10.22034/jrenew.2025.215267

سال دوازدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۴، ص ص 189- ۱۹۹

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۴۰۳/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۴۰۳/۱۰/۲۰

مروری بر وضعیت پیل‌های سوختی میکروبی و کاربرد آنها در تصفیه فاضلاب

عرفان عباسیان همدانی[۱*]، سعید طالبی [۲*]

۱- دانشجوی ارشد مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشیار، مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۵۸۷۵۴۴۱۳، sa.talebi@aut.ac.ir, erfan.abbasian@aut.ac.ir

چکیده

باتوجه‌به نیاز روزافزون انرژی در سالیان اخیر، مدیریت منابع انرژی امری ضروری است. این روند روبه‌رشد مصرف انرژی می‌تواند ناشی از صنعتی‌شدن کشورها، افزایش جمعیت و مدرنیته شدن زندگی انسان‌ها باشد. همچنین، توسعه شهرنشینی و صنعت موجب افزایش میزان تولید فاضلاب‌های صنعتی و شهری می‌شود. استفاده افزاینده از منابع سوخت‌های فسیلی و تولید بیشتر فاضلاب، موجب ایجاد نگرانی‌های زیست‌محیطی در جهان شده و نیاز به راه‌حلی جایگزین برای مدیریت این مسائل می‌باشد. پیل‌های سوختی میکروبی یکی از راهکارهای بالقوه مناسب برای تصفیه فاضلاب و تولید انرژی پاک می‌باشند. انرژی شیمیایی اجزاء پساب توسط باکتری‌ها به الکتریسیته تبدیل شده و می‌تواند به‌عنوان منبعی قابل‌اتکا برای تولید برق زیستی و پاک در نظر گرفته شود. این فرایند موجب تصفیه هم‌زمان فاضلاب‌ها و تولید الکتریسیته سبز می‌شود که می‌تواند از انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی بکاهد. هرچند هنوز استفاده از این فناوری به دلیل مشکلات اقتصادی و توان خروجی پایین در مقیاس بزرگ امکان‌پذیر نیست، پیش‌بینی می‌شود زمینه استفاده گسترده از این فناوری با پیشرفت آن هموار شود. در این مقاله پیل‌های سوختی میکروبی از جنبه‌های مختلف مانند اجزا و ساختارهای متفاوت معرفی شده‌اند. به‌علاوه کاربردهای آنها در بخش‌ها و صنایع مختلف به طور جامع مرور شده و پیشنهاداتی برای آینده بیان شده است. به‌طورکلی این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مرجعی جامع برای پژوهش‌های تکمیلی در این زمینه مدنظر قرار گیرد.

کلیدواژگان: پیل سوختی میکروبی، تصفیه فاضلاب، انرژی پاک، ساختارهای پیل سوختی میکروبی، انرژی زیستی

A review of the status of microbial fuel cells and their applications in wastewater treatment

Erfan Abbasian Hamedani[1*], Saeed Talebi[2*]

1-Master Student, Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 158754413 Tehran, Iran, erfan.abbasian@aut.ac.ir, sa.talebi@aut.ac.ir

Received: ۱۰ July 2024 Accepted: 09 January 2025

Abstract

Due to the rising energy demands in recent years, energy resource management has become essential. This upward trend in energy consumption can be attributed to the industrialization of countries, population growth, and the modernization of human lifestyles. Additionally, the development of urbanization and industry has led to an increase in the production of industrial and urban wastewater. The growing use of fossil fuel resources and the increase in wastewater production have prompted global environmental concerns, necessitating alternative solutions for managing these issues. Microbial fuel cells (MFCs) present a highly promising solution for wastewater treatment and clean energy production. The chemical energy of wastewater components is converted into electricity by bacteria and can be considered a reliable source for producing clean and biological electricity. This process simultaneously treats wastewater and generates green electricity, which can reduce the emissions of environmental pollutants. Although the use of this technology is still not feasible on a large scale due to economic challenges and low output power, it is anticipated that the widespread use of this technology

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

will be facilitated by advancements in this field. In this paper, microbial fuel cells are introduced from various perspectives, including their components and different structures. Furthermore, their applications in various sectors and industries have been comprehensively reviewed, and suggestions for the future have been presented. Overall, this research can be considered a comprehensive reference for further studies in this field.

Keywords: Microbial fuel cell, Wastewater treatment, Clean energy, MFC configurations, Bioenerg

۱- مقدمه

از گذشته تا به امروز نیاز بشر به منابع آب پاک امری انکارناپذیر برای بقا و پیشرفت بوده است. به‌طوری‌که وجود منابع آب پاک برای توسعه جوامع بشری ضروری می‌باشد. باتوجه‌به افزایش جمعیت و روند صنعتی‌شدن کشورها میزان تولید فاضلاب در جهان روندی صعودی داشته است. تمام بخش‌ها از قبیل صنعت، خانگی، کشاورزی، و غیره در افزایش میزان فاضلاب نقش دارند. این فاضلاب‌ها می‌تواند اثری نامطلوب بر روی محیط‌زیست و جامعه داشته باشند و نیاز است میزان تولید آن کنترل شود [۱, ۲].

درحال‌حاضر، فرایندهای تصفیه فاضلاب نیاز به سرمایه‌گذاری زیادی دارند و بسیار انرژی بر هستند. علاوه بر این، این فرایندها منجر به تولید میزان زیادی از آلاینده‌های زیست‌محیطی مانند کربن‌دی‌اکسید و متان به محیط می‌شوند که باعث افزایش گرمایش جهانی و اثرات نامطلوب بر تغییرات اقلیمی می‌شود. به‌عنوان‌مثال، نزدیک به ۱۵۰۰ تن از گازهای گلخانه‌ای برای تصفیه ۱۰۰۰ تن فاضلاب تولید می‌شود. در ایالات متحده امریکا انرژی موردنیاز ۹.۶ میلیون خانوار که معادل ۱۱۰ تراوات ساعت است برای فرایندهای تصفیه فاضلاب مصرف می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت فناوری‌های حاضر در فرایند تصفیه فاضلاب مناسب توسعه پایدار نیستند و یافتن راه‌حلی جایگزین برای این مسئله ضروری می‌باشد [۳].

در دهه اخیر، فناوری پیل سوختی میکروبی[1] به دلیل پتانسیل تولید هم‌زمان برق و تصفیه فاضلاب به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. موضوع قابلیت تولید الکتریسیته از طریق تجزیه مواد آلی به‌واسطه میکروارگانیسم‌ها توسط پاتر در سال ۱۹۱۱ مطرح شد و فناوری پیل سوختی میکروبی از اواخر دهه ۸۰ میلادی مورد مطالعه قرار گرفت [۴]. در این روش انرژی شیمیایی ذخیره شده در مواد آلی قابل‌تجزیه به طور مستقیم با استفاده از سلول‌های سوختی میکروبی به برق تبدیل می‌شود. این فناوری همچنین می‌تواند برای تولید برق، تصفیه فاضلاب، زیست پالایی فلزات سنگین و مواد شیمیایی سمی مورداستفاده قرار گیرد [۵]. ازاین‌رو با توجه با قابلیت‌های پیل سوختی میکروبی، این فناوری راهکاری جذاب در جهت توسعه پایدار می‌باشد. بااین‌وجود هنوز مشکلاتی از قبیل هزینه بالای تجاری‌سازی و راندمان پایین وجود دارد. هرچند در چند سال گذشته عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی بسیار بهبود یافته است [۶, ۷].

پیل‌های سوختی میکروبی انواع مختلفی دارند و در تصفیه فاضلاب و مواد شیمیایی صنایع مختلف عملکرد خوبی نشان داده‌اند. باتوجه‌به انعطاف‌پذیری این فناوری، می‌توان از آن در مناطق روستایی و همشهری استفاده کرد که به مدیریت منابع آب کمک شایانی می‌کند. به‌علاوه تصفیه فاضلاب این فناوری برق پاک نیز تولید می‌کند که یکی از موارد موردنیاز برای گذار به آینده سبز است و می‌تواند انتشارات گازهای آلاینده به محیط‌زیست را کم کند [۸]. در جدول ۱ مقایسه‌ای بین فناوری پیل سوختی میکروبی و فناوری‌های معمول انجام شده است [۴].

جدول ۱ مقایسه بین فناوری پیل سوختی میکروبی و سایر فرایندهای تصفیه فاضلاب [۴]

فرایند تصفیه فاضلاب	کارایی تصفیه	تولید لجن	بار اعمال شده	تعادل انرژی
لجن فعال معمولی[2]	بالا	بالا	کم	-
هضم بی‌هوازی[3]	معمولی	کم	بالا	-
پیل سوختی میکروبی	معمولی	کم	کم	+

این مقاله علمی‌ترویجی به ابعاد مختلفی از پیل‌های سوختی به دلیل پتانسیل کاربردها و مزایایشان می‌پردازد. در این مقاله فاکتورهای مختلفی همچون اجزاء، ساختارهای متفاوت و کاربرد پیل‌های سوختی میکروبی موردمطالعه قرار می‌گیرد. براین‌اساس، انتظار می‌رود این مطالعه به گسترش دانش‌پایه پیل‌های سوختی میکروبی بر اساس توضیحات مختلف کمک کند.

۲- مشخصات کلی پیل سوختی میکروبی

پیل سوختی میکروبی فناوری‌ای دوستدار محیط‌زیست می‌باشد که در کنار تصفیه فاضلاب و حذف مواد شیمیایی می‌تواند برق پاک نیز تولید کند. عموماً پیل سوختی میکروبی شامل محفظه‌های آندی و کاتدی و محیطی برای تبادل یون‌ها می‌باشد. الکترود آند و کاتد در محفظه‌های آندی و کاتدی قرار دارند. در محفظه آند، میکروب‌ها تحت شرایط بی‌هوازی اکسید شده و کربن‌دی‌اکسید و الکترون تولید می‌کنند [۹]. باکتری‌ها این الکترون‌ها را به الکترود آند منتقل می‌کنند. در مدار خارجی، الکترون‌ها به محفظه کاتد منتقل شده و اختلاف‌پتانسیل ایجاد می‌شود. برای حفظ تعادل الکتریکی، پروتون‌های تولید شده از طریق غشای تبادل پروتون به محفظه دیگر منتقل می‌شوند. در محفظه کاتد، فرایند کاهش انجام می‌شود و با مصرف اکسیژن، پروتون‌ها و الکترون‌ها، آب تولید می‌شود. اکسیژن به دلیل فراوانی و پایداری، معمولاً به‌عنوان پذیرنده الکترون استفاده می‌شود [۱۰, ۱۱]. محققان عموماً برای بررسی عملکرد پیل سوختی میکروبی بر انواع مختلف فاضلاب فاکتورهایی مانند راندمان کولمبیک[4]، نرخ حذف میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی[5] (COD) و غلظت ماده اولیه بر روی میزان توان تولیدی می‌سنجند.

[1] Microbial fuel cell
[2] Conventional Activated Sludge
[3] Anaerobic Digestion
[4] Coulombic efficiency
[5] Chemical oxygen demand (COD) removal rate

نرخ حذف میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی به بهره‌وری از حذف میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی از فاضلاب، به میزان حذف شده در هر واحد زمان اشاره دارد. کارایی پیل‌های سوختی میکروبی در این زمینه تحت‌تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد، از جمله رشد هوازی که توسط انتشار اکسیژن از طریق کاتد تسهیل می‌شود، رشد میکروبی و مساحت‌های سطح الکترودها در غیاب تولید جریان. در زیر فرمول نرخ حذف میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی نمایش داده است [۱۲].

$$\text{نرخ حذف COD} = \frac{COD_0 - COD_t}{COD_0} \quad (۱)$$

که در فرمول بالا COD_0 میزان اکسیژن‌خواهی در لحظه اولیه و COD_t میزان اکسیژن‌خواهی در لحظه t می‌باشد.

راندمان کولمبیک یکی از پارامترهای مهم در پیل سوختی میکروبی است. این پارامتر به نسبت الکترون‌های دریافت شده از ماده‌ها اطلاق می‌شود. راندمان کولمبیک نسبت مستقیمی با دانسیته جریان دارد به این معنا که در دانسیته جریان بالاتر راندمان کولمبیک مقدار بیشتری دارد [۱۳].

$$CE = \frac{M\int_0^t Idt}{Fbv_{An}\Delta COD} \quad (۲)$$

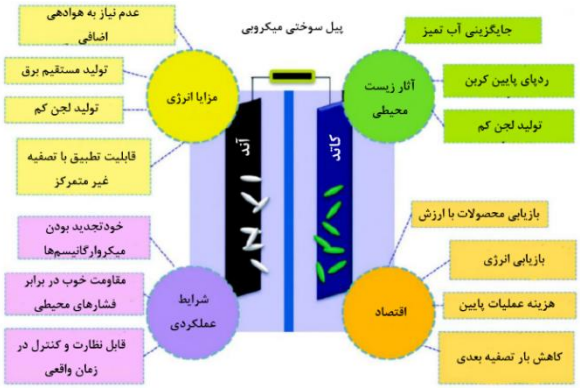
که در آن M وزن جرمی اکسیژن، F ثابت فارادی، v_{An} حجم مایع داخل محفظه آند، b تعداد الکترون های مباله شده به ازای هر مول اکسیژن، ΔCOD تغییرات میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی در زمان t.

همچنین در حالت پیوسته، راندمان کولمبیک بر اساس جریان تولید شده در شرایط حالت پایدار محاسبه می‌شود [۱۲, ۱۳].

$$CE = \frac{M\,I}{Fbq\Delta COD} \quad (۳)$$

که در آن q نرخ جریان حجمی فاضلاب است.

در شکل ۱ شماتیکی از پیل سوختی میکروبی به همراه ویژگی های آن نمایش داده‌شده است [۱۴].



شکل ۱ شماتیک پیل سوختی میکروبی و ویژگی‌های آن [۱۴]

۳- اجزا و عوامل موثر بر عملکرد پیل سوختی میکروبی

مهم‌ترین اجزاء پیل سوختی میکروبی شامل محفظه آند و الکترود آند[1]، محفظه کاتد و الکترود کاتد[2] و غشا تبادل کننده یون[3] می‌باشد. بااین‌وجود مسائل دیگری چون میکروارگانیسم‌ها، pH و غیره نیز اهمیت دارند [۱۵].

۳-۱- آند

محفظه آند نقش بسیار حیاتی در عملکرد پیل سوختی میکروبی دارد. محفظه آند با مواد مغذی (فاضلاب)، میکروارگانیسم‌ها و واسطه‌ها (با بدون واسطه) پر می‌شود و شرایط بی‌هوازی در آن حاکم است. علاوه بر این، الکترود آند در انواع مختلف در محفظه آند وجود دارد که تأثیر قابل توجهی بر جنبه‌های اقتصادی و قیمت پیل سوختی میکروبی دارد. همچنین، انتخاب صحیح الکترود آند می‌تواند بر راندمان پیل سوختی تأثیر بگذارد [۱۶]. مواد آند باید دارای ویژگی‌های خاصی باشند تا عملکرد بهینه‌ای در پیل‌های سوختی میکروبی داشته باشند. این ویژگی‌ها شامل مقاومت در برابر خوردگی، رسانایی الکتریکی بالا، پایداری شیمیایی و مکانیکی، زیست‌سازگاری، و سطح مقطع گسترده می‌باشند. این ویژگی‌ها نه‌تنها باعث افزایش کارایی سلول‌های سوخت میکروبی می‌شوند، بلکه هزینه‌های نگهداری و جایگزینی را نیز کاهش می‌دهند [۱۷]. میله‌های گرافیتی، پارچه‌های کربنی و برس‌های فیبر گرافیتی از جمله مواد مبتنی بر کربن هستند که به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردشان در آندها به کار می‌روند. این مواد دارای سطح مقطع و کارایی بالایی هستند و در عین حال هزینه نسبتا پایینی دارند [۱۸]. سایر موادی که به‌عنوان آند در استفاده می‌شوند شامل کاغذ کربنی، کربن شیشه‌ای متخلخل، مس، فولاد ضدزنگ، و کربن فعال گرانولی هستند [۱۹].

برخی از فلزات واسطه مانند مس، تیتانیوم و نیکل نیز برای ساخت الکترودهای آند به‌کار رفته‌اند. این فلزات رسانایی و استحکام بیشتری به ارمغان می‌آورند. بااین‌حال، به دلیل نیاز به پوشش‌دهی سطحی، تمایل به تشکیل بیوفیلم بر روی الکترودهای فلزی آندی کاهش می‌یابد. برخی اصلاحات سطحی ممکن است به رفع مشکلات زیست‌سازگاری و چسبندگی کمک کنند [۲۰]. یک مطالعه اخیر نشان داده است که اصلاح آئروژل کربن معمولی[4] با نانولوله‌های دی‌اکسید سریم (CeO_2) و صفحات نانویی گرافن اکسید کاهش‌یافته دوپ‌شده با نیتروژن[5] می‌تواند به طور قابل‌توجهی چگالی توان را تا ۱۴۶۸ میلی‌وات بر مترمربع افزایش دهد. همچنین، این آئروژل کربن بهبود یافته یک راه‌حل مقرون به صرفه برای ساخت آند ارائه می‌دهد، زیرا از کاغذ باطله به دست می‌آید [۲۱].

مواد کربنی دارای رسانایی الکتریکی خاص، ویژگی‌های مکانیکی، پایداری شیمیایی و زیست‌سازگاری هستند. نانولوله‌های کربنی[6] (CNTs) و گرافن به‌عنوان مواد نانوساختار با نسبت سطح به حجم بالا، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این مواد به دلیل پتانسیل بالای خود به‌عنوان مواد آندی در سلول‌های سوخت میکروبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هر دو آلوتروپ[7] کربن، یعنی CNTs و گرافن، دارای ویژگی‌های مطلوبی مانند سطح ویژه بالا، پایداری مکانیکی عالی، رسانایی بالا، دوام شیمیایی، قابلیت ساخت میکرو در حالت دسته‌ای، زیست‌سازگاری و ویژگی‌های الکتروشیمیایی مناسب هستند. بااین‌حال، هزینه بالای این مواد همچنان یک چالش محسوب می‌شود [۲۲]. با

[1] Anode electrode
[2] Cathode electrode
[3] Ion exchange membrane
[4] Conventional carbon aerogel
[5] Nanotubes decorated nitrogen-doped reduced graphene oxide nanosheets (NRGO)
[6] Carbon nanotubes (CNTs)
[7] Allotrope

وجود این چالش‌ها، ویژگی‌های منحصربه‌فرد این مواد، آن‌ها را به گزینه‌ای جذاب برای بررسی و توسعه بیشتر در کاربردهای پیل سوختی میکروبی تبدیل کرده‌است. علاوه بر این، محفظه چاپ سه‌بعدی می‌تواند با تعویض ساده کاغذ بازیافت شود که باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود و الکترود CNTs می‌تواند با مواد سطحی پیشرفته‌تر اصلاح شود [۲۳].

۳-۲- کاتد

کاتد یکی دیگر از اجزای مهم پیل سوختی میکروبی است که انتخاب درست آن می‌تواند بر عملکرد پیل تأثیر بسزایی بگذارد. الکترود کاتد باید دارای ویژگی‌هایی همچون خوردگی کم، رسانایی الکتریکی خوب، تخلخل بالا و سطح مخصوص بالا باشد. مواد کاتدی باید دارای پتانسیل اکسایش - کاهش بالا باشند تا عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی را بهبود بخشند. الکترون‌ها و یون‌ها به ترتیب از طریق مدار خارجی و غشای تبادل پروتون[1] (PEM) به محفظه کاتد هوازی از محفظه آند منتقل می‌شوند. مولکول‌های آب با بازترکیب الکترون‌ها و پروتون‌ها در الکترود کاتد و کاهش اکسیژن تشکیل می‌شوند. از این طریق، میکروب‌ها و کاتالیست‌های غیرزیستی می‌توانند کاهش اکسیژن را تسهیل کنند [۲۴]. در طی عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی، اکسیژن به‌عنوان یکی از کارآمدترین پذیرنده‌های الکترون در کاتد عمل کرده و توان قابل‌توجهی تولید می‌کند. سینتیک بهینه واکنش کاهش اکسیژن[2] (ORR) تولید توان مؤثر در پیل را تقویت می‌کند؛ بنابراین، کاتد می‌تواند با استفاده از یک کاتالیست فعال بهبود پیدا کند [۲۵]. عموماً کاتالیست‌های بر پایه پلاتین به دلیل کاهش انرژی فعال‌سازی و افزایش نرخ واکنش کاتد به‌عنوان کاتالیست مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرچند موانعی چون قیمت بالا و دردسترس نبودن، استفاده گسترده از پلاتین را به‌عنوان کاتالیست محدود می‌سازد. اکثر موادی که به‌عنوان الکترود آند مورد استفاده قرار می‌گیرند توانایی به‌کارگیری برای الکترود کاتد را نیز دارا هستند [۲۶]. پارچه کربنی، الیاف کربنی، گرافیت دانه‌ای و کاغذ کربنی به طور منظم به‌عنوان مواد کاتدی استفاده می‌شوند. تلاش‌های زیادی برای کاهش هزینه پیل‌های سوختی میکروبی از طریق جایگزینی الکترودهای پلاتین با مواد ارزان‌تر در حال انجام است. کربن فعال، نانولوله‌های کربنی و مس، دیگر انواع الکترودهای کاتدی هستند. CNTها می‌توانند با افزایش سطح، چگالی توان پیل‌های سوختی میکروبی را به حداکثر برسانند که کاهش اکسیژن در محفظه کاتد را تقویت می‌کند [۲۷].

۳-۳- غشا تبادلگر یون

یکی دیگر از اجزاء مهم پیل‌های سوختی میکروبی که تأثیر مهمی بر اقتصاد و عملکرد آن دارد، غشا تبادلگر یون است. غشا تبادلگر پروتون (PEM) یکی از پرکاربردترین جداکننده‌ها است. این جداکننده‌ها علاوه بر فراهم‌کردن تبادل پروتون‌ها، محفظه‌های آندی و کاتدی را از یکدیگر جدا می‌کند و مانع ورود اکسیژن به محفظه آندی می‌شود [۲۸]. جداکننده‌ها می‌توانند شامل ۶۰ درصد هزینه پیل‌های سوختی میکروبی را شامل شوند. غشاهای تبادلگر پروتون باید دارای ویژگی‌هایی مانند هدایت پروتون بالا، خواص تفکیکی، استحکام و دوام در برابر حرارت و مواد شیمیایی باشند [۲۹]. به‌طور خاص، غشاهای تبادلگر پروتون با کاهش مقاومت داخلی و جلوگیری از تلفات ناشی از پلاریزاسیون، می‌توانند بازده کولمبیک را افزایش داده و توان خروجی سلول را بهبود بخشند. علاوه بر این، این غشاءها در کاهش نفوذ مواد آلی و محدودسازی انتقال اکسیژن به محفظه آند نقش بسزایی دارند، که این عوامل در حفظ شرایط بی‌هوازی و عملکرد بهینه سلول‌های سوختی میکروبی حائز اهمیت است [۳۰, ۳۱]. نفیون[3] یک ماده غشا تبادل پروتون پرکاربرد است که به دلیل هدایت پروتونی بالا و پایداری شیمیایی‌اش شناخته شده است [۳۲]. پیل‌های سوختی میکروبی بدون فلز و سرامیکی به‌عنوان جایگزین‌های اقتصادی‌تر مورد مطالعه هستند. علاوه‌براین، استفاده از مواد زائد قابل بازیافت مانند الیاف نایلون، شیشه، کیسه‌های خرید تجزیه‌پذیر و مواد غیرمتعارف مانند لاستیک طبیعی استخراج شده از دستکش‌های آزمایشگاهی، نویدبخش حل مشکلات مالی و زیست‌محیطی است [۳۳].

پل نمکی می‌تواند به‌عنوان جایگزین دیگری برای غشا تبادل پروتون باشد. این پل نمکی که شامل آگار[4] و نمک یونی (مانند NaOH یا KCl) است، ابتدا ذوب شده و سپس در قالب استوانه‌ای ریخته می‌شود تا جامد گردد [۳۲]. پل جامد شده سپس بین محفظه‌های پیل سوختی میکروبی قرار می‌گیرد که به‌عنوان یک غشا تبادل پروتون عمل کرده و انتقال پروتون‌ها را تسهیل می‌کند. غلظت ۵٪ نمک برای آماده سازی پل نمکی برای دستیابی به حداکثر توان خروجی مناسب‌ترین است، همچنین ۱۰٪ آگار برای تولید بیشترین جریان بهینه است [۳۴, ۳۵]. انتشار اکسیژن در محفظه آند نیز می‌تواند به کاهش تولید توان در سیستم پل نمکی منجر شود [۳۶]. عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی را می‌توان با استفاده از پل نمکی بلندتر نیز بهبود بخشید [۳۷].

۳-۴- دما

دما یک فاکتور مهم در عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی می‌باشد. درگیری فعالیت‌های میکروبی اثر دما را مهم‌تر می‌کند؛ زیرا بیشتر جمعیت الکتروژنیک[5] در محدوده دمایی ۲۰-۳۵ درجه سانتی‌گراد فعال هستند. این محدوده دمایی به طور مؤثری نرخ رشد بهینه میکروارگانیسم‌ها و توسعه فیلم زیستی را افزایش می‌دهد و همچنین pH بهینه را در پیل‌های سوختی میکروبی تنظیم می‌کند. همچنین دمای عملیاتی بالاتر مسئول حذف بیشتر تقاضای اکسیژن شیمیایی است. علاوه‌برآن، دما بر خصوصیات سینتیک، انتقال جرم و ترمودینامیکی مثل انرژی فعال‌سازی، راندمان کولمبیک، انرژی آزاد گیبس و پتانسیل‌های الکترود بسیار تأثیرگذار است [۳۸]. عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی در دماهای پایین در محدوده ۴-۳۰ درجه سانتی‌گراد نیاز به زمان راه‌اندازی طولانی‌تری برای تولید توان و عملکرد دارد. در دماهای زیر ۱۵ درجه سانتی‌گراد، پیل‌های سوختی میکروبی حتی پس از یک ماه عملیات نمی‌توانند توان قابل‌توجهی تولید کنند. اما اگر پیل‌های سوختی میکروبی در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد راه‌اندازی شود، تولید توان حتی در دو دمای پایین ۴ درجه سانتی‌گراد و ۱۰ درجه سانتی‌گراد نیز قابل‌دستیابی است [۳۹]. نشان‌داده‌شده است که چگالی توان حداکثر در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد دوبرابر نسبت به دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش‌یافته است. بااین‌حال، با افزایش دما به ۵۰ درجه سانتی‌گراد چگالی توان کاهش شدید چهار برابری را نشان می‌دهد [۴۰].

۳-۵- pH

[1] Proton exchange membrane
[2] Oxygen reduction reaction
[3] Nafion
[4] Agar
[5] electrogenic

مکانیسم عملیاتی پیل‌های سوختی میکروبی شامل تولید پروتون در یک آند است که به سمت کاتد حرکت می‌کند تا با واکنش با اکسیژن، موجب تشکیل آب بشوند. این عملیات حلقه پیوسته منجر به اسیدی شدن آند می‌شود که عمدتاً به دلیل انتشار ناقص پروتون‌ها از طریق غشا است. از سوی دیگر، کاتد به دلیل کاهش راندمان جایگزینی پروتون، با قلیایی‌شدن مواجه می‌شود. این عوامل در نهایت عملکرد یک سلول سوختی میکروبی را محدود می‌کنند و ازاین‌رو باعث ایجاد گرادیان غلظت pH می‌شوند [۳۳]. علاوه بر این، رشد باکتری‌ها نقش کلیدی در تنظیم pH ایفا می‌کند. باکتری‌ها معمولاً در pH نزدیک به خنثی رشد مطلوبی دارند. چنین تغییرات pH برای حمایت از رشد باکتری ممکن است منجر به تغییر سایر پارامترها مانند غلظت یون، تحرک پروتون، پتانسیل غشا و تشکیل بیوفیلم شود [۴۱]. مشاهده شده است که نرخ متابولیک سلول‌های باکتریایی در pH نزدیک به خنثی (حدود ۶.۳-۷.۸) بهینه است. باکتری های اسید زا در pH=۵.۵ فعال هستند و این شرایط با تجزیه مواد باعث تولید هیدروژن می‌شود. افزایش سطح pH در محفظه کاتدی (شرایط قلیایی) نرخ تجزیه مواد و در نتیجه آزادسازی الکترون‌ها را کاهش می‌دهد که منجر به کاهش تولید توان می‌شود. علاوه بر این، افزایش pH محفظه کاتدی از حالت خنثی (۷) به قلیایی (۱۲) توان خروجی را بیشتر کاهش می‌دهد، که این موضوع اهمیت انتخاب یک pH عملیاتی بهینه برای حداکثرسازی تولید انرژی را برجسته می‌کند [۳۳].

۴- انواع و ساختارهای متفاوت پیل سوختی میکروبی

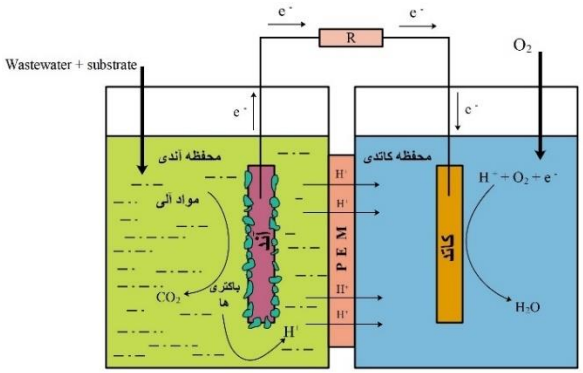
در پاسخ به نیاز فزاینده به منابع انرژی تجدیدپذیر و تصفیه آب، طرح‌های مختلفی از پیل سوختی میکروبی در حال مطالعه هستند. اجزاء اصلی پیل سوختی شامل آند، کاتد و غشا تبادل پروتون در بالاتر معرفی شدند و پیکربندی‌های متفاوت پیل سوختی میکروبی بر مبنا حضور این اجزاء متفاوت است. انواع مختلفی از پیل سوختی میکروبی همانند پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای، تک محفظه‌ای، بالارونده[1]، به‌هم‌پیوسته[2] و غیره وجود دارد که در ادامه معرفی می‌شوند.

۴-۱- پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای

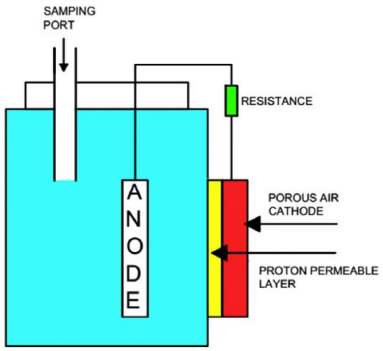
ساختار دو محفظه‌ای یکی از ساختارهای رایج پیل سوختی میکروبی می‌باشد که به ساختار H شکل نیز شناخته می‌شوند. این ساختار متشکل از محفظه آندی، محفظه کاتدی و غشا تبادل پروتون می‌باشد. پروتون‌ها می‌توانند از طریق غشا تبادل پروتون یا پل نمکی که محفظه آند و کاتد را به هم متصل می‌کند، از آند به کاتد بروند. در محفظه آندی که مواد وارد می‌شوند شرایط بی‌هوازی حاکم است و الکترون و کربن‌دی‌اکسید در آن تولید می‌شود [۴۲]. در محفظه کاتدی نیز اکسیژن کاهش می‌یابد و باعث تولید آب می‌شود. این طراحی پیل سوختی میکروبی به مفهوم‌سازی بسیاری دیگر از پیل‌های سوختی میکروبی مانند بالارونده و به‌هم‌پیوسته منجر شده است. در پیل‌های سوختی میکروبی دو محفظه‌ای، معمولاً مس، کاغذ کربنی، پارچه کربنی، گرافیت، شبکه فولادی ضدزنگ و برس‌های کربنی و گرافیتی به‌عنوان الکترودها استفاده می‌شوند [۴۳]. ساختار دو محفظه‌ای می‌تواند به‌صورت پیوسته[3] یا ناپیوسته[4] عمل کند. پیچیدگی این طراحی قابلیت آن برای افزایش مقیاس را محدود می‌کند. در شکل ۲ شماتیک یک پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای نمایش‌داده‌شده است [۴۳].

۴-۲- پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای

پیل سوختی تک محفظه‌ای یک طراحی ساده و مقرون‌به‌صرفه است که در آن محفظه کاتدی وجود ندارد. در این طراحی دیگر نیازی به جریان اکسیژن نمی‌باشد چرا که کاتد در معرض هوا می‌باشد و به دلیل عدم وجود محفظه کاتدی، پیل سوختی کوچک‌تر و قابلیت استفاده آسان‌تری دارد. در ساختار تک محفظه‌ای، هر دو الکترود، یعنی آند و کاتد، بدون غشا تبادل پروتون امکان استفاده دارند. پیل‌های سوختی تک محفظه‌ای ممکن است اشکال مختلفی از محفظه‌ها داشته باشند که در مطالعات مختلف بررسی شده‌اند [۴۱]. در شکل ۳ طراحی از پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای نمایش‌داده‌شده است [۴۲].



شکل۲ نمای مفهومی از پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای [۴۳]



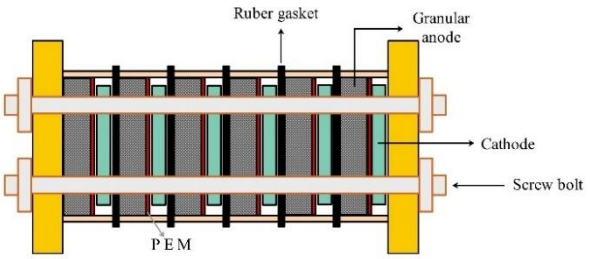
شکل ۳ شماتیک پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای [۴۴]

۴-۳- پیل سوختی میکروبی به‌هم‌پیوسته

یکی از دلایلی که استفاده از پیل‌های سوختی میکروبی در سطح جهان محدود است، توان خروجی پایین آنها می‌باشد. از کاربردهای مهم این سلول‌ها می‌توان به تولید توان و کاهش نرخ حذف اکسیژن‌خواهی اشاره کرد. یکی از راهکارهای افزایش بازدهی پیل‌های سوختی میکروبی به‌هم متصل‌کردن آنها به‌صورت موازی یا سری می‌باشد. موازی‌کردن این سلول‌ها منجر به افزایش جریان و در

[1] Up flow
[2] Stacked
[3] Continuous
[4] Batch

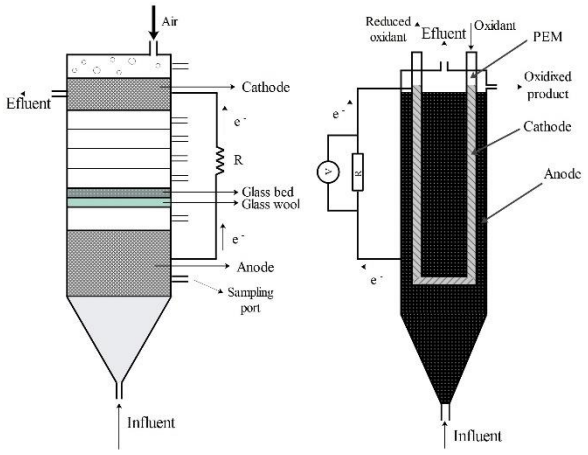
طرف دیگر سری کردن آنها باعث افزایش ولتاژ می‌شود. پیل‌های سوختی به‌هم‌پیوسته نتایج امیدوارکننده‌ای از نظر توان خروجی و نرخ حذف میزان اکسیژن‌خواهی ارائه کرده‌اند [۴۵]. بر اساس گزارش‌های علمی، ساختار موازی به‌کاررفته در پیل‌های سوختی میکروبی دارای بازدهی و حذف COD بهتری نسبت به ساختار سری است که به دلیل نرخ واکنش بیوالکتروشیمیایی بالاتر است [۴۶]. یافته‌ها نشان داد که استفاده از این ساختار به‌هم‌پیوسته در هر دو پیکربندی موازی و سری، پتانسیل قابل‌توجهی برای تولید چگالی انرژی بالا دارد. شکل ۴ یک سلول سوختی میکروبی به‌هم‌پیوسته را نشان می‌دهد.



شکل ۴ طراحی یک نمونه پیل سوختی میکروبی به‌هم‌پیوسته [۴۳]

۴-۴- پیل سوختی میکروبی بالارونده

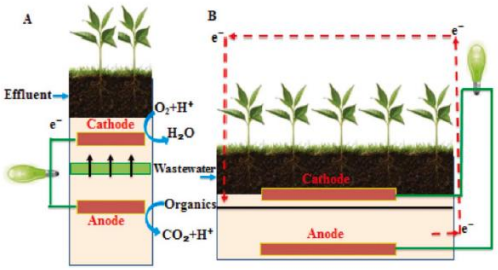
پیل سوختی میکروبی بالارونده یک روش نوآورانه می‌باشد که در آن سیال از پایین وارد سلول می‌شود. مدل‌های مختلفی از مدل بالارونده توسط محققان برای تصفیه فاضلاب مورد بررسی قرار گرفته است. در این طراحی آند در پایین قرار دارد و سیال از آند به سمت بالا به سمت کاتد حرکت کرده و از محفظه در بالا خارج می‌شود [۴۷]. در طراحی پیل‌های سوختی میکروبی بالارونده، آنولیت یا کاتولیت متمایزی وجود ندارد. طراحی بالارونده از لایه‌های پشم‌شیشه و مهره‌های شیشه‌ای به‌عنوان جایگزین غشا تبادل پروتون‌ها برای جداسازی محفظه‌های آندی و کاتدی استفاده می‌کند. حذف غشاها از طراحی بالارونده هزینه‌ها را کاهش می‌دهد اما ممکن است باعث افزایش هزینه‌های مقیاس‌بندی شود. موقعیت بهینه آند و کاتد می‌تواند به طور چشمگیری نفوذ اکسیژن به محفظه آند را کاهش دهد [۴۸]. بااین‌حال، این سلول‌ها دارای محدودیت‌هایی مانند مقاومت داخلی بالا و طراحی پیچیده هستند؛ بنابراین، استفاده از آن‌ها عمدتاً به تحقیقات پایه محدود می‌شود. به‌علاوه، هی[1] و همکاران [۴۹] مدلی از پیل سوختی میکروبی **U** شکل را که در آن کاتد در محفظه آندی قرار دارد را معرفی کردند. در شکل ۵ مدل‌های متفاوت از پیل سوختی میکروبی بالارونده وجود دارد.



شکل ۵ پیل سوختی میکروبی بالارونده [۴۳]

۴-۵- پیل سوختی میکروبی تالاب مصنوعی[2]

یکپارچه‌سازی سلول‌های سوختی میکروبی با تالاب‌های مصنوعی یکی دیگر از طراحی‌های قابل‌قبول است که به آن پیل‌های سوختی میکروبی تالاب مصنوعی می‌گویند. طراحی این ساختار عموماً بر اساس یک پیل سوختی میکروبی بالارونده است. بااین‌حال، این فناوری با عملکرد مناسب و طراحی نوآورانه‌ای همراه است، اما محدودیت‌هایی برای توسعه در مقیاس بزرگ دارد، مانند ساختارهای پیچیده، موانع هزینه‌ای، محل و مواد پایه. بنابراین، مطالعه و توسعه این ساختار از نظر طراحی و خروجی توان، پتانسیل زیادی برای استفاده‌های آینده دارد. در شکل ۶ نمونه ای از پیل سوختی میکروبی تالاب مصنوعی نمایش داده شده است [۳۳].



شکل ۶ مدل عمودی و افقی پیل سوختی میکروبی تالاب مصنوعی [۳۳]

۴-۶- پیل سوختی میکروبی کاغذی

پیل‌های سوختی میکروبی کاغذی پتانسیل زیادی برای کاربردهای آینده دارند. در این ساختار، از ذرات گرافیت به‌عنوان آند و کاتد استفاده می‌شود. همچنین، از کاغذ پوستی به‌عنوان غشا استفاده شده است. این ساختار به دلیل ویژگی‌های مفیدی مانند مقاومت شیمیایی، دفع ساده و ویژگی‌های اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است.

۴-۷- سایر انوع پیل سوختی میکروبی

[1] He

[2] Constructed wetland MFC

پیل‌های سوختی میکروبی انواع مختلفی دارند که بر مبنا ساختار آنها عملکرد آنها می‌تواند متفاوت باشد. انواع دیگر پیل سوختی میکروبی همچون پیل سوختی میکروبی سرامیکی توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است؛ چون می‌توانند هزینه‌ها را کاهش دهند و محیط را برای تجاری‌سازی این فناوری فراهم کنند. وینفیلد و همکاران [۴۲] مزایای استفاده از سرامیک‌ها به‌عنوان تبادلگرهای یونی را به دلیل امکان‌پذیری و صرفه‌جویی اقتصادی نشان دادند. علاوه بر این، گزارش دادند که سرامیک‌ها محیط مناسبی برای رشد باکتری‌ها فراهم می‌کنند و همچنین باعث افزایش بهره‌وری تولید انرژی می‌شوند. این مزایا به دلیل ویژگی‌های سرامیک است که عملکرد جداسازی آن بر اساس اندازه می‌باشد و کاهش pH در آندولیت را نشان نمی‌دهد.

۵- بررسی کاربردهای پیل‌های سوختی میکروبی در صنایع مختلف

پیل‌های سوختی میکروبی کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. این فناوری به دلیل تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی و تولید هم‌زمان برق پاک گزینه‌ای قابل‌توجه برای حرکت به سمت توسعه پایدار می‌باشد. محققان عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی را برای فاضلاب‌های مختلف و در صنایع مختلف بررسی کرده‌اند. همچنین عملکرد این فناوری برای مواردی همچون فاضلاب شهری، صنایع دامداری و لبنیات، تولید آب جو و شراب، کشاورزی، نفت و پتروشیمی و غیره مطالعه شده است.

نیسن[1] و همکاران [۵۰] از یک پیل سوختی میکروبی تک محفظه برای تصفیه فاضلاب کشتارگاه استفاده کردند و توانستند چگالی توان حدود mW/m^2 ۳۲ با نرخ حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی ۷۲ درصد به دست آورند. در مطالعه‌ای دیگر، کیم و همکاران آزمایش اولیه‌ای بر روی فاضلاب ناشی از خوک‌ها در یک پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای انجام دادند که چگالی توان mW/m^2 ۴۵ تولید کرد [۵۱]. گرگوری[2] و همکاران [۵۲] با استفاده از بقایای ذرت در یک پیل سوختی میکروبی لوله‌ای با کاتد هوایی و بیورآکتورهای بستر نشت‌کننده برای تبدیل سلولز به قندها که با مایع شکمبه و اکسیژن پشتیبانی می‌شد، mW/m^3 ۲۳۰ انرژی تولید کردند. در مطالعه‌ای دیگر عملکرد پیل سوختی میکروبی بر روی پساب‌های کارخانه برنج‌کوبی بررسی شد. در این مطالعه COD پساب چیزی حدود ۳۱۲۸ میلی‌گرم بر لیتر بوده است که تا نزدیک ۷۲ درصد آن از بین رفته است. برای این کار از یک سلول سوخت میکروبی دو محفظه‌ای متصل به یک محفظه اسیدوژنیک که آند آن توری استنلس‌استیل و کاتد آن صفحه گرافتی بوده استفاده شده است. در نهایت توان این سلول سوختی چیزی حدود ۴ وات بر مترمربع بوده است [۵۳]. فاضلاب نشاسته در یک سلول سوخت میکروبی با کاتد هوایی توانست چگالی توانی برابر با ۲۳۹.۴ میلی‌وات بر مترمربع تولید کند که این میزان کمتر از چگالی توان تولید شده توسط بقایای ذرت است. این سیستم همچنین تقریباً ۸۰-۹۰ درصد کارایی حذف COD را داشت [۵۴]. مطالعه دیگری به بررسی عملکرد پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای برای پساب‌های کارخانه چوب پرداخته است. در این بررسی، از برس‌های فیبر کردن برای آند و کاغذهای کربن با کاتالیست پلاتین برای کاتد استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد مقادیر به‌دست‌آمده برای نرخ حذف COD، راندمان کلمبیک و توان ماکسیمم خروجی به ترتیب برابر ۸۷٪، ۱۸٪ و mW/m^2 ۷۱ می‌باشد [۵۵].

مراسی و همکاران [۵۶] در مطالعه خود به بررسی عملکرد پیل سوختی میکروبی لوله‌ای حریان بالا برای تصفیه فاضلاب لبنیاتی در دو بازه ۳۰ روز و ۷۵ روز پرداختند. گزارش‌ها حاکی بر آن است که پیل سوختی میکروبی عملکرد خوبی داشته و توانسته است به نرخ حذف COD ۹۴ درصد برسد. به‌علاوه، سلول سوختی توانسته میزان نیتروژن ارگانیک، فسفر، نیترات، و فسفات را به ترتیب به میزان ۴۷، ۹۵، ۱۰۰ و ۷۵ درصد کاهش دهد. میزان توان حداکثر در این مطالعه برابر ۳.۵ وات بر مترمکعب بوده است. در مطالعه‌ای نویسندگان به بررسی تصفیه پساب‌های فرایند تولید ماست با استفاده از پیل سوختی میکروبی پرداختند. پساب‌های ناشی از تولید ماست حاوی غلظت‌های بالا مواد معلق و COD می‌باشد. به‌علاوه این پساب‌ها به دلیل شست‌وشوی بطری‌های ماست با سدیم هیدروکسید (NaOH) دارای pH بالا و نزدیک ۱۱ می‌باشند [۵۷]. لو و همکاران [۵۸] در شرایط قلیایی pH =۱۰.۵ غلظت‌های متفاوت COD را با پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای تست کردند. نتایج نشان داد که حداکثر توان خروجی برابر W/m^2 ۱.۰۴ می‌باشد. همچنین نرخ حذف COD و آمونیاک به ترتیب برابر ۸۷٪ و ۷۴٪ می‌باشد. آب پنیر در سلول‌های سوختی میکروبی تک‌محفظه‌ای و دومحفظه‌ای با حجم‌های کاری مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعه‌ای، با استفاده از الکترودهای گرافیتی در پیل سوختی میکروبی دومحفظه‌ای، حداکثر توان تولیدی ۳۲۴.۸ میکروواوت و جریان ۱.۱۹۴ میلی‌آمپر ثبت شد [۵۹].

یکی از موارد پراستفاده پیل‌های سوختی میکروبی، فاضلاب‌های شهری و خانگی می‌باشد. در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای برای تصفیه فاضلاب‌های آشپزخانه پرداخته شده است. آند و کاتد در این مطالعه گرافیت است و حداکثر توان خروجی و نرخ حذف COD به ترتیب برابر mW/m^2 ۹۲۴.۷۹ و ۲۵.۴٪ می‌باشد [۶۰]. مینگ‌جیانگ و همکاران [۶۱] در مطالعه خود کاربرد پیل سوختی بالارونده بدون غشا را برای تصفیه فاضلاب‌های خانگی بررسی کردند. حداکثر توان خروجی mW/m^3 ۴۸۱ بوده است. میزان نرخ حذف COD، فسفر و آمونیاک به ترتیب معادل ۷۷.۹، ۲۳.۵ و ۹۷.۶ درصد بوده است که این مقادیر هنگامی که پیل سوختی با فوتوبیوراکتور ترکیب می‌شود بالاتر می‌روند. داس و همکاران [۶۲] در مطالعه خود از پیل سوختی به‌هم‌پیوسته (۶ پیل سوختی) به حجم ۷۲۰ لیتر برای تصفیه فاضلاب‌های خانگی استفاده کردند. آنها دریافتند که نرخ حذف COD رابطه مستقیمی با زمان کارکرد سیستم دارد. بیشترین مقدار توان و نرخ حذف COD به ترتیب برای این سیستم mW ۶۱ و ۸۷.۲۹±۷.۲۸ درصد ثبت شده است. ادرار به‌عنوان سوختی امیدوارکننده برای تولید برق در سلول‌های سوختی میکروبی اثبات شده است. تولید متوسط ادرار توسط یک بزرگسال ۲.۵ لیتر در روز است که منجر به تولید ۱۷ میلیارد لیتر ادرار توسط جمعیت جهانی می‌شود [۶۳, ۶۴]. عملکرد پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای با آند و کاتدهایی بر پایه کربن برای ادرار انسان بررسی شده است. در این مورد نرخ حذف COD، راندمان کولمبیک و حداکثر توان به ترتیب برابر ۷۵.۵٪، ۲۶.۵٪ و mW/m^2 ۲۲۷ بوده است [۶۵].

عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی بسیار بر روی پساب‌های ناشی از تخمیر و کارخانه‌ها شراب‌سازی و آب جو بررسی شده است. در مطالعه‌ای نرخ حذف COD برای پساب‌های ناشی از شراب سازی ۱۷ درصد ثبت شده است. از پیل

[1] Niessen

[2] Gregoire

سوختی میکروبی دو محفظه‌ای با حجم ۷۰ میلی لیتر برای این پژوهش استفاده است که حداکثر توان خروجی و راندمان کولمبیک به ترتیب برابر ۴۶۵ mW/m^2 و ۱۵٪ بوده است [۶۶]. فاضلاب کارخانه‌های شراب‌سازی سرشار از بار آلی و فقیر از مواد مغذی معدنی مانند نیتروژن و فسفر است [۶۶]. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای به حجم mL ۲۰۰، تصفیه پساب‌های ناشی از فرایند آب جو مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه آند و کاتد برپایه گرافیت بوده است و نرخ حذف COD برابر ۸۰٪ بود. به‌علاوه حداکثر توان خروجی معادل ۳۰۵ mW/m^2 بوده است [۶۷].

در مطالعات زیادی به بررسی عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی در صنعت پرداخته شده است. صنایع نفت و پتروشیمی نیز از دیگر عوامل تولید فاضلاب هستند. این فاضلاب‌ها حاوی آلاینده‌هایی مانند هیدروکربن‌ها، فلزات سنگین و مواد شیمیایی سمی هستند که برای محیط‌زیست ضرر دارند. این فاضلاب‌ها برای پیل‌های سوختی میکروبی مناسب نیستند. فاضلاب نفتی که شامل ترکیبات فنولیک، آلیفاتیک و آروماتیک است، ساختار پیچیده‌ای برای تجزیه سلول‌ها دارد. علاوه بر این، تعاملات دشوار بین این ترکیبات و میکروب‌ها منجر به کاهش عملکرد پیل سوختی میکروبی می‌شود [۶۸]. در مطالعه‌ای عملکرد پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای برای پساب‌های پالایشگاه در بازه‌های زمانی متفاوت بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که نرخ حذف COD معادل ۸۴.۴٪ و حداکثر توان خروجی ۲۲۵ mW/m^2 می‌باشد [۶۹]. نوری و همکاران [۷۰] اثر پیل سوختی تک محفظه‌ای را بر روی پساب کارخانه شکلات سازی بررسی کردند. حجم این سیستم ۹۰ میلی لیتر و بود و نرخ حذف COD و حداکثر توان به ترتیب برابر ۹۰٪ و ۲۳ mW/m^2 بوده است. در مطالعه دیگری پساب‌های صنعت غذاهای دریایی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه با استفاده از سلول سوختی میکروبی دو محفظه‌ای به حجم mL ۹۸ به نرخ حذف COD ۸۰-۲۸ درصد با توجه زمان کارکرد حاصل شد. به‌علاوه، حداکثر توان تولیدی معادل ۱۶.۲ W/m^3 و راندمان کولمبیک ۱۵٪ بوده است [۷۱]. چن و همکاران [۷۲] در مطالعه خود با استفاده از پیل سوختی میکروبی تالاب مصنوعی توانستند پساب‌های رنگ ازو رو تصفیه کنند. نرخ حذف رنگ نزدیک ۹۶ درصد بوده است و حداکثر توان خروجی معادل ۰.۸۵۲ W/m^2 بوده است.

مطالعات فوق نشان دادند که پیل‌های سوختی میکروبی عملکرد قابل‌قبولی برای تصفیه پساب‌های صنایع مختلف دارند. همچنین در جدول ۲ نمونه‌هایی دیگرد از کاربردهای پیل سوختی میکروبی ارائه شده است.

جدول ۲ کاربردهای پیل‌های سوختی میکروبی در صنایع مختلف

مرجع	نوع پیل سوختی میکروبی و فاضلاب	یافته‌ها
[۷۳]	تالاب مصنوعی - خانگی	از صفحه‌های کربن به‌عنوان آند و کاتد در این مطالعه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نرخ حذف COD بیش از ۹۵٪ بوده و پیل عملکرد خوبی برای تصفیه آمونیاک داشته است. به‌علاوه، راندمان کلومبیک و توان خروجی به ترتیب۱۳.۶٪ و ۱.۵۹ mW/m^2 بوده است.
[۷۴]	تک محفظه‌ای کاتد هوایی - فاضلاب آشپزخانه	در این مطالعه از گرافیت برای آند و کاتد استفاده شده است. حجم سیستم ۶۰۰ میلی لیتر بوده و نرخ حذف COD ان ۸۹٪ بوده است. همچنین حداکثر توان خروجی برابر ۷۱۰±۳ mW/m^2 بوده است.
[۷۵]	به‌هم‌پیوسته – فاضلاب خانگی	این مطالعه در بازه ۹۲ روز و حجم ۳۶ لیتر انجام شده است. نرخ حذف COD چیزی حدود ۹۳.۵۲٪ بوده است. علاوه براین حداکثر توان خروجی معادل ۴۷.۷ میلی امپر بوده است.
[۷۶]	دو محفظه‌ای – فاضلاب شهری و لبنیاتی	پیل سوختی میکروبی، مقاومت داخلی کمتری هنگام تصفیه فاضلاب شهری در مقایسه با پساب لبنیاتی نشان داد. نرخ حذف COD برای فاضلاب شهری و لبنیاتی به ترتیب برابر ۸۴٪ و ۷۰٪ بوده است. همچنین راندمان کلومبیک فاضلاب شهری معادل ۳۷٪ و برای فاضلاب لبنیاتی ۱۷٪ بوده است.
[۷۷]	دو محفظه‌ای - لبنیات	از سیستمی به حجم ۱۷ میلی لیتر برای تصفیه پساب‌های کارخانه لبنی استفاده شد. نرخ حذف COD و حداکثر توان به ترتیب برابر ۷۶٪ و ۱۳۱ mW/m^2 بوده است.
[۷۸]	تک محفظه‌ای - صنایع غذاهای دریایی	سیستمی به حجم ۲۶ میلی لیتر برای تصفیه پساب‌های صنعت غذاهای دریایی استفاده شد. نرخ حذف COD و راندمان کولمبیک به ترتیب برابر ۸۵٪ و ۱۴٪ بوده است. همچنین حداکثر توان خروجی برابر ۳۵۸.۸ mW/m^2 بوده است.
[۷۹]	دو محفظه‌ای - آب جو و ضایعات میوه	از ضایعات میوه‌هایی مثل آناناس، انبه و پرتغال در پساب هاب فرایند آب جو برای بالابردن عملکرد پیل سوختی میکروبی استفاده شده است. به دلیل استفاده از ضایعات میوه‌ها، پیل سوختی به توان خروجی mW/m^2 ۹۹۴.۷ رسید. همچنین نرخ حذف COD برابر ۹۶.۲۸٪ بوده است که عملکرد خوب پیل سوختی میکروبی را نشان می دهند.
[۸۰]	تک محفظه‌ای - شیرابه محل دفن زباله	این سیستم با حجم ۳۴۳ میلی لیتر برای تصفیه شیرابه های ناشی از محل دفن زباله استفاده شد. از کاغذ کربنی به همراه پلاتین برای کاتد ان استفاده شد و حداکثر توان خروجی ان برابر ۱۵۱۳ mW/cm^2 بوده است.
[۸۱]	تک محفظه‌ای و دو محفظه‌ای - پالایشگاه نفت	در این مطالعه از پیل‌های سوختی تک محفظه‌ای و دو محفظه‌ای برای تصفیه فاضلاب‌های ناشی از پالایشگاه نفت استفاده شد. بالاترین توان خروجی متعلق به پیل دو محفظه‌ای با مقدار mW/m^3 ۳۲۸.۲۶ بود. همچنین نرخ حذف COD برابر ۸۴.۴٪ بوده است.
[۸۲]	به‌هم‌پیوسته - رنگرزی صنعت نساجی	در این مطالعه سه پیل سوختی میکروبی به هم متصل شدند تا توان خروجی بالاتر برود.

نتایج نشان می‌دهد که حداکثر توان خروجی برابر ۳۸.۶ mW/m^2 بوده است. همچنین نرخ حذف COD و رنگ‌زدایی به ترتیب برابر ۸۲.۱۴٪ و ۷۴.۸٪ بوده است.

۶- نتیجه گیری

در دهه اخیر تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین بسیار موردتوجه قرار گرفته است. یکی از دلایل این مشکلات استفاده روزافزون از سوخت‌های فسیلی می‌باشد. در کنار این موارد تأمین پایدار آب و جلوگیری از کمبود آن امری ضروری برای توسعه پایدار می‌باشد. لازم است انرژی‌های تجدیدپذیر به‌تدریج جای منابع انرژی‌های فسیلی را بگیرند. پیل‌های سوختی میکروبی یکی از آن راه‌حل‌های جایگزین مناسب هستند که می‌توانند هم برای بخش تصفیه فاضلاب و هم تأمین انرژی پاک به کار بیایند. در این تکنولوژی به کمک باکتری‌ها و میکروارگانیسم‌ها مواد آلی درون فاضلاب‌ها و پساب‌ها تجزیه شده و منجر به تولید انرژی الکتریسیته می‌شود. در این مقاله مروری، مطالعه‌ای جامع در مورد اجزا، انواع، و کاربردهای پیل سوختی میکروبی ارائه شده است. اجزاء اصلی سلول‌های سوختی میکروبی همانند آند، کاتد، تبادلگر یون‌ها و عواملی مثل دما و pH بررسی شده است. همچنین انواع ساختار این پیل‌های سوختی همانند تک محفظه‌ای، دو محفظه‌ای، به‌هم‌پیوسته و غیره موردمطالعه قرار گرفته است. در ادامه کاربردهای این تکنولوژی در انواع مختلف فاضلاب به طور جامع مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مواردی که باید به آن توجه شود خروجی پایین توان پیل‌های سوختی میکروبی و هزینه‌های بالای آن می‌باشد. در حال حاضر، هزینه سرمایه‌گذاری برای کاربرد پیل‌های سوختی میکروبی در تصفیه فاضلاب بسیار بیشتر از فرایندهای متعارف تصفیه فاضلاب است و هزینه تولید انرژی از این فناوری به‌ازای هر واحد به طور قابل‌توجهی بیشتر از سایر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی و زیست‌توده است. راه‌حل این موضوع در دستان بیوتکنولوژیست‌ها و مهندسان شیمی است. پیکربندی‌های پیچیده‌تر رآکتورها باید طراحی شوند تا چگالی‌های توان بهتری به دست آید و درعین‌حال هزینه‌های عملیات و نگهداری کمتر باشد. تولید انرژی را می‌توان با درک بهتر بیوفیلم‌های میکروبی و عملکردهای متابولیکی مربوطه بهبود بخشید. همچنین باتوجه‌به کاربردهای بسیار گسترده نانومواد، می‌توان از آنها در پیل‌های سوختی میکروبی استفاده کرد. از نانومواد می‌توان در بخش‌های مختلف پیل‌های سوختی میکروبی نظیر آند و کاتد استفاده کرد که این کار می‌تواند منجر به افزایش بازدهی پیل‌ها شود. این مواد می‌توانند کاربردهای وسیعی در این تکنولوژی داشته باشند و می‌توان در مطالعات آینده به آن‌ها پرداخت. علاوه بر این، فناوری پیل سوختی میکروبی می‌تواند با روش‌های متعارف تصفیه فاضلاب ترکیب شود تا عملکرد بهتری در حذف COD و بازیابی منابع داشته باشد. همان‌طور که بیان شد پیل‌های سوختی‌های میکروبی عملکرد قابل‌قبولی در صنایع مختلف دارند. هرچند استفاده آنها در ابعاد وسیع و حجم‌های بالا به دلیل مشکلات ذکر شده دور از دسترس می‌باشد. برای مطالعات آینده، پژوهشگران باید به‌صورت قابل‌توجهی به استفاده از مواد پایدار برای طراحی اجزاء و پیکربندی پیل‌های سوختی میکروبی توجه داشته باشند. این کار می‌تواند باعث بهبود تولید انرژی و کاهش هزینه‌های تصفیه فاضلاب مبتنی بر این فناوری شود. با پیشرفت در این زمینه و کاهش هزینه و افزایش توان خروجی، می‌توان از این فناوری در ابعاد گسترده و تجاری استفاده کرد که برای توسعه پایدار بسیار مفید می‌باشد.

۷- مراجع

[1] M. R. C. Qazani, M. Ghasemi, and H. Asadi, Optimizing microbial fuel cells with multiple-objectives PSO and type-2 fuzzy neural networks, *Fuel,* vol. 372, p. 132090, 2024.

[2] E. Abbasian Hamedani, S. A. Alenabi, and S. Talebi, Hydrogen as an energy source: A review of production technologies and challenges of fuel cell vehicles, *Energy Reports,* vol. 12, pp. 3778-3794, 2024.

[3] S. Khandaker, S. Das, M. T. Hossain, A. Islam, M. R. Miah, and M. R. Awual, Sustainable approach for wastewater treatment using microbial fuel cells and green energy generation–A comprehensive review, *Journal of molecular liquids,* vol. 344, p. 117795, 2021.

[4] M. Rahimnejad, M. Asghary, and M. Fallah, Microbial fuel cell (MFC): an innovative technology for wastewater treatment and power generation, *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety: Volume II: Biological Agents and Methods for Industrial Waste Management,* pp. 215-235, 2020.

[5] S. B. Patwardhan *et al.*, Microbial fuel cell united with other existing technologies for enhanced power generation and efficient wastewater treatment, *Applied Sciences,* vol. 11, no. 22, p. 10777, 2021.

[6] V. Venkatramanan, S. Shah, and R. Prasad, A critical review on microbial fuel cells technology: Perspectives on wastewater treatment, *The Open Biotechnology Journal,* vol. 15, no. 1, 2021.

[7] S. A. Mirbagheri and S. Malekmohammadi, The effect of temperature, pH and concentration on the performance of a single chamber microbial fuel cell, *Journal of Water and Wastewater,* vol. 34, no. 4, pp. 109-122, 2023. (in persion).

[8] S. Siddiqui, P. Bhatnagar, S. Dhingra, U. Upadhyay, and I. Sreedhar, Wastewater treatment and energy production by microbial fuel cells, *Biomass Conversion and Biorefinery,* vol. 13, no. 5, pp. 3569-3592, 2023.

[9] P. G. Zadeh, S. Rezania, M. Fattahi, P. Dang, Y. Vasseghian, and T. M. Aminabhavi, Recent advances in microbial fuel cell technology for energy generation from wastewater sources, *Process Safety and Environmental Protection,* 2024.

[10] N. E. Paucar and C. Sato, Microbial fuel cell for energy production, nutrient removal and recovery from wastewater: A review, *Processes,* vol. 9, no. 8, p. 1318, 2021.

[11] S. Sobhani and M. Esfandyari, A Review on the Removal of Heavy Metals from Wastewater by Microbial Fuel Cells, *Journal of Farayandno,* vol. 18, no. 82, pp. 53-72, 2023. (in persion).

[12] M. Shabani, H. Younesi, M. Pontié, A. Rahimpour, M. Rahimnejad, and A. A. Zinatizadeh, A critical review on recent proton exchange membranes applied in microbial fuel cells for renewable energy recovery, *Journal of cleaner production,* vol. 264, p. 121446, 2020.

[13] G. Pasternak, N. Ormeno-Cano, and P. Rutkowski, Recycled waste polypropylene composite ceramic membranes for extended lifetime of microbial fuel cells, *Chemical Engineering Journal,* vol. 425, p. 130707, 2021.

[14] W.-W. Li, H.-Q. Yu, and Z. He, Towards sustainable wastewater treatment by using microbial fuel cells-centered technologies, *Energy & Environmental Science,* vol. 7, no. 3, pp. 911-924, 2014.

[15] S. Elhenawy, M. Khraisheh, F. AlMomani, M. Al-Ghouti, and M. K. Hassan, From waste to watts: Updates on key applications of microbial fuel cells in wastewater treatment and energy production, *Sustainability,* vol. 14, no. 2, p. 955, 2022.

[16] M. Hassan, S. Kanwal, R. S. Singh, M. A. SA, M. Anwar, and C. Zhao, Current challenges and future perspectives associated with configuration of microbial fuel cell for simultaneous energy generation and wastewater treatment, *International Journal of Hydrogen Energy,* vol. 50, pp. 323-350, 2024.

[17] T. K. Ida and B. Mandal, Microbial fuel cell design, application and performance: A review, *Materials Today: Proceedings,* vol. 76, pp. 88-94, 2023.

[18] P. Choudhury *et al.*, Performance improvement of microbial fuel cells for waste water treatment along with value addition: A review on past achievements and recent perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 79, pp. 372-389, 2017.
[19] A. K. Islam *et al.*, Comparative performance of sustainable anode materials in microbial fuel cells (MFCs) for electricity generation from wastewater, *Results in Engineering,* vol. 20, p. 101385, 2023.
[20] R. Selvasembian *et al.*, Recent progress in microbial fuel cells for industrial effluent treatment and energy generation: Fundamentals to scale-up application and challenges, *Bioresource technology,* vol. 346, p. 126462, 2022.
[21] N. Senthilkumar *et al.*, Waste paper derived three-dimensional carbon aerogel integrated with ceria/nitrogen-doped reduced graphene oxide as freestanding anode for high performance and durable microbial fuel cells, *Bioprocess and biosystems engineering,* vol. 43, pp. 97-109, 2020.
[22] J. Ma *et al.*, Progress on anodic modification materials and future development directions in microbial fuel cells, *Journal of Power Sources,* vol. 556, p. 232486, 2023.
[23] U. Jayapiriya, S. Inoue, and S. Goel, A facile technique to develop conductive paper based bioelectrodes for microbial fuel cell applications, *Biosensors and Bioelectronics,* vol. 214, p. 114479, 2022.
[24] A. Saravanan, P. S. Kumar, S. Srinivasan, S. Jeevanantham, R. Kamalesh, and S. Karishma, Sustainable strategy on microbial fuel cell to treat the wastewater for the production of green energy, *Chemosphere,* vol. 290, p. 133295, 2022.
[25] H. Yuan, Y. Hou, I. M. Abu-Reesh, J. Chen, and Z. He, Oxygen reduction reaction catalysts used in microbial fuel cells for energy-efficient wastewater treatment: a review, *Materials Horizons,* vol. 3, no. 5, pp. 382-401, 2016.
[26] P. Jalili, A. Ala, P. Nazari, B. Jalili, and D. D. Ganji, A comprehensive review of microbial fuel cells considering materials, methods, structures, and microorganisms, *Heliyon,* 2024.
[27] M. Kamali, Y. Guo, T. M. Aminabhavi, R. Abbassi, R. Dewil, and L. Appels, Pathway towards the commercialization of sustainable microbial fuel cell-based wastewater treatment technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 173, p. 113095, 2023.
[28] S. Berchmans, Microbial fuel cell as alternate power tool: Potential and challenges, *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts,* pp. 403-419, 2018.
[29] Z. Ge and Z. He, Long-term performance of a 200 liter modularized microbial fuel cell system treating municipal wastewater: treatment, energy, and cost, *Environmental Science: Water Research & Technology,* vol. 2, no. 2, pp. 274-281, 2016.
[30] N. Lu, S. Zhou, and J. Ni, Mechanism of energy generation of microbial fuel cells, *Progress in Chemistry,* vol. 20, no. 0708, p. 1233, 2008.
[31] M. Rahimnejad, G. Bakeri, M. Ghasemi, and A. Zirepour, A review on the role of proton exchange membrane on the performance of microbial fuel cell, *Polymers for Advanced Technologies,* vol. 25, no. 12, pp. 1426-1432, 2014.
[32] R. Goswami and V. K. Mishra, A review of design, operational conditions and applications of microbial fuel cells, *Biofuels,* vol. 9, no. 2, pp. 203-220, 2018.
[33] H. M. Singh, A. K. Pathak, K. Chopra, V. Tyagi, S. Anand, and R. Kothari, Microbial fuel cells: a sustainable solution for bioelectricity generation and wastewater treatment, *Biofuels,* vol. 10, no. 1, pp. 11-31, 2019.
[34] V. Sridevi, S. Basheerunnisa, P. Venkat Rao, G. Rushi Varma, and D. Pavan Srivatsav, Performance of salt bridge in microbial fuel cell at various agarose concentrations for treating sugar industrial effluent, *International Journal of Advanced Science and Engineering,* vol. 6, no. 04, pp. 1513-1519, 2020.
[35] R. Nair, K. Renganathan, S. Barathi, and K. Venkatraman, Performance of salt-bridge microbial fuel cell at various agarose concentrations using hostel sewage waste as substrate, *International Journal of Advancements in Research & Technology,* vol. 2, no. February, p. 326, 2013.
[36] B. Min, S. Cheng, and B. E. Logan, Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells, *Water research,* vol. 39, no. 9, pp. 1675-1686, 2005.
[37] K. Obileke, H. Onyeaka, E. L. Meyer, and N. Nwokolo, Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review, *Electrochemistry Communications,* vol. 125, p. 107003, 2021.
[38] G. Jadhav and M. Ghangrekar, Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration, *Bioresource technology,* vol. 100, no. 2, pp. 717-723, 2009.
[39] S. Cheng, D. Xing, and B. E. Logan, Electricity generation of single-chamber microbial fuel cells at low temperatures, *Biosensors and Bioelectronics,* vol. 26, no. 5, pp. 1913-1917, 2011.
[40] O. Adelaja, T. Keshavarz, and G. Kyazze, The effect of salinity, redox mediators and temperature on anaerobic biodegradation of petroleum hydrocarbons in microbial fuel cells, *Journal of hazardous materials,* vol. 283, pp. 211-217, 2015.
[41] A. S. Jatoi *et al.*, Advanced microbial fuel cell for waste water treatment—a review, *Environmental Science and Pollution Research,* vol. 28, pp. 5005-5019, 2021.
[42] J. Winfield, I. Gajda, J. Greenman, and I. Ieropoulos, A review into the use of ceramics in microbial fuel cells, *Bioresource technology,* vol. 215, pp. 296-303, 2016.
[43] E. A. Hamedani, A. Abasalt, and S. Talebi, Application of microbial fuel cells in wastewater treatment and green energy production: A comprehensive review of technology fundamentals and challenges, *Fuel,* vol. 370, p. 131855, 2024.
[44] M. Do *et al.*, Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: a mini review, *Science of the Total Environment,* vol. 639, pp. 910-920, 2018.
[45] A. Mukherjee *et al.*, Effective power management system in stacked microbial fuel cells for onsite applications, *Journal of Power Sources,* vol. 517, p. 230684, 2022.
[46] S. H. Lee, J. Y. Ban, C.-H. Oh, H.-K. Park, and S. Choi, A solvent-free microbial-activated air cathode battery paper platform made with pencil-traced graphite electrodes, *Scientific reports,* vol. 6, no. 1, p. 28588, 2016.
[47] A. Pugazhendi, B. A. Al-Mur, and R. B. Jeyakumar, Cosmetic industrial wastewater treatment and bioelectricity production in upflow microbial fuel cell (UMFC) using extremophilic bacterial consortium, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,* p. 105438, 2024.
[48] G. Yang, J. Wang, H. Zhang, H. Jia, Y. Zhang, and F. Gao, Applying bio-electric field of microbial fuel cell-upflow anaerobic sludge blanket reactor catalyzed blast furnace dusting ash for promoting anaerobic digestion, *Water research,* vol. 149, pp. 215-224, 2019.
[49] Z. He, N. Wagner, S. D. Minteer, and L. T. Angenent, An upflow microbial fuel cell with an interior cathode: assessment of the internal resistance by impedance spectroscopy, *Environmental science & technology,* vol. 40, no. 17, pp. 5212-5217, 2006.
[50] J. Niessen, U. Schröder, M. Rosenbaum, and F. Scholz, Fluorinated polyanilines as superior materials for electrocatalytic anodes in bacterial fuel cells, *Electrochemistry Communications,* vol. 6, no. 6, pp. 571-575, 2004.
[51] J. R. Kim, J. Dec, M. A. Bruns, and B. E. Logan, Removal of odors from swine wastewater by using microbial fuel cells, *Applied and environmental microbiology,* vol. 74, no. 8, pp. 2540-2543, 2008.
[52] K. Gregoire and J. Becker, Design and characterization of a microbial fuel cell for the conversion of a lignocellulosic crop residue to electricity, *Bioresource Technology,* vol. 119, pp. 208-215, 2012.
[53] A. Raychaudhuri and M. Behera, Enhancement of bioelectricity generation by integrating acidogenic compartment into a dual-chambered microbial fuel cell during rice mill wastewater treatment, *Process Biochemistry,* vol. 105, pp. 19-26, 2021.
[54] N. Lu, S.-g. Zhou, L. Zhuang, J.-t. Zhang, and J.-r. Ni, Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology, *Biochemical engineering journal,* vol. 43, no. 3, pp. 246-251, 2009.
[55] R. Toczyłowska-Mamińska, K. Szymona, and M. Kloch, Bioelectricity production from wood hydrothermal-treatment

[72] B.-Y. Chen *et al.*, Assessment upon azo dye decolorization and bioelectricity generation by Proteus hauseri, *Bioresource technology,* vol. 101, no. 12, pp. 4737-4741, 2010.
[73] N. X. P. Vo, D. Dang Nguyen Hoang, T. Doan Huu, T. Doan Van, H. Lam Pham Thanh, and Q. Vo Nguyen Xuan, Performance of vertical up-flow-constructed wetlands integrating with microbial fuel cell (VFCW-MFC) treating ammonium in domestic wastewater, *Environmental Technology,* vol. 44, no. 12, pp. 1822-1837, 2023.
[74] H. Nagar, N. Badhrachalam, V. B. Rao, and S. Sridhar, A novel microbial fuel cell incorporated with polyvinylchloride/4A zeolite composite membrane for kitchen wastewater reclamation and power generation, *Materials chemistry and physics,* vol. 224, pp. 175-185, 2019.
[75] J. Suransh, D. A. Jadhav, D. D. Nguyen, and A. K. Mungray, Scalable architecture of low-cost household microbial fuel cell for domestic wastewater treatment and simultaneous energy recovery, *Science of The Total Environment,* vol. 857, p. 159671, 2023.
[76] M. Mohammadi, M. Ghasemi, and M. Sedighi, Comparative study of energy production and treatment of municipal and dairy wastewater via microbial fuel cell technology: process evaluation towards optimization, *Biomass Conversion and Biorefinery,* vol. 14, no. 5, pp. 6285-6298, 2024.
[77] E. Retnaningrum and W. Wilopo, Performance and bacterial composition of anodic biofilms in microbial fuel cell using dairy wastewater, in *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1744, no. 1: AIP Publishing.
[78] H. L. Sun, Electricity generation from seafood wastewater in a single-and dual-chamber microbial fuel cell with CoTMPP oxygen-reduction electrocatalyst, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology,* vol. 87, no. 8, pp. 1167-1172, 2012.
[79] O. Akinwumi, M. Aremu, and S. Agarry, Enhanced microbial fuel cell-bioelectricity generation and pollutant removal from brewery wastewater and modelling the kinetics, *Biomass Conversion and Biorefinery,* pp. 1-18, 2022.
[80] J. M. Sonawane, S. B. Adeloju, and P. C. Ghosh, Landfill leachate: A promising substrate for microbial fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy,* vol. 42, no. 37, pp. 23794-23798, 2017.
[81] I. M. Abu-Reesh, A. Kunju, and S. Sevda, Performance of microbial fuel cells in treating petroleum refinery wastewater, *Journal of Water Process Engineering,* vol. 49, p. 103029, 2022.
[82] K. Sonu, Z. Syed, and M. Sogani, Up-scaling microbial fuel cell systems for the treatment of real textile dye wastewater and bioelectricity recovery, *International Journal of Environmental Studies,* vol. 77, no. 4, pp. 692-702, 2020.
wastewater: Enhanced power generation in MFC-fed mixed wastewaters, *Science of The Total Environment,* vol. 634, pp. 586-594, 2018.
[56] R. J. Marassi, L. G. Queiroz, D. C. V. Silva, F. T. da Silva, G. C. Silva, and T. C. B. de Paiva, Performance and toxicity assessment of an up-flow tubular microbial fuel cell during long-term operation with high-strength dairy wastewater, *Journal of cleaner production,* vol. 259, p. 120882, 2020.
[57] M. M. Mardanpour, M. N. Esfahany, T. Behzad, and R. Sedaqatvand, Single chamber microbial fuel cell with spiral anode for dairy wastewater treatment, *Biosensors and Bioelectronics,* vol. 38, no. 1, pp. 264-269, 2012.
[58] H. Luo *et al.*, Electricity generation in a microbial fuel cell using yogurt wastewater under alkaline conditions, *RSC advances,* vol. 7, no. 52, pp. 32826-32832, 2017.
[59] S. Nasirahmadi and A. Safekordi, Whey as a substrate for generation of bioelectricity in microbial fuel cell using E. coli, *International Journal of Environmental Science & Technology,* vol. 8, pp. 823-830, 2011.
[60] A. Adebule, B. Aderiye, and A. Adebayo, Improving bioelectricity generation of microbial fuel cell (MFC) with mediators using kitchen waste as substrate, *Ann. Appl. Microbiol. Biotechnol. J,* vol. 2, no. 1, pp. 1-5, 2018.
[61] H.-m. Jiang, S.-j. Luo, X.-s. Shi, M. Dai, and R.-b. Guo, A system combining microbial fuel cell with photobioreactor for continuous domestic wastewater treatment and bioelectricity generation, *Journal of Central South University,* vol. 20, no. 2, pp. 488-494, 2013.
[62] I. Das, M. Ghangrekar, R. Satyakam, P. Srivastava, S. Khan, and H. Pandey, On-site sanitary wastewater treatment system using 720-L stacked microbial fuel cell: case study, *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste,* vol. 24, no. 3, p. 04020025, 2020.
[63] S. Freguia, M. E. Logrieco, J. Monetti, P. Ledezma, B. Virdis, and S. Tsujimura, Self-powered bioelectrochemical nutrient recovery for fertilizer generation from human urine, *Sustainability,* vol. 11, no. 19, p. 5490, 2019.
[64] I. Ieropoulos, J. Greenman, and C. Melhuish, Urine utilisation by microbial fuel cells; energy fuel for the future, *Physical Chemistry Chemical Physics,* vol. 14, no. 1, pp. 94-98, 2012.
[65] S. Barbosa, L. Peixoto, A. Ter Heijne, P. Kuntke, M. Alves, and M. Pereira, Investigating bacterial community changes and organic substrate degradation in microbial fuel cells operating on real human urine, *Environmental Science: Water Research & Technology,* vol. 3, no. 5, pp. 897-904, 2017.
[66] E. D. Penteado, C. M. Fernandez-Marchante, M. Zaiat, P. Cañizares, E. R. Gonzalez, and M. A. Rodrigo, Energy recovery from winery wastewater using a dual chamber microbial fuel cell, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology,* vol. 91, no. 6, pp. 1802-1808, 2016.
[67] W. Miran *et al.*, Microbial community structure in a dual chamber microbial fuel cell fed with brewery waste for azo dye degradation and electricity generation, *Environmental Science and Pollution Research,* vol. 22, pp. 13477-13485, 2015.
[68] J. M. Sonawane, R. Mahadevan, A. Pandey, and J. Greener, Recent progress in microbial fuel cells using substrates from diverse sources, *Heliyon,* vol. 8, no. 12, 2022.
[69] S. Srikanth, M. Kumar, D. Singh, M. Singh, and B. Das, Electro-biocatalytic treatment of petroleum refinery wastewater using microbial fuel cell (MFC) in continuous mode operation, *Bioresource technology,* vol. 221, pp. 70-77, 2016.
[70] P. Noori and G. Najafpour Darzi, Enhanced power generation in annular single-chamber microbial fuel cell via optimization of electrode spacing using chocolate industry wastewater, *Biotechnology and applied biochemistry,* vol. 63, no. 3, pp. 427-434, 2016.
[71] S. J. You, J. N. Zhang, Y. X. Yuan, N. Q. Ren, and X. H. Wang, Development of microbial fuel cell with anoxic/oxic design for treatment of saline seafood wastewater and biological electricity generation, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology,* vol. 85, no. 8, pp. 1077-1083, 2010.