



Design and Construction of a Microbial Fuel Cell for Electricity Generation from Municipal Wastewater Using Industrial Vinasse as Substrate

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Kiaeenajad A.¹ MSc,
Moqtaderi H.*¹ PhD,
Mahmoodi N.M.² PhD,
Maerufi S.M.² PhD

How to cite this article

Kiaeenajad A, Moqtaderi H, Mahmoodi N.M, Maerufi S.M. Design and Construction of a Microbial Fuel Cell for Electricity Generation from Municipal Wastewater Using Industrial Vinasse as Substrate. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(9):2403-2412.

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran

²Environmental Research Center, Color Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Engineering Faculty, Alzahra University, Deh-Vanak Street, Tehran, Iran. Postal Code: 1993893973.
Phone: +98 (21) 85692161
Fax: -
h.moqtaderi@alzahra.ac.ir

Article History

Received: December 6, 2019

Accepted: July 26, 2020

ePublished: September 20, 2020

ABSTRACT

One of the technologies considered for bioenergy production is microbial fuel cell. The microbial fuel cells are used as a novel method for wastewater treatment and power generation simultaneously. In this method, microorganisms appear as catalysts to convert chemical energy stored in organic matter into electrical energy under anaerobic conditions. In this study, a microbial fuel cell was designed and constructed using microorganisms existing in municipal wastewater to generate electricity. The structure of the current microbial fuel cell was single-chamber; into which added the wastewater. This chamber was adjacent to the anode and fed with anaerobic sludge, existing in municipal wastewater. In the constructed fuel cell, an air-cathode was used which was separated from the anode chamber by a proton exchange membrane. In order to measure voltage at different currents, a variable resistance and a digital multimeter with data storage capability were used. In this study, the developed potential differences due to changes in the type of microorganism, substrate, and the value of external resistance were investigated. Among the two types of substrates molasses and industrial vinasse investigated, industrial vinasse produced more voltage. The maximum current density of 312.7843mA/m² was measured at 200 Ohm resistance and maximum power density at 600 Ohm resistance and current density of 201.41mA/m² was measured 85.6010mW/m².

Keywords Microbial Fuel Cell; Micro-Organism; Anaerobic Sludge Sewage; Molasses; Vinasse

CITATION LINKS

[1] Electricity generation by shewanella sp. HN-41 in microbial ... [2] A multi-perspective review of microbial fuel-cells for wastewater treatment: Bio-electro-chemical ... [3] Microbial fuel cells for energy recovery ... [4] Performance evaluation of activated carbon-based electrodes with novel power management system for long-term benthic ... [5] Electricity generation through degradation of organic matters in medicinal herbs wastewater using bio-electro ... [6] Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity ... [7] Wastewater treatment using dual-chamber microbial fuel cell with ... [8] Microbial fuel cell: a strategy for bioremediation and ... [9] Performance analysis of a microbial fuel cell using different substrate ... [10] A review on electrical behavior of different substrates, electrodes and membranes ... [11] Microbial fuel ... [12] An experimental study of microbial fuel cells for electricity generating: Performance characterization ... [13] Design of microbial fuel cells for practical application: A review and analysis ... [14] Enhanced bio-decolorization of acid orange 7 and electricity generation in microbial fuel cells with superabsorbent-containing membrane ... [15] Driving force behind electrochemical performance of microbial fuel cells fed with ... [16] A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable ... [17] A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable ... [18] The effect of anode geometry on power output ... [19] Complete degradation of the azo dye Acid Orange-7 and bioelectricity generation in an integrated microbial fuel cell, aerobic two-stage bioreactor system in continuous flow mode ... [20] Oil wastewater treatment and electricity generation by ... [21] Know-how development, design, and construction of local 100-W polymere membrane ... [22] PEM fuel cell ... [23] Performance of platinum black and supported platinum catalysts in a direct methanol ... [24] Adaptation of microbial community of the anode biofilm in microbial fuel ... [25] Effect of temperature on electricity generation of single-chamber microbial fuel cells with ...

طراحی و ساخت یک پیل سوختی میکروبی برای تولید برق از پساب شهری با استفاده از ویناس صنعتی به عنوان پیش ماده

عطیه کیانی نژاد MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران

حامد مقتدری PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران

نیازمحمد محمودی PhD

پژوهشکده محیط زیست، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران

سیدمحمد معروفی MSc

پژوهشکده محیط زیست، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران

چکیده

یکی از فناوری‌های مورد توجه برای تولید زیستی انرژی، پیل سوختی میکروبی است. پیل سوختی میکروبی به عنوان روشی جدید برای تصفیه پساب و تولید برق همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش میکروارگانیسم‌ها در نقش کاتالیست ظاهر شده تا انرژی شیمیایی ذخیره شده در مواد آلی را در شرایط بی‌هوازی به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. در این پژوهش یک پیل سوختی میکروبی طراحی و ساخته شد که در آن میکروارگانیسم‌های موجود در پساب شهری برای تولید برق استفاده شد. در پیل سوختی میکروبی ساخته شده از ساختاری تک‌محفظه استفاده شد که در مجاورت آن قرار دارد که با لجن بی‌هوازی موجود در پساب شهری تغذیه شد. در پیل سوختی حاضر، کاتد هوایی مورد استفاده قرار گرفت که با غشای انتقال پروتون از محفظه آن جدا شد. به منظور اندازه‌گیری ولتاژ در شدت جریان‌های مختلف، از مقاومت خارجی متغیر و مولتی‌متر دیجیتال با قابلیت ذخیره داده‌ها استفاده شد. در این مطالعه، مقدار ولتاژ تولیدی در اثر تغییرات نوع مخلوط میکروارگانیسم، نوع پیش‌ماده و مقاومت بررسی شد. از بین دو نوع پیش‌ماده ملاس و ویناس صنعتی، ویناس صنعتی ولتاژ بیشتری را تولید کرد. بیشینه چگالی جریان در مقاومت ۲۰۰ اهم، ۳۱۲/۷۸۴۳ میلی‌آمپر بر متر مربع و بیشینه چگالی توان در مقاومت ۶۰۰ اهم و چگالی جریان ۲۰۱/۴۱ میلی‌آمپر بر متر مربع، به مقدار ۸۵/۶۰ میلی‌وات بر متر مربع اندازه‌گیری شد.

کلیدواژه‌ها: پیل سوختی میکروبی، میکروارگانیسم، لجن بی‌هوازی، فاضلاب، ملاس، ویناس

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵

نویسنده مسئول: h.moqtaderi@alzahra.ac.ir

مقدمه

مصرف انرژی به سرعت در حال افزایش است. استفاده از سوخت‌های فسیلی به عنوان منبع اصلی انرژی، به علت محدودیت منابع، ناپایداری در تأمین، ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، چالش‌های قابل توجهی به وجود آورده است. بنابراین ایجاد منابع جایگزین و تجدیدپذیر انرژی ضروری به نظر می‌رسد [1]. پیل‌های سوختی میکروبی، سیستم‌هایی بیوالکتروشیمیایی هستند که از طریق واکنش کاتالیستی میکروارگانیسم‌ها، انرژی شیمیایی حاصل از واکنش سوخت و اکسیدکننده را در شرایط بی‌هوازی به انرژی الکتریکی تبدیل

می‌کنند [2, 3] و مزایای کاربردی و زیست‌محیطی قابل توجهی برای آنها گزارش شده است [4].

اجزای اصلی تشکیل‌دهنده پیل سوختی میکروبی شامل آند و محفظه آند، کاتد و محفظه کاتد، غشای انتقال پروتون، پیش‌ماده و میکروارگانیسم است. در این نوع از پیل‌های سوختی میکروبی از یک میکروارگانیسم به عنوان بیوکاتالیست استفاده می‌شود که با تجزیه و اکسید مواد آلی الکترون و پروتون تولید می‌کند. از مزایای استفاده از باکتری‌ها به عنوان بیوکاتالیست می‌توان به قدرت بالای اکسایش، سرعت زیاد آنها در انتقال الکترون‌ها به سمت الکتروود و تجزیه آلاینده‌ها و سم‌زدایی از محیط اشاره کرد [5].

پیش‌ماده به عنوان سوخت، توسط میکروارگانیسم‌ها در محفظه بی‌هوازی که الکتروود آن در آن قرار دارد، اکسید می‌شود و الکترون و پروتون آزاد می‌نماید. پروتون‌ها به وسیله غشای تبادل پروتون به کاتد انتقال می‌یابند. در واقع، غشا برای پروتون‌هایی که در آند تولید می‌شود تراوا است و آنها می‌توانند به سمت کاتد حرکت کرده و در آنجا با اکسیژن و الکترون‌های انتقال یافته از طریق مدار خارجی، ترکیب شده و آب تولید کنند. از این رو، پیل باید طوری طراحی شود که شرایط بی‌هوازی را در محفظه آند فراهم نماید زیرا حضور اکسیژن در محفظه آندی، مانع از تولید الکترون می‌شود و یا با جذب الکترون‌ها و پروتون‌ها، از تشکیل جریان الکتریسیته در مدار خارجی ممانعت می‌کند. همچنین هوای تزریق شده در کاتد باید اکسیژن محلول برای واکنش را فراهم سازد [6-8]. گستره وسیعی از مواد آلی از هیدروکربنات‌های ساده مانند گلوکز [9] تا ترکیبات پیچیده مانند فاضلاب خانگی، فاضلاب دامداری‌ها، فاضلاب صنایع شکلات‌سازی و آبجوسازی به عنوان پیش‌ماده در سیستم پیل سوختی میکروبی به کار می‌روند [10].

هر چند، نخستین مشاهده جریان الکتریسیته تولیدی توسط باکتری‌ها توسط پاتر مشاهده شد ولی تا چند دهه بعد، پیشرفت‌های کاربردی اندکی گزارش شد [11]. در اوایل ۱۹۹۰، پیل‌های سوختی میکروبی بیشتر مورد توجه قرار گرفتند و پژوهش در مورد این پیل‌ها رشد چشمگیری داشت. با این حال آزمایش‌های انجام شده نیازمند استفاده از واسطه‌های شیمیایی یا انتقال‌دهنده‌های الکترونی بود، که الکترون‌ها را از داخل سلول به الکتروودهای بیرونی انتقال می‌دادند. پیشرفت قابل توجهی در پیل‌های سوختی میکروبی در سال ۱۹۹۹ زمانی روی داد که روشن شد افزودن این واسطه‌ها ضروری نیست [11]. پیل‌های سوختی میکروبی از حیث مکانیزم انتقال الکترون به دو دسته با واسطه و بدون واسطه تقسیم می‌شوند. پیل‌های سوختی میکروبی با واسطه از لحاظ الکتروشیمیایی غیرفعال هستند و انتقال الکترون توسط واسطه‌هایی مثل تیونین، متیل ویولوژن، هیومیک اسید، قرمز خنثی و غیره انجام می‌شود. مولکول‌های واسطه، الکترون را از میکروارگانیسم‌ها دریافت کرده و آنها را در سطح الکتروود آند تخلیه می‌کنند. معمولاً استفاده از این واسطه‌ها هزینه‌بر است و

طراحی صفحه تخت حداقل فاصله‌ای که بین الکترودها می‌توان ایجاد کرد منجر به افزایش نرخ انتقال یون و کاهش مقاومت داخلی می‌شود. در مطالعه‌ای که روی نسبت سطح مقطع به حجم انجام دادند نتیجه گرفتند که براساس شکل پیل سوختی میکروبی، اندازه و سطح الکترودها مشخص‌کننده حداکثر توان قابل دسترسی است و همچنین دریافتند که برای کاهش مقاومت داخلی لازم است تا فاصله بین الکترودها کاهش یابد. به علاوه مشخص شد، فاکتورهای دیگری از جمله طول برس گرافیت، تعداد برس‌ها، جهت و قطر آنها عوامل مؤثر در طراحی پیل سوختی میکروبی لوله‌ای است که منجر به کاهش مقاومت داخلی و افزایش چگالی توان می‌شوند[13].

بیرجندی و همکاران یک سیستم الکتروفنتون برای تولید انرژی زیستی مورد بررسی قرار دادند. این سیستم دومحفظه‌ای با منبع کربنی گلوکز و غشای نفیون و الکترودها اصلاح شده با هدف افزایش کارایی در فرآیند تصفیه ساخته شده بود. آنها در این آزمایش بیشترین مقدار اتانول، راندمان حذف گلوکز و حداکثر تولید توان را به ترتیب ۱۷/۵۲ گرم بر لیتر، ۶۸/۸۱٪ و ۳۰/۳۶ میلی‌وات بر متر مربع به دست آوردند[15].

لای و همکاران تولید برق در پیل‌های سوختی میکروبی تک‌محفظه‌ای را با کاتد هوایی و با یک بیوکاتد قارچی، بررسی کردند. قارچ مورد استفاده، لاکاز موجود در اطراف کاتد را تولید می‌کند. پلیمر ابرجاذب، با پلی‌وینیل الکل (Polyvinyl Alcohol) مخلوط شده تا یک غشای الکترولیت پلیمری ایجاد کند تا کاتد را از محلول آندی جدا کرده و در نتیجه سرعت انتقال پروتون و ظرفیت جذب آب را افزایش داده و در نتیجه موجب افزایش میزان برق تولیدی شود. آنها به این نتیجه رسیدند که قارچ استفاده شده در کشت حالت جامد نسبت به حالت مایع، ۷/۱ برابر بیشتر لاکاز تولید می‌کند. ماکزیمم ولتاژ مدار باز ۶۹۹ میلی‌ولت به دست آمد که با غشای پلیمری با نسبت بهینه یک به ۲ برای پلی‌وینیل الکل به پلیمر ابرجاذب تجهیز شده بود. همچنین مقدار بیشینه چگالی توان ۲۰۷/۷۴ میلی‌وات بر متر مربع به دست آمد. این تحقیقات نشان داد که استفاده از قارچ در حالت کشت جامد روی کاتد به میزان قابل توجهی باعث افزایش تولید لاکاز شد و اضافه کردن پلیمر ابرجاذب به غشای الکترولیت پلیمری، انتقال پروتون را افزایش داد و تولید برق پیل را بهبود بخشید. همچنین استفاده از غلظت‌های زیاد پلیمر ابرجاذب قدرت مکانیکی غشای پلیمری را کاهش داد، اما در نسبت بهینه ترکیب، غشایی با قدرت مکانیکی بالا، قابلیت انتقال پروتون خوب ایجاد شد که مزایای قابل توجهی در تولید برق داشت[14].

برای طراحی پیل‌های میکروبی با کاربرد صنعتی، مانند تولید برق از پساب‌های شهری و تصفیه همزمان، یکی از نکات شایان توجه نوع پیش‌ماده مورد استفاده به عنوان ماده مغذی میکروارگانیسم‌ها است. پیش‌ماده مناسب برای این کاربرد باید به صورت پیوسته و با هزینه مناسب قابل تأمین باشد.

در مواردی سمی بودن این مواد نیز مشکل‌زا است. در پیل‌های سوختی میکروبی بدون واسطه، از باکتری‌هایی فعال الکتروشیمیایی نظیر خانواده شوانلا پوتریفیشینس (*Shewanella Putrefaciens*، آئرومانس هیدروفیلا (*Aeromonas hydrophila*) و ژئوباکتر برای انتقال الکترون استفاده می‌شود. آنها با استفاده از پیل‌های و سیتوکروم‌های غشایی، الکترون‌ها را مستقیماً به الکترودها تحویل می‌دهند و نیازی به واسطه ندارند[7,8].

در طی دو دهه اخیر، پژوهش‌های زیادی برای بهینه‌سازی پارامترها و افزایش کارایی پیل‌های سوختی میکروبی انجام شده است. در این تحقیقات، فاکتورهای متعددی از جمله جنس الکترودها، مساحت سطح الکترودها، فاصله بین الکترودها، شکل و ساختار و اندازه محفظه، ساختار و ترکیبات غشای تبادل پروتون، دمای عملکرد، انواع احیاکننده‌ها در سمت کاتد، نوع و ترکیب میکروارگانیسم‌ها و پیش‌ماده مورد استفاده و تأثیر انواع افزودنی‌های شیمیایی مورد بررسی قرار گرفته است.

لی مطالعه‌ای روی تولید جریان الکتروسیسته در پیل‌های سوختی میکروبی انجام داد. او به مطالعه تأثیر سه پارامتر دما، نوع باکتری و اندازه محفظه بر روی عملکرد یک پیل سوختی میکروبی پرداخت. بدین منظور سه مرحله آزمایش با سه نمونه باکتری شامل خاک‌روبی، گل‌ولای اقیانوس و لجن‌زار، با شرایط مختلف به مدت ۱۰ روز انجام شد. نتیجه آزمایش اول در دمای اتاق این بود که پیل سوختی میکروبی شامل باکتری خاک‌روبی و باکتری گل‌ولای اقیانوس به ترتیب کمترین و بیشترین میزان تولید الکتروسیسته را داشتند. نتیجه آزمایش دوم این بود که بیشترین و کمترین میزان تولید الکتروسیسته به ترتیب در دمای صفر درجه سانتی‌گراد و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق افتاد. در آزمایش سوم حجم محفظه مورد بررسی قرار گرفت که مشاهده شد در بزرگ‌ترین پیل سوختی میکروبی که ۲۴/۸ برابر پیل سوختی میکروبی متوسط بود، میزان تولید الکتروسیسته، تقریباً ۱/۳ برابر بود و همچنین حجم محفظه پیل سوختی میکروبی متوسط که ۲/۲ برابر حجم محفظه کوچک‌ترین پیل سوختی میکروبی بود، میزان تولید الکتروسیسته در آن ۱/۲ برابر بیشتر بود. بنابراین روشن شد، که میزان حجم محفظه، تأثیر مستقیم قابل توجهی روی میزان تولید الکتروسیسته ندارد. نتیجه کلی این بود که نمونه گل‌ولای اقیانوس در دمای صفر درجه سانتی‌گراد و با ابعاد ۱۰/۲ در ۱۰/۲ در ۱۳/۴ سانتی‌متر بالاترین میزان تولید الکتروسیسته را داشت، اگر چه این میزان با گذر زمان در طول ۱۰ روز کاهش پیدا کرد[12].

جنیک و همکاران، ۱۸ پژوهش صورت گرفته در مورد تأثیر فاکتورهای مختلف بر عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی را بررسی و گزارش کردند. در هر یک از این پژوهش‌ها جنس آندها، جنس کاتد، نوع غشا، ساختار هندسی و سطح مخصوص متغیر بوده و هر یک از عوامل به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفتند. آنها از مقایسه طراحی لوله‌ای و صفحه تخت به این نتیجه رسیدند که در

بر مقایسه ویناس صنعتی و ملاس به عنوان پیش ماده است. این هدف از طریق طراحی و ساخت یک سیستم پیل سوختی میکروبی و بررسی اثر نوع مخلوط میکروارگانیزم و نوع پیش ماده روی ولتاژ خروجی سیستم حاصل شده است. پیل سوختی مورد نظر، تک محفظه‌ای با کاتد هوایی است. در محفظه آند از مخلوطی شامل میکروارگانیزم و پیش ماده استفاده شده است.

بخش تجربی

مواد

مواد اولیه مورد استفاده شامل آب دیونیزه، اتانول، آب اکسیژنه، پلاتین ۱۰ درصد وزنی، محلول پلی‌تترافلوئوراتیلن (PTFE) ۶۰ درصد وزنی، محلول نفیون (Nafion) ۳۰ درصد وزنی، اسیدسولفوریک یک مولار، اپوکسی نارسانا و چسب کربن است. میکروارگانیزم‌های تهیه شده، شامل آب ماست و همچنین مخلوط میکروبی مخزن بی‌هوازی سرباز و پساب ابتدای حوضچه لجن فعال که از فاضلاب اکباتان در تهران، بوده است. از ویناس صنعتی و ملاس نیز به عنوان پیش ماده برای این میکروارگانیزم‌ها استفاده شد که حجم آن تقریباً معادل یک صدم حجم پساب انتخاب شده بود.

تجهیزات

لوله کربنی با طول ۹۰، قطر خارجی ۱۶ و ضخامت ۴ میلی‌متر، پارچه کربنی با ابعاد ۳۲×۱۵۰ و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر، غشای نفیون ۱۱۵ با ابعاد ۳۲×۱۵۰ و ضخامت ۰/۱۲۷ میلی‌متر، مقاومت متغیر ولومی (صفر تا ۲۰ کیلو اهم) با سر ولوم برای تنظیم دقیق مقاومت دلخواه، دستگاه مولتی‌متر دیجیتال هیوکی مدل DT4200s، دستگاه پرس و سیم مسی مورد استفاده قرار گرفت.

طراحی سیستم پیل سوختی میکروبی

یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی پیل‌های سوختی میکروبی، طراحی ساختار محفظه پیل است. انواع پیل سوختی میکروبی براساس ساختار محفظه پیل، می‌توان به مواردی مانند پیل سوختی میکروبی اچ‌شکل، پیل سوختی میکروبی دومحفظه‌ای، پیل سوختی میکروبی تک‌محفظه‌ای، پیل‌های سوختی میکروبی لوله‌ای و پیل سوختی میکروبی با جریان بالارونده اشاره کرد [18]. پیل‌های سوختی میکروبی تک‌محفظه‌ای به دلیل داشتن مقاومت داخلی کمتر در مقایسه با نوع دومحفظه‌ای دارای چگالی توان بیشتری هستند. در پیل سوختی تک‌محفظه‌ای فاصله بین آند و کاتد به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و هیچ هزینه انرژی برای اکسیژن فعال کاتدی لازم نیست زیرا کاتد به‌صورت منفرد هوادهی می‌شود [11]. علاوه بر این، پیل‌های سوختی میکروبی هم در حالت جریان پیوسته و هم در حالت جریان ناپیوسته می‌توانند در معرض اکسیژن اتمسفری قرار گرفته و قدرت خروجی بالاتری را ایجاد کنند زیرا مساله محدودیت نرخ انتقال جرم اکسیژن به کاتد وجود ندارد [18]. همچنین مساحت آند و کاتد می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سیستم‌های دوگانه افزایش یابد. از این‌رو،

شهاب و همکاران، اثر چند پیش‌ماده ساکارز، گلوکز و نشاسته را بر روی پیل سوختی میکروبی دومحفظه‌ای مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش پتاسیم فروسیانید به‌عنوان گیرنده الکترون و برای جداسازی کاتد از آند از پیل نمکی استفاده شد و لجن تخلیه کارخانه‌ای به‌عنوان مخزن باکتری مورد استفاده قرار گرفت. ولتاژ و جریان در مقاومت‌های ۹/۸۱ و ۵/۹۱ کیلو اهم اندازه‌گیری شد. بالاترین ولتاژ در مقاومت ۹/۸۱ کیلو اهم، ۷۱۶/۳۲ میلی‌وات اندازه‌گیری شد در حالی که حداکثر چگالی جریان و چگالی قدرت برای ساکارز، به ترتیب ۴/۷۵ میلی‌آمپر بر مترمربع و ۳/۰۹ میلی‌وات بر متر مربع در مقاومت ۵/۹۱ به‌دست آمد [9].

متئو و همکاران، کارایی یک پیل سوختی میکروبی با چهار پیش‌ماده مختلف را بررسی کردند. در میان پیش‌ماده‌های مورد بررسی شامل استات، لاکتات، گلوکز و اکتانوات، بهترین عملکرد را استات نشان داد. بالاترین چگالی جریان ۲۰ آمپر بر متر مربع، بالاترین چگالی توان ۲ وات بر متر مربع و ولتاژ مدار باز ۰/۳۷۶ ولت از نتایج به‌دست‌آمده با پیش‌ماده استات بود. همچنین تحلیل‌های ولتاژمتری و منحنی پلاریزاسیون نشان داد که برتری استات به سبب پایین بودن مقاومت اهمی آن بوده است [15].

در دهه اخیر نیز در سه پژوهش پانت و همکاران [16]، پاندى و همکاران [17] و میسر/ و همکاران [10] درباره پیل‌های سوختی با استفاده از انواع پیش‌ماده‌ها بررسی شده است. در این مطالعات به طیف وسیعی از پیش‌ماده‌ها از جمله استات، گلوکز، ساکاروز، زایلینول، ترکیب گلوکز- فنل، سلولز، فرفورال، آب نارگیل، لجن فاضلاب، پساب شهری، فضولات گاو، پساب صنایع غذایی، پساب آسیاب برنج، زیست‌توده ذرت، پساب صنعتی با ملاس و اوره، پساب غنی‌شده با پروتئین اشاره شده است.

پاندى و همکاران [17]، دسته‌بندی جامعی برای انواع پیش‌ماده ارائه کردند که غالب پیش‌ماده متداول را در خود جای می‌دهد. براساس این مطالعه پیش‌ماده‌های با ترکیب شیمیایی تعریف‌شده شامل هگزوزها، پنتوزها، مشتقات شکر، پلی‌الکها (هگزیتول‌ها و پنتیتول‌ها)، اسیدهای آمینه، اسیدهای ارگانیک، الکل‌ها، ترکیبات هتروسیکلی نیتروژنی و متفرقه‌ها (فنل، سولفید، فرفورال) هستند. البته پیش‌ماده‌های بسیار متنوع و تعریف‌نشده به لحاظ ترکیب شیمیایی نیز مورد مطالعه قرار گرفته که در این پژوهش به آنها اشاره است. این قسم دوم شامل انواع پساب‌های شهری و صنعتی و ترکیبات مختلفی از زیست‌توده‌های گیاهی و حیوانی است. در مجموع، حدود ۱۰۰ پیش‌ماده به همراه خلاصه نتایج تحقیقات مرتبط با آن ارائه شده است.

با توجه به اینکه ویناس (پساب صنایع الکل‌سازی) صنعتی، به‌صورت محصول جانبی برخی از صنایع بزرگ مانند صنایع تولید الکل در ایران به میزان قابل توجهی تولید می‌شود، بررسی قابلیت‌های آن به‌عنوان پیش‌ماده دارای اهمیت است. تا به حال مطالعه مستقیم یا مقایسه‌ای ویناس به‌عنوان پیش‌ماده، در میان پژوهش‌های مذکور صورت نگرفته است. لذا تمرکز پژوهش حاضر

آماده‌سازی

آماده‌سازی آند

به دلیل اینکه ممکن است، روی سطح الکتروود چربی و آلودگی نشسته باشد و داخل خلل و فرج الکتروود نیز چربی و آلودگی جمع شده باشد، این مراحل برای آماده‌سازی و آلودگی‌زدایی آند انجام شد. الکتروود به مدت ۲۰ دقیقه در آب اکسیژنه و در دمای محیط قرار داده شد سپس الکتروود به مدت ۱۰ دقیقه در آب دیونیزه جوشانده شد [20].

آماده‌سازی کاتد

به دلیل مشابه آنچه درباره‌ی آند ذکر شد، نظیر همان مراحل برای آماده‌سازی کاتد انجام گرفت. الکتروود به مدت ۲۰ دقیقه در آب اکسیژنه و در دمای محیط قرار گرفت سپس الکتروود به مدت ۱۰ دقیقه در آب دیونیزه جوشانده شد [20].

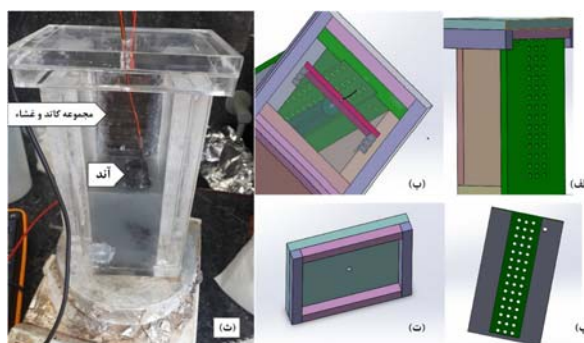
اکسیژن مناسب‌ترین و رایج‌ترین الکترون گیرنده در پیل‌های سوختی میکروبی است و با توجه به اینکه سرعت احیای اکسیژن روی کربن بسیار کند است، استفاده‌کردن از الکترودهای کربنی به‌عنوان کاتد بازده مناسبی ندارد. از این‌رو معمولاً برای بالا بردن سرعت احیای اکسیژن، از کاتالیست پلاتینی بر روی صفحه کربنی استفاده می‌شود. به همین علت پودر پلاتین ۱۰ درصد وزنی به مقدار بارگذاری ۳۵/۰ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع با آب و اتانول به‌صورت فیزیکی مخلوط شد و سپس سطحی از کاتد که با هوا در تماس است، توسط قلمو به آن مخلوط آغشته شد که سطح کامل پارچه کربنی را بپوشاند و سپس خشک شد. همچنین برای رسیدن به راندمان بالا از آلوده‌شدن پارچه کربنی جلوگیری کرده و سپس پارچه کربنی در شرایط کاملاً تمیز قرار گرفت [20, 21].

سپس مراحل زیر بر روی سطحی از پارچه کربنی که در تماس با غشا بود، انجام شد. در ابتدا مخلوط پودر پلاتین ۱۰ درصد وزنی به مقدار بارگذاری ۳۵/۰ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع با آب و اتانول به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط شد. سپس پلی‌تترافلوئوراتیلن ۶۰ درصد وزنی اضافه شد تا محلول ۳۰٪ ساخته شود و به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شد. مخلوط موجود به‌وسیله قلمو روی پارچه کربنی کشیده شد و بعد از آن پارچه کربنی به مدت ۲۴ ساعت در هوای محیط خشک شد و سپس در اجاق با دمای ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت. سپس در کوره‌ای با دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شد. محلول نفیون ۳۰ درصد وزنی به مقدار ۲ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع آماده شد و روی پارچه کربنی با قلمو کشیده شد و در آخر پارچه کربنی را در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در اجاق قرار گرفت و اجازه داده شد به مدت یک ساعت در هوای محیط خشک شود. در واقع این مراحل همان روند تشکیل لایه کاتالیست است [22].

آماده‌سازی غشا

قبل از استفاده غشا، به‌منظور حذف ناخالصی‌ها و افزایش تخلخل غشا و همچنین برای عملکرد بهتر در عبور دادن پروتون و همچنین پروتونیزه‌کردن آن این مراحل صورت گرفت. غشا در ظرف آب

پیل‌های سوختی میکروبی با کاتد هوایی تک‌محفظه‌ای به‌طور معمول قدرت عملکرد بالاتری را ثبت می‌کنند و نسبت به همتایان دوگانه خود پایداری بیشتری دارند. نقطه ضعف این نوع طراحی در مقیاس‌ناپذیری آن است، زمانی که فاصله بین الکتروودها زیاد می‌شود تولید قدرت غیرممکن می‌شود. با توجه به اینکه لازم است کاتد همیشه در معرض هوا باشد، طراحی این نوع از پیل‌های سوختی در مقیاس‌های بزرگ با پیچیدگی‌هایی جدی مواجه است [19]. بر همین مبنا و براساس ابعاد مورد نظر، پیل سوختی میکروبی مورد استفاده به‌صورت تک‌محفظه‌ای و مطابق شکل ۱-الف طراحی شد.



شکل ۱) محفظه و اجزای پیل سوختی میکروبی

محفظه این پیل سوختی میکروبی به‌صورت مکعب‌مستطیل و با ابعاد ۱۶۰×۶۰×۶۰ که از صفحه پلکسی بی‌رنگ شفاف به ضخامت یک سانتی‌متر ساخته شده است. برای ایجاد امکان تغییر محل آند، در جداره داخلی پیل مطابق شکل ۱-ب شیارهایی تعبیه شد که شیارها در فواصل ۲۳، ۳۲، ۴۱ میلی‌متری از کاتد تعبیه شدند. به‌منظور امکان ایجاد این شیارها و آب‌بندی محفظه به‌طور همزمان، دیواره‌های کناری به‌صورت دولایه ساخته شدند. محل قرارگیری آند به‌صورت یک تیر سوراخ‌دار است که داخل شیارهای داخلی محفظه قرار می‌گیرد.

در دیواره‌ای از محفظه مطابق شکل ۱-پ که محل قرارگیری کاتد و غشا بود منافذی به قطر ۵ میلی‌متر ایجاد شد تا امکان تماس کاتد با هوا ایجاد شود. همچنین برای سهولت قرارگیری کاتد و غشا روی این دیواره شیارهایی به ضخامت ۲/۷ میلی‌متر ایجاد شد. این دیواره به‌صورت جدا ساخته شد تا بتوان کاتد و غشا را به‌راحتی در مکان خودش قرار داده و در صورت نیاز جنس کاتد را تعویض کرد.

برای سهولت دسترسی به بخش‌های داخلی پیل و همچنین جلوگیری از ورود هوا به محفظه مطابق شکل ۱-ت درپوشی برای آن طراحی شده تا در صورت نیاز از آن استفاده شود. علت این امر، لزوم ممانعت از تماس مستقیم هوا با محلول سمت آند بوده است. جهت عبور سیسم متصل به آند، روی در محفظه سوراخی به قطر ۵ میلی‌متر ایجاد شد. در شکل ۱-ث نمایی از پیل سوختی میکروبی تک‌محفظه‌ای طراحی‌شده، نشان داده شده است.

به دمای محیط صنعتی، دمای محفظه با استفاده از یک گرم‌کن حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شد [19, 24, 25].

تحلیل نتایج

بررسی اثر نوع میکروارگانیزم‌ها بر ولتاژ پیل سوختی

برای بررسی اثر نوع میکروارگانیزم‌ها بر ولتاژ پیل سوختی، آند در ۳۲ میلی‌متری از کاتد قرار داده شد. سه نوع میکروارگانیزم بدون پیش‌ماده در حالت مدار باز بدون همزن مغناطیسی و گرم‌کن برای تعیین بیشترین ولتاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفت. این سه نوع به ترتیب شامل ۲۵۰ میلی‌لیتر آب ماست، ۲۵۰ میلی‌لیتر پساب ابتدای حوضچه لجن فعال از فاضلاب اکباتان و ۲۵۰ میلی‌لیتر پساب از مخزن بی‌هوازی سرباز از فاضلاب اکباتان بود.

در حالت اول بعد از تزریق آب ماست به درون محفظه آند ولتاژ به ۶۸ میلی‌ولت رسید و بعد از ۹۰ دقیقه به ماکزیمم مقدار خود، ۳۳۱ میلی‌ولت رسید و بعد از آن شروع به کاهش کرد یعنی در مدت ۱۵ دقیقه به ۲۷۳ میلی‌ولت رسید و این روند کاهشی ادامه یافت. در حالت دوم بلافاصله بعد از تزریق ابتدای حوضچه لجن فعال به درون محفظه آند ولتاژ به ۶۹ میلی‌ولت رسید و بعد از ۱۲۰ دقیقه به ماکزیمم مقدار خود، ۳۵۴ میلی‌ولت رسید و بعد از آن شروع به کاهش کرد و به ۲۸۰ میلی‌ولت رسید. سپس هنگامی که گلوکز به‌عنوان پیش‌ماده به محفظه اضافه شد، دوباره این روند افزایش پیدا کرد. این افزایش ولتاژ دوباره به‌علت افزایش پیش‌ماده قابل دسترس برای میکروارگانیزم‌ها بود. در حالت سوم نیز بلافاصله بعد از تزریق مخزن بی‌هوازی به درون محفظه آند ولتاژ به ۲۲۰ میلی‌ولت رسید و بعد از ۱۲۰ دقیقه به ۳۸۰ میلی‌ولت رسید که در نمودار ۱ می‌توان این روند تغییرات ولتاژ را برحسب زمان برای هر سه حالت مشاهده کرد. البته در حالت سوم هم به فاز کاهشی مانند نمودارهای قبلی می‌رسد ولی به دلیل عدم نیاز به این فاز، ادامه کار ثبت نشد زیرا هدف پیدا کردن بهترین میکروارگانیزمی بود که بیشترین ولتاژ خروجی را بدهد که در حالت سوم بیشترین ولتاژ به دست آمد. بررسی‌ها نشان داد که در میکروارگانیزم سوم، ولتاژ حداکثر حتی ممکن است به بیش از ۳۸۰ میلی‌ولت هم برسد. این کاهش زودهنگام ولتاژ را می‌توان براساس کاهش غلظت پیش‌ماده قابل دسترس برای میکروارگانیزم‌ها (کمبود مواد غذایی موجود) و یا انباشته شدن باکتری‌ها در کف محفظه به‌علت عدم وجود همزن مغناطیسی و همچنین عدم وجود گرم‌کن توضیح داد.

بررسی اثر نوع پیش‌ماده بر روی ولتاژ پیل سوختی

انتخاب نوع میکروارگانیزم با توجه به توضیحات قبل، مخزن بی‌هوازی سرباز به‌علت بیشترین ولتاژ تولیدی است. در قدم بعدی اثر ویناس صنعتی و ملاس در تعامل با این ترکیب از میکروارگانیزم مورد بررسی قرار گرفت. این کار با اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز در طی مدت زمان ۱۲۰ دقیقه حاصل شد. همان طور که در نمودار ۲ هم مشهود است ویناس صنعتی در مقایسه با ملاس

دیونیزه به مدت یک ساعت و در دمای حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و سپس غشا در محلول آب‌اکسیژنه ۳ درصد وزنی به مدت یک ساعت و در دمای حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و مجدداً مرحله اول تکرار شد. سپس غشا در محلول اسیدسولفوریک یک مولار به مدت یک ساعت و در دمای حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و در آخر هم باز مرحله اول تکرار شد [20, 23]. بعد از این مراحل سطح غشا آماده استفاده و فعال است.

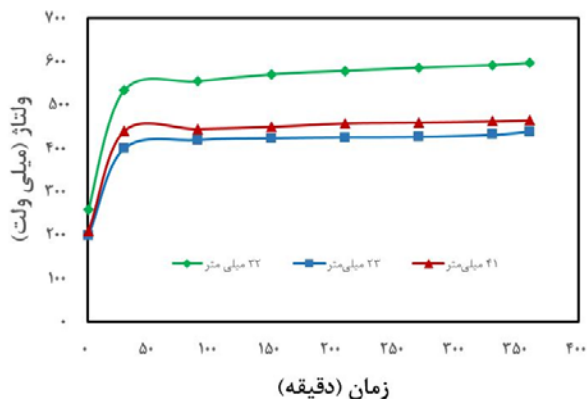
همچنین در تمامی مراحل باید دقت داشت که نفیون در محلول مورد نظر معلق باشد و بخشی از آن بیرون از محلول قرار نگیرد. از آنجا که بعد از اتمام کار، برداشتن نفیون از محلول کار دشواری است، می‌توان نفیون را بین دو لام قرار داد که لام‌ها توسط چسب به هم چسبانده می‌شوند. بعد از آماده‌سازی نفیون تا موقع نیاز مجدد می‌بایست نفیون را خشک کرد. نفیون در یک اجاق خلأ در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه خشک شد [23].

آماده‌سازی مجموعه الکتروود و غشا

بعد از آماده‌سازی غشا نفیون و استقرار آن روی چند لایه پارچه کربنی (به‌عنوان کاتد)، مجموعه پارچه کربنی و غشا در دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۹۳ اتمسفر به مدت ۱۵ دقیقه پرس شد. پرس این مجموعه برای جلوگیری از نشت گازهای واکنش‌گر و آب‌بندی شدن آن ضروری است [21, 22].

روش انجام آزمایش

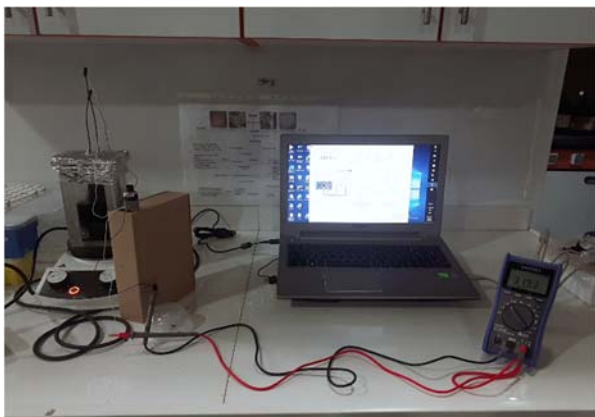
بعد از ساخت محفظه و آماده‌سازی‌های انجام‌شده، آند با استفاده از شیارهای تعبیه‌شده در بدنه محفظه در فواصل مختلف از کاتد قرار گرفت و همچنین با فاصله ۱۰ میلی‌متری از کف محفظه مستقر شد. لوله کربنی (آند) توسط یک سیم مسی به میله پلکسی واقع در شیارهای بالای محفظه، چسبانده شد. چسب کربن به دلیل رسانایی الکتریکی، غیرسمی بودن و چسبندگی مناسب، برای اتصال سیم مسی به الکتروودها استفاده و محل اتصال با اپوکسی غیررسانا عایق بندی شد. با توجه به اینکه لوله کربنی نسبت به پارچه کربنی خاصیت نفوذپذیری و همچنین رسانایی الکتریکی کمتری دارد، دور تا دور لوله کربنی با پارچه کربنی پوشانده شد تا نفوذپذیری و رسانایی الکتریکی آند افزایش پیدا کند. سپس در بخش کاتد، دور تا دور مجموعه پارچه کربنی و غشا به دیواره سوراخ‌دار چسبانده شد که اطمینان حاصل شود آب بین سطح محفظه و کاتد جمع نمی‌شود که مانع رسیدن هوا به کاتد شود. سپس ۲۵۰ میلی‌لیتر پساب از صافی کاغذی عبور کرد تا گل‌ولای و آشغال‌های موجود حذف شوند و در آخر مایع کدررنگ که مخلوطی از میکروارگانیزم‌ها است باقی بماند. با توجه به شرایط بی‌هوازی در محفظه آند، به مدت ۱۵ دقیقه با وارد کردن گاز نیتروژن، اکسیژن درون محفظه خارج شد [20]. برای کاهش اُفت غلظتی از یک همزن مغناطیسی برای ایجاد اختلاط بیشتر در محلول محفظه استفاده شد و با استفاده از اطلاعات موجود از کارهای منتشرشده و همچنین به دلیل لزوم اعتبار نتایج برای محیطی با شرایط نزدیک



نمودار ۳) تغییرات ولتاژ برحسب زمان برای فاصله‌های مختلف آند و کاتد

استخراج منحنی پلاریزاسیون

با انتخاب مخزن بی‌هوازی سرباز به‌عنوان مخلوطی از میکروارگانیسم‌ها و همچنین ویناس صنعتی به‌عنوان پیش‌ماده پساب، به محفظه آند تزریق شد و آند در فاصله ۳۲ میلی‌متری از کاتد قرار گرفت و مقاومت‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و مدار باز، به‌صورت موازی با مولتی‌متر در مدار قرار گرفتند. ثبت ولتاژ برای هر مقاومت در بازه‌ای که ولتاژ به ماکزیمم مقدار خود رسیده، انجام شد. بر همین اساس، میزان تغییرات ولتاژ برحسب زمان برای هر مقاومت و نمودار پلاریزاسیون و منحنی چگالی توان و نمودار تغییرات ولتاژ برحسب مقاومت و همچنین نمودار تغییرات چگالی جریان بر حسب مقاومت رسم شد. در شکل ۲ نمایی از سیستم داده‌برداری در حالت آزمایش نشان داده شده است.

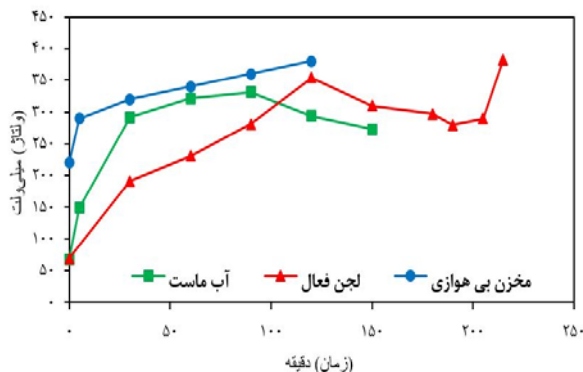


شکل ۲) چیدمان اندازه‌گیری ولتاژ پیل سوختی میکروبی تک‌محفظه‌ای در مقاومت‌های خارجی مختلف

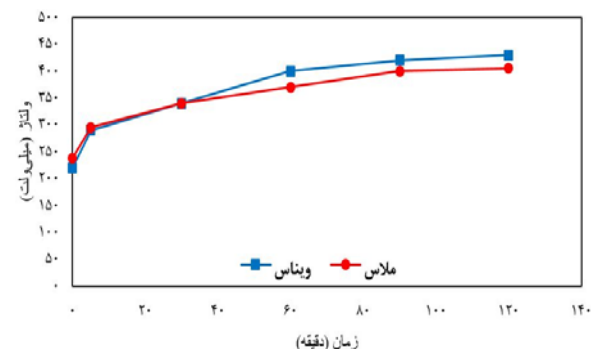
نمودار ولتاژ برحسب زمان برای هر مقاومت

همان طور که در نمودار ۴ دیده می‌شود ولتاژ در مقاومت‌های پایین‌تر سریع‌تر از مقاومت‌های بالاتر ثابت می‌شود و با افزایش مقاومت ولتاژ تولیدی افزایش پیدا می‌کند. در هر مقاومت بعد از تزریق مخلوط میکروارگانیسم با گذر زمان سیستم ابتدا فاز

عملکرد بهتری در ایجاد اختلاف پتانسیل نشان داده است. بیان دقیق علت عملکرد بهتر ویناس صنعتی به بررسی‌های بیشتری نیاز دارد که باید در گام‌های بعدی با انجام آزمون‌هایی نظیر ولتامتری و اندازه‌گیری امیدانس و تفکیک اتلافات مختلف تشریح شود. براساس این نتیجه، برای اندازه‌گیری مشخصه‌ها از ویناس صنعتی به‌عنوان پیش‌ماده استفاده شد.



نمودار ۱) تغییرات ولتاژ برحسب زمان برای سه نوع میکروارگانیسم



نمودار ۲) تغییرات ولتاژ برحسب زمان برای دو نوع پیش‌ماده

بررسی اثر فاصله بر روی ولتاژ پیل سوختی

براساس نتایج قبلی مخزن بی‌هوازی سرباز به‌عنوان مخلوطی از میکروارگانیسم‌های لازم انتخاب شد و همچنین ویناس صنعتی به‌عنوان پیش‌ماده پساب، به محفظه آند تزریق شد. برای سنجش اثر فاصله دو الکتروود، آند در فواصل ۳۲، ۲۳، و ۴۱ میلی‌متری از کاتد قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده برای ولتاژ مدارباز در مدت زمان ۵ ساعت در نمودار ۳، ارایه شده است. مشهود است که بالاترین ولتاژ در فاصله ۳۲ میلی‌متری از کاتد بدست آمده است. این نتایج به نوعی وجود یک مقدار بهینه برای فاصله الکتروودها را تایید می‌کند. از علل وجود این نقطه بهینه می‌توان به عواملی با نتایج در جهت عکس یکدیگر در این موضوع اشاره کرد. زیاد شدن فاصله به‌طور مستقیم مقاومت یونی را افزایش می‌دهد ولی تا حدودی با کم‌تر شدن مقاومت هیدرولیکی زمینه انتقال جرم بهتر و کاهش تلفات غلظتی را فراهم می‌نماید.

که در این رابطه ولتاژ برحسب ولت و جریان برحسب آمپر و مقاومت برحسب اهم است و توان پیل سوختی میکروبی در هر نقطه نیز، از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$P = V \cdot I \quad (2)$$

برای محاسبه چگالی توان (میلی‌وات بر متر مربع) و چگالی جریان (میلی‌آمپر بر متر مربع)، مقادیر به‌دست‌آمده توان و جریان بر مساحت سطح الکتروود (معمولاً آند) تقسیم شد. با رسم تغییرات ولتاژ برحسب چگالی جریان و همچنین چگالی توان برحسب چگالی جریان در فاز ایستا که ولتاژ پیل به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد منحنی پلاریزاسیون مطابق نمودار ۵ حاصل شد. این تغییرات ولتاژ، جریان و توان خروجی برحسب تغییرات مقاومت خارجی به‌دست آمد که در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود، بیشینه چگالی جریان در مقاومت ۲۰۰ اهم برابر $312/7843$ میلی‌آمپر بر متر مربع است و همچنین چگالی توان با افزایش چگالی جریان افزایش پیدا کرده است و در نقطه $85/6$ میلی‌وات بر متر مربع و چگالی جریان $201/41$ میلی‌آمپر بر متر مربع، به بیشینه مقدار خود می‌رسد پس از این نقطه چگالی توان کاهش می‌یابد. بیشینه چگالی توان هنگامی حاصل می‌شود که در آن مقاومت درونی و بیرونی پیل با یکدیگر برابر باشد. بنابراین مقاومت درونی پیل با توجه به حداکثر چگالی توان، ۶۰۰ اهم به‌دست آمد. بالا بودن مقاومت درونی سیستم، موجب کاهش توان تولیدی می‌شود، بنابراین برای داشتن توان خروجی بالا و در عین حال ثابت، پیل سوختی میکروبی باید به‌گونه‌ای طراحی شود که مقاومت درونی کمتری داشته باشد.

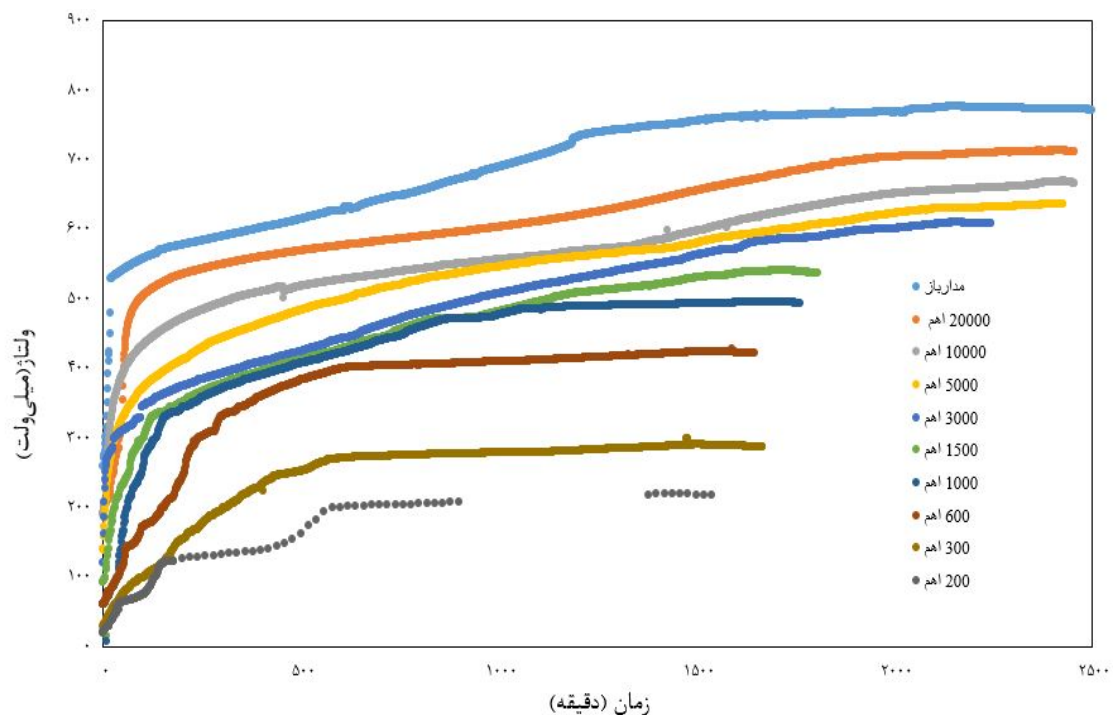
افزایشی را طی کرده و سپس به فاز ایستایی می‌رسد و بعد از آن وارد فاز کاهش شده و سپس ثابت می‌شود ولی مبنای اندازه‌گیری هنگامی است که ولتاژ به فاز ایستایی می‌رسد، ماکزیمم ولتاژ را ثبت کرده و ثبت ولتاژ ادامه پیدا نمی‌کند. ماکزیمم نقاط مورد نظر به‌طور میانگین بعد از ۳۰ ساعت به‌دست می‌آیند و در ادامه کار از آن استفاده می‌شود.

در حالت مدار باز ولتاژ اولیه از ۲۵۹ میلی‌وات به سرعت تغییر کرده و با توجه به فراهم‌بودن شرایط مناسب برای رشد باکتری ولتاژ پیل بعد از ۳۶ ساعت به ۷۷۷ میلی‌وات رسید و سپس ثابت شد. نمودار ۴ حاصل حدود ۳۵۰ ساعت آزمایش است. نتایج مربوط به تمام مقاومت‌ها با اتصال مولتی‌متر دیجیتال به کامپیوتر به‌طور خودکار هر یک دقیقه یک‌بار ثبت شد و فقط نتایج مربوط به مقاومت ۲۰۰ اهم به‌دلیل عدم وجود مولتی‌متر دیجیتال با مولتی‌متر معمولی این‌گونه بود که در ۳ ساعت ابتدایی نتایج هر یک دقیقه یک‌بار ثبت شد و سپس نتایج در ۱۲ ساعت بعدی به‌صورت ۲۰ دقیقه یک‌بار ثبت شد. سپس به‌علت مشکلات رفت‌وآمد در آزمایشگاه به‌مدت ۸ ساعت هیچ‌گونه نتیجه‌ای ثبت نشد و در ۳ ساعت پایانی آزمایش نتایج مجدداً به‌صورت ۲۰ دقیقه یک‌بار ثبت شد.

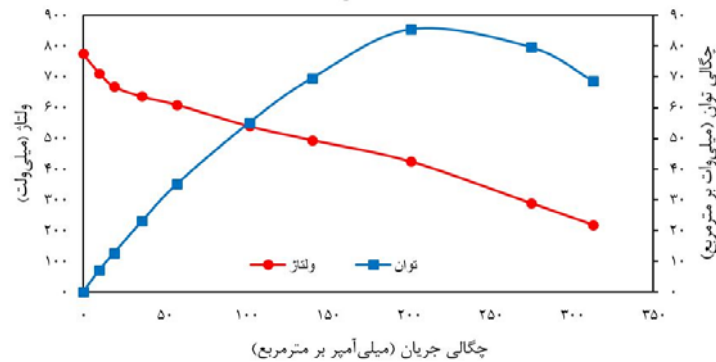
نمودار پلاریزاسیون و چگالی توان

جهت به‌دست‌آوردن نمودار پلاریزاسیون لازم است که شدت جریان خروجی در هر مقاومت به‌دست آید. شدت جریان با استفاده از قانون اهم (رابطه ۱) محاسبه شد.

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



نمودار ۴) تغییرات ولتاژ برحسب زمان برای مقاومت‌های مختلف در پیل سوختی میکروبی



نمودار (5) منحنی پلاریزاسیون و چگالی توان

جدول (1) تغییرات ولتاژ برحسب زمان برای مقاومت‌های مختلف در پیل سوختی میکروبی

مقاومت (اهم)	ماکزیمم ولتاژ (میلی‌ولت)	جریان (میلی‌آمپر)	چگالی جریان (میلی‌آمپر بر متر مربع)	چگالی توان (میلی‌وات بر متر مربع)
مدار باز	۷۷۷	۰	۰	۰
۲۰۰۰	۷۱۳	۰/۰۳۵۶۵	۱۰/۱۳۷۶۹۳۰	۷/۲۲۷۷۲۱۲۲۴
۱۰۰۰۰	۶۷۰	۰/۰۶۷	۱۹/۰۵۱۴۱	۱۲/۷۶۴۴۴۴۹۵
۵۰۰۰	۶۳۷	۰/۱۲۷۴	۳۶/۲۲۶۱	۲۳/۰۷۶۰۳۵۰۳
۳۰۰۰	۶۱۰	۰/۲۰۳۳	۵۷/۸۱۷۷	۳۵/۲۶۸۸۰۴۹۷
۱۵۰۰	۵۴۰	۰/۳۶	۱۰۲/۳۶۵۸	۵۵/۲۷۷۵۲۵۰۲
۱۰۰۰	۴۹۵	۰/۴۹۵	۱۴۰/۷۵۳	۶۹/۶۷۲۷۱۳۸۳
۶۰۰	۴۲۵	۰/۷۰۸۳	۲۰۱/۴۱۴۲	۸۵/۶۰۱۰۱۹۸۷
۳۰۰	۲۹۰	۰/۹۶۶۶	۲۷۴/۸۷۱۱	۷۹/۷۱۲۶۱۷۵۳
۲۰۰	۲۲۰	۱/۱	۳۱۲/۷۸۴۳	۶۸/۸۱۲۵۵۵۶۸۷

رسید و سپس ثابت شد و همچنین بیشینه چگالی جریان در مقاومت ۲۰۰ اهم ۳۱۲/۷۸۴۳ میلی‌آمپر بر متر مربع و بیشینه چگالی توان در مقاومت ۶۰۰ اهم و چگالی جریان ۲۰۱/۴۱ میلی‌آمپر بر متر مربع، به مقدار ۸۵/۶۰ میلی‌وات بر متر مربع رسیده است. در ماکزیمم چگالی توان، مقاومت درونی پیل ۶۰۰ اهم به دست آمد. با افزایش چگالی جریان، چگالی توان ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است و در آخر با افزایش مقاومت، چگالی جریان کاهش می‌یابد.

نمودار ولتاژ و چگالی جریان برحسب مقاومت

با توجه به قانون اهم، مقاومت با ولتاژ رابطه مستقیم و با جریان رابطه عکس دارد. براساس نتایج، با افزایش مقاومت از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ اهم، ولتاژ از ۲۲۰ به ۷۱۳ میلی‌ولت افزایش یافت و جریان از ۱/۱ به ۰/۰۳۵ میلی‌آمپر و در نتیجه چگالی جریان از ۳۱۲/۷۸ بر به ۱۰/۱۳۷۶ میلی‌آمپر بر متر مربع کاهش یافت.

نتیجه‌گیری

به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان گفت که در بین سه نوع مخلوط میکروارگانیزم آب ماست و مخزن بی‌هوای سرباز و ابتدای حوضچه لجن فعال بررسی‌شده، مخزن بی‌هوای سرباز بیشترین ولتاژ را تولید کرده است و با افزایش پیش‌ماده قابل دسترس برای میکروارگانیزم‌ها ولتاژ تولیدی افزایش پیدا کرده است. در بین دو نوع پیش‌ماده ملاس و ویناس صنعتی بررسی‌شده، ویناس صنعتی بیشترین ولتاژ و توان مخصوص را تولید کرده است. ولتاژ در مقاومت‌های پایین‌تر، سریع‌تر از مقاومت‌های بالاتر ثابت شده است و همچنین با افزایش مقاومت، ولتاژ افزایش پیدا کرده است. سپس در هر مقاومت ثابت با افزایش زمان، سیستم ابتدا فاز افزایشی را طی کرده و سپس به فاز ایستایی رسیده است و بعد از آن وارد فاز کاهشی شده و سپس ثابت می‌شود. ماکزیمم ولتاژ در حالت مدار باز بعد از ۳۶ ساعت به ۷۷۷ میلی‌ولت

تشکر و قدردانی: از دکتر محمدرضا صعودی، استاد دانشکده علوم زیستی دانشگاه الزهراء، به جهت مساعدت در استفاده از آزمایشگاه میکروبیولوژی، تقدیر و تشکر می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی و ادبی حاصل فعالیت نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن بر عهده آنها است.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافی با اشخاص و سازمان‌های دیگر وجود ندارد.

سهم نویسندگان: عطیه کیانی‌نژاد (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ حامد مقتدری (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ نیازمحمد محمودی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۵٪)؛ سیدمحمد معروفی (نویسنده چهارم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۵٪).

منابع مالی: از گرنت پژوهشی حامد مقتدری استفاده شده است.

- 13- Janicek A, Fan Y, Liu H. Design of microbial fuel cells for practical application: A review and analysis of scale-up studies. *Biofuels*. 2014;5(1):79-92.
- 14- Lai CY, Liu SH, Wu GP, Lin CW. Enhanced biodecolorization of acid orange 7 and electricity generation in microbial fuel cells with superabsorbent-containing membrane and laccase-based bio-cathode. *Journal of Cleaner Production*. 2017;166:381-386.
- 15- Mateo S, Cañizares P, Rodrigo MA, Fernandez-Morales FJ. Driving force behind electrochemical performance of microbial fuel cells fed with different substrates. *Chemosphere*. 2018;207:313-319.
- 16- Pant D, Van Bogaert G, Diels L, Vanbroekhoven K. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*. 2010;101(6):1533-1543.
- 17- Pandey P, Shinde VN, Deopurkar RL, Kale SP, Patil SA, Pant D. Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery. *Applied Energy*. 2016;168:706-723.
- 18- Gerber M. The effect of anode geometry on power output in microbial fuel cells [dissertation]. Columbus: The Ohio State University; 2014.
- 19- Fernando E, Keshavarz T, Kyazze G. Complete degradation of the azo dye Acid Orange-7 and bioelectricity generation in an integrated microbial fuel cell, aerobic two-stage bioreactor system in continuous flow mode at ambient temperature. *Bioresource Technology*. 2014;156:155-162.
- 20- Baqeri M. Oil wastewater treatment and electricity generation by microbial fuel cells [dissertation]. Isfahan: Isfahan University, 2012. [Persian]
- 21- Javanbakht M, Hooshyari Kh, Ghaffarian H. Know-how development, design, and construction of local 100-W polymere membrane microbial fuel cell. 30th International Power System Conference, 23-25 November 2015, Tehran, Iran. Tehran: Niro Research Institute; 2015. [Persian]
- 22- Litster S, McLean G. PEM fuel cell electrodes. *Journal of Power Sources*. 2004;130(1-2):61-76.
- 23- Krishnamurthy B, Deepalochani S. Performance of platinum black and supported platinum catalysts in a direct methanol fuel cell. *International Journal of Electrochemical Science*. 2009;4(3):386-395.
- 24- Mei X, Xing D, Yang Y, Liu Q, Zhou H, Guo C, et al. Adaptation of microbial community of the anode biofilm in microbial fuel cells to temperature. *Bioelectrochemistry*. 2017;117:29-33.
- 25- Tang YL, He YT, Yu PF, Sun H, Fu JX. Effect of temperature on electricity generation of single-chamber microbial fuel cells with proton exchange membrane. *Advanced Materials Research*. 2011;393-395:1169-1172.
- 1- Wu D, Xing D, Mei X, Liu B, Guo C, Ren N. Electricity generation by shewanella sp. HN-41 in microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013;38(35):15568-15573.
- 2- Capodaglio AG, Molognoni D, Pons AV. A multi-perspective review of microbial fuel-cells for wastewater treatment: Bio-electro-chemical, microbiologic and modeling aspects. The 18th International Conference on Positron Annihilation, AIP Conference Proceedings, Unknown Date of Conference & Location of Conference. Woodbury: AIP; 2016.
- 3- Köroğlu EO, Özkaya B, Çetinkaya AY. Microbial fuel cells for energy recovery from waste. *International Journal of Energy Science*. 2014;4(1):28-30.
- 4- Karra U, Muto E, Umaz R, Kölln M, Santoro C, Wang L, et al. Performance evaluation of activated carbon-based electrodes with novel power management system for long-term benthic microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. 2014;39(36):21847-21856.
- 5- Birjandi N, Younesi H, Ghoreyshi AA, Rahimnejad M. Electricity generation through degradation of organic matters in medicinal herbs wastewater using bio-electro-fenton system. *Journal of Environmental Management*. 2016;180:390-400.
- 6- Rahimnejad M, Adhami A, Darvari S, Zirepour A, Oh SE. Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal*. 2015;54(3):745-456.
- 7- Lotfi M, Younesi H, Bahramifar N. Wastewater treatment using dual-chamber microbial fuel cell with saccharomyces cerevisiae. *Journal of Water and Wastewater*. 2018;29(4):101-108. [Persian]
- 8- Jafari M, Sedighi Khavidak S. Microbial fuel cell: a strategy for bioremediation and energy production. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2018;20(3):37-43. [Persian]
- 9- Shehab US, Shoffiuddin RK, Nayeem US, Ahm S. Performance analysis of a microbial fuel cell using different substrate materials for different loads. *Iranian Journal of Energy & Environment*. 2018;9(3):191-196. [Persian]
- 10- Mishra B, Awasthi SK, Rajak RK. A review on electrical behavior of different substrates, electrodes and membranes in microbial fuel cell. *International Journal of Energy Power Engineering*. 2017;11(9):983-988.
- 11- Logan BE. *Microbial fuel cells*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2008.
- 12- Li J. An experimental study of microbial fuel cells for electricity generating: Performance characterization and capacity improvement. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*. 2013;3(3):171-178.