پل نمکی به یک دیگر متصل گردیدند. سپس توسط سیم مسی به گرافیت غوطه ور در محفظه ها اتصال یافته تا جهت اندازه گیری پارامترهای الکتریکی توسط مولتی متر، مورد استفاده قرار گیرند. پس از متصل شدن اجزای دستگاه جهت عدم نفوذ اکسیژن به محفظه آندی، این بخش کاملاً درزگیری شد. محفظه کاتدی نیز به منظور ورود اکسیژن و ترکیب آن با یون های هیدروژن منتقل شده از سمت آند و متعاقب آن تشکیل آب، درمعرض هوا قرار داده شد فرمول (۱).

فرمول ۱: تشکیل آب

$$6O2 + 24H^{+} + 24e^{-} \rightarrow 12H2O$$

برای همگن شدن پساب و اکسیژن رسانی بهتر، وسیله ای با یک پره و آرمیچرجهت تامین نیروی کم برق طراحی شد و فرآیند همزنی انجام گرفت. این کار روزانه ۵ نوبت و به مدت ۵ دقیقه انجام شد.

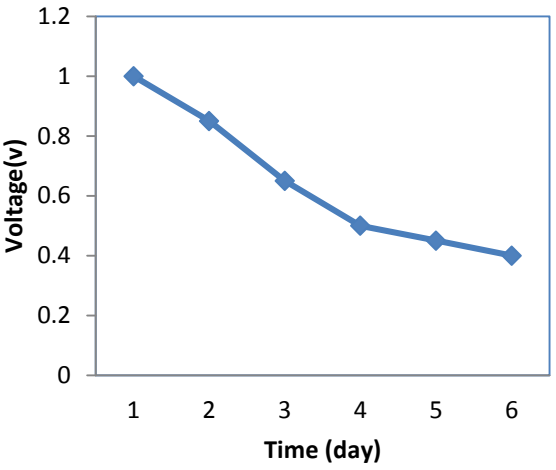
- سنجش پارامتر ها

دراین مطالعه متغیرهای مرتبط با انرژی الکتریکی تولید شده از پساب سیستم MFC، توسط مولتی متر دیجیتال اندازه گیری شد. برای این منظور ابتدا اختلاف پتانسیل موجود بین دو محفظه (ولتاژ) مورد سنجش قرار گرفت. سپس با وارد کردن مقاومت ۲۷۰ اهمی، شدت جریان تولید شده در مدار (آمپراژ)، ثبت گردید. هر روز به تعداد ۵ دفعه، پارامترهای ذکرشده قرائت و میانگین داده ها به عنوان نتیجه اصلی در آن روز، گزارش شد.

یافته ها و بحث

داده های به دست آمده از پارامترهای الکتریکی مورد سنجش، درهر روز و به تعداد۵ مرتبه اندازه گیری و قرائت شده و میانگین آنها به عنوان متغیر الکتریکی آن روز گزارش گردید.

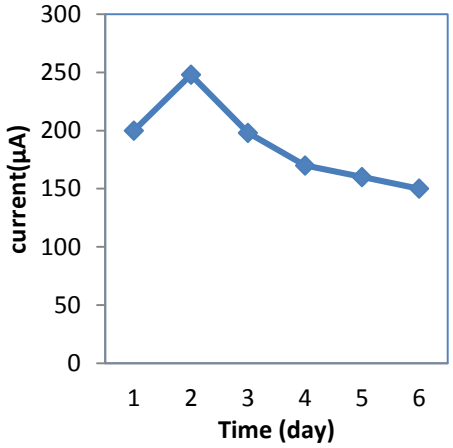
پس از راه اندازی دستگاه و ارزیابی پارامترها به کمک مولتی متر دیجیتال، مشخص گردید که در ۲۴ ساعت نخست، بیش ترین اختلاف پتانسیل (v) بین دو قطب آند و کاتد پیل ایجاد گردید و این مقدار معادل 0.96 mV ثبت شد که به طورتقریبی 1V در نظرگرفته شد. (نمودار۱). پس از آن و طی روزهای دیگر کارکرد دستگاه، ولتاژ به تدریج کاسته شد و تا روزهای ۵ و۶ که مقادیر تقریبا مشابه حاصل گردید، این محدوده ثابت شد.



نمودار۱- مقدار ولتاژ اندازه گیری شده در۶ روز

Diagram 1. The amount of voltage in 6 days

مقدار جریان الکتریکی پیل نیز با قراردادن مقاومت ۲۷۰ اهمی در مدار اندازه گیری شد. بیشینه جریان تولید شده در روز دوم به مقدار 248µA محاسبه شد که پس از آن به تدریج رو به کاهش نهاد (نمودار۲).



نمودار۲- شدت جریان در ۶ روز

Diagram 2. current intensity in 6 days

توان(P) نیز از فرمول (۲) محاسبه شد. میزان توان به همراه ولتاژ و شدت جریان در ۶ روز نیز در نمودار (۳) نشان داده شده است.

$$P = V \times I$$ فرمول (۲)

تحقیقات صورت گرفته در این زمینه مشخص کرد که در بیش تر مطالعات از سیستم تبادل گر پروتونی غشایی PEM (Proton Exchange Membrane) جهت انتقال یون های H^+ استفاده می شود زیرا کارایی آن بسیار بیش تر از پل نمکی است. اما استفاده از این سیستم محدودیت هایی را نیز نظیر هزینه بالا، محدوده فعالیت دمایی محدود و نفوذ پذیری نسبت به اکسیژن، دارا می باشد (۸،۷). اما با استناد به نتایج کسب شده از این مطالعه مشخص گردید که سیستم پل نمکی نیز قادر است مقادیر بالایی از ولتاژ را در پیل سوختی میکروبی ایجاد کند علاوه برآن جریان الکتریکی قابل توجهی تولید نماید. مطالعات Muralidharan و همکاران (۲۰۱۱) در این زمینه مؤید نتایج به دست آمده در این مطالعه است. آن ها با استفاده از یک پیل سوختی میکروبی بدون غشا برپایه پل نمکی، با به کارگیری مقاومت مشابه ۲۷۰ اهمی درمدار، شدت جریانی معادل 256µA ازسیستم دریافت نمودندکه مقدار آن با مقدار ناچیز اختلاف ناشی از خطای ناگزیر انسانی، مشابه مقادیر حداکثر جریان تولید شده در این پژوهش است. مقدارحداکثر این مطالعه 248µA بود. آن ها علاوه براین، غلظت های مختلف از دو نوع نمک KCl و NaCl را در تولید جریان الکتریکی، مورد مقایسه قرار دادند (۹).

در ارتباط با معیارهای تصفیه شدگی پساب مورد آزمون نیز طی۶ روزکارکرد پیل و ارزیابی مشاهده ویژگی های ظاهری آن و مقایسه با خصوصیات اولیه پساب خام، به انجام رسید. مشاهدات نشان داد که طی ۶ روز، پساب از ترکیبات بد بو و تیره رنگ به مقدار زیادی عاری گشته که بیان گر تجزیه ترکیبات سولفیدی موجود در پساب به همراه دیگر ترکیبات احتمالی، توسط اجتماعات میکروبی موجود بوده است.

اندازه گیری pH پساب، قبل و بعد از راه اندازی دستگاه در مدت ۶ روز نیز، افزایش pH نمونه پساب رانشان داد. pH پساب از ۸ به ۹ افزایش یافت. در حالت بافری نیز، اسیدی شدن آن را نشان داد که تغییر از pH ۷/۲ به pH ۵/۵ ثبت شد.

نتایج فوق درسیستم طراحی شده نشان گر کارکرد صحیح دستگاه و عملکرد مناسب پل نمکی در انتقال یون های H^+ از آند به کاتد است.

نتیجه گیری

طبق نتایج این مطالعه، با توجه به مزایایی از قبیل تولید مستقیم الکتریسیته از فاضلاب و حذف قابل توجهی از بار آلی فاضلاب، استفاده از پیل های سوخت میکروبی (MFC) در مقیاس صنعتی پس از انجام مطالعات تکمیلی و برآورد اقتصادی، جهت تصفیه فاضلاب توصیه می شود. فرآیندهای هوازی تصفیه فاضلاب مانند لجن فعال، سیستم هوادهی درحدود ۵۰٪ انرژی تصفیه خانه را مصرف می کند. درMFC، هوادهی تنها برای انتقال اکسیژن درکاتد نیاز است. علاوه بر این برآورد می شود در ازای هرکیلو وات ساعت برق تولیدی از انرژی‌های تجدید پذیر به‌جای زغال سنگ، می توان از انتشارحدود یک کیلوگرم CO_2 جلوگیری کرد (۱).

از این رو بهبود مداوم پیل های سوخت میکروبی و مطالعات گسترده در این حیطه، افزایش نیرو وکاهش هزینه‌های مرتبط با تولید نیرو در این سیستم‌ها را در پی خواهد داشت. علاوه بر آن که ممکن است برون دادهای دو و یا چندگانه دیگری را نظیر تصفیه هم زمان پساب به دنبال داشته باشد.

با این حال مشکلات و محدودیت‌های فراوانی در این زمینه وجود دارد که نیازمند پژوهش‌های منحصرشده‌تر و در مقیاس کابردی وسیع‌تر است.

Reference

1. John Wiley & Sons Logan BE. Microbial Fuel Cell. New Tork. 2008.
2. Chaudhuri, SK. and Lovley, DR" Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells". Nature Biotechnology. (2003). No21, pp. 1229-1232.

3. Microbial fuel cell, hydrogen and fuel cell issu January. 1393. No 95. http://www.fcc.gov.ir/microbialfuelcell.aspx.
4. Ahn Y, Logan BE.” Effectiveness of Domestic Wastewater Treatment Using Microbial Fuel Cells at Ambient and Mesophilic Temperatures”. Bioresour Technol. No:101(2). 2010. pp: 469-75.
5. Jiang J, Zhao Q, Zhang J, Zhang G, Lee D. “Electricity Generation from Bio-treatment of Sewage Sludge with MicrobialFuel Cell”. BioresourTechnol.NO: 100.Y:2009. pp:5808-5812.
6. Qing W, et al.” Electricity Generation and Modeling of Microbial Fuel Cell from Continuous Beer Brewery Wastewater”. Bioresour Technol. NO:100(18). Y: (2009); pp:4171-4175.
7. Reimers, CE., Tender, LM., Fertig, S. and Wang, W.” Harvesting energy from the marine sediment-water interface”. Environmental Science & Technology .NO: 35. Y:(2001)., pp. 192-195.
8. Basura, V.I., Beattie, P.D. and Holdcroft, S. “Solid-state electrochemical oxygen reduction at Pt/Nafions 117 andPt/BAM3GTM 407 interfaces". J. Electroanal. Chem .NO: 458, (1998), pp. 1-5.
9. Muralidharan, A., Ajay Babu, OK., Nirmalraman, K. and Ramya. “MImpact of Salt Concentration on Electricity Production in Microbial Hydrogen Based Salt Bridge Fuel Cells”. Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences, NO:1(2), April-June.Y: (2001), pp. 178-184.