

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 4, pp: 109-122

The Effect of Temperature, pH and Concentration on the Performance of a Single Chamber Microbial Fuel Cell

S. A. Mirbagheri^{1*}, S. Malekmohammadi²

1. Prof., Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
(Corresponding Author) mirbagheri@kntu.ac.ir
3. Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received Oct. 28, 2022 Accepted May 31, 2023)

To cite this article:

Mirbagheri, S. A., Malekmohammadi, S. 2023. "The effect of temperature, pH and concentration on the performance of a single chamber microbial fuel cell" Journal of Water and Wastewater, 34(4), 109-122.
<https://doi.org/10.22093/wwj.2023.367515.3296>.

Abstract

Microbial fuel cells are one of the new methods of energy production that microorganisms generate power from biomass by performing oxidation and reduction processes. In this research, a single-chamber reactor with a volume of 157 ml was constructed and investigated. This reactor had three brush anodes and an air cathode. The maximum voltage and power density were 500 mv and 33 mW/m², respectively. The COD removal efficiency was 53, 66, 85 and 89% at 8, 12, 24 and 48 hours, respectively, which is a high efficiency for an anaerobic system. The Coulombic efficiency after 25 and 80 hours was 13.64 and 20.9, respectively. The higher the concentration of COD, the higher the efficiency of electricity production. Also, the maximum power density for concentrations of 4500, 2000, 1000, 500, 300 and 150 were obtained as 393, 330, 285, 252, 230 and 140 mW/m², respectively. An increase in temperature first leads to an increase in efficiency (power production) and then a decrease. An increase in pH also leads to an increase in efficiency (power production) and then to its decrease, and neutral pH is optimal. Also, three different substrates, including acetate, glucose, and domestic wastewater, were evaluated. The type of substrate affects more than the maximum power value; it affects the three increasing, static and decreasing phases. Acetate and domestic wastewater also act very similarly.

Keywords: Microbial Fuel Cell, Wastewater Treatment, Electricity Production, COD Removal, Single-Chamber.



Extended Abstract

1. Introduction

A microbial fuel cell is one of the new methods of energy production in which microorganisms generate an electric current from biomass. Microbial fuel cells can simultaneously deal with pollution caused by wastewater and fossil fuels (Malekmohammadi and Mirbagheri, 2022).

2. Materials and Methods

In this research, a single-chamber microbial fuel cell was built and experiments were performed on it (Fig. 1). The single-chamber microbial fuel cell is made of Plexiglas with a volume of 157 ml (3x3x15cm). Three brush anodes with a diameter of 2.5 cm and a length of 3 cm were used, which were placed at a distance of 2.5 cm from the cathode and each other. The used air cathode is made of polyvinylidene fluoride and active carbon and black carbon (Malekmohammadi and Mirbagheri, 2023). It should be noted that the construction of anode and cathode electrodes is detailed in the main text of the paper. The COD concentration was determined using a spectrophotometric device. pH was also measured by a pH meter.

The substrate that was used for inoculating and operating the reactor included domestic wastewater, buffer solution and sodium acetate. The inoculation stage was carried out in fed-batch and OCV mode. After inoculation and start-up, the system was examined in fed-batch mode at different resistances, the resulting voltage was measured, and finally, the amount of current and power was obtained through Ohm's formula. The system was investigated under different conditions of pH, temperature, time, resistance, concentration, type of feed. The operating details are explained in the main text.

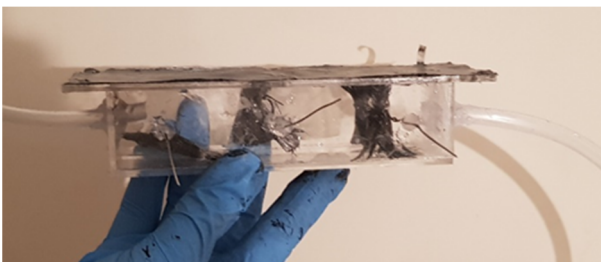


Fig. 1. Photo of the constructed microbial fuel cell

3. Results

Common tests such as open circuit voltage, power density and polarization were performed, which are detailed in the main paper. In this summary, some important results are reviewed.

3.1. Effect of substrate type on microbial fuel cell performance

In this research, three different types of feed were also evaluated. These three types included glucose, acetate, and raw wastewater. As it is clear in Fig. 2, all three create the desired and almost the same efficiency, but their difference is in the three increasing, static, and decreasing phases. Glucose passes all three phases very quickly because glucose is easily degradable and is easily oxidized by microorganisms, (Fan et al., 2007).

Acetate has a longer increasing and stationary phase than glucose, and can produce electricity from it for a longer time. Depending on wastewater specifications, these three phases may change. Since domestic wastewater contains a variety of substrates, the power increases well because it has active microorganisms. It also has a longer stationary phase because compared to glucose and acetate, it contains more degradable hard materials. The slope of its decreasing phase is also slow and the microorganisms finally oxidize the hard degradable materials, and electricity is still produced. Generally, the choice of wastewater type is very effective in the performance of microbial fuel cell (Hejazi et al., 2019).

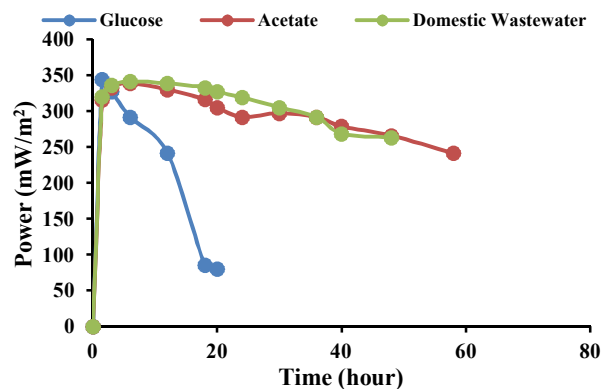


Fig. 2. The diagram of different substrates

3.2. Investigating the effect of temperature on the microbial fuel cell performance

Temperature is important in the process of anaerobic digestion and decomposition. Most anaerobic digestion occurs in mesophilic temperature ranges (35 to 40 °C). When the temperature drops below this value, the activity of microorganisms gradually decreases. In order to investigate the effect of temperature on the microbial fuel cell, at a resistance of 100 ohms, temperatures of 25, 35, and 45 °C were tested. As can be seen in Fig. 3, the increase in temperature leads to an increase in efficiency. The highest efficiency was observed at a temperature of 35 °C. Temperature changes did not have much effect on



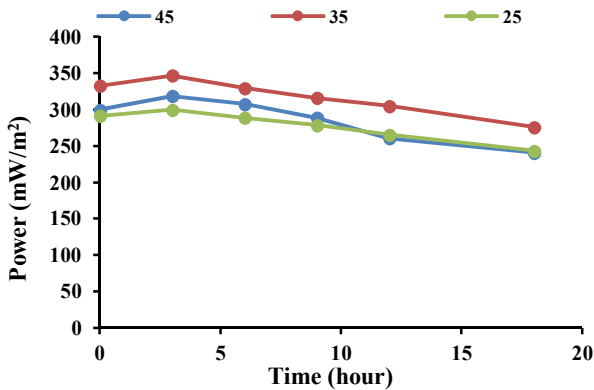


Fig. 3. Diagram of power density-time at different temperatures

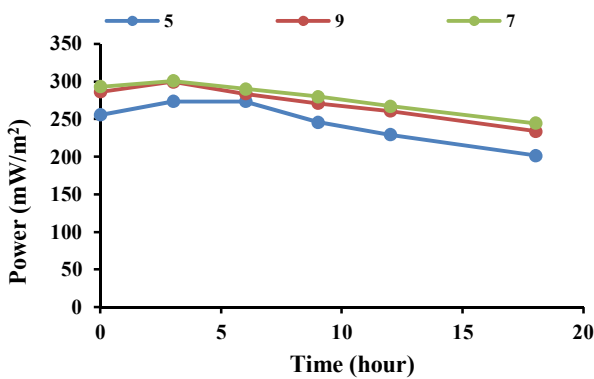


Fig. 4. Diagram of power density-time at different pH

electricity production. Therefore, the system has good resistance to changes and shocks. This resistance shows the superiority of microbial fuel cells compared to other anaerobic systems.

3.3. Investigating the effect of pH on the microbial fuel cell performance

pH was investigated because it has a great effect on the activity of microorganisms and some microorganisms

are active only in a certain pH range. Also, the production mechanism of electron and proton (H^+) is affected by this factor. The desired pH was obtained by adding 10% NaOH and 10% HCl solutions to the wastewater and measuring it with a pH meter. The experiment was carried out at different pHs of 5, 7 and 9. The experiments were carried out under constant conditions of concentration, temperature of 25 °C, and optimal resistance. As seen in Fig. 4, the increase in pH first leads to an increase and then a decrease in efficiency. The optimum pH is neutral. It can also be concluded from the figure that high pH (pH = 9) has a higher efficiency than acidic conditions (pH = 5) because electron transfer is easier.

4. Conclusion

Microbial fuel cell technology is a new technology that has many unknown aspects. It seems that the maximum production power and removal efficiency are highly dependent on the start-up and operation parameters, and considering them can help in making an optimal microbial fuel cell. In this research, a single-chamber reactor was built and investigated. The maximum voltage and power density were 500 mv and 33 mW/m², respectively. Three different feeds including acetate, glucose, and domestic sewage were also evaluated. The type of input feed has a more significant effect on the three phases of increasing, static, and decreasing than the maximum power value. Glucose goes through the rising phase in a short period of time, but it has a much shorter stationary phase than acetate. Based on the results, the increase in temperature leads to an increase in efficiency. The highest efficiency was observed at 35 °C. An increase in pH first leads to an increase in efficiency and then to its decrease, and neutral pH is optimal.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۴، صفحه: ۱۲۲-۱۰۹

تأثیر پارامترهای دما، pH و غلظت بر عملکرد پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای

سید احمد میرباقری^{۱*}، سیما ملک محمدی^۲

۱- استاد، گروه عمران- محیطزیست، دانشکده عمران،
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) mirbagheri@kntu.ac.ir

۲- گروه عمران- محیطزیست، دانشکده عمران،
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(دریافت ۱۴۰۱/۸/۶ پذیرش ۱۴۰۲/۳/۱۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

میرباقری، س.ا.، ملک محمدی، س.، ۱۴۰۲، "تأثیر پارامترهای دما، pH و غلظت بر عملکرد پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای"
مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۴)، ۱۲۲-۱۰۹. <https://doi.org/10.22093/wwj.2023.367515.3296>

چکیده

پیل سوختی میکروبی، یکی از راهکارهای نوین تولید انرژی است که در آن میکروارگانیسم‌ها با انجام فرایند اکسایش و کاهش از مواد آلی، جریان الکتریکی را به وجود می‌آورند. در این پژوهش، یک راکتور تک محفظه‌ای از جنس پلکسی گلاس به حجم ۱۵۷ میلی‌لیتر ساخته و بررسی شد. این راکتور ۳ عدد آند برسی و یک هوا کاتد داشت. بیشینه ولتاژ و چگالی توان به ترتیب ۵۰۰ mv و 33 mW/m^2 به دست آمد. کارایی حذف COD در زمان‌های ۸، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت به ترتیب ۵۳، ۶۶، ۸۵ و ۸۹ درصد به دست آمد که کارایی بالایی برای یک سیستم بی‌هوازی بود و بازده کلومیک بعد از ۲۵ و ۸۰ ساعت به ترتیب برابر ۱۳/۶۴ و ۲۰/۹ به دست آمد. هر چه غلظت COD ورودی به پیل بیشتر باشد، کارایی برق تولیدی بیشتر است. همچنین، ماکسیمم چگالی توان تولیدی برای غلظت‌های ۴۵۰۰، ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰ و 150 mg/L به ترتیب ۳۹۳، ۳۳۰، ۲۸۵، ۲۵۲، ۲۳۰ و 140 mW/m^2 به دست آمد. افزایش دما، ابتدا منجر به افزایش کارایی (توان تولیدی) و سپس منجر به کاهش آن شد. افزایش pH نیز ابتدا منجر به افزایش کارایی (توان تولیدی) و سپس کاهش آن شد و pH خنثی، بهینه بود. همچنین سه خوراک مختلف شامل استات، گلوکز و فاضلاب خانگی نیز ارزیابی شد. نوع خوراک بیشتر از آنکه روی مقدار ماکسیمم توان اثر بگذارد، روی سه فاز افزایشی، ایستا و کاهش‌ی اثرگذار بود. همچنین استات و فاضلاب خانگی بسیار شبیه به هم عمل کردند.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی میکروبی، تصفیه فاضلاب، تولید برق، حذف COD، تک محفظه‌ای

۱- مقدمه

پیل سوختی میکروبی، ابزاری است که از توانایی فعالیت کاتابولیسی میکروارگانیسم‌ها برای تولید الکتریسیته از مواد آلی استفاده می‌کند (Scott and Murano, 2007, Masih et al., 2012).

فناوری پیل سوختی میکروبی^۱، یک فناوری نوپا است که جنبه‌های ناشناخته بسیاری دارد که توسط آنها به طور هم‌زمان می‌توان با دو معضل آلودگی ناشی از فاضلاب و سوخت‌های فسیلی مقابله کرد.

¹ Microbial Fuel Cell (MFC)



الکترونیکی، انعطاف پذیری و استحکام بالا را داشته باشند و همچنین از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشند (Logan, 2008). الکترودها غالباً بر پایه کربن هستند. مواد کربنی که به عنوان الکتروده استفاده می‌شوند عبارت‌اند از: میله گرافیت، فیبر گرافیت، کربن پارچه‌ای، کربن کاغذی، کربن نمودی (Zhou et al., 2011). برای الکتروده آند، کربن برسی ساخته شده از کربن پارچه به دلیل سطح مقطع زیاد، بیشترین کارایی را دارد، به شرطی که در فاصله بهینه از کاتد قرار گیرد (Cheng et al., 2006, Hays et al., 2011). الکتروده کاتد نیز در پیل‌های تک‌محفظه‌ای باید از نوع هوا-کاتد باشد که باید از یک لایه ضد آب روی کربن پارچه یا مش استیل استفاده شود (Zhang et al., 2010, Yang et al., 2014).

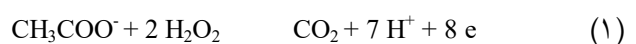
در فرایندهای بیولوژیکی، خوراک نقش مهمی در فراهم کردن منبع انرژی و کربن دارد (Du et al., 2007). غلظت سوبسترا و ترکیب شیمیایی آن، می‌تواند هم بر جمعیت میکروبی و هم بر عملکرد کلی MFC اثر گذاشته و میزان دانسیته توان و بازده کلومبیک را تحت تأثیر قرار دهد (Ray et al., 2020, Ullah and Zeshan, 2020). پیل‌های سوختی میکروبی با پساب‌های مختلف کارخانه‌های تولید نشاسته، پساب آبجوسازی و حتی شیرابه آزمایش شد و کارایی حذف قابل قبولی را داشته‌اند (Pant et al., 2010).

کارایی زیاد حذف مواد آلی و تولید انرژی الکترونیکی، باعث جذابیت پیل‌های سوختی میکروبی شده، اما صنعتی شدن آنها با مشکلاتی همراه است. پیل‌های سوختی میکروبی به دلیل محدودیت‌های عملی هنوز برای تقاضای انرژی زیاد مناسب نیستند. عملکرد پیل‌ها به پارامترهای نوع راکتور (Mukherjee et al., 2013) و پیکربندی (Du et al., 2007)، نوع فاضلاب (Kim et al., 2016) جنس و سطح الکتروده (Zhu et al., 2013, Compton et al., 2022) پتانسیل آندی (Wang et al., 2009)، گوناگونی میکروبی (Tee et al., 2017) و پارامترهای بهره‌برداری مانند دما (Puig et al., 2010)، مقاومت خارجی، pH (D'Angelo et al., 2017) زمان (Pant et al., 2018)، غلظت (Aelterman et al., 2008) و مقاومت یونی وابسته است. بهینه‌سازی و شناخت این پارامترها باعث پیشرفت تجاری این فناوری در آینده نزدیک می‌شود (Malekmohammadi and Mirbagheri, 2021). در این پژوهش، سعی بر شناخت و تأثیر پارامترهای عملیاتی

در این راکتورها، مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌های فعال الکتروشیمیایی اکسید می‌شوند و الکترون آزاد می‌شود. از الکترون تولید شده، برای تولید برق استفاده می‌شود (Min and Angelidaki, 2008). طراحی‌های مختلفی برای MFC انجام شده است، اما غالباً در دو دسته دو محفظه‌ای و تک‌محفظه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ۱-A و ۱-B) (Solanki et al., 2013).

پیل‌های سوختی میکروبی دو محفظه‌ای، شامل یک محفظه آندی و یک محفظه کاتدی است که توسط غشای تبادل پروتون از یکدیگر جدا شده‌اند (Xu et al., 2012, Parkash, 2015). خوراک به عنوان سوخت توسط میکروارگانیسم‌ها در محفظه بی‌هوازی که الکتروده آند در آن قرار دارد، اکسید می‌شود و الکترون و پروتون آزاد می‌کند (Venkata Mohan et al., 2008, Oh et al., 2010). پروتون‌ها به وسیله غشای تبادل پروتون به محفظه کاتدی انتقال می‌یابند و در واکنش با اکسیژن به آب تبدیل می‌شوند (Rabaey and Keller, 2008).

به عنوان نمونه معادلات ۱ و ۲، واکنش‌های اکسیداسیون استات در آند و احیای اکسیژن را در کاتد نشان می‌دهد. ولتاژ تولیدی با استفاده از یک ولت متر که به طور موازی با مقاومت در مدار قرار می‌گیرد، اندازه‌گیری می‌شود. تصویر پیل دو محفظه‌ای در شکل ۱-a نشان داده شده است



در سیستم تک‌محفظه‌ای مانند شکل ۲، محفظه کاتدی و غشای تبادل پروتون حذف شده، بنابراین از لحاظ قیمت و طراحی مناسب‌تر است (Liu and Logan, 2004). در این حالت، کاتد از یک سمت در تماس با آب و از سمت دیگر در مجاورت هوا قرار دارد. در تک‌محفظه‌ای، واکنش‌های آندی مانند دو محفظه‌ای انجام می‌شود و الکترون تولیدی از طریق سیم به کاتد منتقل شده و تولید جریان انجام می‌شود (Hou et al., 2011, Sun et al., 2012).

یکی از مهم‌ترین اجزای پیل‌های سوختی میکروبی، الکتروده است. الکتروده به کار گرفته شده در پیل‌های سوختی میکروبی باید ویژگی‌های تخلخل، تطبیق پذیری خوب با باکتری‌ها، هدایت



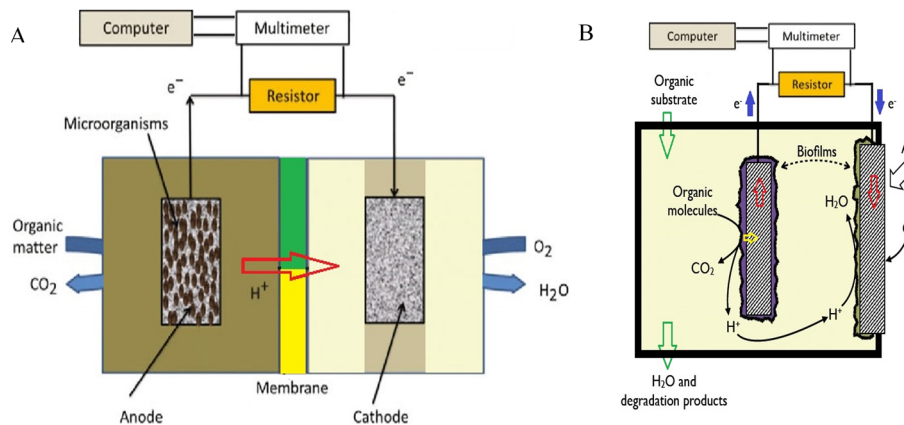


Fig. 1. A) Schematic of two-chamber microbial fuel cell and B) schematic of single-chamber microbial fuel cell
 (شکل ۱- A) تصویر پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای و (B) تصویر پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای

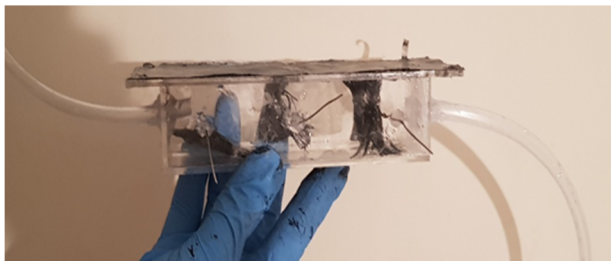


Fig. 2. Photo of the constructed microbial fuel cell
 شکل ۲- تصویر پیل سوختی میکروبی ساخته شده

کربن پارچه استفاده شد. این توپ‌های پارچه‌ای سطح مخصوص بزرگتری نسبت به آندهای برسی موجود در بازار که از کربن فایبر استفاده می‌کنند، دارد. در حقیقت ساخت این توپ‌های پارچه‌ای یکی از نوآوری‌های این پژوهش به حساب می‌آید. در این حالت سطح تماس بیشتری ایجاد می‌شود.

۲-۲- ساخت الکتروکاتد

مواد لازم برای ساخت هوا-کاتدها شامل پلی‌وینیلیدین فلوراید، دی‌متیل فرم آمید، کربن فعال پودری، کربن سیاه و مش استیل ۵۰ است. کاتدهای مورد استفاده با تکنیک وارونگی فاز با استفاده از چسب پلی‌وینیلیدین فلوراید و مخلوطی از کربن فعال و کربن سیاه بر روی مش استیل ساخته شدند (Yang et al., 2014).

برای ساخت الکتروکاتد از توری استیل ضدزنگ با مش ۵۰ استفاده می‌شود، زیرا اگر زیست لایه بر سطحی متخلخل رشد کند، مکان‌های بیشتری در اختیار خوراک قرار می‌گیرد تا به کمک زیست کاتالیست تجزیه شود. علاوه بر آن، نفوذ خوراک به درون

پیل سوختی میکروبی شد. به این منظور، راکتوری ساخته، بهره‌برداری و بررسی شد. تأثیر نوع و غلظت خوراک ورودی، pH و دما بر این راکتور سنجیده شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، یک پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای ساخته و آزمایش‌ها بر روی آن انجام شد (شکل ۲). پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای از جنس پلکسی گلاس به حجم ۱۵۷ میلی‌لیتر (۱۵×۳×۳ cm) بود. از سه عدد آند برسی به قطر ۲/۵ سانتی‌متر و طول ۳ سانتی‌متر استفاده شد که به فاصله ۲/۵ سانتی‌متری از کاتد و یکدیگر قرار گرفته بودند. هوا-کاتد مورد استفاده از جنس پلی‌وینیلیدین فلوراید و کربن فعال و سیاه بود (Malekmohammadi and Mirbagheri, 2023).

لازم به ذکر است که غلظت اکسیژن مورد نیاز شیمیایی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری با برند لایوناند تعیین شد. pH نیز توسط دستگاه pH متر اندازه‌گیری شد.

۱-۲- ساخت الکتروکاتد

مواد لازم برای ساخت آندهای برسی شامل کربن پارچه، سیم تیتانیومی و سیم مسی است. برای ساخت آندهای برسی باید از دو سیم از جنس تیتانیوم استفاده شود و این دو سیم باید در یکدیگر بافته شوند. سیم‌ها به طول ۵ سانتی‌متر بریده شدند. نخ‌های کربن پارچه را به صورت توپ یا منگوله درآورده و میان سیم‌های بافته شده قرار داده شد (مطابق شکل ۳- a). برای این راکتور از ۳ توپ



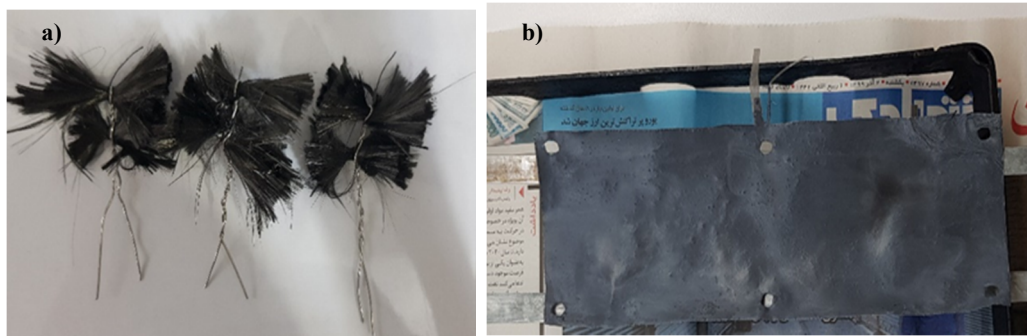


Fig. 3. a) Photo of the constructed brush anodes, b) photo of the constructed air-cathode

شکل ۳- a) تصویر آندهای بررسی و b) تصویر هوا-کاتد

شد. ولتاژ مدارباز به آن معنی است که هیچ مقاومتی سر راه الکترودها قرار ندارد و مقدار ولتاژ در ماکسیمم مقدار خود خواهد بود. حالت نیمه پیوسته نیز حالتی بین جریان پیوسته و ناپیوسته می باشد که در دستگاه های MFC بسیار رایج است. در حالت نیمه پیوسته، وقتی اختلاف پتانسیل آند و کاتد کاهش محسوسی یافت، حدود یک سوم از خوراک داخل محفظه با خوراک تازه تعویض شد. عملیات راه اندازی تا زمانی ادامه پیدا می کند که ماکسیمم ولتاژ مدارباز ثابت شود و با تعویض خوراک، تغییری در آن انجام نشود. با ثابت شدن ولتاژ ماکسیمم، راکتور آماده بهره برداری خواهد بود که در ادامه با کمک نمودار، بیشتر شرح داده خواهد شد.

۲-۴- بهره برداری

بعد از تلقیح و راه اندازی، راکتور به ثبات رسیده و میکروارگانیسم ها و بیوفیلم های لازم برای فعالیت آماده اند، زیرا با افزودن خوراک تازه، ولتاژ ماکسیمم تغییر نمی کند و بیوفیلم به اندازه کافی ایجاد شده است. در این مرحله از همان فاضلاب تصفیه خانه محمودآباد استفاده شد و غلظت مطلوب با استفاده از سدیم استات یا گلوکوز به دست آمد. سیستم به صورت نیمه پیوسته، بررسی شد و با قرار دادن مقاومت های مختلف بر سر راه الکترودها، ولتاژ حاصله اندازه گیری شد و در نهایت از طریق فرمول اهم، مقدار جریان و توان به دست آمد. سیستم تحت شرایط مختلف pH، دما، زمان، مقاومت، غلظت، نوع خوراک بررسی شدند. لازم به ذکر است که این سیستم زمان ماند سلولی ندارد و زمان ماند هیدرولیکی نیز متغیر است.

زیست لایه نیز تا حد زیادی بالا می رود. مش استیل ۵۰، در ابعاد ۱۴×۳ بریده شد. برای افزایش هدایت الکتریکی، پوشش دهی روی آن انجام شد که به شرح زیر است.

ابتدا محلول ۱۰ درصد حجمی پلی وینیلدین فلوراید تهیه شد. برای این منظور، گرانول های پلی وینیلدین فلوراید در حلال دی متیل فرم آمید، ریخته و به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس هم زده شد تا کاملاً حل شود. پس از ساخت محلول، کربن فعال و کربن سیاه به محلول اضافه شد. نسبت محلول، کربن سیاه و کربن فعال به ترتیب ۱۰، ۳ و ۳۰ است. مخلوط ساخته شده، به آرامی روی مش استیل ۵۰ ریخته و به طور یکنواخت در تمام نقاط پخش شد. سپس مش استیل، برای تغییر فاز داخل آب مقطر به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شد. پس از گذشت ۱۵ دقیقه، کاتد در مجاورت هوا به مدت ۸ ساعت قرار داده شد تا خشک شود. در نهایت کاتد آماده شده خاصیت ضد آب بودن داشت و قابل استفاده در پیل بود (شکل ۳- b).

۲-۳- تلقیح و راه اندازی راکتور

خوراکی که برای تلقیح و راه اندازی راکتور استفاده شد شامل فاضلاب خانگی پس از مرحله دانه گیری، محلول بافبری و سدیم استات بود. فاضلاب مذکور از تصفیه خانه محمودآباد تهیه شد که غلظت COD آن ۶۵۵ mg/L بود. به فاضلاب مذکور محلول بافبری برای ثابت ماندن pH اضافه شد. همچنین از سدیم استات (CH₃COOH) برای افزایش غلظت COD تا مقدار ۱۰۰۰ mg/L استفاده شد. عملیات راه اندازی در حالت نیمه پیوسته و مدارباز انجام



نمودارهای پلاریزاسیون (شکل ۵) و چگالی توان (شکل ۶)، مقدار جریان در مقاومت‌های مختلف (از زیاد تا کم) محاسبه می‌شود. نقطه شروع نمودار حالت ولتاژ مدارباز است که ماکسیمم ولتاژ را دارد و توان و جریان هم در این حالت برابر صفر هستند. با قرار دادن مقاومت، ولتاژ کاهش می‌یابد و توان و جریان هم ایجاد می‌شود. در این پژوهش از مقاومت زیاد شروع کرده و رفته رفته مقاومت کاهش داده شد. کاهش مقاومت منجر به کاهش ولتاژ و افزایش جریان تولیدی می‌شود. از آنجا که توان هم با مقاومت و هم با جریان رابطه مستقیم دارد، توان تولیدی ابتدا افزایش می‌یابد و در مقاومت‌های کم به نقطه اوج خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. کلیه مطالب بیان شده در شکل‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده است. همان طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، نمودار به نقطه اوج خود یعنی توان

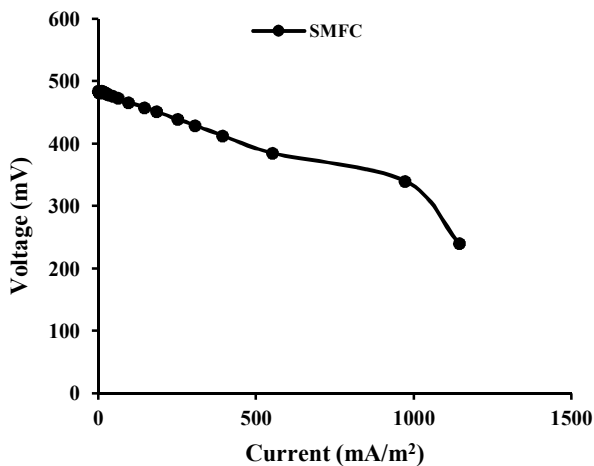


Fig. 5. Diagram of polarization
شکل ۵- نمودار پلاریزاسیون راکتور

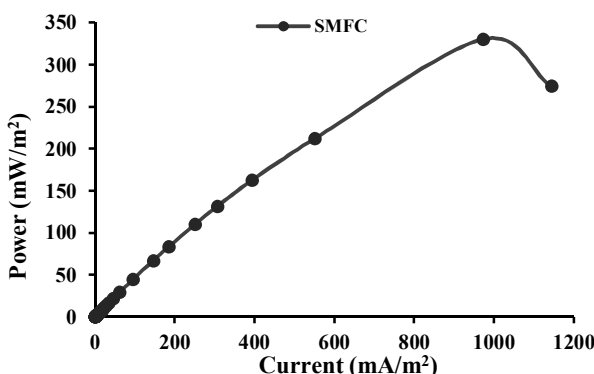


Fig. 6. Diagram of power density
شکل ۶- نمودار چگالی توان راکتور

۳- نتایج

۳-۱- اندازه‌گیری ولتاژ مدارباز

شکل ۴، ولتاژ مدارباز را در مدت ۴۰۰ ساعت نشان می‌دهد که به طور مرتب تزریق خوراک تازه به راکتور انجام شد، زیرا به صورت نیمه پیوسته بهره‌برداری شد. در ۱۰۰ ساعت اول، اختلاف پتانسیل محسوسی بین الکترودها مشاهده نشد، زیرا هنوز میکروارگانیزم‌ها فعال نشده‌اند و بیوفیلمی اطراف آن‌د تشکیل نشده بود. زمان تزریق خوراک تازه، با فلش در شکل مشخص شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، با هر بار تزریق خوراک جهش محسوسی در مقدار ولتاژ مشاهده می‌شود. افزایش ولتاژ به افزایش ضخامت زیست لایه فعال بر سطح الکترودها نسبت داده می‌شود. اما با گذشت زمان به دلیل مصرف فاضلاب توسط میکروارگانیزم‌ها، افت محسوسی در ولتاژ تولیدی دیده می‌شود که این افت نشان‌دهنده زمان مناسب تزریق است. عملیات راه‌اندازی تا زمانی ادامه می‌یابد که با تزریق خوراک تازه، افزایش ولتاژ مشاهده نشود. این امر بدان معنا است که زیست لایه به ضخامت مطلوبی رسیده و زیست لایه فعال تمام سطح الکترودها را اشغال کرده است. ماکسیمم ولتاژ مدارباز ۵۰۰ mV بود که در شکل ۴ مشخص است.

۳-۲- منحنی پلاریزاسیون و چگالی توان

از آنجا که توان با مقاومت رابطه مستقیم دارد، کاهش مقاومت الزاماً باعث افزایش توان نمی‌شود و باید توان بهینه را یافت که در این بخش نمودار چگالی توان-جریان بررسی می‌شود. برای رسم

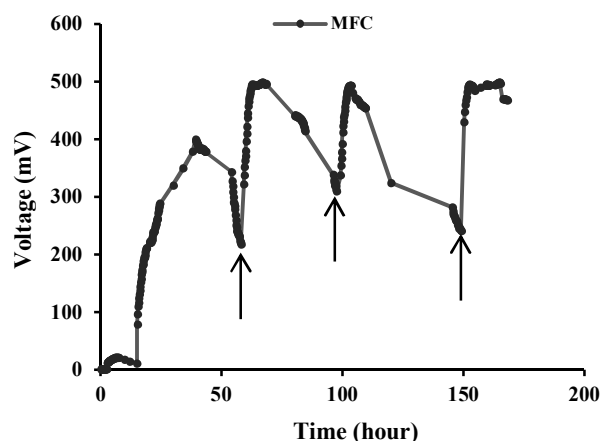


Fig. 4. Diagram of OCV
شکل ۴- نمودار ولتاژ مدارباز



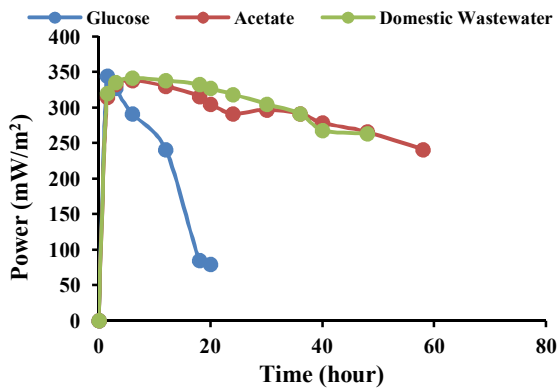


Fig. 7. Diagram of different substrate
شکل ۷- نمودار چگالی توان با خوراک‌های مختلف

۳-۴- تأثیر غلظت COD بر عملکرد پیل سوختی میکروبی

غلظت خوراک ورودی، یکی از پارامترهای مهم در مورد پیل‌های سوختی میکروبی است، به دلیل اینکه ارتباط مستقیم بر توان تولیدی دارد و هم در انتخاب این سیستم برای تصفیه فاضلاب بسیار حائز اهمیت خواهد بود (Malekmohammadi and Mirbagheri, 2022).

در این پژوهش، COD در بازه گسترده‌ای ارزیابی شد که شامل غلظت‌های ۵، ۱۵۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۵۰۰ mg/L بود. برای بررسی دقیق، راکتور هم در حالت مدار باز و هم در مقاومت‌های گوناگون بررسی شد. شکل ۸، نمودار چگالی توان را برای غلظت‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق روند معمول، کاهش مقاومت تا $100\ \Omega$ منجر به افزایش توان می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش غلظت COD منجر به افزایش توان و

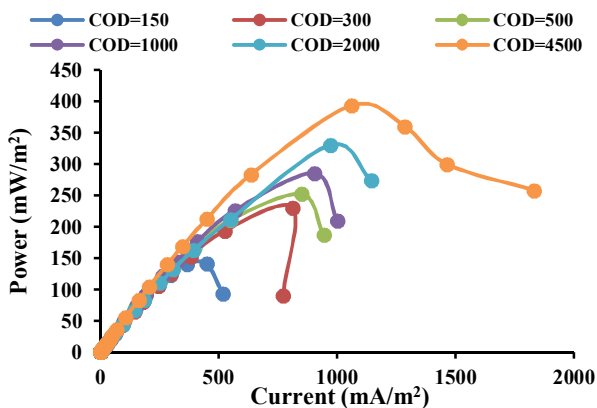


Fig. 8. Diagram of different COD concentration
شکل ۸- نمودار چگالی در غلظت‌های مختلف

۴۸۴ میلی‌وات بر مترمربع رسید. این نقطه دارای مقاومت ۱۰۰ اهم بود. بنابراین در این مقاومت، بیشترین توان رخ داد. همچنین مقاومت بهینه که در آن مقاومت بیرونی و درونی باهم برابر بودند و چگالی توان به ماکسیمم مقدار خود رسید، ۱۰۰ اهم به دست آمد.

۳-۳- تأثیر نوع خوراک بر عملکرد پیل سوختی میکروبی

در این پژوهش، سه نوع مختلف از خوراک نیز ارزیابی شد. این سه نوع شامل گلوکز، استات و فاضلاب خام بود. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، هر سه کارایی مطلوب و تقریباً یکسانی را ایجاد می‌کنند، اما تفاوتشان در سه فاز افزایشی، ایستا و کاهششی است. گلوکز هر سه فاز را بسیار سریع طی می‌کند. فاز افزایشی و کاهششی سریع و نیز فاز ایستایی کوتاهی را هم دارد. دلیل این امر، راحت تجزیه پذیر بودن گلوکز است و به سادگی توسط میکروارگانیسم‌ها اکسید می‌شود (Fan et al., 2007).

استات مسیر را معقول‌تر طی می‌کند و به فاضلاب واقعی نزدیک‌تر است. استات فاز افزایشی و ایستایی طولانی‌تری نسبت به گلوکز دارد و مدت‌زمان بیشتری می‌توان از آن برق گرفت. فاضلاب نیز با توجه به مشخصاتی که دارد، این سه فازش ممکن است تغییراتی بکند. از آنجا که فاضلاب خانگی دارای مجموعه‌ای از خوراک است، به دلیل داشتن میکروارگانیسم‌های فعال، فاز افزایشی سریعی دارد.

همچنین فاز ایستایی طولانی‌تری دارد، زیرا نسبت به گلوکز و استات، شامل مواد سخت تجزیه پذیر بیشتری نیز هستند. شیب فاز کاهششی آن نیز کند است و میکروارگانیسم‌ها سراغ مواد سخت تجزیه پذیر می‌روند و همچنان برق تولید می‌شود. فاضلاب علاوه بر داشتن مواد کربنی لازم یا ماکرونوترینت‌ها، دارای مواد مغذی میکرونوترینت‌ها است که در درازمدت تأثیر بهتری روی رشد میکروارگانیسم‌ها خواهد داشت. به دلیل وجود همین تنوع ماده مغذی یا نوترینت است که در مرحله راه‌اندازی از فاضلاب استفاده می‌شود. به طور کلی، انتخاب نوع فاضلاب در عملکرد پیل سوختی میکروبی بسیار مؤثر است. بهتر است از فاضلاب‌های سخت تجزیه پذیر استفاده نشود تا میکروارگانیسم‌ها زودتر و بیشتر عملیات اکسایش و تولید الکترون را انجام دهند (Hejazi et al., 2019).

2019)



(+H) تحت تأثیر این عامل قرار دارد. pH موردنظر با اضافه کردن محلول‌های 10% NaOH و 10% HCl به فاضلاب و اندازه‌گیری آن با pH متر به دست آمد. آزمایش در pHهای مختلف ۵، ۷ و ۹ انجام شد. آزمایش‌ها در شرایط ثابت غلظت ۱۰۰۰ mg/L، دما ۲۵°C و مقاومت بهینه انجام شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، افزایش pH ابتدا منجر به افزایش کارایی و سپس کاهش آن شد و pH بهینه، خنثی به دست آمد. همچنین از شکل می‌توان نتیجه گرفت که pHهای بالا (pH=۹) نسبت به شرایط اسیدی (pH=۵) کارایی بیشتری دارند، چون انتقال الکترون راحت‌تر انجام می‌شود.

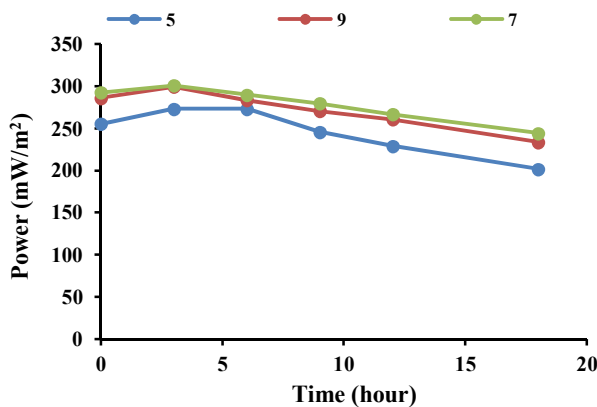


Fig. 10. Diagram of power density-time at different pH

شکل ۱۰- نمودار چگالی توان- زمان در pHهای مختلف

۳-۷- بررسی کارایی حذف COD پیل سوختی میکروبی

مقدار COD در حالت نیمه پیوسته در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد و کارایی حذف آن محاسبه شد که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

افزایش زمان، منجر به زیاد شدن کارایی حذف در سیستم می‌شود. کارایی حذف COD در زمان‌های ۸، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت به ترتیب ۵۳، ۶۶، ۸۵ و ۸۹ درصد به دست آمد که کارایی بالایی برای یک سیستم بی‌هوازی بود. به‌طور کلی پیل سوختی میکروبی عملکرد مناسبی در تصفیه فاضلاب دارد و فقط باید حجم آن را به مقیاس صنعتی رساند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کارایی حذف پیل با افزایش زمان زیاد می‌شود و بعد از گذشت ۱۲ ساعت به کارایی حذف معقول و قابل رقابت با سایر سیستم‌ها می‌رسد.

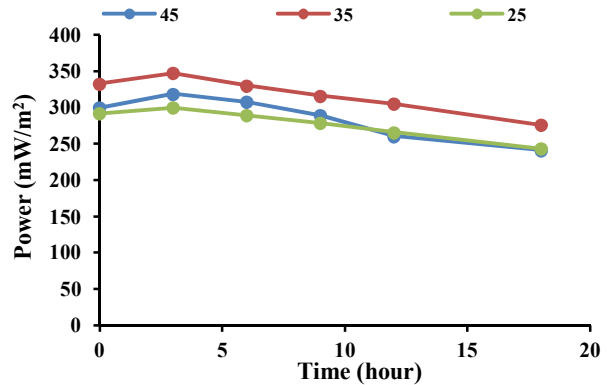


Fig. 9. Diagram of power density-time at different temperatures

شکل ۹- نمودار چگالی توان- زمان در دماهای مختلف

جریان در هر مقاومت می‌شود، اما تأثیر چندانی روی مقاومت درونی یا مقاومت بهینه ندارد. توان ماکسیمم برای غلظت‌های ۴۵۰۰، ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰ به ترتیب ۳۳۰، ۳۹۳، ۲۸۵، ۲۵۲، ۲۳۰ و ۱۴۰ mW/m² به دست آمد.

۳-۵- بررسی تأثیر دما بر عملکرد پیل سوختی میکروبی

دما به‌عنوان یک پارامتر مهم در فرایند تجزیه و هضم بی‌هوازی مطرح است. اغلب فرایندهای تجزیه میکروبی در محدوده‌های دمایی مزوفیلیک (۳۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس) کار می‌کنند. وقتی دما از این مقدار کمتر بیاید، فعالیت میکروارگانیسم‌ها به تدریج کم می‌شود. برای بررسی اثر دما بر پیل سوختی میکروبی، در غلظت ۱۰۰۰ mg/L و مقاومت ۱۰۰ اهم، دماهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سلسیوس، آزمایش شدند. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، زیاد شدن دما منجر به افزایش کارایی می‌شود. در دمای ۳۵ درجه سلسیوس بیشترین کارایی مشاهده شد، اما کاهش و افزایش دما تأثیر چندانی بر کارایی برق تولیدی نداشت. به‌طور کلی، می‌توان گفت که سیستم در برابر تغییرات، مقاومت خوبی دارد. این مقاومت برتری پیل‌های سوختی میکروبی را نسبت به سایر سیستم‌های بی‌هوازی نشان می‌دهد.

۳-۶- بررسی تأثیر pH بر عملکرد پیل سوختی میکروبی

بررسی pH به این دلیل بود که روی فعالیت میکروارگانیسم‌ها اثر زیادی دارد و برخی از میکروارگانیسم‌ها فقط در محدوده pH خاصی فعالیت دارند. همچنین مکانیسم تولید الکترون و پروتون



شرایط مناسب تغذیه و رشد میکروارگانیسم‌ها است.

۴- نتیجه‌گیری

تکنولوژی پیل سوختی میکروبی یک فناوری نوپا است که جنبه‌های ناشناخته بسیاری دارد. به نظر می‌رسد که بیشینه توان تولیدی و کارایی حذف به پارامترهای راه‌اندازی و بهره‌برداری بسیار وابسته است و در نظر گرفتن آنها می‌تواند در ساخت پیل سوختی میکروبی بهینه کمک کند. در این پژوهش، یک راکتور تک‌محفظه‌ای ساخته و بررسی شد. بیشینه ولتاژ و چگالی توان به ترتیب ۵۰۰ mV و 33 mW/m^2 به دست آمد. کارایی حذف COD در زمان‌های ۸، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت به ترتیب ۵۳، ۶۶، ۸۵ و ۸۹ درصد به دست آمد که کارایی زیادی برای یک سیستم بی‌هوازی بود. بر اساس نتایج، هر چه غلظت COD ورودی به پیل بیشتر باشد، کارایی برق تولیدی بیشتر می‌شود.

همچنین، ماکسیمم چگالی توان تولیدی برای غلظت‌های ۴۵۰۰، ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰ به ترتیب ۳۹۳، ۳۳۰، ۲۸۵، ۲۵۲، ۲۳۰ و 140 mW/m^2 بود. بازده کلومیکیک بعد از ۲۵ و ۸۰ ساعت به ترتیب برابر $13/64$ و $20/9$ به دست آمد. همچنین سه خوراک مختلف شامل استات، گلوکز و فاضلاب خانگی نیز ارزیابی شد. نوع خوراک ورودی بیشتر از آنکه روی مقدار ماکسیمم توان اثر بگذارد، روی سه فاز افزایشی، ایستا و کاهش‌ی اثرگذار بود. گلوکز در مدت‌زمان کوتاهی فاز افزایشی را می‌پیماید، ولی دارای فاز ایستایی بسیار کوتاه‌تری نسبت به استات بود. همچنین استات و فاضلاب خانگی بسیار شبیه به هم عمل کردند. بر اساس نتایج، افزایش دما منجر به زیاد شدن کارایی (توان تولیدی) شد. در دمای ۳۵ درجه سلسیوس بیشترین کارایی مشاهده شد. افزایش pH ابتدا منجر به افزایش کارایی (توان تولیدی) و سپس کاهش آن شد و pH خنثی، بهینه بود.

۵- قدردانی

نویسندگان این پژوهش، از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی برای تهیه و تدارک امکانات و تجهیزات آزمایشگاهی تشکر می‌کنند.

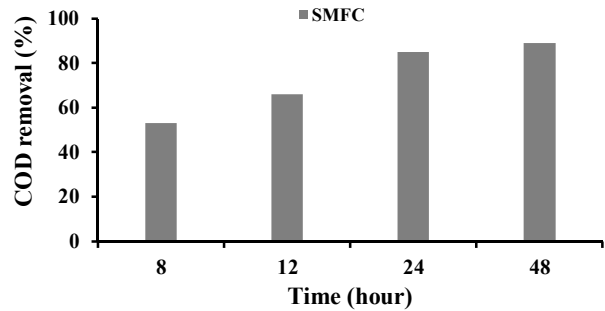


Fig. 11. COD removal efficiency at different times

شکل ۱۱- کارایی حذف COD در زمان‌های مختلف

۳-۸- بازده کلومیکیک

بازده کلومیکیک، نسبت الکترون‌های بازیابی شده به صورت جریان الکتریکی از اکسایش خوراک به کل الکترون‌های قابل‌دستیابی را بیان می‌کند (Fan et al., 2007). هرچه بازدهی کلومیکیک بیشتر باشد، نشان‌دهنده این است که میکروارگانیسم‌های موجود در پیل سوختی میکروبی در شرایط ایده‌آلی قرار داشته‌اند و شرایط بهینه و تغذیه مناسب برای آنها فراهم شده است. با انتگرال‌گیری عددی از شدت جریان الکتریکی برحسب زمان در محدوده موردنظر و محاسبه میزان کاهش COD، می‌توان بازدهی کلومیکیک را محاسبه کرد. سطح زیر این نمودارها با استفاده از نرم‌افزار اورجین محاسبه شد. در این بخش، بازده کلومیکیک برای زمان‌های ۲۵ و ۸۰ ساعت محاسبه شد تا تأثیر زمان بر آنها سنجیده شود (معادلات ۳ و ۴).

(۳)

$$C_E = \left(\frac{8 \int I dt}{F V_{An} \Delta COD} \right) = \left[\frac{8 \times 61 \times 3600}{96485 \times 0.157 \times 0.85 \times 1000} \right] \times 100 = 13.64 \% \quad (\text{برای } 25 \text{ ساعت})$$

(۴)

$$C_E = \left(\frac{8 \int I dt}{F V_{An} \Delta COD} \right) = \left[\frac{8 \times 107 \times 3600}{96485 \times 0.157 \times 0.97 \times 1000} \right] \times 100 = 20.9 \% \quad (\text{برای } 80 \text{ ساعت})$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش زمان منجر به افزایش بازده می‌شود، چون رشد میکروارگانیسم‌ها و تجزیه مواد آلی به صورت کامل انجام می‌شود. همچنین ۲۰ درصد بازده کلومیکیک نسبت به سایر پژوهش‌های مشابه مناسب است و نشان‌دهنده

References

Aelterman, P., Versichele, M., Marzorati, M., Boon, N. & Verstraete, W. 2008. Loading rate and external resistance control the electricity generation of microbial fuel cells with different three-dimensional anodes.



- Bioresource Technology*, 99(18), 8895-8902. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.061>.
- Cheng, S., Liu, H. & Logan, B. E. 2006. Increased power generation in a continuous flow mfc with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental Science and Technology*, 40(7), 2426-2432. <https://doi.org/10.1021/es051652w>.
- Compton, P., Dehkordi, N. R., Knapp, M., Fernandez, L. A., Alshwabkeh, A. N. & Larese-Casanova, P. 2022. Heterogeneous fenton-like catalysis of electrogenerated H₂O₂ for dissolved RDX removal. *Frontiers in Chemical Engineering*, 4, 864816. <https://doi.org/10.3389/fceng.2022.864816>.
- D'Angelo, A., Mateo, S., Scialdone, O., Cañizares, P., Fernandez-Morales, F. J. & Rodrigo, M. A. 2017. Optimization of the performance of an air-cathode MFC by changing solid retention time. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 92(7), 1746-1755. <https://doi.org/10.1002/jctb.5175>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>.
- Fan, Y., Hu, H. & Liu, H. 2007. Enhanced coulombic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration. *Journal of Power Sources*, 171(2), 348-354. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.06.220>.
- Hays, S., Zhang, F. & Logan, B. E. 2011. Performance of two different types of anodes in membrane electrode assembly microbial fuel cells for power generation from domestic wastewater. *Journal of Power Sources*, 196(20), 8293-8300. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.06.027>.
- Hejazi, F., Ghoreyshi, A. A. & Rahimnejad, M. 2019. Simultaneous phenol removal and electricity generation using a hybrid granular activated carbon adsorption-biodegradation process in a batch recycled tubular microbial fuel cell. *Biomass and Bioenergy*, 129, 105336. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105336>.
- Hou, B., Sun, J. & Hu, Y. 2011. Effect of enrichment procedures on performance and microbial diversity of microbial fuel cell for Congo red decolorization and electricity generation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 90(4), 1563-1572. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3226-2>.
- Kim, K. Y., Yang, W., Evans, P. J. & Logan, B. E. 2016. Continuous treatment of high strength wastewaters using air-cathode microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 221, 96-101. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.031>.
- Liu, H. & Logan, B. E. 2004. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environmental Science and Technology*, 38(14), 4040-4046. <https://doi.org/10.1021/es0499344>.
- Logan, B. E. 2008. *Microbial Fuel Cells*. John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, USA. <https://doi.org/10.1002/9780470258590>.
- Malekmohammadi, S. & Mirbagheri, S. A. 2021. A review of the operating parameters on the microbial fuel cell for wastewater treatment and electricity generation. *Water Science and Technology*, 84(6), 1309-1323. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.333>.
- Malekmohammadi, S. & Mirbagheri, S. A. 2022. Optimization of an artificial neural network topology using response surface methodology for microbial fuel cell power prediction. *Biotechnology Progress*, 38(4), e3258. <https://doi.org/10.1002/btpr.3258>.
- Malekmohammadi, S. & Mirbagheri, S. A. 2023. Scale-up single chamber of microbial fuel cell using agitator and sponge biocarriers. *Environmental Technology*, 2197126, 1-9. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2197126>.



- Masih, S. A., Devasahayam, M. & Zimik, M. 2012. Optimization of power generation in a dual chambered aerated membrane microbial fuel cell with *E. coli* as biocatalyst. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 71(9), 621-626.
- Min, B. & Angelidaki, I. 2008. Innovative microbial fuel cell for electricity production from anaerobic reactors. *Journal of Power Sources*, 180(1), 641-647. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.076>.
- Mukherjee, S., Su, S., Panmanee, W., Irvin, R. T., Hassett, D. J. & Choi, S. 2013. A microliter-scale microbial fuel cell array for bacterial electrogenic screening. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 201, 532-537. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.025>.
- Oh, S. T., Kim, J. R., Premier, G. C., Lee, T. H., Kim, C. & Sloan, W. T. 2010. Sustainable wastewater treatment: how might microbial fuel cells contribute. *Biotechnology Advances*, 28(6), 871-881. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.07.008>.
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L. & Vanbroekhoven, K. 2010. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533-1543. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>.
- Pant, D., Van Bogaert, G., Alvarez-Gallego, Y., Diels, L. & Vanbroekhoven, K. 2018. Evaluation of bioelectrogenic potential of four industrial effluents as substrate for low cost microbial fuel cells operation. *Environmental Engineering and Management Journal*, 15(8), 1897-1904. <https://doi.org/10.30638/eemj.2016.203>.
- Parkash, A. 2015. Design and fabrication of a double chamber microbial fuel cell for voltage generation from biowaste. *Journal of Bioprocessing and Biotechniques*, 5(8), 1. <https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000246>.
- Puig, S., Serra, M., Coma, M., Cabré, M., Balaguer, M. D. & Colprim, J. 2010. Effect of pH on nutrient dynamics and electricity production using microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 101(24), 9594-9599. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.082>.
- Rabaey, K. & Keller, J. 2008. Microbial fuel cell cathodes: from bottleneck to prime opportunity? *Water Science and Technology*, 57(5), 655-659. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.103>.
- Ray, M., Kumar, V. & Banerjee, C. 2020. Strategies for optimization of microbial community structure in microbial fuel cell for advanced industrial wastewater treatment. *Recent Developments in Bioenergy Research*, 299-310. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819597-0.00015-5>.
- Scott, K. & Murano, C. 2007. Microbial fuel cells utilising carbohydrates. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 82(1), 92-100. <https://doi.org/10.1002/jctb.1641>.
- Solanki, K., Subramanian, S. & Basu, S. 2013. Microbial fuel cells for azo dye treatment with electricity generation: a review. *Bioresource Technology*, 131, 564-571. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.063>.
- Sun, J., Li, Y., Hu, Y., Hou, B., Xu, Q., Zhang, Y., et al. 2012. Enlargement of anode for enhanced simultaneous azo dye decolorization and power output in air-cathode microbial fuel cell. *Biotechnology Letters*, 34(11), 2023-2029. <https://doi.org/10.1007/s10529-012-1002-8>.
- Tee, P. F., Abdullah, M. O., Tan, I. A., Amin, M. A., Nolasco-Hipolito, C. & Bujang, K. 2017. Effects of temperature on wastewater treatment in an affordable microbial fuel cell-adsorption hybrid system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 178-188. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.040>.
- Ullah, Z. & Zeshan, S. 2020. Effect of substrate type and concentration on the performance of a double chamber microbial fuel cell. *Water Science and Technology*, 81(7), 1336-1344. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.387>.
- Venkata Mohan, S., Saravanan, R., Raghavulu, S. V., Mohanakrishna, G. & Sarma, P. N. 2008. Bioelectricity production from wastewater treatment in dual chambered microbial fuel cell (MFC) using selectively



- enriched mixed microflora: effect of catholyte. *Bioresource Technology*, 99(3), 596-603. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.12.026>.
- Wang, X., Feng, Y., Ren, N., Wang, H., Lee, H., Li, N. et al. 2009. Accelerated start-up of two-chambered microbial fuel cells: effect of anodic positive poised potential. *Electrochimica Acta*, 54(3), 1109-1114. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.07.085>.
- Xu, J., Sheng, G. P., Luo, H. W., Li, W. W., Wang, L. F. & Yu, H. Q. 2012. Fouling of proton exchange membrane (PEM) deteriorates the performance of microbial fuel cell. *Water Research*, 46(6), 1817-1824. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.060>.
- Yang, W., He, W., Zhang, F., Hickner, M. A. & Logan, B. E. 2014. Single-step fabrication using a phase inversion method of poly (vinylidene fluoride) (PVDF) activated carbon air cathodes for microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology Letters*, 1(10), 416-420. <https://doi.org/10.1021/ez5002769>.
- Zhang, F., Saito, T., Cheng, S., Hickner, M. A. & Logan, B. E. 2010. Microbial fuel cell cathodes with poly (dimethylsiloxane) diffusion layers constructed around stainless steel mesh current collectors. *Environmental Science and Technology*, 44(4), 1490-1495.
- Zhou, M., Chi, M., Luo, J., He, H. & Jin, T. 2011. An overview of electrode materials in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196(10), 4427-4435. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.012>.
- Zhu, X., Zhang, L., Li, J., Liao, Q. & Ye, D. D. 2013. Performance of liter-scale microbial fuel cells with electrode arrays: effect of array pattern. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(35), 15716-15722. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.06.052>.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

