JEHE Alborz University of Medical Sciences Journal of Environmental Health Engineering , 2024; 12(1):63-74 Systematic Review Article

Microbial Fuel Cells for Bio-electricity Generation from Organic Waste (Opportunities and Challenges)

Received: 14 August 2024, Accepted: 21 September 2024

Hannaneh Turk-Zadeh Mahani[1,2], Saeedeh Morad-Alizadeh[1,2*], Mahdi Rezaei[1,2]

[1] *Environmental Health Engineering Research Center, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran*
[2]*Environmental Health Engineering Department, Faculty of Public Health, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran*

***Corresponding Author:**
saeideh.moradalizadeh71@gmail.com

How to Cite This Article:
Turk-Zadeh Mahani H, Morad-Alizadeh S, Rezaei M. Microbial Fuel Cells for Bio-electricity Generation from Organic Waste (Opportunities and Challenges). Journal of Environmental Health Engineering. 2024;12(1):63-74.

DOI:
10.61186/jehe.12.1.63

ABSTRACT

Background: With the industrialization of societies, the use of fossil fuels has increased. To address the issues arising from this, the "waste-to-energy" approach using a type of fuel production process known as microbial fuel cells can be utilized. Therefore, the aim of this study was to describe and investigate the use of microbial fuel cells for the production of bioelectricity from organic waste.

Materials and Methods: In the initial search for articles, a total of 214 articles from 2009 to 2024 were found. After removing duplicates, 101 articles remained. At the end of the screening stage, 62 articles remained. To access relevant articles, the full texts were reviewed, and finally, 29 articles were used in the present study.

Results: In microbial fuel cells, waste is considered as organic substrates, and microorganisms oxidize them to ultimately produce electrical energy without generating toxic by-products. Acetate is commonly used as an organic substrate due to its higher output power in fuel cells. For evaluating the performance of the fuel cells, electrodes are crucial as their material affects electron transfer and chemical efficiency.

Conclusion: Despite the advantages of microbial fuel cell technology in waste management and reducing air pollution, it faces challenges such as relatively high investment costs and low efficiency when applied on a large scale, which has delayed its commercialization. However, it is necessary to examine and control the factors reducing the efficiency of this technology on the large scale to expand its application scope and justify the high investment costs.

Keywords: Bioelectric Energy Sources, Electricity, Population Growth, Technology

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]

Copyright © 2024 The Authors.
Published by Alborz University of Medical Sciences
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License. (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).Non-commercial uses of the work are permitted,provided the original work is properly cited.

JEHE مجله مهندسی بهداشت محیط، دوره ۱۲، شماره ۱، پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۶۳ تا ۷۴ مقاله مرور ساختاریافته
Alborz University of Medical Sciences

سلول‌های سوختی میکروبی برای تولید بیوالکتریسیته از پسماندهای آلی (فرصت‌ها و چالش‌ها)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

حنانه ترک‌زاده ماهانی[۲،۱]، سعیده مرادعلی‌زاده[۲،۱]*، مهدی رضایی[۲،۱]

[۱] مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران
[۲] گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران

چکیده

زمینه و هدف: با صنعتی شدن جوامع، مصرف سوخت‌های فسیلی افزایش یافته که برای حل معضلات ناشی از این مسائل، می‌توان از رویکرد «پسماند به انرژی» با استفاده از نوعی فرایند تولید سوخت به نام سلول‌های سوختی میکروبی بهره برد؛ لذا هدف از انجام این مطالعه، توصیف و بررسی استفاده از سلول‌های سوختی میکروبی جهت تولید بیوالکتریسیته از پسماندهای آلی بود.

مواد و روش ها: در جستجوی اولیه مقالات، جمعاً ۲۱۴ مقاله از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۴ میلادی یافت شد که پس از حذف موارد تکراری، این تعداد به ۱۰۱ مقاله رسید. سپس در انتهای مرحله غربالگری، تعداد ۶۲ مقاله باقی ماند. برای دستیابی به مقالات مرتبط، متن کامل مقالات مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، ۲۹ مقاله باقی ماند که در مطالعه حاضر استفاده شد.

یافته ها: در سلول‌های سوختی میکروبی، پسماندها به عنوان بسترهای آلی در نظر گرفته می‌شوند و میکروارگانیسم‌ها با اکسید کردن آن‌ها، درنهایت انرژی الکتریکی تولید می‌کنند بدون اینکه محصولات جانبی سمی تولید شود. معمولاً از بستر آلی استات بدلیل توان خروجی بالاتر در سلول‌های سوختی استفاده می‌شود. برای ارزیابی عملکرد سلول سوختی، الکترودها حائزاهمیت‌اند؛ زیرا جنس الکترود، بر انتقال الکترون و کارایی شیمیایی آن تأثیرگذار است.

نتیجه گیری: فناوری سلول سوختی میکروبی، با وجود مزایایی که در زمینه مدیریت پسماند و کاهش بار آلودگی هوا دارد، چالش‌هایی مانند هزینه نسبتاً بالای سرمایه‌گذاری و راندمان پایین هنگام بکارگیری آن در مقیاس بزرگ را نیز داشته که باعث شده تجاری‌سازی این سیستم به تعویق افتد. با این حال، نیاز است تا با بررسی و کنترل عوامل کاهش راندمان این فناوری در مقیاس‌های وسیع، حیطه کاربرد آن را گسترش داد تا بتوان هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری را توجیه کرد.

واژه های کلیدی: الکتریسیته، رشد جمعیت، فناوری، منابع انرژی بیوالکتریکی

***پست الکترونیکی نویسنده مسئول:**
saeideh.moradalizadeh71@gmail.com

نحوه استناد به این مقاله:
Pasalari H, Fakhri H, Esrafili A, Hoseinzadeh E, Farzadkia M. Synthesis and characterization of new metal organic hybrid immobilized on carbon support: photocatalytic degradation of organophosphate pesticide (Malathion) and drug pollutant (Tetracycline) from aqueous solution. Journal of Environmental Health Engineering. 2024;12(1):1-6.

DOI:
10.61186/jehe.12.1.63

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]

مقدمه

با افزایش جمعیت و صنعتی شدن جوامع، جهان به سمت بحران انرژی حرکت کرده‌است. برای حل این مسئله و نیز دست یافتن به پایداری جهانی، نیاز به رویکردی جامع داریم. یافتن انرژی جایگزین به شیوه پایدار از نظر محیط‌زیستی، توسط دانشمندان سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته‌است[1،2].

توسعه پایدار، مستلزم دسترسی به انرژی پاک و سازگار با محیط زیست برای برآوردن نیازهای روزافزون است. در میان جنبه‌های مختلف توسعه پایدار، مدیریت پسماند به عنوان یکی از چالش‌های مرتبط در جوامع مدرن و همچنین درحال‌توسعه مطرح است. بر این اساس، تولید پسماندهای جامد، در درجه اول با رشد سریع فعالیت‌های خانگی، تجاری و به ویژه گسترش صنعتی مرتبط است. با این حال، پسماندها فرصتی برای تولید انرژی تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست را فراهم می‌کنند.

شرکت‌هایی که از انرژی پایدار به عنوان سوخت استفاده می‌کنند، به سوخت‌های زیست‌توده و پسماندها توجه ویژه‌ای دارند؛ چرا که با بکارگیری رویکردهای «پسماند به انرژی»، تبدیل مواد زائد به اشکال انرژی باارزشی؛ مانند بیوگاز، بیوالکل، بیوالکتریسیته وغیره امکان‌پذیر می‌شود.

بیوالکتریسیته یا همان تولید برق از مواد آلی با استفاده از سلول‌های سوختی میکروبی، مفهومی است که تقریباً به ۱۰۰ سال قبل بر می‌گردد[2-4]. سلول (پیل)های سوختی، سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی می‌باشند که می‌توانند به طور مستقیم انرژی ذخیره‌شده در پیوندهای شیمیایی مواد آلی را از طریق واکنش‌های بیوالکتروشیمیایی به واسطه میکروارگانیسم‌ها، به برق تبدیل کنند.

سلول‌های سوختی میکروبی (MFC: Microbial Fuel Cell) به دلیل ظرفیت‌شان برای حل بحران انرژی و آلودگی محیطی مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ بطوری که چندین مطالعه، در زمینه امکان تولید برق از این سلول‌های سوختی با استفاده از پسماندهای آلی در کشورهای مختلف انجام شده‌است (جدول ۱). بطور مثال، طبق مطالعه انجام‌شده توسط «مانیشا ورما و همکاران» در سال ۲۰۲۳ میلادی، امکان تولید برق به طور بالقوه از تجزیه پسماند پوست موز در سلول‌های مذکور با استفاده از میکروارگانیسم «S.cerevisiae» به عنوان یک بیوکاتالیست مورد بررسی قرار گرفت. همچنین «واهید میران و همکاران» در سال ۲۰۱۶ میلادی توانستند بطور موفقیت‌آمیزی، بیوالکتریسیته را با استفاده از پسماند پوست پرتقال به عنوان منبع کربنِ تجدیدپذیر در یک سلول سوختی تولید کنند[2،5-7].

جدول 1. از جمله مطالعات انجام‌شده در زمینه تولید بیوالکتریسیته بوسیله سلول‌های سوختی میکروبی (از سال 2014 تا 2024 میلادی)

نویسندگان	سال (میلادی)	یافته‌ها
مانیشا و همکاران	۲۰۲۳	امکان تولید برق بطور بالقوه از تجزیه پسماند پوست موز با استفاده از میکروارگانیسم «S.cerevisiae» به عنوان یک بیوکاتالیست در سلول سوختی میکروبی وجود دارد.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]

فلورس و همکاران	۲۰۲۲	با استفاده از سلول سوختی میکروبی دومحفظه‌ای که از پسماند حاصل از میوه آووکادو به عنوان بستر آلی استفاده می‌کند، می‌توان جریانی به اندازه (۳/۷۳۲۶±۰/۰۵۵۶۸) میلی‌آمپر با ولتاژ (۰/۷۴±۰/۰۲۱۲۱) ولت تولید کرد.
یاکوب و همکاران	۲۰۲۲	پسماندهای حاصل از سه میوه استوایی (رامبوتان، لانگسات و انبه) به عنوان بستر آلی در سلول سوختی میکروبی مورد بررسی قرار گرفتند و مشخص شد که پسماند میوه انبه قادر است تا چگالی جریان بیشتری تولید کند (۸۷/۷۱ میلی‌آمپر بر مترمربع).
فلورس و همکاران	۲۰۲۱	با استفاده از پسماند حاصل از میوه تمشک آبی، می‌توان جریانی به میزان ۱/۱۳۰±۰/۰۱۸ میلی‌آمپر با ولتاژ ۱/۱۲۷±۰/۰۹۶ ولت در سلول سوخت میکروبی تولید کرد.
فلورس و همکاران	۲۰۲۱	مشاهده شد که بستر آلی حاصل از پسماند میوه آناناس در مقابل گوجه‌فرنگی و سیب‌زمینی، در سلول سوختی میکروبی می‌تواند برقی با ارزش بالاتر (جریان ۲۷/۰±۸۸/۲۳ میلی‌آمپر و ولتاژ ۰/۳۴۸۴±۰/۰۰۳ ولت) تولید کند.
کالاگبر و همکاران	۲۰۲۰	در سلول سوختی میکروبی تک‌محفظه‌ای، پسماندهای حاصل از گوجه‌فرنگی و میوه‌های موز و آناناس به عنوان بستر آلی (در وزن‌های ۵ تا ۲۰ کیلوگرمی) مورد استفاده قرار گرفتند و مشخص شد که به ازای افزایش جرم بستر، جریان برق تولیدی نیز افزایش خواهد یافت.
امیرالدین و همکاران	۲۰۲۰	با استفاده از پسماند حاصل از سیب‌زمینی در یک سلول سوختی میکروبی تک‌محفظه‌ای، می‌توان بیوالکتریسیته با ولتاژ حداکثر ۱/۱۲ ولت تولید کرد (تحت دمای محیطی و pH خنثی).
فلورس و همکاران	۲۰۲۰	از میان سه نوع پسماند آلی مورد آزمایش به عنوان بستر (توت هندی، شاه توت، دراگون فروت)، پسماند دراگون فروت بیشترین میزان ولتاژ برق را در سلول سوختی میکروبی تولید کرد (۱/۱۷±۰/۱۲ ولت).
اومین و همکاران	۲۰۱۸	با بکارگیری میکروارگانیزم‌های مسئول تخمیر بی‌هوازی در یک سلول سوختی میکروبی و با استفاده از پسماندهای باغی به عنوان بستر آلی، بیوالکتریسیته تولید خواهد شد. همچنین می‌توان با استفاده از زغال بامبو، سرعت انجام فرایند را در طول یک ماه افزایش داد.
میران و همکاران	۲۰۱۶	با استفاده از پسماند پوست پرتقال به عنوان منبع کربن در سلول‌های سوختی میکروبی، می‌توان شاهد تولید شدن بیوالکتریسیته بود.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]

لوگرنو و همکاران	۲۰۱۵	در یک سلول سوختی میکروبی، با استفاده از مخلوطی از پسماندهای آلی به عنوان بستر آلی، میزان ۳۳۰ میلی‌ولت برق در مدت‌زمان ۶۰ روز بدون تجدید بستر تولید شد.
عزیزالمقصود و همکاران	۲۰۱۴	با آزمایش و مقایسه دو سلول سوختی میکروبی با دو بستر آلی متفاوت (پسماند آلی آشپزخانه‌ای و پسماند چوب بامبو) مشخص شد که در طول بررسی پنج روزه، سلول سوختی اول، حداکثر ولتاژ ۶۲۰ میلی‌ولت و سلول سوختی دوم، ۵۴۰ میلی‌ولت را تولید خواهند کرد.

با توجه به مطالب ذکرشده و مطالعات انجام‌شده، سلول‌های سوختی میکروبی از دو جنبه محیط‌زیستی (مدیریت پسماند و تولید انرژی پایدار) بسیار حائزاهمیت بوده که نیاز برای بررسی و توسعه بیشتر این فناوری سبز را توجیه می‌کند؛ لذا هدف از انجام مطالعه حاضر، بررسی رویکرد «پسماند به انرژی» با استفاده از فناوری سلول‌های سوختی میکروبی می‌باشد تا بتوان از آن در جهت تولید بیوالکتریسیته از پسماندهای آلی استفاده کرد تا با این روش بتوان گامی مؤثر به سوی دستیابی به انرژی پایدار برداشت.

مواد و روش‌ها

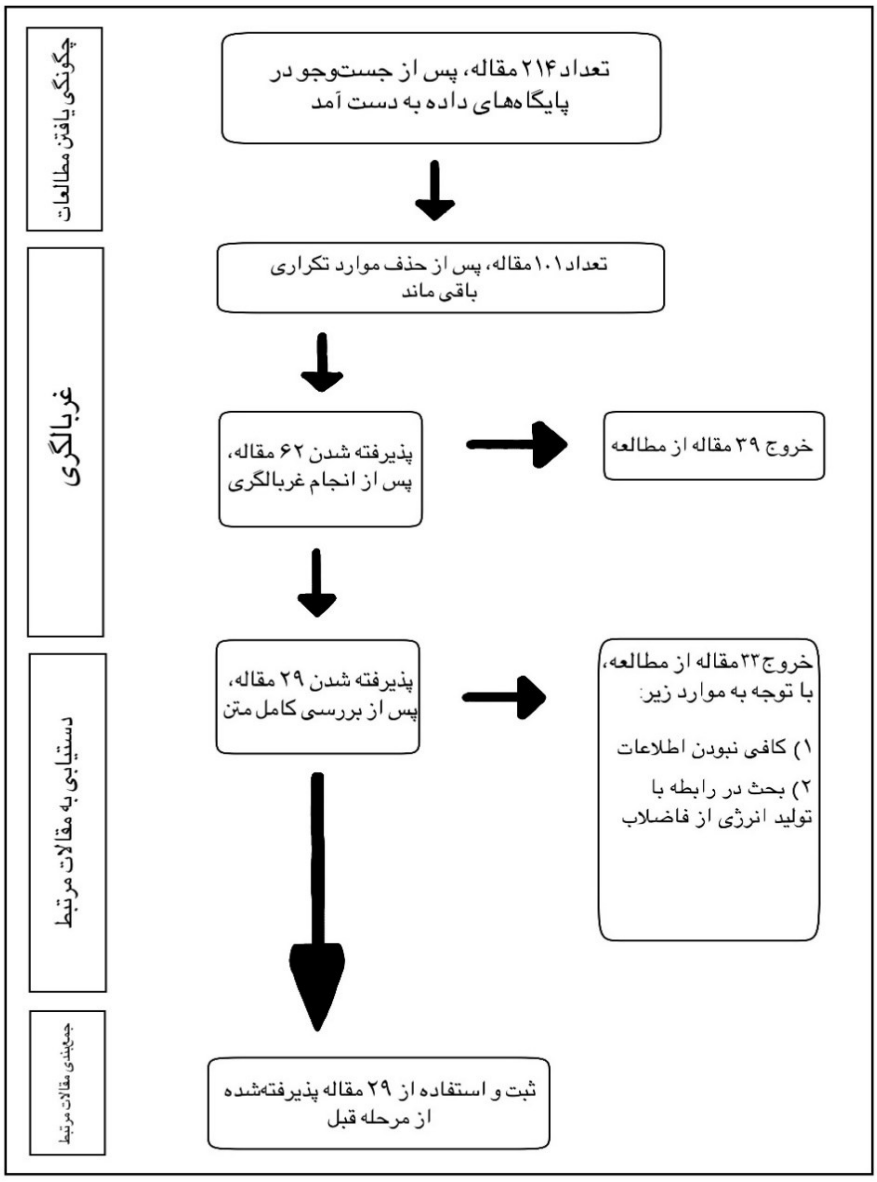
مطالعه حاضر، از نوع مروری ساختاریافته می‌باشد که برای انجام آن با توجه به هدف «بررسی رویکرد پسماند به انرژی با استفاده از فناوری سلول‌های سوختی میکروبی»، کلیدواژه‌های (((microbial fuel cells[Title])) AND (bioelectricity[Title])) AND (waste to energy[Title])) AND (challenges[Title] AND opportunities[Title]) در قسمت عنوان مقالات به صورت فارسی و انگلیسی در پایگاه های اطلاعاتی «Magiran، Wiley و Springer, SID, PubMed, ScienceDirect» جستجو شدند.

پس از عمل جستجو، جمعاً ۲۱۴ مقاله از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۴ میلادی یافت شد که پس از حذف موارد تکراری و نامربوط، به ۱۰۱ مقاله رسید. سپس در مرحله غربالگری، عنوان و چکیده مقالات مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، تعداد ۶۲ مقاله باقی ماند. سپس برای دستیابی به مقالات مرتبط، متن کامل مقالاتِ باقیمانده مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، از داده‌های کمی و کیفی ۲۹ مقاله در مطالعه حاضر، استفاده شد (شکل ۱).

معیار ورود مقالات به مطالعه، مرتبط و متناسب بودن محتوا با موضوع مورد نظر و معیار خروج نیز عدم ارائه اطلاعات کافی پیرامون موضوع و عدم دسترسی به متن کامل مقالات بوده‌است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]



شکل1. فلوچارت جستجوی پریسما

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]

یافته‌ها

افزایش جمعیت و تقاضای انرژی در جهان، تولیدکنندگان را به استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی به ویژه در صنعت نفت و گاز تشویق کرده‌است. این صنایع با فعالیت خود، گازهای گلخانه‌ای را به اتمسفر منتشر کرده و پساب آن‌ها نیز آلاینده‌های خطرناکی برای محیط زیست بوده که در نهایت باعث ایجاد گرمایش جهانی و آلودگی محیطی می‌شوند[۸].

با توجه به اینکه منابع سوخت‌های فسیلی رو به کاهش هستند، باید به دنبال یک منبع انرژی جایگزین و سازگار با محیط زیست باشیم. انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان منابع انرژی پاک در نظر گرفته می‌شوند و به دلیل ماهیت‌شان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند.

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در دنیای امروز، توسعه کارآمد منابع تجدیدپذیر است[۹]. از سوی دیگر، تولید پسماند در کشورهای درحال‌توسعه به دلیل رشد مداوم، صنعتی‌شدن، شهرنشینی و افزایش جمعیت؛ به طور پیوسته در حال افزایش است. مدیریت نادرست پسماندهای جامد شهری، نه تنها اثرات منفی محیط‌زیستی به دنبال دارد؛ بلکه باعث تحت تأثیر قرار گرفتن بهداشت عمومی نیز می‌شود. بنابراین مدیریت جمع‌آوری، تفکیک و دفع ایمن پسماندها، ضروری است[۱۰].

با توجه به مشکلات مربوط به سوخت‌های فسیلی، افزایش درخواست شهروندان برای دستیابی به انرژی تجدیدپذیر و نیز افزایش روزافزون در تولید پسماند؛ لازم است که به فکر راه‌حلی مناسب و کارآمد جهت حل این مسائل باشیم. چندین کشور در سراسر جهان با تمرکز بر منابع انرژی تجدیدپذیر، تلاش‌های قابل توجهی برای یافتن راه‌حلی واقع‌بینانه برای بحران انرژی انجام داده‌اند. در نتیجه این تلاش‌ها، فناوری «تبدیل پسماند به انرژی» بهترین گزینه به عنوان وسیله‌ای برای دستیابی به منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده‌است.

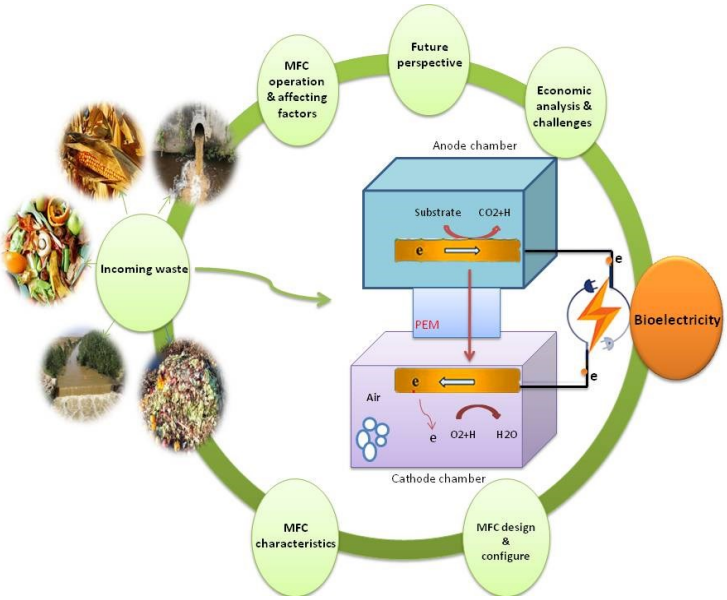
این فناوری پیشرفته، قادر است مقدار قابل توجهی گرما و انرژی از پسماند آلی استحصال کند که در نتیجه، می‌تواند تعدادی از مسائل محیط‌زیستی مرتبط با مدیریت پسماند جامد را کاهش دهد. این فناوری، همچنین باعث کاهش اثرات سوء سوخت‌های فسیلی؛ مانند گازهای گلخانه‌ای، گرمایش جهانی و تغییرات آب‌وهوایی نیز می‌شود.

در میان روش‌های موجود تبدیل پسماند به انرژی، سلول‌های سوختی میکروبی چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای در تبدیل مستقیم پسماند به انرژی می‌باشند. سلول سوختی میکروبی، یک فناوری دوستدار محیط‌زیست است که از میکروارگانیسم‌ها به عنوان کاتالیزور زیستی برای تولید برق استفاده می‌کند. این فناوری در مقایسه با هضم بی‌هوازی متعارف، ظرفیت بیشتری را با بازده استحصال انرژی بالاتر از پسماند نشان می‌دهد. به طور معمول، رویکرد بی‌هوازی معمولی، بیوگاز را از پسماند تولید می‌کند که مستعد آنتروپی ۶۵ درصدی است که در طی تبدیل احتراق به برق، از دست می‌رود. علاوه بر آن، شرایط سختی مورد نیاز است که به موجب آن H_2S موجود باید از جریان احتراق حذف شود تا از تولید SO_X جلوگیری شود. درمقابل، چنین عملیاتی برای سلول سوختی میکروبی لازم نیست؛ زیرا این فناوری، عمدتاً CO_2 تولید می‌کند[۱۰-۱۴].

سلول‌های سوختی میکروبی، سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی هستند که از طریق واکنش کاتالیستی میکروارگانیسم‌ها، انرژی شیمیایی موجود در ترکیبات آلی را در شرایط بی‌هوازی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. در واقع، باکتری‌ها قادرند مواد آلی را اکسید کرده و الکترون‌ها را به کاتد سلول سوختی میکروبی منتقل کنند که در نتیجه، جریان الکتریکی ایجاد خواهد شد (شکل ۲)؛ اما در صورتی که گاز اکسیژن در محفظه آند سلول سوختی وجود داشته باشد، فرایند تولید برق متوقف خواهد شد. بنابراین، طراحی یک سیستم که بتواند از واکنش اکسیژن با باکتری‌ها جلوگیری کند، مورد نیاز است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]



شکل 2. خلاصه‌ای از فرایند تولید بیوالکتریسیته از پسماندهای آلی در سلول‌های سوختی میکروبی

تقریباً همه سلول‌های سوختی میکروبی، از محفظه‌های آند و کاتد ساخته شده‌اند که به طور فیزیکی توسط یک غشای تبادل پروتون (PEM: Proton Exchange Membrane) از هم جدا شده‌اند. بیوکاتالیست فعال در آند، بسترهای آلی را اکسید می‌کند و در نتیجه فعالیت خود، الکترون و پروتون ایجاد می‌کند. غشای تبادل پروتون، پروتون‌ها را به محفظه کاتد منتقل کرده و مدار خارجی الکترون‌ها را به کاتد منتقل می‌کند تا مدار کامل شود. این مراحل به طور همزمان برای تولید برق و حذف پسماندهای آلی اتفاق می‌افتند.

بیوفیلم، در طول زمان به دلیل فعالیت میکروبی روی سطح الکترود تشکیل می‌شود. بیوفیلم همچنین در عبور الکترون‌ها از میکروارگانیسم به آند کمک کرده و سرعت تجزیه ترکیبات آلی را افزایش می‌دهد[۱۱،۱۵-۱۷].

بر اساس طراحی، سلول‌های سوختی میکروبی را می‌توان به دو نوع تقسیم کرد: ۱) تک محفظه؛ و ۲) دو محفظه. سلول سوختی دو محفظه‌ای، شامل محفظه‌های آندی و کاتدی مجزا می‌باشد. حال اگر آند و کاتد، هر دو در یک محفظه باشند، سلول سوختی از نوع تک محفظه‌ای خواهد شد[۱۸]. عملکرد سلول‌های سوختی میکروبی تا حد زیادی به طراحی راکتور و بخش‌های مجزای آن بستگی دارد[۱۹].

بستر سلول‌های سوختی میکروبی

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های سلول سوختی، بسترهای مورد استفاده در آن به دلیل تأثیری که در تولید برق می‌گذارند، است. به همین دلیل در مطالعات، کارایی سوبستراهای مختلف؛ از جمله استات، گلوکز، لاکتات وغیره را به عنوان بستر سلول‌های سوختی بررسی کرده‌اند که در میان آن‌ها معمولاً توان خروجی استات بالاتر بوده و در نتیجه، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همچنین می‌توان پسماندهای مواد غذایی، فضولات حیوانی، لجن فاضلاب و نیز ترکیبات لیگنوسلولزی مشتق‌شده از بقایای کشاورزی را به عنوان بستر برای تولید برق استفاده کرد. تولید انرژی با استفاده از فناوری مذکور، به غلظت لایهٔ بستر بستگی دارد؛ بطوری که اگر غلظت بستر از حد معینی بیشتر شود، تولید برق با مشکل مواجه خواهد شد[۱۶،۲۰].

اثر آند در سلول‌های سوختی میکروبی

یک محفظه آند، از میکروارگانیسم، واسطه (که اختیاری است)، بستر، الکترود و گیرندهٔ الکترود تشکیل شده‌است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]

انرژی فعال‌سازی مورد نیاز برای واکنش آند، باید متناسب با کاتالیزورها کاهش یابد. کاتالیزورها، معمولاً باکتری‌های موجود در محفظه آند هستند (به همین دلیل است که در این سیستم، به آن‌ها «بیوکاتالیست» نیز گفته می‌شود). در واقع، محفظه آند محل اکسیداسیون می‌باشد.

اثر کاتد در سلول‌های سوختی میکروبی

پروتون‌های تولیدشده در محفظه آند، توسط غشای تبادل پروتون به کاتد منتقل می‌شوند و در نتیجه، مدار کامل می‌شود. محفظه کاتد، شامل یک گیرنده الکترون و یک الکترود کاتدی می‌باشد. در حقیقت، محفظه کاتد محل احیا است[۱۶،۱۱].

برای ارزیابی عملکرد سلول سوختی، انتخاب الکترودهای مناسب بسیار مهم است؛ زیرا مواد تشکیل‌دهنده الکترود، بر چسبندگی باکتری، انتقال الکترون و کارایی شیمیایی آن تأثیرگذار است. سازگاری زیستی، پایداری شیمیایی، مقاومت در برابر خوردگی و استحکام مکانیکی کافی؛ عوامل دیگری هستند که برای مواد تشکیل‌دهنده الکترود آندی مهم هستند. در نتیجه فعالیت سلول سوختی، اختلاف پتانسیل بین الکترودهای آند و کاتد را می‌توان به صورت ولتاژ در واحد زمان اندازه‌گیری کرد.

تعدادی از مواد الکترودی که معمولاً در این سلول‌ها استفاده می‌شوند، عبارتند از: کاغذ کربن، پارچه کربن، نمد کربن، نمد فیبر کربن فعال، نمد گرافیت، کاربید تنگستن و فویل گرافیت. مواد کربنی، مواد للکترودی رایج مورد استفاده در سلول‌های سوختی هستند. افزودن مواد کربنی؛ مانند گرانول‌های گرافیت، گرانول‌های کربن فعال و پودر کربن فعال به محفظه کاتد، باعث افزایش تولید برق می‌شود.

غشای تبادل پروتون

غشای تبادل کاتیونی (پروتونی)، به دلیل توانایی در انتقال پروتون بین الکترودها است که با این نام شناخته شده‌است. یک غشای تبادل پروتونی، به عنوان یک مانع فیزیکی بین محفظه آند و کاتد عمل می‌کند و از انتقال اکسیژن و مواد معدنی بین دو محفظه، جلوگیری می‌کند. از بین غشاهای پروتونی موجود، غشای «Nafion» یکی از رایج ترین غشاهای مورد استفاده در سلول‌های سوختی میکروبی است. با این حال، هزینهٔ بالای این غشا، یکی از جنبه‌های منفی آن می‌باشد.

برای انتخاب غشای مناسب، مهم است که پارامترهای تأثیرگذار؛ مانند هدایت یونی، نرخ انتقال پروتون، میزان مقاومت داخلی، میزان رسوب زیستی، پایداری مکانیکی و حرارتی و هزینه عملیات نیز در نظر گرفته شود[۲۱،۲۰].

بحث

هر سیستمی که برای تجاری‌سازی در نظر گرفته می‌شود، ابتدا باید از یک ارزیابی اقتصادی عبور کند که سیستم را تأیید کرده تا سرمایه‌گذاران را جذب را فراهم کند. سلول‌های سوختی‌سودآوری و امکان تجاری‌سازی میکروبی، با وجود مزایایی که دارند، ضعف‌هایی نیز دارند که مهم‌ترین آن، هزینه سرمایه‌گذاری بالاست. به طور کلی، الکترودهای مورد نیاز برای آند و کاتد پرهزینه هستند. با این حال، می‌توان با استفاده از الکترودهای مشتق‌شده از پسماندها، هزینه‌ها را تا حدی کاهش داد[۲۲-۲۴].

غشای تبادل پروتون، یکی دیگر از اجزای پرهزینه در سلول‌های سوختی میکروبی بوده که حدود ۴۰ درصد هزینه سیستم را به خود اختصاص می‌دهد. استفاده از بیوچار تولیدشده از پسماندهای آلی، یک ماده جدید کم‌هزینه است که می‌تواند در یک غشای تبادل پروتون گنجانده شود تا در سلول‌های سوختی مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از این غشا، می‌توان هزینه مورد نیاز برای غشا را تا ۳۷ درصد (نسبت به غشای Nafion) کاهش داد[۲۵].

فرصت‌ها و چالش‌ها

استفاده از پسماندهای آلی در سلول‌های سوختی میکروبی، آن را به یک دستگاه سازگار با محیط‌زیست تبدیل می‌کند که مزایای دوگانه تولید بیوالکتریسیته و مدیریت پسماند را ارائه می‌دهد[۲۶]. استفاده از این فناوری در قالب یک منبع

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]

جایگزین برای تولید برق، به عنوان یک فرایند قابل اعتماد و کارآمد در نظر گرفته می‌شود که از روش‌های تجدیدپذیر استفاده کرده و هیچ محصول جانبی سمی تولید نخواهد کرد[۱۸].

از دیگر مزایای سلول‌های سوختی میکروبی، می‌توان به کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی (در نتیجه، کاهش انتشار آلاینده‌های جوّی) اشاره کرد. همچنین این سیستم دارای اجزای متحرک نبوده و منجر به ایجاد آلودگی صوتی قابل توجهی نمی‌شود و به شرایط و محیط عملیاتی نیز حساس نیست[۲۷].

این سلول‌های سوختی می‌توانند انرژی کافی برای تأمین انرژی دستگاه‌های الکترونیکی کوچک، کندانسورها و یا برای کاربردهایی با توان بالاتر در مدت زمان بسیار کوتاهی تولید کنند[۱۳]. همچنین می‌توان از این سیستم به طور گسترده در مکان‌هایی که زیرساخت‌های الکتریکی کافی وجود ندارد، استفاده کرد.

نصب چند نوع سلول سوختی به عنوان اولین طرح توسعه سلول سوختی در کشور ایران مورد توجه قرار گرفت. در این راستا، چند سلول سوختی آزمایشگاهی کوچک توسط «آژانس انرژی‌های نوین ایران» و سایر مناطق تحقیقاتی و دانشگاهی کشور راه‌اندازی شده‌است. همچنین «سازمان گسترش و نوسازی ایران»، «مؤسسه سبز دانشگاه علوم و فناوری ایران»، «دانشگاه صنعتی اصفهان»، «مرکز تحقیقات مواد و انرژی‌های تجدیدپذیر» و سایر بخش‌های خصوصی؛ پروژه‌های متعددی را در زمینه سلول سوختی انجام داده‌اند. با این حال، فناوری سلول سوختی در ایران در آغاز چرخه بلوغ فنی خود است. به همین دلیل، این فناوری در ایران تجاری‌سازی نشده و هنوز وارد بازار نشده‌است.

سلول‌های سوختی میکروبی، اگرچه به عنوان منبع جایگزین انرژی غیرمتعارف در نظر گرفته شده‌اند؛ اما کاربرد آن‌ها در حال حاضر بسیار محدود است. این سیستم، علی‌رغم پایداری و سازگاری با محیط‌زیست، چالش‌هایی نیز دارد؛ از جمله هزینه بالای قطعات برای پیاده‌سازی آن در مقیاس بزرگ، تولید برق محدود و راندمان پایین این سیستم‌ها[۱۹،۲۸،۲۹].

خروجی ولتاژ سلول‌های سوختی میکروبی، کم و ناپایدار است که کارکرد دستگاه را دشوار می‌کند. در نتیجه، قدرت آن برای اجرای سیستم‌هایی مانند حسگرهای زیستی و سایر دستگاه‌های مشابه کافی نیست[۱۳]. همچنین بستر آلی آن، بحرانی‌ترین چالش است، بطوری که پایداری پایین بستر ممکن است بر راندمان اصلاح و تولید انرژی تأثیر داشته باشد؛ زیرا بستر آلی، توان کافی برای جمعیت باکتری فراهم نمی‌کند و خروجی ضعیفی به دنبال خواهد داشت. پایداری طولانی‌مدت بسترهای آلی در سلول‌های سوختی میکروبی برای استفاده صنعتی باید موضوع تحقیقات آینده باشد[۱۶،۲۹].

نتیجه‌گیری

با توجه به بحران انرژی و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، باید به فکر استفاده از منابع تجدیدپذیر باشیم. یکی از این منابع، سلول‌های سوختی میکروبی می‌باشد. این سیستم، یک فناوری پیشرفته برای تولید بیوالکتریسیته می‌باشد که می‌توان از پسماندها برای تولید انرژی استفاده کرد که این امر، خود باعث مدیریت پسماند و کنترل آلودگی می‌شود. محدودیت عمده این فناوری در کنار هزینه بالای پیاده‌سازی، توان خروجی ناپایدار و بسیار کم آن است و افزایش مقیاس کار، منجر به کاهش توان خروجی می‌شود که این، خود دلیل اصلی عدم تجاری‌سازی این فناوری است. با این حال، نیاز است تا با بررسی و کنترل عوامل کاهش راندمان این فناوری در مقیاس‌های وسیع، حیطه کاربرد آن را گسترش داد تا بتوان هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری را توجیه کرد

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]

References

1. Imanthi K, Madusanka D, Pathmalal M, Idroos F. Emerging trends of cyanobacteria-based microbial fuel cells as an alternative energy source. Development in Wastewater Treatment Research and Processes. 2023:99-119.
2. Hoang AT, Nižetić S, Ng KH, Papadopoulos AM, Le AT, Kumar S, et al. Microbial fuel cells for bioelectricity production from waste as sustainable prospect of future energy sector. Chemosphere. 2022;287:132285.
3. Hasan MR, Anzar N, Sharma P, Malode SJ, Shetti NP, Narang J, et al. Converting biowaste into sustainable bioenergy through various processes. Bioresource Technology Reports. 2023:101542.
4. Daniel DK, Mankidy BD, Ambarish K, Manogari R. Construction and operation of a microbial fuel cell for electricity generation from wastewater. International Journal of Hydrogen Energy. 2009;34(17):7555-60.
5. Nookwam K, Cheirsilp B, Maneechote W, Boonsawang P, Sukkasem C. Microbial fuel cells with Photosynthetic-Cathodic chamber in vertical cascade for integrated Bioelectricity, biodiesel feedstock production and wastewater treatment. Bioresource Technology. 2022;346:126559.
6. Verma M, Singh V, Mishra V. Optimization of banana peel waste based microbial fuel cells by machine learning. Biomass Conversion and Biorefinery. 2023;1:1-16.
7. Miran W, Nawaz M, Jang J, Lee DS. Conversion of orange peel waste biomass to bioelectricity using a mediator-less microbial fuel cell. Science of the Total Environment. 2016;547:197-205.
8. Elhenawy S, Khraisheh M, AlMomani F, Al-Ghouti M, Hassan MK. From waste to watts: Updates on key applications of microbial fuel cells in wastewater treatment and energy production. Sustainability. 2022;14(2):955.
9. Enamala MK, Dixit R, Tangellapally A, Singh M, Dinakarrao SMP, Chavali M, et al. Photosynthetic microorganisms (Algae) mediated bioelectricity generation in microbial fuel cell: Concise review. Environmental Technology & Innovation. 2020;19:100959.
10. Malav LC, Yadav KK, Gupta N, Kumar S, Sharma GK, Krishnan S, et al. A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities. Journal of Cleaner Production. 2020;277:123227.
11. Pandit C, Thapa BS, Srivastava B, Mathuriya AS, Toor U-A, Pant M, et al. Integrating Human Waste with Microbial Fuel Cells to Elevate the Production of Bioelectricity. BioTech. 2022;11(3):36.
12. Mbazima SJ, Masekameni MD, Mmereki D. Waste-to-energy in a developing country: The state of landfill gas to energy in the Republic of South Africa. Energy Exploration & Exploitation. 2022;40(4):1287-312.
13. Ramya M, Kumar PS. A review on recent advancements in bioenergy production using microbial fuel cells. Chemosphere. 2022;288:132512.
14. Roy H, Rahman TU, Tasnim N, Arju J, Rafid MM, Islam MR, et al. Microbial Fuel Cell Construction Features and Application for Sustainable Wastewater Treatment. Membranes. 2023;13(5):490.
15. Mohseni M, Akrami Sm. Electricity production in two-chamber microbial fuel cells using exoelectrogenic Shewanella sp. isolated from sediments of the Caspian Sea. Journal of molecular cell research. 2018;30(2):198-211
16. Fadzli FS, Bhawani SA, Adam Mohammad RE. Microbial fuel cell: recent developments in organic substrate use and bacterial electrode interaction. Journal of Chemistry. 2021;1:1-16.
17. Aleid GM, Alshammari AS, Ahmad ARD, Hussain F, Oh S-E, Ahmad A, et al. Advancement in microbial fuel cells technology by using waste extract as an organic substrate to produce energy with metal removal. Processes. 2023;11(8):2434.
18. Chaturvedi V, Verma P. Microbial fuel cell: a green approach for the utilization of waste for the generation of bioelectricity. Bioresources and Bioprocessing. 2016;3:1-14.
19. Dwivedi KA, Huang S-J, Wang C-T, Kumar S. Fundamental understanding of microbial fuel cell technology: Recent development and challenges. Chemosphere. 2022;288:132446.
20. Naha A, Debroy R, Sharma D, Shah MP, Nath S. Microbial Fuel Cell: A State-of-the-Art and Revolutionizing Technology for efficient Energy Recovery. Cleaner and Circular Bioeconomy. 2023:100050.
21. Abbassi R, Yadav AK. Introduction to microbial fuel cells: challenges and opportunities. Integrated Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment. 2020;1:3-27.
22. Trapero JR, Horcajada L, Linares JJ, Lobato J. Is microbial fuel cell technology ready? An economic answer towards industrial commercialization. Applied energy. 2017;185:698-707.
23. Munoz-Cupa C, Hu Y, Xu C, Bassi A. An overview of microbial fuel cell usage in wastewater treatment, resource recovery and energy production. Science of the Total Environment. 2021;754:142429.
24. Yaqoob AA, Ibrahim MNM, Rodríguez-Couto S. Development and modification of materials to build cost-effective anodes for microbial fuel cells (MFCs): An overview. Biochemical Engineering Journal. 2020;164:107779.
25. Chakraborty I, Das S, Dubey B, Ghangrekar M. Novel low cost proton exchange membrane made from sulphonated biochar for application in microbial fuel cells. Materials Chemistry and Physics. 2020;239:122025.
26. Obileke K, Onyeaka H, Meyer EL, Nwokolo N. Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. Electrochemistry Communications. 2021;125:107003.
27. Do M, Ngo H, Guo W, Liu Y, Chang S, Nguyen D, et al. Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: a mini review. Science of the Total Environment. 2018;639:910-20.
28. Ahanchi M, Jafary T, Yeneneh AM, Rupani PF, Shafizadeh A, Shahbeik H, et al. Review on waste biomass valorization and power management systems for microbial fuel cell application. Journal of Cleaner Production. 2022:134994.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]

29. S Mohsen P, Pourfayaz F, Shirmohamadi R, Moosavi S, Khalilpoor N. Potential, current status, and applications of renewable energy in energy sector of Iran: A review. Renewable Energy Research and Applications. 2021;2(1):25-49.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01]

[DOI: 10.61186/jehe.12.1.63]