



Investigation of input flow rate intensity in electricity production and wastewater treatment in microbial fuel cell

Noushin Birjandi*

Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

Received: 14 February 2025/ **Revised:** 5 March 2025/ **Accepted:** 11 March 2025

<https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2056100.1039>

Abstract

Microbial fuel cells (MFCs) are electrochemical converters that can convert chemical energy of organic matters with catalytic microorganisms to electrical energy. One of the important factors for increasing the efficiency of the cell output is the optimal input flow rate. In this study, the effect of flow rate from the anode chamber in herbal medicine wastewater treatment and using of it as the organic matter to produce electricity was investigated in the MFC. This procedural system contained a dual-chamber MFC with Nafion membrane as a separator and equipped with an Fe@Fe₂O₃/graphite as catalysis in electrode. The dual chamber MFC with continuous flow was used for 2 months at ambient temperature and different flow rate of anolyte. With increasing input flow rate from 0.1 to 1.6 ml/min, power density and voltage input increased from 95.05 to 366.13 mW/m² and 627 to 844 V, respectively, while the removal of COD decreased from 75% to 31%. Also, the maximum produced power was obtained in substrate degradation rate of 1.81 g COD/l.d and F:M 0.584 mg COD/mg MLSS.d. In addition, the changes of pH were lower in high flow rate due to low activity of microorganisms. The results show that microbial fuel cell can be used as a cost-effective technology for herbal medicine wastewater treatment and production of electricity simultaneously.

Keywords: Clean energy, Flow rate, Microbial fuel cell, Power generation, Wastewater treatment.



بررسی اثر میزان دبی ورودی بر عملکرد پیل سوختی میکروبی در تولید انرژی پاک و تصفیه پساب

نوشین بیرجندی*

گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

دریافت: ۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۳ / اصلاحات: ۱۵ اسفند ماه ۱۴۰۳ / پذیرش: ۲۱ اسفند ماه ۱۴۰۳

<https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2056100.1039>

چکیده

پیل‌های سوختی میکروبی (MFCs) مبدل‌های الکتروشیمیایی هستند که قادرند انرژی موجود در باندهای شیمیایی ترکیبات آلی را با عمل کاتالیستی میکروارگانیزم‌ها به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. یکی از پارامترهای مهم در جهت افزایش راندمان خروجی پیل، میزان بهینه دبی ورودی می‌باشد. در این مطالعه، تاثیر میزان جریان عبوری از محفظه آند بر عملکرد MFC در تولید انرژی پاک و حذف آلاینده‌ها بررسی شد. دو محفظه‌ای که توسط غشای نفیون از یکدیگر جدا شده بودند با جریان پیوسته به مدت ۲ ماه در دمای محیط و در میزان نرخ جریان آنولیت متفاوت توسط پمپ پرستالتیک راهبری شد. شدت جریان، ولتاژ و توان تولیدی به عنوان انرژی پاک با استفاده از دستگاه دیتالاگر سنجیده شد، همچنین میزان حذف آلاینده‌ها با استفاده از روش‌های استاندارد آب و پساب مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق با افزایش شدت جریان ورودی از 1/0 ml/h به ۱/۶ میزان توان تولیدی از 05/95 mW/m² به ۳۶۶/۱۳ و میزان ولتاژ از 627 mV به ۸۴۴ افزایش یافت در حالی که میزان حذف COD از ۷۵ به ۳۱ درصد کاهش یافت. همچنین حداکثر توان تولیدی در نسبت F:M برابر 584/0 mg COD/mg MLSS. d و میزان تجزیه ماده آلی 81/1 g COD/l. d به دست آمد. به علاوه میزان تغییرات pH در شدت جریان بالا به دلیل فعالیت کم میکروارگانیزم‌ها، کم‌تر بود. نتایج به دست آمده نشان داد پیل سوختی میکروبی می‌تواند به عنوان یک تکنولوژی مقرون به صرفه برای تولید انرژی پاک از مواد آلی تجدید پذیر و حذف آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: انرژی پاک، پیل سوختی میکروبی، تصفیه پساب، توان تولیدی، نرخ جریان عبوری.

مقدمه

رشد جمعیت، افزایش مصرف منابع طبیعی، استفاده روز افزون از سوخت‌های فسیلی به خصوص نفت و گاز طی سالیان اخیر همراه با مدیریت نامتعادل انرژی باعث پدید آمدن بحران جهانی انرژی شده است (Du et al., 2007; Das et al., 2009). سوخت‌های فسیلی به واسطه نشر منوکسید کربن و گازهای گلخانه‌ای دیگر، تاثیر منفی جدی روی محیط زیست می‌گذارد. نگرانی در مورد تغییر آب و هوا و گرم شدن کره زمین، افزایش تقاضای جهانی استفاده از نفت، جایگزین کردن سوخت طبیعی به منظور تامین انرژی، نیازمند گسترش روش‌های جدید تولید انرژی با استفاده از منابع طبیعی کربن و انرژی تجدید پذیر می‌باشد (Logan and Regan, 2006).

از طرف دیگر، رشد سریع شهرنشینی و افزایش صنایع سبب تولید حجم زیادی پساب بسیار قوی شده که افزایش میزان آلودگی آب‌های پذیرنده را در پی دارد (Dentel et al., 2004; Sarkar et al., 2006) به علاوه انرژی بالای مورد نیاز سیستم‌های متداول تصفیه پساب، نیازمند فن‌آوری‌های تصفیه جایگزین هستند که هم هزینه و هم انرژی مورد نیاز برای بهره‌برداری کارآمد از آن‌ها کم‌تر باشد (Ghangrekar and Shinde, 2007, Venkata Mohan et al., 2008; You et al., 2008). در این راستا کشورهای پیشرفته و توسعه یافته، درصد کشف روش‌هایی جهت استفاده بهینه از پساب‌های صنعتی و به طور کلی تولید انرژی و به خصوص تولید الکتریسیته با صرف هزینه کم‌تر هستند (Kim et al., 2002; Gil et al., 2003). یکی از شیوه‌های مبتکرانه‌ای که فن‌آوری آن در دهه اخیر به سرعت توسعه یافته است، استفاده از پیل‌های سوختی جهت تامین هم‌زمان الکتریسیته و حرارت به روش الکتروشیمیایی می‌باشد. پیل سوختی، دستگاهی الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی حاصل از یک واکنش شیمیایی را به انرژی الکتریکی مفید تبدیل می‌کند. تبدیل انرژی در پیل سوختی، تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی می‌باشد. یکی از انواع پیل‌های سوختی، MFCs¹ می‌باشد که با توجه به قابلیت تنوع استفاده از سوسترهای مختلف نظیر پساب در کنار تولید الکتریسیته از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Schamphelaire et al., 2008) MFCs از دو محفظه آندی و کاتدی تشکیل شده است (Du et al., 2007). محفظه آندی بی‌هوازی بوده و میکروارگانیسم‌های موجود در آن در نقش کاتالیست بیولوژیکی عمل کرده و از طریق تنفس بی‌هوازی ماده آلی، تولید الکترون و پروتون می‌کند. انتقال الکترون از آند به کاتد به وسیله مدار خارجی انجام می‌شود و پروتون‌ها از طریق یک غشای تبادل پروتون به درون محفظه کاتد انتشار می‌یابند (Ahn and Logan, 2010). MFCs می‌توانند در دو حالت پیوسته و ناپیوسته عمل کنند. در یک سیستم ناپیوسته کاهش میزان مواد لازم برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها در طول زمان، منجر به کاهش توان خروجی در MFC می‌گردد در حالی که در سیستم‌ها پیوسته به دلیل مناسب بودن شرایطی نظیر غلظت ثابت سوستر این مساله می‌تواند قابل حل باشد بنابراین با توجه به شرایط پایدار و مناسب، استفاده از آن‌ها به عنوان یک منبع انرژی و تصفیه پساب امکان پذیر می‌باشد (Rahimnejad et al., 2011). عوامل گوناگونی در عملکرد پیل‌های سوختی در حالت پیوسته موثر هستند که بهبود این عوامل می‌تواند کاربرد تجاری آن‌ها را امکان پذیر سازد. یکی از پارامترهای مهم در جهت تولید بهتر جریان الکتریکی در MFCs پیوسته، شدت جریان خوراک ورودی می‌باشد. نرخ جریان عبوری از محفظه آند تاثیر بسزایی بر روی انتقال جرم و دسترسی میکروارگانیسم‌های کاتالیستی موجود بر روی بایوفیلیم به مواد معدنی و سوستر دارد (Logan and Regan, 2006).

در مطالعه‌ای که توسط ون و همکاران (Wen et al., 2010) پیرامون تولید الکتریسیته با MFC از پساب آبجوسازی انجام شد، حداکثر ولتاژ ۰/۵۷ V و بازده حذف COD² به ۴۳-۴۰٪ رسید. هم‌چنین در مطالعه دیگری که در آن پساب صنایع شکلات سازی مورد بررسی قرار گرفت، بیشینه ولتاژ تولیدی پس از ۱۳۵ ساعت راهبری به ۳۸۹ mV رسید (Patil et al., 2009). آهن و لوگان (Ahn and Logan, 2010). نیز توانستند ۲۵/۸٪ از COD پساب شهری را حذف کنند. وینفیلد و همکاران (Winfield et al., 2012) با تغییر میزان دبی در محدوده ۶۰-۱۵ میلی لیتر بر ساعت، عملکرد مجموعه MFCs با کاتد هوایی که از نظر هیدرولیکی اتصال سری با یکدیگر داشتند را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که در شدت جریان‌های بالاتر عملکرد پیل‌ها و میزان دسترسی همگی آن‌ها به مواد معدنی بهتر بود. هاشمی و صمیمی (Hashemi and Samimi, 2012) نیز با طراحی آزمایش در یک MFC پیوسته که از پساب خانگی به عنوان منبع میکروبی استفاده می‌نمود، به بررسی اثر نرخ جریان، میزان سوسترهای ورودی و pH بر روی عملکرد پیل پرداختند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که میزان دبی تاثیر مهمی بر روی میزان توان تولیدی و هم‌چنین زمان رسیدن آن به حالت پایدار دارد هم‌چنین آن‌ها برای یافتن میزان تاثیر دبی بر روی میزان ولتاژ تولیدی در طول زمان و در طی شکل گیری بایوفیلیم در یک MFC دو محفظه‌ای با کاتد هوایی،

زمان مانده‌های گوناگون را در محدوده ۲۴-۴ ساعت مورد مطالعه قرار دادند و به مقدار بهینه برابر با ۸ ساعت دست یافتند. در سال ۲۰۲۰، داس و همکاران (Das et al., 2020). در تحقیق خود، CuZn را به عنوان کاتالیزور کاتدی کم‌هزینه در MFC‌های مقیاس آزمایشگاهی و میدانی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که MFC در مقیاس آزمایشگاهی با CuZn به عنوان کاتالیزور کاتدی، چهار برابر چگالی توان بالاتری را در مقایسه با MFC کنترل مقیاس آزمایشگاهی که بدون کاتالیزور کاتدی کار می‌کرد، نشان داد. MFC در مقیاس میدانی با CuZn به عنوان کاتالیزور کاتدی نیز ۶۴ برابر چگالی توان بالاتری را در مقایسه با MFC کنترل نشان داد. بنابراین، کاربرد CuZn به عنوان کاتالیزور کاتدی در MFC‌های مقیاس آزمایشگاهی و میدانی را تضمین می‌کند در همان سال، ونگ و همکاران (Wang et al., 2020) برای افزایش ظرفیت تولید انرژی و افزایش فعالیت واکنش کاهش اکسیژن از MIL-53(Fe) به عنوان کاتالیزور استفاده کردند و به ولتاژ خروجی ۰/۳۷ V برای یک هفته دست پیدا کردند و متوجه شدند که MIL-53(Fe) یک کاتالیزور الکتروشیمیایی عالی است که به طور قابل توجهی توانایی کاهش اکسیژن کاتالیزوری را افزایش می‌دهد و توان خروجی را بالا می‌برد. در تحقیقی دیگر، از باکتری‌های اکسیدکننده آهن استفاده شد تا عملکرد آن‌ها را مورد بررسی قرار دهند و توانستند به حداکثر چگالی توان $1/1 \text{ W/m}^2$ دست پیدا کنند (Izadi et al., 2019) در این تحقیق با استفاده از یک MFC دو محفظه‌ای که در آن بخش عمده خوراک ورودی در سمت محفظه آند پساب گیاهان دارویی بود، اثر شدت جریان ورودی به محفظه آندی در محدوده وسیعی مورد بررسی قرار گرفت و اثر آن بر میزان توان تولیدی، ولتاژ، میزان حذف COD و تغییرات pH در جریان‌های ورودی و خروجی نشان داده شد تا در آینده بتوان از این تکنولوژی در مقیاس صنعتی و در شرایطی بهینه بهره برد.

مواد و روش‌ها

ماده آلی و منبع میکروارگانیسم

پساب گیاهان دارویی از کارخانه سها جیسا، تولید کننده عصاره گیاهان دارویی واقع در شهرک صنعتی سلمان شهر گرفته شد و قبل از استفاده در دمای 4°C در یخچال نگهداری شد. خصوصیات پساب تهیه شده در جدول ۱ آورده شده است که این خصوصیات بر طبق روش استاندارد آب و پساب تعیین گردید (APHA, 1998). برای تامین میکروارگانیسم‌های مورد نیاز در پیل، مقداری لجن فعال از تصفیه خانه شهرک صنعتی چمستان در شهرستان نور تهیه گردید.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی پساب گیاهان دارویی

Table 1. Physicochemical characteristics of the herbal medicine wastewater

| مقدار | محدوده | مولفه اندازه‌گیری شده |
|--------------|-------------|-----------------------|
| 12.5±0.2 | 12.11-33.97 | Ph (mg/L) |
| 6183.30±0.36 | 6170-6196 | COD (mg/L) |
| 22505±0.0 | 2245-2255 | TSS (mg/L) |
| 1422.84±0.35 | 1414-1432 | VSS (mg/L) |
| 1210.67±0.56 | 1202-1220 | TKN (mg/L) |
| 17.92±0.1 | 17.17-98.86 | Phosphate (mg/L) |
| 0.30±0.22 | 0.1-0.5 | Sulfate (mg/L) |
| 37.81±0.25 | 30-46 | Nitrate (mg/L) |
| 1.240±0.11 | 1.1-32.16 | Nitrite (mg/L) |
| 0.16±0.1 | 0.0-22.1 | Chloride (mg/L) |
| 4.2±0.12 | 4.3-9.5 | |

ساختار پیل سوختی میکروبی

در این مطالعه MFC به صورت دو محفظه‌ای طراحی شد. این پیل شامل دو محفظه آندی و کاتدی (حجم هر کدام ۴۵۰ ml) از جنس پلکسی گلاس است که توسط غشای تبادل پروتون (Nafion 112, SigmaAldrich) از یکدیگر جدا شده‌اند. که برای عملکرد مناسب، غشا قبل از استفاده به مدت ۱ ساعت در آب اکسیژنه ۳٪ در حال جوش قرار داده شد سپس به مدت ۱ ساعت در اسید سولفوریک ۰/۵ مولار قرار گرفت. دو الکتروآند و کاتد از جنس صفحه گرافیتی با ابعاد $45 \times 25 \times 3 \text{ mm}$ بوده که در مسیر انتقال الکترون یک مقاومت ۱۰۰ اهمی قرار گرفت. الکتروآند نیز به صورت ترکیبی از گرافیت/ $\text{Fe}@ \text{Fe}_2\text{O}_3$ به عنوان کاتالیست ساخته شد. روش ساخت بدین صورت بود که ابتدا ۰/۹ گرم $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ و ۱/۸ گرم NaBH_4 به ترتیب در ۱۰۰ ml و ۴۰ آب مقطر حل شدند و محلول آهن و الکتروآند

به مدت ۲۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک قرار گرفتند سپس به منظور احیای یون‌های آهن، محلول سدیم بورو هیدرید به آرامی به آن اضافه گردید. الکتروود مورد نظر با آب دیونیزه به خوبی شسته شد و به منظور استفاده آینده در گاز نیتروژن خشک گردید. محفظه آند با پساب گیاهان دارویی به عنوان آنالیت پر شد این محفظه کاملاً بی هوازی بود. جریان پساب ورودی به صورت مداوم توسط پمپ پرستالتیک در میزان دبی‌های مختلف (۰/۱ تا ۱/۶ ml/min) برقرار شد و pH آن بر روی ۷ تنظیم گردید و هیچ واسطه بیرونی در این محفظه مورد استفاده قرار نگرفت. در محفظه کاتدی که هوازی بود از کاتالیست آهن استفاده شد و به طور مداوم با استفاده از پمپ هوا، هوادهی گردید.

روش‌های تجزیه و تحلیل

شدت جریان، ولتاژ و توان تولیدی MFC با استفاده از دستگاه دیتالاگر و بر اساس معادلات زیر محاسبه شد:

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

$$P = \frac{IV}{A} \quad (2)$$

که در آن I شدت جریان، V ولتاژ، R مقاومت، P توان تولیدی و A مساحت الکتروود کاتد (۱۱/۲۵ cm²) را نشان می‌دهد. میزان COD با استفاده از روش کالریمتری به دست آمد. دی کرومات پتاسیم به عنوان ماده اکسید کننده قوی به کار برده شد. همچنین از دستگاه ترمورآکتور (Velp Scientifica, Eco16 Thermoreactor, Europe) جهت هضم استفاده شد و میزان جذب آن توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۰۰ nm قرائت شد. عملکرد MFC در حذف COD در مدت بهره‌برداری با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$COD_{removal\%} = \frac{InitialCOD - FinalCOD}{InitialCOD} \times 100 \quad (3)$$

از شاخص میزان تجزیه ماده آلی (SDR)⁷ و جریان تولیدی به عنوان شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم براساس بهره‌وری تصفیه استفاده شد.^۹

$$SDR(mg/l.d) = \frac{(COD_{in} - COD_f)(mg/l) \times Q(l/d)}{V(l)} \quad (4)$$

همچنین نسبت F:M که نشان دهنده میزان غذادهی به میکروارگانیسم می‌باشد بر طبق معادله زیر محاسبه شد:

$$\frac{F}{M} (mgCOD/mgMLSS.d) = \frac{Q(l/d) \times COD_{in}(mg/l)}{V(l) \times MLSS(mg/l)} \quad (5)$$

که در آن Q میزان شدت جریان ورودی، V حجم محفظه آند و MLSS غلظت توده زیستی تشکیل شده در محفظه آندی سیستم MFC می‌باشد. برای تعیین میزان غلظت توده زیستی، ابتدا کاغذ صافی وزن شد (A)، سپس ۵۰ میلی لیتر نمونه از کاغذ صافی ۰/۴۵ میکرومتر عبور داده شد و در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و بعد از خشک شدن توزین گردید (B) و عدد محاسبه شده برای اندازه‌گیری مقدار کل جامدات معلق در معادله زیر قرار داده شد:

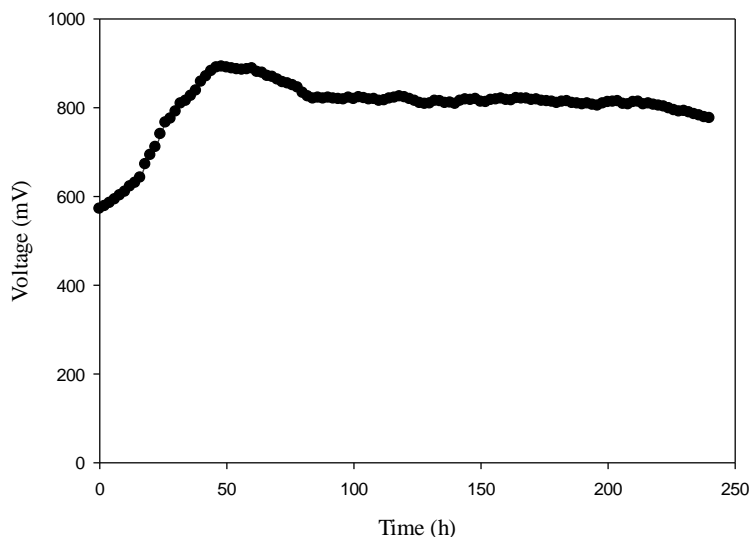
$$MLSS(mg/l) = \frac{(A - B)(mg) \times 1000(ml/l)}{V(ml)} \quad (6)$$

نتایج و بحث

تولید الکتروسیسته در پیل سوختی میکروبی

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد سیستم MFC استفاده شده در این مطالعه، قادر به تولید الکتروسیسته از پساب گیاهان دارویی به عنوان

ماده آلی بوده و باکتری‌های الکتریکی فعال مورد نیاز در پساب این صنعت وجود دارد. شکل ۱ روند تغییرات ولتاژ در طول عملکرد سیستم را نشان می‌دهد.



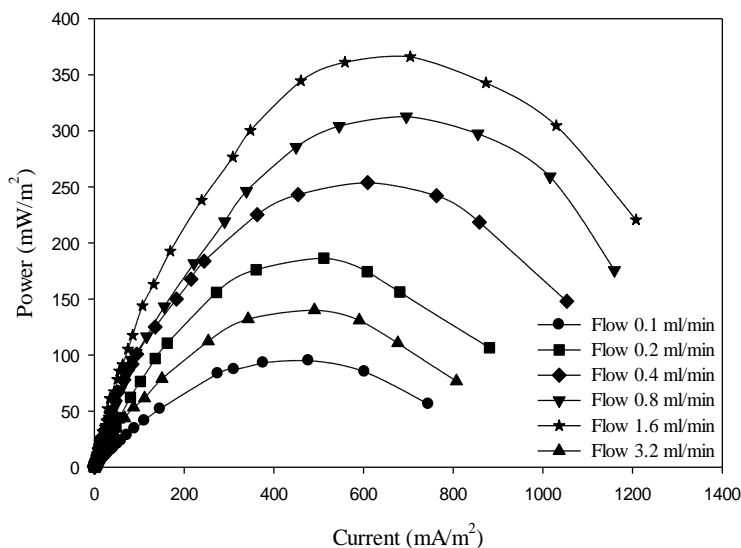
شکل ۱. تغییرات ولتاژ به دست آمده در طول عملکرد پیل سوختی میکروبی
Fig. 1. Voltage variations obtained during microbial fuel cell operation

همان طور که ملاحظه می‌شود پس از تزریق لجن فعال به سیستم MFC، میکروارگانیسم‌ها شروع به فعالیت کرده و ولتاژ در همان ساعات‌های اولیه به مقدار بالایی می‌رسد که این امر می‌تواند به علت حضور ترکیباتی باشد که به آسانی توسط میکروارگانیسم‌های موجود مصرف می‌شوند (Mathuriya and Sharma, 2010). مشابه چنین افزایشی در ولتاژ اولیه، برای سلول‌های سوخت میکروبی با منابع مختلف ماده آلی گزارش شده است (Scott et al., 2007). نتایج نشان می‌دهد لجن فعال طبق مطالعات پیشین، بیوکاتالیست مناسبی برای تولید الکتریسیته می‌باشد (Oh and Logan, 2005) بعد از ۱۲ ساعت میکروارگانیسم‌ها وارد فاز لگاریتمی شده و شروع به تجزیه ماده آلی می‌کنند و پس از گذشت حدود ۴۸ ساعت به دلیل تشکیل جامعه میکروبی پایدار در محفظه آند، ولتاژ به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد پس از آن به علت تجزیه ماده آلی و کاهش منبع کربن در محفظه آند ولتاژ مقداری کاهش یافته و سپس به مقدار ثابت می‌رسد که برای مدت زمان ده روز در این مقدار پایدار بوده است. فاز افزایشی ولتاژ به علت غنی‌سازی و پروسه تشکیل بیوفیلم باکتری‌های فعال الکتریکی بر روی سطح آند، طولانی می‌باشد (Mathuriya and Sharma, 2010). با توجه به این شکل حداکثر ولتاژ تولیدی برابر ۸۹۲ mV به دست آمد. لو و همکاران (Lu et al., 2009) از تصفیه پساب صنایع نشاسته‌سازی در کشور چین به ولتاژ ۴۹۰ mV دست یافتند. نیمجه و همکاران (Nimje et al., 2012) نیز در کشور تایوان با استفاده از سلول سوخت میکروبی تک محفظه‌ای و پساب صنایع لبنی ولتاژ و شدت جریان به ترتیب برابر با ۶۵۰ mV و ۰/۶۵ mA را به دست آوردند

اثر میزان جریان ورودی بر منحنی پلاریزاسیون

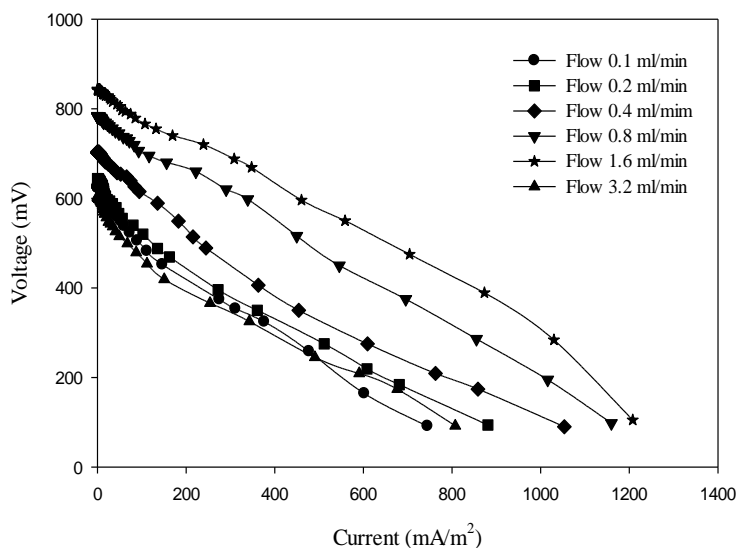
میزان جریان ورودی پساب یکی از پارامترهایی بود که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین اثر مقاومت بر عملکرد سیستم MFC از منحنی پلاریزاسیون استفاده می‌شود. همان طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان جریان ورودی تا ۱/۶ ml/min میزان شدت جریان، ولتاژ و توان تولیدی سیستم افزایش یافت و زمانی که میزان جریان ورودی پساب از این مقدار بیشتر شد، سیستم MFC شدت جریان، ولتاژ و توان کم‌تری را نشان داد. با توجه به نتایج حاصل از شکل ۲ حداکثر دانسیته توان تولیدی و شدت جریان در میزان دبی ۱/۶ ml/min به ترتیب برابر با ۳۶۶/۱۳ mW/m² و ۱۲۰۷/۷۳ mA/m² به دست آمد که نسبت به حداقل میزان دبی ۰/۱ ml/min به میزان چشم‌گیری افزایش داشته است (۹۵/۰۵ mW/m² و ۷۴۵/۲۴ mA/m²). در یک مرحله، زمانی که ولتاژ سیستم به مقدار ثابتی رسید با تغییر مقاومت خارجی مدار و ثبت ولتاژ، منحنی پلاریزاسیون سیستم ثبت شد (شکل ۳) که میزان ولتاژ برای دبی زیاد و کم به ترتیب برابر ۸۴۴ mV و ۶۲۷ mV به دست آمد. طبق معادله $V=RI$ همراه با افزایش مقاومت، شدت جریان تولیدی

کاهش یافته و به طور نسبی ثابت شدن ولتاژ در مقاومت‌های بالاتر مشاهده می‌شود. ثابت شدن ولتاژ در یک نقطه نشان می‌دهد سیستم به حالت پایدار رسیده و می‌تواند از تصفیه پساب، الکتریسیته تولید کند.



شکل ۲. میزان توان و دانسیته جریان تولیدی در دبی‌های مختلف پساب به عنوان سوخت

Fig. 2. Power and current density produced at different wastewater flow rates as fuel



شکل ۳. میزان شدت جریان و ولتاژ تولیدی در دبی‌های مختلف پساب به عنوان سوخت

Fig. 3. Current intensity and voltage produced at different wastewater flow rates as fuel

کاهش شدت جریان، ولتاژ و توان تولیدی سیستم در میزان دبی بیش از ۱/۶ ml/min بیانگر اشباع شدن فعالیت میکروبی با پساب به عنوان سوخت تحت این شرایط، مصرف ناقص سوخت و رشد سریع‌تر باکتری‌های تخمیر کننده نسبت به باکتری‌هایی که از نظر الکتروشیمیایی فعال‌اند، می‌باشد. دلیل دیگر برای این امر، این است که میزان جریان ورودی بالا ممکن است باعث جایگزین شدن دیگر پذیرنده‌های الکترون در رقابت با آند شده و این موضوع سبب بازده پایین سیستم گردد (Oh and Logan, 2005). این نتایج با نتایج به دست آمده از تولید الکتریسیته زیستی از پساب شیمیایی در MFC بدون واسطه با استفاده از محیط کشت مخلوط میکروارگانیسم‌ها و نتایج به دست آمده توسط کیم و همکاران مطابقت دارد (Kim et al., 2007) با مقایسه نتایج می‌توان بیان کرد در حالتی که دبی زیاد است به دلیل انتقال جرم بالا و تاثیر بیشتر پدیده جابه‌جایی میزان دسترسی میکروارگانیسم‌های موجود در بیوفیلم به سوبسترا و مواد معدنی بیشتر شده که منجر به افزایش فعالیت آن‌ها می‌گردد بنابراین در جریان‌های بالا، بازده و میزان توان تولیدی افزایش می‌یابد.

البته باید در نظر گرفت میزان بیش از حد دبی منجر به افزایش حتمی توان تولیدی نمی‌شود و بایستی در میزان بهینه خود باشد (Wen et al., 2010). در سیستم‌های پیوسته بیولوژیکی لازم است که همواره بخشی از میکروارگانیسم‌ها در سیستم باقی بماند. بنابراین چنانچه در چنین سیستم‌هایی سرعت جریان ورودی به مقدار زیادی افزایش یابد، میکروارگانیسم‌ها نیز به همان نسبت از سیستم خارج می‌گردند و ممکن است غلظت میکروارگانیسم در سیستم به صفر کاهش پیدا کند. در چنین شرایطی فرآیند بیولوژیکی متوقف خواهد شد و به اصطلاح فرآیند تهی شدن اتفاق می‌افتد (Rahimnejad et al., 2011).

میزان تجزیه ماده آلی و توان تولیدی

نتایج آزمایش نشان می‌دهد که محفظه آند MFC مانند سیستم‌های تصفیه بی‌هوازی معمول به خوبی توانسته COD پساب را حذف کند و جدای از تولید الکتریسیته، میزان تجزیه ماده آلی خوبی دارد. این نشان دهنده عملکرد خوب میکروارگانیسم‌های موجود در پساب در تجزیه منبع کربن ماده آلی به عنوان دهنده الکترون است (Mathuriya and Sharma, 2010). با توجه به جدول ۲ میان SDR و توان تولیدی ارتباط خوبی مشاهده شده است. این نشان می‌دهد که تولید الکتریسیته از طریق تجزیه ماده آلی می‌باشد.

جدول ۲. ارتباط شدت جریان خوراک ورودی با میزان تجزیه ماده آلی و غذادهی میکروارگانیسم‌ها

Table 2. Relationship between the influent feed current intensity and organic matter degradation rate as well as microorganism feeding

| F:M (mg/mg.d) | MLSS (mg/l) | میزان تجزیه ماده آلی (g COD/l.d) | حداکثر دانسیته توان (mW/m ²) | میزان جریان ورودی (ml/min) |
|------------------|----------------|-------------------------------------|---|----------------------------|
| 0.093 | 6264 | 0.43 | 95.05 | 0.1 |
| 0.151 | 7308 | 0.7 | 186.05 | 0.2 |
| 0.207 | 8462 | 0.95 | 253.91 | 0.4 |
| 0.373 | 9011 | 1.46 | 312.79 | 0.8 |
| 0.584 | 9890 | 1.81 | 366.13 | 1.6 |
| 0.945 | 1044 | 2.29 | 140.14 | 3.2 |

علت تولید الکتریسیته کم‌تر در شدت جریان ۳/۲ ml/min با وجود SDR بالا ممکن است افزایش غلظت بالای دیگر پذیرنده‌های الکترون مانند نیترات و فسفات در پساب باشد که الکترون‌های تولیدی را مصرف کرده و سبب تولید الکتریسیته کم‌تر در این مرحله می‌شوند. به علاوه از دلایل دیگر می‌توان به این نکته اشاره کرد که سوبسترای تجزیه شده به جای تولید الکترون به مصرف رشد باکتریایی رسیده باشد (Aldrovandi et al., 2009). دیگر پارامتر مورد بررسی در سیستم MFC نسبت F:M بود که فاکتوری بسیار مهم در غذادهی میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. بر اساس نتایج حاصله، نسبت F:M در مقدار ۰/۵۸۴ mg COD/mg MLSS.d بهترین نتایج را برای تولید الکتریسیته در برداشت (توان ۳۶۶/۱۳ mW/m²) و با کاهش در مقدار نسبت F:M کیفیت تولید الکتریسیته به سمت شرایط نامطلوب تغییر یافت. به طور کلی در این مطالعه، مقدار بالای غذادهی به میکروارگانیسم‌ها برای حداکثر تولید توان ایده آل بود.

اثر میزان جریان ورودی بر میزان حذف COD

برای ارزیابی عملکرد سیستم به عنوان واحد تصفیه، پساب خروجی از این سیستم از نظر میزان COD مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تست COD در دبی‌های مختلف در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به نتایج با افزایش میزان دبی از ۰/۱ تا ۳/۲ ml/min مقدار حذف COD محفظه آندی از ۷۵ تا ۲۳ درصد کاهش یافت. از آن جا که تماس مواد آلی و تجزیه آن‌ها توسط میکروارگانیسم‌های روی بیوفیلم احتیاج به زمان ماند کافی دارد، بنابراین کاهش دبی و در نتیجه آن افزایش زمان ماند منجر به بهبود فعالیت متابولیکی و رشد میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی می‌شود که به موجب آن مواد آلی موجود بیشتر مصرف شده و بازده حذف COD افزایش می‌یابد (Winfield et al., 2012). هم‌چنین میزان تغییرات pH در جریان‌های ورودی و خروجی آند در حالت‌های مختلف دبی بررسی شد که می‌توان گفت تغییرات pH در میزان دبی بالا به دلیل فعالیت کم میکروارگانیسم‌ها، کم‌تر بوده است. به طور کلی بعد از اکسیداسیون در محفظه آندی سیستم MFC به دلیل تولید اسیدهای آلی حاصل از تجزیه مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها، میزان pH در این محفظه کاهش یافته است.

جدول ۳. اثر شدت جریان خوراک ورودی بر درصد حذف بار آلی پساب و تغییرات pH

Table 3. Effect of influent feed current intensity on the organic load removal percentage of wastewater and pH changes

| درصد حذف COD | pH | | COD (mg/l) | | میزان جریان ورودی (ml/min) |
|--------------|-----------|-----------|------------|-----------|----------------------------|
| | خروجی آند | ورودی آند | خروجی آند | ورودی آند | |
| 74.73 | 4.17 | 7.32 | 509 | 2014 | 0.1 |
| 63.18 | 7.75 | 7.25 | 707 | 1920 | 0.2 |
| 54.21 | 5.03 | 7.19 | 696 | 1520 | 0.4 |
| 43.32 | 5.64 | 7.19 | 827 | 1459 | 0.8 |
| 31.36 | 5.82 | 7.22 | 860 | 1253 | 1.6 |
| 23.27 | 5.90 | 7.15 | 821 | 1070 | 3.2 |

نتیجه گیری

یافته‌های این مطالعه قابلیت تولید الکتروسیسته از فرآیند تصفیه بیولوژیکی پساب گیاهان دارویی با استفاده از تکنولوژی MFC دو محفظه‌ای در شدت جریان‌های مختلف را به اثبات رسانید. با توجه به نتایج به دست آمده در این سیستم و با برقراری شرایط مناسب، افزایش میزان شدت جریان ورودی منجر به افزایش توان تولیدی تا $366/13 \text{ mW/m}^2$ شد در حالی که میزان حذف COD تا ۲۳٪ کاهش یافت. به علاوه ولتاژی در حدود 844 mV در میزان دبی بالا به دست آمد. بر اساس نتایج نهایی حاصل از تصفیه پساب گیاهان دارویی در سیستم MFC، این سیستم می‌تواند به عنوان یک تکنولوژی جدید برای تولید الکتروسیسته از مواد آلی قابل تجدید و به عنوان جایگزینی برای انواع مختلف روش‌های تصفیه پساب به کار گرفته شود. با توجه به مزایایی از قبیل تولید مستقیم الکتروسیسته از پساب و حذف قابل توجهی از بار آلی پساب، استفاده از این سیستم در مقیاس صنعتی پس از انجام مطالعات تکمیلی و برآورد اقتصادی جهت تصفیه پساب توصیه می‌شود. در واقع محفظه آند سیستم مانند یک راکتور بی‌هوای رشد معلق عمل می‌کند که معمولاً در فرآیندهای تصفیه پساب کاربرد دارد و در مقایسه با فرآیندهای هوای مانند لجن فعال، کاهش تولید جامدات را در پی دارد.

منابع

- Ahn, Y., & Logan, B. E. (2010). Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures. *Bioresource technology*, 101 (2), 469-475.
- Aldrovandi, A., Marsili, E., Stante L., Paganin P., Tabacchioni S. & Giordano A. (2009). Sustainable power production in a membrane-less and mediator-less synthetic wastewater microbial fuel cell. *Bioresource technology*, 100 (13), 3252-3260.
- APHA. (1998). Standard Methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington USA."
- Daniel, D. K., Das Mankidy, B., Ambarish, K., & Manogari, R. (2009). Construction and operation of a microbial fuel cell for electricity generation from wastewater. *International journal of hydrogen energy*, 34 (17), 7555-7560.
- Das, I., Das, S. & Ghangrekar, M. (2020). Application of bimetallic low-cost CuZn as oxygen reduction cathode catalyst in lab-scale and field-scale microbial fuel cell. *Chemical Physics Letters*, 751, 137536.
- Dentel, S., Strogon, B., & Chiu, P. (2004). Direct generation of electricity from sludges and other liquid wastes. *Water Science & Technology*, 50 (9), 161-168.
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology advances*, 25 (5), 464-482.
- Ghangrekar, M. M., & Shinde, V. B. (2007). Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production. *Bioresource Technology*, 98 (15), 2879-2885.
- Gil, G. C., Chang I. S., Kim, B. H., Kim, M., Jang, J. K., Park, H. S., & Kim, H. J. (2003). Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. *Biosensors and Bioelectronics*, 18 (4), 327-334.
- Hashemi, J., & Samimi, A. (2012). Steady state electric power generation in up-flow microbial fuel cell using the estimated time span method for bacteria growth domestic wastewater. *Biomass and Bioenergy*, 45, 65-76.
- Izadi, P., Fontmorin, J.M., Fernández, L. F., Cheng, S., Head, I., & Yu, E. H. (2019). High performing gas diffusion biocathode for microbial fuel cells using acidophilic iron oxidizing bacteria. *Frontiers in Energy Research*, 7: 93.
- Kim, H. J., Park, H. S., Hyun, M. S., Chang, I. S., Kim, M. & Kim, B. H. (2002). A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme and Microbial Technology*, 30 (2), 145-152.
- Kim, J. R., Jung, S. H., Regan, J. M. & Logan, B. E. (2007). Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells. *Bioresource technology*, 98 (13), 2568-2577.
- Logan, B. E. & Regan, J. M. (2006). Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends in Microbiology*, 14 (12), 512-518.

- Lu, N., Zhou S. g., Zhuang L., Zhang J. t. & Ni J. r. (2009). Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology. *Biochemical Engineering Journal*, 43 (3): 246-251.
- Nimje, V. R., Chen C.Y., Chen, H. R., Chen, C. C., Huang, Y. M., Tseng, M. J., Cheng, K. C. & Chang Y..F. (2012). Comparative bioelectricity production from various wastewaters in microbial fuel cells using mixed cultures and a pure strain of *Shewanella oneidensis*. *Bioresource technology*, 104, 315-323.
- Oh, S. & Logan, B. E. (2005). Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. *Water Research*, 39 (19), 4673-4682.
- Patil, S. A., Surakasi, V. P., Koul, S., Ijmulwar, S., Vivek, A., Shouche, Y. & Kapadnis, B. (2009). Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber. *Bioresource technology*, 100 (21), 5132-5139.
- Rahimnejad, M., Ghoreyshi A. A., Najafpour, G. & Jafary, T. (2011). Power generation from organic substrate in batch and continuous flow microbial fuel cell operations. *Applied Energy*, 88 (11), 3999-4004.
- Rahimnejad, M., Najafpour, G. D., Ghoreyshi, A. A., Shakeri, M. & Zare, H. (2011). Methylene blue as electron promoters in microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (20), 13335-13341.
- Mathuriya, A. & Sharma, V. (2010). Bioelectricity production from various wastewaters through microbial fuel cell technology. *Journal of Biochemical Technology*, 2 (1), 133-137.
- Sarkar, B., Chakrabarti, P., Vijaykumar, A., & Kale, V. (2006). Wastewater treatment in dairy industries-possibility of reuse. *Desalination*, 195 (1), 141-152.
- Schamphelaire, L. D., Bossche L.V.D., Dang, H. S., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environmental science & technology*, 42 (8), 3053-3058.
- Scott, K., Murano, C., & Rimbu, G. (2007). A tubular microbial fuel cell. *Journal of Applied Electrochemistry*, 37 (9), 1063-1068.
- Venkata Mohan, S., Mohanakrishna, G., Reddy, B. P., Saravanan, R., & Sarma, P. N. (2008). Bioelectricity generation from chemical wastewater treatment in mediatorless (anode) microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched hydrogen producing mixed culture under acidophilic microenvironment. *Biochemical Engineering Journal*, 39 (1), 121-130.
- Wang, H., Jiang, L., Chen, J., Fu, M., Diao, Z., Liu, H., & Guo, H. (2020). Enhanced bioelectrochemical performance caused by porous metal-organic framework MIL-53 (Fe) as the catalyst in microbial fuel cells. *Process Biochemistry*, 99, 147-153.
- Wen, Q., Wu, Y., Zhao, L., & Sun, Q., (2010). Production of electricity from the treatment of continuous brewery wastewater using a microbial fuel cell. *Fuel*, 89 (7), 1381-1385.
- Winfield, J., Ieropoulos, I., & Greenman, J. (2012). Investigating a cascade of seven hydraulically connected microbial fuel cells. *Bioresource technology*, 110, 245-250.
- You, S., Zhao, Q., Zhang, J., Liu, H., Jiang, J., & Zhao, S. (2008). Increased sustainable electricity generation in up-flow air-cathode microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 23 (7), 1157-1160.