

مروری بر سلول های سوختی میکروبی

ولی اله ماندنی پور^{۱*}، مهدی بمانی^۲

۱. گروه شیمی کاربردی، دانشکده علوم پایه، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران
۲. گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

Email: valimandanipoor@yahoo.com

خلاصه

هر کشوری برای توسعه اقتصادی خود نیاز دارد استفاده از منابع خود را به درستی مدیریت نماید تا با مشکل انرژی مواجه نشود. تولید انرژی و استفاده بهینه از آن در بخش های مختلف یک جامعه به ویژه برای مصارف صنعتی و کشاورزی اهمیت زیادی دارد. با توجه به نیاز مبرم به محیط زیستی سالم با انرژی پایدار، دولت و صنایع باید نگاه ویژه ای به منابع انرژی مبتنی بر کاهش کربن داشته باشند که در حال حاضر اکثر کشورهای در حال توسعه برای تولید انرژی خود روی آن تمرکز دارند و در این زمینه یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر سلول سوختی است. سلول سوختی نوعی سلول گالوانی است که شیمی دانان جهت تأمین انرژی و کاهش آلودگی محیط زیست پیشنهاد می کنند. این سلول ها افزون بر کارایی بیشتر، می توانند انتشار کربن دی اکسید در محیط زیست را کاهش دهند به طوری که دوستدار محیط زیست بوده و منبع انرژی سبز به شمار می روند. سلول سوختی میکروبی (MFC) نوعی سلول سوختی بیوالکتروشیمیایی است که جریان الکتریکی را با انتقال الکترون های تولید شده از اکسیداسیون میکروبی از آند به کاتد از طریق یک مدار الکتریکی خارجی، تولید می کند. آن ها می توانند انرژی شیمیایی موجود در ترکیبات مختلف از جمله کاه گندم، گوجه فرنگی، مرکبات ضایعاتی، سبوس برنج، قارچ، فاضلاب و ... را مهار کرده و آن را به سمت تولید انرژی الکتریکی هدایت کنند و در عین حال اصلاح محیطی را ارائه دهند. در این مقاله ابتدا در یک دسته بندی کلی سلول های سوختی تک محفظه ای، دو محفظه ای و انباشته توضیح داده می شوند، سپس ساختار کلی سلول های سوختی توضیح داده می شود و پس از آن سلول های سوختی میکروبی که به انواع سلول های سوختی مبتنی بر میکروارگانیزم ها، مبتنی بر رنگ، مبتنی بر پساب، سلول های سوختی کاتد-هوا و ... تقسیم بندی شده اند، همچنین نحوه عملکرد آن ها، استراتژی های بهبود عملکرد و چشم انداز آینده آن ها بررسی خواهد شد.

کلید واژه: سلول سوختی میکروبی؛ سلول سوختی مبتنی بر رنگ؛ سلول سوختی مبتنی بر پساب؛ سلول سوختی مبتنی بر میکروارگانیزم ها؛ سلول سوختی کاتد-هوا

۱- مقدمه

کربوهیدرات‌های ساده را از طریق واکنش‌های بیوشیمیایی به کربن‌دی‌اکسید، اکسید کنند [۱۰]. آن‌ها می‌توانند از گیاهانی همچون گندم، برنج، ماش، گوجه فرنگی و ... به عنوان منبع موجودات ارگانیک استفاده کنند و انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. این نوع سلول سوختی گیاهی-میکروبی^۳ (PMFC) نامیده می‌شود، که الکتریسیته سبز پایدار را از طریق گیاهان زنده تولید می‌کند [۱۱]. سلول سوختی گیاهی-میکروبی از گیاهان به عنوان منبع مواد میکروبی استفاده می‌کند که با قراردادن ریشه‌های گیاه در نزدیکی منطقه آندی که محیط بی‌هوازی در MFC فرض می‌شود، به دست می‌آید، و به سیستم^۴ اجازه می‌دهد تا به عنوان یک بیورآکتور عمل کند که تبدیل انرژی از انرژی الکتریکی شیمیایی به انرژی الکتریکی سبز را ممکن می‌سازد [۱۲].

در این مقاله مروری به بررسی پتانسیل سلول‌های سوختی میکروبی و مشکلات و چالش‌های آن‌ها و همچنین مواردی که نیاز است تحقیقات بیشتری بر روی آن‌ها صورت گیرد تا باعث بهبود سلول‌های سوختی میکروبی شود پرداخته شده است. این مقاله به طور گسترده یافته‌های تحقیقات تجربی نویسندگان مختلف را مورد بحث قرار می‌دهد و شکاف‌های دانش سلول‌های سوختی میکروبی را که باید برای به دست آوردن یک درک جامع و اصولی از کار سلول‌های سوختی میکروبی مورد بهره‌برداری قرار گیرند، را بررسی می‌کند همچنین به خواننده این بینش را می‌دهد که زمینه‌هایی که هنوز مورد بهره‌برداری قرار نگرفته‌اند و زمینه‌هایی که برای تجاری‌سازی لازم است را شناسایی کند. در ادامه ابتدا در یک دسته‌بندی کلی سلول‌های سوختی تک محفظه‌ای، دو محفظه‌ای و انباشته توضیح داده می‌شوند، سپس ساختار کلی سلول‌های سوختی توضیح داده می‌شود و پس از آن سلول‌های سوختی میکروبی که به انواع سلول‌های سوختی مبتنی بر میکروارگانسیم‌ها، مبتنی بر رنگ، مبتنی بر پساب، سلول‌های سوختی کاتد-هوا و ... تقسیم‌بندی شده‌اند، همچنین نحوه عملکرد آن‌ها،

جهت پیشرفت تکنولوژی و بقای زندگی در تمامی حوزه‌ها چه در صنعت، چه در حوزه کشاورزی و حمل و نقل و ... انرژی مورد نیاز است و بدون انرژی هیچ‌گونه پیشرفتی حاصل نمی‌شود [۱-۲]. با توجه به رشد جمعیت در دنیا، تقاضا برای انرژی روز به روز بیشتر هم می‌شود که متأسفانه به طور کلی در دنیا به درستی از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده نشده است که انتظار می‌رود منابع انرژی تجدیدپذیر به سرعت جایگزین انرژی‌های تجدیدناپذیر شوند تا از هدر رفت منابع انرژی تجدیدناپذیر جلوگیری شود. از این‌رو، نیاز فوری به تحقیق و توسعه سایر منابع انرژی (تجدیدپذیر (Renewable)، پاک (Clean) و پایدار (Sustainable)) که کارآمد، کافی و سازگار با محیط زیست باشند، وجود دارد. سلول‌های سوختی میکروبی^۱ (MFC) که می‌توانند از استراتژی‌های اصلاح زیستی برای تولید انرژی استفاده کنند، بسیار مورد توجه هستند. سلول سوختی میکروبی مجموعه‌ای است که می‌تواند از فناوری الکتروشیمیایی برای تصفیه فاضلاب در حین تولید انرژی الکتریکی استفاده کند. مشخصه فاضلاب‌ها، غلظت بالای آلاینده‌هاست، سلول سوختی میکروبی می‌تواند از این فاضلاب بعنوان سوخت استفاده کند و از ورود آلاینده‌ها به محیط زیست در حین تولید برق جلوگیری کند [۳-۵].

سلول‌های سوختی میکروبی می‌توانند انرژی پاک را برای کاربردهای مختلف فراهم کنند. آن‌ها بی‌سروصدا و در شرایط ملایم عمل می‌کنند. قطعات متحرک کمتری دارند و برای انواع کاربردها مناسب هستند [۶]. سلول‌های سوختی میکروبی رآکتورهای بیوالکتروشیمیایی هستند که در آن‌ها میکروارگانسیم‌ها می‌توانند واسطه تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی ذخیره شده در توده بیومس^۲ یا مواد آلی به انرژی الکتریکی شوند [۷-۸]. MFCها همچنین می‌توانند به عنوان یک روش پیش تصفیه برای حذف مواد آلی محلول از زیست توده‌های مختلف استفاده شوند در حالی که به طور همزمان برق تولید کنند [۹]. آن‌ها همچنین می‌توانند

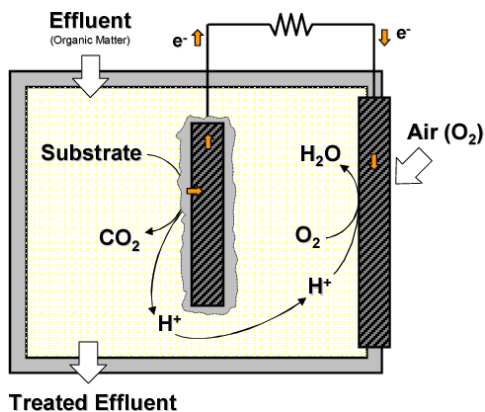
³ Plant-Microbial Fuel Cell

⁴ Setup

¹ Microbial Fuel Cell

² Biomass

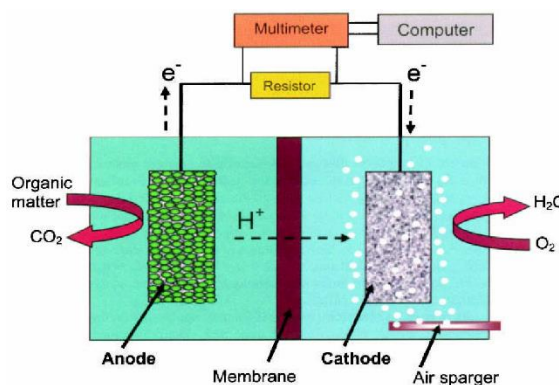
یک MFC تک محفظه معمولی از یک اتافک تشکیل شده است. فقط یک محفظه آند دارد که آند را در خود جای داده است. هیچ محفظه‌ی کاتدی مشخصی وجود ندارد و کاتد در معرض هوا قرار می‌گیرد [۱۶-۱۸].



شکل ۱- نمودار شماتیک یک MFC تک محفظه [۱۹]

۲-۲- سلول سوختی میکروبی دو محفظه‌ای

یک MFC دو محفظه‌ای دارای دو محفظه‌ی تعریف شده است، محفظه‌ی آند و محفظه‌ی کاتد، که توسط یک جداکننده از هم جدا می‌شوند که جداکننده می‌تواند یک غشاء یا یک پل نمکی باشد [۲۰].



شکل ۲- نمودار شماتیک MFC دو محفظه‌ای [۲۱]

۲-۳- سلول سوختی میکروبی انباشته

MFCهای انباشته آن‌هایی هستند که به صورت سری یا موازی به هم متصل می‌شوند. هنگامی که MFCهای منفرد به صورت موازی متصل یا روی هم چیده می‌شوند، ولتاژ، متوسط ولتاژ MFCهایی است که روی هم چیده شده‌اند،

استراتژی‌های بهبود عملکرد و چشم‌انداز آینده آن‌ها بررسی خواهد شد.

۲- سلول سوختی میکروبی

یک MFC استاندارد از محفظه‌های کاتد و آند تشکیل شده است. برای جداسازی آن‌ها از غشاء استفاده می‌شود. میکروب‌های درون محوطه آندی باعث متابولیسم کردن ترکیبات آلی در بخش آند شده و باعث تولید الکترون‌ها و یون‌های پروتون می‌شوند. این کار می‌تواند از طریق اکسیداسیون بی‌هوازی رخ دهد [۱۳]. سپس ترکیبات آلی به عنوان دهنده‌ی الکترون عمل می‌کنند. پس از آن الکترون‌ها به سطح آند منتقل می‌شوند و از آن‌جا می‌توانند از طریق مدار الکتریکی به کاتد مهاجرت کنند. از سوی دیگر، پروتون‌ها از طریق الکترولیت و سپس از طریق غشای کاتیونی به بخش کاتدی انتقال داده می‌شوند. سپس پروتون‌ها و الکترون‌ها در کاتد مصرف می‌شوند. انرژی الکتریکی با قرار دادن جمع‌کننده‌ی^۱ بار، در بین محفظه‌های آند و کاتد برداشت می‌شود [۱۴].

دستگاه MFC می‌تواند با استفاده از بهره‌وری از فعالیت باکتریایی در متابولیسم سوبستراهای معدنی و آلی در شرایط بی‌هوازی الکتریسته تولید کند. انرژی تولید شده از MFC معمولاً از نظر چگالی توان^۲ ارزیابی می‌شود. گفته می‌شود که بر خلاف منابع برق تجدیدپذیر مانند باد و خورشید که با چالش‌های نوسانات بهره‌وری، انتقال برق و ذخیره‌سازی مواجه هستند، انرژی تولیدشده از سلول‌های سوختی میکروبی پاک، ایمن، تجدیدپذیر و قابل ذخیره‌سازی است [۱۵].

در این بخش، به دستگاه‌های MFC تک محفظه‌ای که دارای آند و کاتد در یک محفظه‌ی واحد هستند، دو یا چند محفظه‌ای که دارای آند و کاتد در محفظه‌های جداگانه هستند و همچنین به دستگاه‌های سلول سوختی میکروبی دسته‌ای به صورت سری یا موازی پرداخته می‌شود.

۲-۱- سلول سوختی میکروبی تک محفظه

² Power density

¹ Collector

رفته در انتخاب ماده‌ی آند برای اطمینان از عملکرد مناسب MFC مهم است [۲۵]. ماده آند باید دارای سطح بزرگ، رسانایی بسیار خوب، پایداری شیمیایی و زیست سازگاری باشد تا از ارتباط خوب و پایدار بین باکتری و ماده‌ی آند اطمینان حاصل شود. اخیراً، مواد مبتنی بر کربن به عنوان مواد آندی استفاده شده‌اند [۲۷-۳۲]. همچنین، از فلزات یا اکسیدهای فلزی، پلیمرهای هادی یا مواد کامپوزیتی استفاده شده است [۲۲].

۳-۲- کاتد

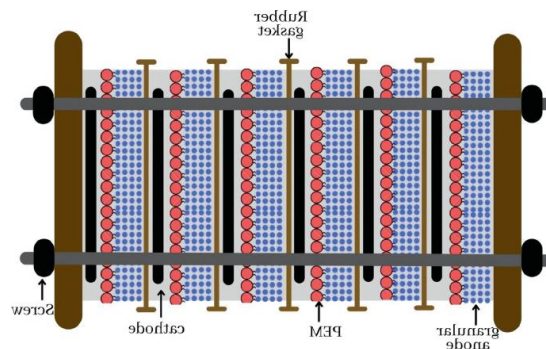
انتظار می‌رود یک الکتروود خوب، پتانسیل بالا جهت احیای اکسیژن، پایداری بالا و فعالیت الکتروکاتالیستی عالی داشته باشد [۳۳-۳۴]. چن^۳ و همکاران پیشنهاد کردند که مواد کاتدی باید به گونه‌ای ساخته شوند که در عین این که تولید برق بالایی داشته باشد، از نظر هزینه نیز مقرون به صرفه باشند. با توجه به ماهیت گران قیمت برخی از فلزات مورد استفاده در ساخت کاتد، مانند پلاتین، نیاز به توسعه کاتدهای جدیدی وجود دارد که سطوح آن دارای کاتالیزور کاتدی برای MFCها باشد که ارزان بوده و در احیای اکسیژن کارایی بالایی داشته باشند و باعث کاهش انرژی فعال‌سازی و بهبود سینتیک واکنش شوند [۳۵]. مواد کاتدی با استحکام مکانیکی خوب، رسانایی بالا و خواص کاتالیزوری خوب از اهمیت زیادی برخوردار هستند [۳۶].

موادی که به عنوان کاتد در MFCها استفاده می‌شوند شامل گرافیت به صورت رشته‌ای^۴، گرافیت به صورت میله‌ای^۵ و گرافیت به صورت ورقه‌ای^۶ [۳۷-۳۸] هستند. بسیاری از موادی که به عنوان آند استفاده می‌شوند که در بخش قبل ذکر شدند به عنوان مواد کاتدی نیز استفاده می‌شوند.

۳-۳- غشاها

غشاها مواد نیمه‌تراوایی هستند که به عنوان یک پل برای انتقال پروتون‌ها عمل می‌کنند تا پروتون‌ها از محفظه آند به محفظه کاتد منتقل شوند. غشاها همچنین می‌توانند از

در حالی که جریان مجموع جریان‌های MFCها به صورت منفرد است. از طرفی، هنگامی که MFCهای منفرد به صورت سری روی هم قرار گیرند، ولتاژ، مجموع ولتاژهای MFCهای منفرد است [۲۲]. انباشته شدن MFCها، به افزایش توان خروجی آن‌ها کمک می‌کند [۱۶، ۲۳]. همچنین مشاهده شده است که انباشته شدن MFCها منجر به افزایش ولتاژ تولید شده می‌شود.



شکل ۳- شماتیک MFC انباشته با شش واحد مجزا [۲۴]

۳- اجزای سلول سوختی میکروبی و

ویژگی‌های آن‌ها

۳-۱- آند

آند یک بخش بسیار مهم از MFC است زیرا به طور مستقیم با میکروارگانیسم تولیدکننده الکترون در تماس است. آند رسانایی الکترون را تضمین می‌کند و همچنین به شدت بر چسبندگی میکروارگانیسم‌ها تأثیر می‌گذارد، که تعیین‌کننده تشکیل بیوفیلم^۱ مورد نیاز برای انتقال الکترون از میکروارگانیسم به الکتروود است [۲۵]. در محفظه آند، میکروب‌ها باعث اکسید بستری^۲ می‌شوند که پروتون و الکترون تولید می‌کنند. الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی به کاتد منتقل می‌شوند در حالی که پروتون‌ها از طریق غشای داخلی انتقال داده می‌شوند. سپس پروتون‌ها و الکترون‌ها در کاتد مصرف می‌شوند و باعث احیای اکسیژن می‌شوند. در تصفیه فاضلاب برای تولید برق، محفظه آند بر خلاف محفظه کاتد معمولاً برای جلوگیری از حضور اکسیژن در شرایط بی‌هوازی کار می‌کند [۲۷]. روش به کار

⁴ Graphite fiber

⁵ Graphite rod

⁶ Graphite sheet

¹ Biofilm

² Substrates

³ Chen

۳-۳-۴- غشاهای دوقطبی

اینها شامل CEM و AEM هستند که در کنار هم در یک MFC قرار گرفته‌اند، یعنی دو غشای تک قطبی که در کنار هم قرار گرفته‌اند و یک فضای بین آنها وجود دارد.

۳-۴-۳- تلقیح^۵

محققان از لجن مزوفیل به عنوان مایه تلقیح در تجزیه جز مایع، ضایعات جامد فشرده برای تولید برق استفاده کرده‌اند [۴۳-۴۴]. سایر محققان همچنین از MFC استفاده کرده‌اند که با ۵۰ mL لجن دانه‌ای هوازی از یک کارخانه تصفیه فاضلاب در مقیاس کامل در لوبواوا، لهستان تلقیح شده بود [۴۵]. گونزالس^۶ و همکاران با سه MFC کار کردند و تلقیح با استفاده از لجن بی‌هوازی از یک تصفیه‌خانه فاضلاب انجام شد. سیستم MFC حداکثر چگالی توان 0.08 mW/m^3 را تولید کرد [۴۶].

۴- کاربرد MFC

۴-۱- MFCهای زیست توده^۷ جهت تولید برق

زیست توده یکی از فراوان‌ترین و تجدیدپذیرترین منابع انرژی است، منبع بزرگی برای تولید انرژی زیستی است و چشم اندازهای امیدوارکننده‌ای را برای تولید برق با استفاده از MFC نشان داده است [۴۷].

ییفنگ^۸ و همکاران تولید برق از هیدرولیز کاه گندم را مورد تحقیق قرار دادند. آن‌ها کاه گندم را در سه مرحله با مایع‌سازی پیش تصفیه کردند. یک MFC دو محفظه با کاغذ کربن به عنوان آند و کاتد استفاده شد. آن‌ها با غشا تبادل پروتون از هم جدا شدند. غلظت اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) 250 mg تا 2000 mg COD/L بود. باکتری‌های متصل به الکترودها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشاهده شدند. پس از ۱۵ روز کار سلول سوختی آن‌ها به حداکثر چگالی توان $13/6 \text{ mW/m}^2$ (ولت) با یک افزایش پایدار تولید برق از هیدرولیز بدون تاخیر دست یافتند همچنین آن‌ها توانستند چگالی

حرکت اکسیژن از کاتد به آند جلوگیری کنند. هریموان^۱ و همکاران از یک غشای نافیون ۲۰۲ برای جداکردن محفظه‌های آند و کاتد MFCهایی که از مواد اکریلیک ساخته شده بودند، استفاده کردند [۲۹]. در ذیل برخی از انواع غشاهایی که در MFCها به کار رفته اند، بررسی خواهند شد:

۳-۳-۱- غشای تبادل پروتون (PEM)^۳

انتظار می رود که یک PEM خوب مقاومت الکتریکی خوب و خواص جداسازی خوبی داشته باشد، هدایت پروتون را افزایش دهد، بتواند گرما و مواد شیمیایی را تحمل کند و مقرون به صرفه باشد. پل نمکی نوعی PEM است. یک پل نمکی شکل پایه‌ی PEM است که از یک نمک یونی مانند NaOH یا KCl تشکیل شده است که با آگار ذوب شده و در قالب استوانه‌ای جامد شده است [۳۹]. PEM پروتون‌های تولید شده در نتیجه تجزیه مواد آلی را به محفظه کاتد منتقل می‌کند. PEMها به نفوذپذیری پروتون بالا و پایداری حرارتی و شیمیایی بالا شناخته می‌شوند [۴۰].

۳-۳-۲- غشای تبادل کاتیونی (CEM)

این نوع غشاء حاوی گروه‌های دارای بار منفی مانند COO^- ، $\text{C}_6\text{H}_4\text{O}^-$ و غیره هستند. آن‌ها به یون‌های با بار مثبت مانند H^+ [۴۱] اجازه عبور می‌دهند و در عین حال از عبور یون‌های منفی جلوگیری می‌کنند [۳۴]. یو^۴ و همکاران از یک غشای تبادل کاتیونی به نام CM 17000 در کار تحقیقاتی خود استفاده کردند که حداکثر چگالی توان $2 \text{ mW/m}^2 \pm 4/77$ را تولید کرد [۱۷].

۳-۳-۳- غشای تبادل آنیونی (AEM)

این غشاها حاوی گروه‌هایی با بار مثبت مانند NR_3^+ ، NHR_2^+ ، NH_3^+ ، SR_2^+ ، PR_3^+ و ... هستند که به ماتریکس غشا متصل هستند. آن‌ها به گروه‌های دارای بار منفی اجازه عبور می‌دهند در حالی که از عبور گروه‌های مثبت جلوگیری می‌کنند [۴۲].

⁵ Inoculum

⁶ Gonzalez

⁷ Biomass

⁸ Yifeng

¹ Harimawan

² Nafion 202

³ Proton exchange membrane

⁴ You



شکل ۴. تصویر سیستم سلول سوختی میکروسکوپی [۹]

پامینتون^۴ و سانچز^۵ بر روی تولید برق در مجموعه سلول سوختی میکروبی با الکترودهای گرافیت و فولاد ضدزنگ که *Vigna radiata* (دانه ماش) را رشد می‌دادند، آزمایش کردند. آن‌ها از MFC تک محفظه‌ای با فولاد ضدزنگ و میله‌های گرافیتی به عنوان الکتروده استفاده کردند. مقاومت دارای بار 2000Ω بود و از سیم‌های مسی به عنوان رسانای خارجی استفاده شد که الکترودها را با بار مقاومت متصل می‌کرد. مطالعات پلاریزاسیون در ۳۰ روز جمع‌آوری داده‌ها انجام شد. در این مرحله، گیاهان به بلوغ رسیده بودند و در حال تولید میوه بودند. نتایج نشان داد که سیستم‌های فولاد ضدزنگ حداکثر چگالی توان 0.35 mW/m^2 را تحت مقاومت 8200Ω تولید کردند که ۴۰ درصد بیشتر از 0.25 mW/m^2 تولید شده توسط مقاومت‌های پیش‌فرض 2000Ω بود. الکترودهای فولادی ضدزنگ حداکثر چگالی توان را به دست آوردند که حدود ۲۰۰ درصد بیشتر از الکترودهای گرافیتی بود. علاوه بر این، گیاهانی که در مجموعه‌های سلول سوختی با مواد الکترودی در سیستم خود رشد می‌کنند، فراوانی و رشد بهتری را نشان می‌دهند. آن‌ها همچنین سالم‌تر و قوی‌تر از گیاهانی بودند که در سیستم بدون مواد الکترودی رشد می‌کردند [۱۱]. شماتیک استفاده شده در این کار در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

توان پایدار $76/6 \text{ mW/m}^2$ (0.58 V) را به مدت ۱۲ روز حفظ کنند [۷].

طبق مطالعه انجام شده توسط شریستا^۱ و همکاران، در تولید الکتروسیسته از گوجه‌فرنگی‌های معیوب، آن‌ها نشان دادند که تفاله گوجه‌فرنگی یک اهداکننده الکترون خوب در سلول‌های سوختی میکروبی است. آن‌ها از MFC دو محفظه‌ای به عنوان مدل آزمایشگاهی برای سیستم‌های الکتروشیمیایی میکروبی استفاده کردند. پنج نمونه آزمایش با غلظت COD تقریباً 828 mg/L و $7 \pm 0.7 \text{ pH}$ استفاده شد. پس از کار به مدت ۱۲۵ روز به صورت عملیات بچ^۲، نتیجه، حداکثر راندمان حذف COD ۹۲ درصدی و پیک جریان و چگالی توان به ترتیب 150.4 mA/m^2 و 15.04 mW/m^2 را نشان داد [۴۴]. عملکرد بهتر برای گوجه‌فرنگی‌های خراب شده مشاهده شد، که به مونوساکارید و گونه‌های فعال ردوکس آن نسبت داده شد که با نرخ بالای انتقال الکترون مشخص می‌شوند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که گوجه‌فرنگی‌های معدوم‌شده خوراک جذابی برای تولید برق هستند. تحقیق انجام شده توسط پرکش^۳ و همکاران (۲۰۱۶) بر روی تولید بیوالکتروسیسته از زیست توده‌های مختلف، در شرایط هوایی و در محفظه آندی صورت گرفت که حاوی بستر و بیوکاتالیست بود. سپس میکروارگانیسم‌ها مواد آلی موجود در محفظه آندی را تحت شرایط بی‌هوازی اکسید کرده و الکترون و پروتون تولید کردند. از سوی دیگر، محفظه کاتدی حاوی آب نمک بود و در شرایط هوایی کار می‌کرد. انواع مختلف زیست توده از جمله کود گاوی، کود کربنی، فاضلاب و لجن فاضلاب مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر ولتاژ تولیدی 2500 mV/l با استفاده از لجن فاضلاب بوده که بیشترین درصد مواد آلی را دارد [۹]. سیستم مورد استفاده در این کار در شکل شماره ۴ مشاهده می‌شود.

⁴ Pamintuan

⁵ Sanchez

¹ Shrestha

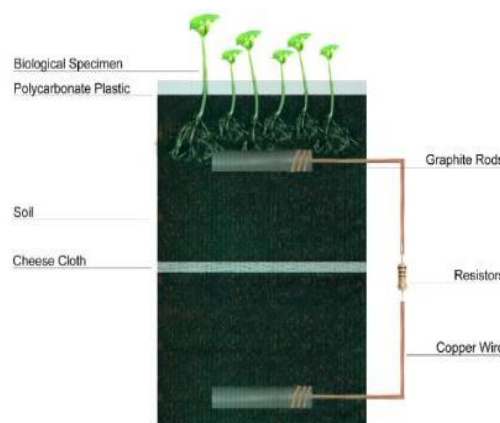
² Batch

³ Parkash

درون سلولی و زیست توده میکروبی باعث افزایش تولید برق می‌شود [۴۹].

چتورودی^۴ و پارادیپ^۵ یک رویکرد سبز برای استفاده از زباله برای تولید بیوالکتریسیته اتخاذ کردند. آن‌ها دریافتند که مطالعات گسترده دید جدیدی را در مورد MFCها تأیید کرده است، و نشان می‌دهد که طیف گسترده‌ای از منابع کربن، از جمله زباله، می‌تواند با استفاده از میکروبی‌های مختلف استفاده شود [۱۴].

خان^۶ و عبیدی^۷ آزمایشی بر روی تولید بیوالکتریسیته نسبی از مرکبات ضایعاتی با استفاده از سلول‌های گالوانیکی، سلول‌های سوختی و سلول‌های سوختی میکروبی انجام دادند. نتایج نشان داد که تمام سلول‌ها برق را از مرکبات تولید کردند. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل دقیق میکروسکوپی تمام نمونه‌هایی که آن‌ها انجام دادند نشان داد که همه MFCها در مقایسه با سلول‌های سوختی همتای خود، توان خروجی بالاتری داشتند. میوه‌های مورد استفاده لیمو، پرتقال، گریپ فروت و مخلوط میوه‌ها بودند. آب آن‌ها در محفظه آندی MFCها که دارای الکترودهای روی بودند، استفاده شد. و الکترودهای مسی در محفظه کاتدی، MFCهای دو محفظه‌ای بودند که دارای چهار سلول به صورت سری و موازی بودند. الکترون‌ها از طریق یک سیم مسی از محفظه آندی خارج شده و به شکل جریان به سمت الکترودهای مسی در جریان بودند. پروتون در محفظه آندی جمع شد و سپس از طریق پل نمکی به محفظه کاتدی انتقال داده شد و در آنجا با O₂ واکنش داد تا آب فوق‌العاده خالص تولید کند. نتایج همچنین نشان داد که لیمو در MFC بالاترین توان خروجی ۲/۹۲ mW/m² را در مقایسه با پرتقال، که ۲/۶۴ mW/m² بود، تولید کرد. گریپ فروت، ۲/۲۵ mW/m²؛ و مخلوط میوه‌ها، mW/m² ۲/۰۲ توان خروجی داشتند. علاوه بر این، با مقایسه توان خروجی ۲/۹۲ mW/m² لیمون‌سل به صورت سری با توان خروجی ۳/۵۵ mW/m² به صورت موازی، مشخص شد که حالت موازی بهتر از حالت سری بود. در این آزمایش چهار واحد سلولی به صورت سری و موازی مورد آزمایش قرار



شکل ۵. شماتیک سلول سوختی گیاهی- میکروبی [۱۱]

ساساکی^۱ و همکاران زیست توده و گلوتامات درون سلولی را در بیوفیلیم‌های آندی بررسی کردند که منجر به تولید برق کارآمد توسط سلول‌های سوختی میکروبی شد. رآکتور MFC حاوی یک کاست-الکتروود^۲ بود که شامل یک کاتد هوا، یک جداکننده و یک آند بود. کاتد هوا کاغذ کربنی بود که با لایه‌های ۴- پلی‌تترافلورواتیلن و یک کاتالیزور پلاتین-کربن پوشانده شده بود [۴۹]. از گرافیت نمدی و فیلتر شیشه‌ای به عنوان آند و جداکننده استفاده شد. مقاومت اولیه ۱۰۰۰۰ Ω با استفاده از چهار MFC با پیکربندی رآکتور یکسان استفاده شد و راندمان حذف COD به صورت درصدی با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد.

$$\text{COD راندمان حذف (\%)} = \frac{\text{COD}_{\text{In}} - \text{COD}_{\text{Out}}}{\text{COD}_{\text{In}}} \times 100 \quad (i)$$

محاسبات آن‌ها نشان داد که راندمان حذف COD در MFC 1 بالاترین مقدار را داشت و ۸۰/۷ ± ۸/۳۰ درصد بود. گونه‌های ژئوباکتر^۳ در بیوفیلیم آند غالب بود و الکتریسیته نسبتاً بیشتری تولید می‌کرد. این بدان معنی است که رشد بیش از حد میکروارگانیسم‌های حاوی بیوفیلیم و احتمالاً پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی از تولید برق جلوگیری می‌کند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تولید برق توسط MFCها با وجود استفاده از شرایط عملیاتی و پیکربندی رآکتور یکسان، متفاوت است. تجمع میکروبی پیچیده در بیوفیلیم آندی نشان داد که کاهش گلوتامات

⁵ Pradeep
⁶ Khan
⁷ Obaid

¹ Sasaki
² Cassette-electrode
³ Geobacter
⁴ Chaturvedi

دو محقق از سلول‌های سوختی میکروبی مبتنی بر قارچ استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که MFCها محبوبیت خود را مدیون میکروارگانیسم‌های مختلفی مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها یا جلبک‌ها هستند، که فعالیت کاتالیزوری آن‌ها امکان تولید فعلی را از طیف وسیعی از بسترها فراهم می‌کند [۵۱]. قارچ‌ها را می‌توان به عنوان هر دو بیوکاتالیست کاتد و آند استفاده کرد. آن‌ها همچنین دریافتند که قارچ‌ها در سیستم‌های MFC در دو حالت اصلی استفاده شده‌اند: (۱) در آند، انتقال الکترون مستقیماً از طریق پروتئین‌های قارچی فعال ردوکس یا با کمک واسطه‌های شیمیایی که انتقال الکترون‌ها را تسهیل می‌کنند، انجام می‌شود. و (۲) در کاتد، قارچ‌ها منبع آنزیم‌هایی هستند که کاهش‌گیرنده الکترون انتهایی را که عمدتاً اکسیژن است، کاتالیز می‌کنند.

برای انتقال مستقیم الکترون، الکترون‌ها باید به غشای خارجی سلول برسند و تماس فیزیکی بین غشای خارجی و آند لازم است. انتقال الکترون از طریق سیتوکروم و نانوسیم‌های غشای خارجی یا پروتئین‌های انتقال الکترون ترانس غشایی با تماس مستقیم و بدون هیچ واسطه الکترونی انتشاری صورت می‌گیرد. نانوسیم‌ها به سیتوکروم‌های متصل به غشاء متصل می‌شوند و به الکتروسیسته‌ها اجازه می‌دهند تا از الکترودی که در تماس مستقیم با سلول نیست به عنوان گیرنده الکترون استفاده کنند. پروتئین‌های انتقال الکترون نقش مهمی در انتقال مستقیم الکترون دارند زیرا الکترون‌ها را از سیتوپلاسم به غشای خارجی و در نهایت به آند منتقل می‌کنند. انتقال مستقیم الکترون اولین انتخاب برای تولید جریان کارآمد در MFCها است. محدودیت انتقال مستقیم الکترون این است که مکان‌های فعال پروتئین‌های انتقال الکترون معمولاً درون پروتئین‌ها مدفون می‌شوند که منجر به سرعت انتقال الکترون ضعیف می‌شود. تاکنون، تنها چندین گونه از باکتری‌های فعال الکتروشیمیایی مانند شوانلا و ژئوباکتر برای تشکیل نانوسیم‌های باکتریایی شناسایی شده‌اند که الکترون‌ها را از سلول دور می‌کنند. برای انتقال غیرمستقیم الکترون، انتقال الکترون با کمک واسطه‌های محلول با

گرفتند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که لیمو فوق‌العاده است زیرا آنالیز فیزیکوشیمیایی نشان داد که کمترین مقدار pH را دارد، که باعث می‌شود در مقایسه با سایر مرکبات برای تولید بیوالکتریسته استفاده شود [۳۸].

یوتا^۱ و همکاران تولید الکتروسیسته از سبوس برنج توسط یک سلول سوختی میکروبی و تأثیر پیش تصفیه کاویتاسیون هیدرودینامیکی را مورد تحقیق قرار دادند. آن‌ها یک MFC تک محفظه‌ای با یک آند نمدی کربنی و یک کاتد هوای موجود در پارچه کربنی ساختند. آن‌ها سه سیستم MFC را که به مقاومت خارجی 510Ω متصل بودند، بررسی کردند. MFC-1 دارای سبوس برنج و گل^۲ در کف بود. MFC-2 دارای سبوس برنج بود. و MFC-3 گل و لای داشتند. پس از ۴۹ روز کار، MFC-1 بار الکتریکی کلی $10^2 \times 1/58$ را داد، که چهار برابر بیشتر از MFC-2 بود که دارای بار الکتریکی $10^2 \times 3/69$ بود. MFC-3 کمترین مقدار را ($10 \times 2/04$) داد. مطالعات نشان داد که هم سبوس برنج و هم گل کف برای تولید برق مهم هستند. بار الکتریکی کل پس از پیش تصفیه با کاویتاسیون هیدرودینامیکی ۲۶ درصد افزایش یافت. تجزیه و تحلیل فیلوژنتیک رشد غالب باکتری‌های تخمیری مانند گونه‌های باکتریوئید و کلسترییدیوم و همچنین گونه‌های ژئوباکتر خارجی الکتروژنی را در بیوفیلم‌های آند نشان داد [۱].

۲-۴- MFCهای مبتنی بر میکروارگانیسم‌ها جهت تولید برق

میکروارگانیسم‌ها نقش مهمی به عنوان بیوکاتالیست در تولید الکتروسیسته از طریق به کارگیری خواص اگزوالکتروژنیک^۳ طبیعی خود دارند [۵۰]. خاصیت اگزوالکتروژنیک توانایی یک میکروارگانیسم برای تولید انتقال الکترون خارج سلولی است. میکروارگانیسم‌ها می‌توانند در نتیجه فرآیندهای متابولیکی خود برق تولید کنند. از این رو آن‌ها اغلب به عنوان بیوکاتالیست‌های آندی یا کاتدی در ساختارهای مختلف راکتور استفاده می‌شوند [۸]. جدول ۱ نمونه‌هایی از این میکروارگانیسم‌ها و نحوه به کارگیری آن‌ها را نشان می‌دهد.

³ Exoelectrogenic

¹ Yuta

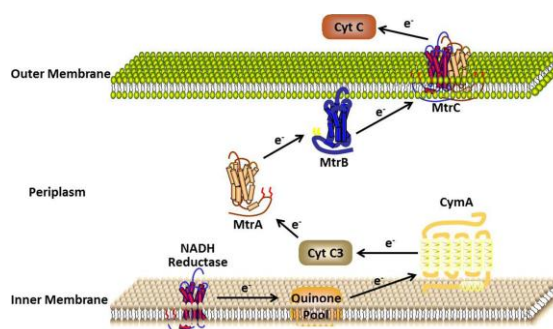
² Bottom mud

الیاف گرافیت با مقاومت‌هایی با مقادیر 47Ω ، 100Ω ، 470Ω ، 1000Ω ، 2200Ω و 4700Ω بودند. پس از کار به مدت ۳۰ روز، نتایج به دست آمده نشان داد که حداکثر توان و جریان خروجی برای گونه‌های باکتریایی مخلوط $62/77 \mu W$ و $0/7 \text{ mA}$ و برای کشت خالص به ترتیب $32/51 \mu W$ و $0/28 \text{ mA}$ بود [۱۵].

چایجک^۳ و همکاران با استفاده از یک سلول سوختی میکروبی مبتنی بر لاکاز با مخمر گالاتومایسس^۴ روی کاتد، تولید برق را افزایش دادند. آن‌ها از MFC دو محفظه‌ای استفاده کردند. الکتروود آند پارچه کربنی ساده بود، در حالی که الکتروود کاتد سه نوع بودند، پارچه کربنی با پوشش $0/3 \text{ mg/cm}^2$ پلاتین، پارچه کربنی ساده با نارگیل و پارچه کربنی ساده با گالاتومایسس که به مدت ۷ روز روی نارگیل کشت داده شد. مقاومت‌های خارجی 390Ω ، 500Ω و 1000Ω به الکتروودها متصل شدند. نتایج نشان داد که MFC با گالاتومایسس حداکثر دارای OCV 250 میلی ولت بود و چگالی توان 59 mW/m^2 ، چگالی جریان 278 mA/m^2 با افزایش ۷۰ درصدی پتانسیل کاتد در مقایسه با زمانی که از گالاتومایسس استفاده نشده بود را تولید کرد. آن‌ها نشان دادند که مخمر تولیدکننده لاکاز (گالاتومایسس) می‌تواند به عنوان یک کاتالیزور زیستی در کاتد MFC دو محفظه‌ای عمل کند [۳۲].

عبدالر^۵ و همکارانش از نوعی تولیدکننده لاکاز (*Aspergillus sydowii* NYKA 510) به عنوان یک بیوکاتالیست کاتدی در سلول سوختی میکروبی استفاده کردند. آن‌ها *Aspergillus sydowii* NYKA 510 را به عنوان قوی‌ترین تولیدکننده لاکاز در میان سه سویه قارچ مشتق شده از خاک جدا و شناسایی کردند. آن‌ها سولفات مس اضافه کردند که بازده آنزیم را به ۱۴۵ درصد افزایش داد. این در یک MFC با سیستمی از مجموعه‌های MFC که به صورت سری به هم متصل شده بودند، به کار گرفته شد. این مجموعه $1/5 \text{ W}$ توان داشت و برای روشن کردن یک لامپ LED، $0/8 \text{ W}$ به مدت ۱۰۰ ساعت (۴ روز) کافی بود. بهترین عملکرد در 2000Ω با دستیابی به V

مولکول کم انجام می‌شود که نیاز به تماس مستقیم بین سلول و گیرنده الکترون را از بین می‌برد. واسطه‌های الکترونی می‌توانند وارد سلول‌های باکتری شده، الکترون‌ها را از واکنش‌های متابولیکی الکتروسیته‌ها استخراج کنند و این الکترون‌ها را به آند یک MFC برسانند [۵۱]. در شکل ۶ مکانیسم انتقال الکترون پیشنهادی شوانلا مشاهده می‌گردد.



شکل ۶. مکانیسم انتقال الکترون پیشنهادی شوانلا [۵۱]

آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تولید توان در MFC‌ها با استفاده از یک سویه قارچ، با تولید توان در MFC‌ها با استفاده از یک سویه باکتری، قابل مقایسه است. تحقیقات بهینه‌سازی عملکرد سلول‌های سوختی میکروبی را با استفاده از لاکتوباسیلوس بولگاریکوس^۱ نشان داده است. آن‌ها از لاکتوباسیلوس بولگاریکوس به عنوان تولیدکننده برق در رآکتور MFC دو محفظه‌ای استفاده کردند که میله‌های کربن هم به عنوان کاتد و هم به عنوان آند عمل می‌کنند. آن‌ها اثرات چگالی نوری، زمان عملیات، حجم رآکتور و نوع الکترولیت را بر عملکرد سیستم MFC بررسی کردند. نتیجه نشان داد که پس از ۱۰۰ ساعت کار، رآکتور 500 میلی لیتری دارای چگالی توان 125 mW/m^2 است. هنگامی که دو رآکتور 100 میلی لیتری و 500 میلی لیتری با هم ترکیب شدند و به صورت سری متصل شدند، حداکثر توان تولیدی به $201/8 \text{ mW/m}^2$ افزایش یافت [۳۱].

فخریال^۲ و همکاران روی تولید برق در یک سلول سوختی میکروبی توسط یک باکتری جدا شده از خاک شالیزار برنج کار کردند. آن‌ها از MFC تک محفظه‌ای با خاک شالیزار برنج به عنوان تلقیح و بستر استفاده کردند. آند و کاتد از

⁴ Galactomyces

⁵ Abdallar

¹ Lactobacillus bulgaricus

² Fakhrial

³ Chaijak

استات و رآکتورهای تغذیه شده با گلوکز. پس از کار، حداکثر جریان $4/6 \text{ mA/m}^2 \pm 284/5$ و حداکثر چگالی توان $0/4 \text{ mW/m}^2 \pm 44/3$ را به دست آوردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مقاومت خارجی نه تنها بر پتانسیل آند و تولید جریان، بلکه بر بیوفیلم آند و متانوزنز تأثیر می‌گذارد. [۵۳]

ادگونلوی^۷ و اولوتو^۸ جهت تولید الکتروسیسته، با استفاده از سلول‌های سوختی میکروبی، از گل بنتونیک جمع‌آوری شده از دو مکان در آکوره و نیجریه استفاده کردند. الکترودهای مورد استفاده در MFC از میله‌های کربنی به دست آمده از باتری‌های سلول خشک ساخته شده بودند، در حالی که از یک پل نمکی به عنوان جداکننده استفاده می‌شد. گل اعماق دریا از دو نقطه در آکوره جمع‌آوری شد و با استفاده از تکنیک‌های میکروبیولوژیکی استاندارد، باکتری‌ها و قارچ‌ها را به مدت دو روز از گل کف دریا جدا کردند. تنظیم کنترل گل استریل شده از همان منبع بود و نتیجه آن‌ها نشان داد که آن‌ها حداکثر ولتاژ $192/5 \text{ V}$ و جریان $0/53 \text{ A}$ تولید کردند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که میکروارگانسیم‌های بی‌هوازی قادر به تولید الکتروسیسته از سلول‌های سوختی میکروبی در شرایط مناسب هستند. [۵۴]

۳-۴- MFCهای مبتنی بر رنگ جهت تولید برق

رنگ‌های آزو با حضور یک یا چند پیوند آزو مشخص می‌شوند که به صورت (-N=N-) نشان داده می‌شوند. در ارتباط با سیستم‌های آروماتیک و اکسوکرومها (OH^- ، SO_3^- و غیره)، آن‌ها معمولاً به دلیل پایداری شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما بیشتر رنگ‌ها سرطازا، حساسیت‌زا، غیرقابل تجزیه زیستی و کاملاً سمی هستند. از این رو، استفاده مداوم و گسترده از آن‌ها خطرات جدی برای سلامت انسان و خطرات زیست محیطی دارند. برخی از روش‌ها، مانند رسوب الکتریکی، الکتروفلوتاسیون، انعقاد الکتریکی و الکترواکسیداسیون برای حذف رنگ‌ها از فاضلاب استفاده شده‌اند [۵۵-۵۶]، اما گران هستند و

$0/76$ ، 380 mA/m^2 ، 160 mW/m^2 و $0/4 \text{ W}$ به دست آمد [۵۰].

کائو^۱ و همکاران بر روی خصوصیات الکتروسیسته تولید شده توسط خاک در سلول‌های سوختی میکروبی و جداسازی باکتری‌های اگزوالکتروجنیک منشا خاک کار کردند. هفت نمونه خاک در سراسر چین جمع‌آوری شد و در MFCهای کاتد-هوا به کار گرفته شد تا در مدت ۲۷۰ روز برق تولید شود. بیست و یک رآکتور MFC با کاتد-هوا در بشر ساخته شد. از نمک کربن مریعی به عنوان آند استفاده شد، در حالی که از کاغذ کربن پلاتینه به عنوان کاتد استفاده شد. پس از کار، آن‌ها حداکثر چگالی توانی را که تولید کردند بین $16/4 \text{ mW/m}^2$ تا $28/6 \text{ mW/m}^2$ بود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که محتوای OC خاک مهم‌ترین اثر را بر تولید برق دارد و کلستریدازاز^۲ گروه باکتری‌های خارجی الکتروژنی غالب در خاک است [۵۱].

آنجلالچلنسی^۳ و همکاران روش‌های مهندسی بیوفیلم را برای بهبود عملکرد سلول‌های سوختی میکروبی و سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی مطالعه کردند. آن‌ها به مکانیسم تشکیل بیوفیلم در میکروارگانسیم‌های الکترواکتیو و استراتژی‌هایی برای بهبود تشکیل بیوفیلم پرداختند که منجر به بهبود نرخ الکتروکاتالیستی برای کاربرد در سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در حالی که باکتری‌های کاهنده فلز، به طور عمده ژئوباکتر و شوانلا کمک زیادی به MFCها کرده‌اند، سایر اگزوالکتروژن‌ها نیز باید کشف و به کار گرفته شوند و برای بهبود آینده فناوری‌های پشتیبانی شده از MFC مورد استفاده قرار گیرند [۵۲].

یونگ^۴ و ریگان^۵ تأثیر مقاومت بر روی الکتروژنز، متانوزنز و تجمع پروکاریوتی آند را در سلول‌های سوختی میکروبی آزمایش کردند. آن‌ها یک MFC دو محفظه‌ای ساختند، آند یک کاغذ کربنی بود که با لجن بی‌هوازی تلقیح شده بود، و کاتد نیز کاغذ کربنی بود اما با $0/35 \text{ mg Pt/cm}^2$ پوشانده شد و توسط غشای نافیون^۶ از آند جدا شده بود. آن‌ها دو مجموعه رآکتور داشتند: رآکتورهای تغذیه شده با

⁵ Regan

⁶ Nafion

⁷ Adegunloye

⁸ Olotu

¹ Cao

² Clostridiaceae

³ Angelacilincy

⁴ Jung

جدول ۱- میکروارگانیسم‌های مورد استفاده در MFC

منبع	حداکثر دانسیته جریان	میکروارگانیسم	محفظه	جداکننده	سابستریت
[۷]	۱۲۳ mW/m ²	باکتری باسیلوس	دو محفظه‌ای آند: کاغذ کربن کاتد: کاغذ کربن		
[۳۱]	۲۰۱/۸ mW/m ²	لاکتوباسیلوس بولگاریکوس	دو محفظه‌ای آند: میله کربن کاتد: میله کربن	غشای تبادل پروتون	
[۱۵]	۷۷/۶۲ mW/m ²	ژئوباکتر شوانلا رودوفراکس	تک محفظه‌ای آند: الیاف گرافیت کاتد: الیاف گرافیت.		خاک شالیزار برنج
[۳۲]	۵۹ mW/m ²	گالاتومایسس	دو محفظه‌ای آند: پارچه کربنی کاتد: پارچه کربنی	غشای تبادل پروتون	
[۵۰]	۱۶۰ mW/m ²	آسپرژیلوس Sydowii NYKA 510	تک محفظه‌ای کاتد-هوا آند: نمک کربن کاتد: نمک کربن	بدون غشا	
[۵۳]	۴۳/۳±۰/۴ mW/m ²	ژئوباکتر متانوسیتا	کربنی با پوشش پلاتینی	غشا نافیون	استات و گلوکز

و یک محفظه کاتد هوازی تشکیل شده است. پرسولفات کاتالیز شده Fe(II)-EDTA به عنوان محلول کاتدی برای رنگ‌زدایی OG و برداشت برق به طور همزمان استفاده شد. پس از ۱۲ ساعت کار، آن‌ها حداکثر چگالی توان mW/m^2 ۹۱/۱ را تولید کردند، نرخ حذف OG، ۹۷/۴٪ بود و تجزیه OG توسط پرسولفات کاتالیز شده Fe(II)-EDTA از مدل سینتیکی مرتبه دوم پیروی می‌کرد [۵۸]. زکریا^۴ و تیمش نارنجی راکتیو ۱۶^۵ را به عنوان رنگ مدل به دلیل مقاومت بالای آن در برابر روش‌های تصفیه مرسوم انتخاب کردند. آن‌ها از زغال چوب فعال تجاری موجود و زغال چوب از تنه نارگیل، چوب حرا، چوب لاستیک و نیشکر جهت ساخت الکترودهای موثر و کم‌هزینه برای رنگ‌زدایی رنگ نارنجی راکتیو ۱۶ استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تمام الکترودهای کامپوزیت زغال چوب پتانسیل خوبی برای رنگ‌زدایی رنگ نساجی نارنجی راکتیو ۱۶ دارند [۵۷]. مطالعات قبلی نشان داده است که تولید لاکاز قارچی ناشی

چندان کارآمد نیستند [۵۷]. وقتی صحبت از تصفیه فاضلاب حاوی رنگ می‌شود، MFC امیدوارکننده است.

رنگ‌ها اغلب بر اساس گروه کروموفور خود به عنوان رنگ‌های آزو، آنتراکینون، تری‌فنیل‌متان، هتروسیکلیک یا فتالوسیانین طبقه‌بندی می‌شوند [۲۸]. محققان تلاش‌هایی را برای یافتن جایگزینی برای تصفیه معمول رنگ در مقیاس بزرگ انجام داده‌اند. از این‌رو، اصلاح زیستی^۱ از آن‌جایی که هزینه کمتری دارد و سازگار با محیط زیست است مورد توجه قرار گرفته است. فناوری MFC یک رویکرد امیدوارکننده برای حذف آلاینده‌ها و در عین حال تولید برق در نظر گرفته شده است.

چنگ-گان^۲ و همکاران از پرسولفات کاتالیز شده با Fe(II)-EDTA برای رنگ‌زدایی رنگ آزو، نارنجی G^۳ (OG)، در سلول‌های سوختی میکروبی استفاده کردند. آن‌ها از MFC دو محفظه‌ای استفاده کردند که از یک محفظه آند بی‌هوازی

⁴ Zakaria

⁵ Reactive orange 16

¹ Bioremediation

² Cheng-Gan

³ Orange G

کاهش پتانسیل سلولی و ارزش چگالی توان به دلیل مهار میکروبی در غلظت‌های بالای سوبستراهای سمی شد [۱۸]. ماری^۵ و همکاران بر روی نقش واسطه‌های ردوکس لاکاز طبیعی در رنگ‌زدایی همزمان رنگ و تولید نیرو در سلول‌های سوختی میکروبی کار کردند. آنزیم لاکاز به عنوان یک بیوکاتد MFC در حضور دو واسطه اکسیداسیون و کاهش طبیعی و یک واسطه مصنوعی رایج به منظور مقایسه آن‌ها استفاده شد. سپس از این‌ها برای بررسی تأثیر آن‌ها بر رنگ‌زدایی رنگ آزو و تولید نیرو استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که پس از ۲۴ ساعت کار، راندمان رنگ‌زدایی ۹۴ درصد و حداکثر چگالی توان $4/2 \text{ mW/m}^2 \pm$ ۷۷/۲ را به دست آوردند. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که واسطه‌های ردوکس طبیعی لاکاس ممکن است رنگ‌زدایی رنگدانه (اسید نارنجی ۴۷) و چگالی توان را در سلول‌های سوختی میکروبی بهبود بخشد [۵۸].

۴-۴- MFCهای مبتنی بر پساب جهت تولید برق

آلودگی جهان به طور مداوم در حال افزایش است و همچنین تقاضای انرژی در حال افزایش است که به نوبه خود منجر به افزایش تولید زباله می‌شود. امروزه، فاضلاب را می‌توان برای جلوگیری از آلودگی تصفیه کرد و از آن برای تولید برق استفاده کرد که آن را به منبعی عالی برای تامین نیازهای روزافزون انرژی جهان تبدیل می‌کند. فاضلاب به عنوان یک خطر بزرگ برای سلامتی محیط زیست انسان و سایر موجودات و مهم‌تر از همه، آبزیان، که فاضلاب مستقیماً به آنجا می‌رود، در نظر گرفته می‌شود [۶۰]. فاضلاب از منابع مختلف به عنوان یک بستر مناسب برای تصفیه زیستی عمل می‌کند و کاربرد آن در فناوری MFC ثابت کرده است که راه حلی ایده آل برای مشکل طولانی مدت مدیریت فاضلاب است [۴۲]. ترکیبات نیتروژن و سایر مواد مغذی خارج شده از فاضلاب و سایر فعالیت‌های انسانی می‌توانند باعث اتروفیکاسیون^۷ و بدتر شدن کیفیت آب و اکوسیستم‌های آبی شوند [۶۱].

از سلول سوختی میکروبی رنگ آنتراکینون رامازول برلیانت آبی^۱ R را تخریب می‌کند. آن‌ها از MFC دو محفظه‌ای استفاده کردند و نتیجه نشان داد که محفظه کاتد MFC باعث کاهش رنگ آنتراکینون تا ۸۰ درصد می‌شود و هم باعث افزایش چگالی توان تا $180/5 \text{ mW/m}^2$ می‌شود. این عملیات به مدت ۲۰ روز به طول انجامید و در طی آن ۶۲/۱ درصد از مواد آلی در محفظه آندی حذف شد و در نتیجه پساب با سمیت بسیار کمتری باقی ماند [۲۸]. ولودارچک^۲ و همکاران بر روی تجزیه رنگ‌های آزو با استفاده از واکنش فنتون درجه ۳ که در سلول‌های سوختی میکروبی تولید H_2O_2 گنجانده شده است، کار کردند. آن‌ها از MFC دو محفظه‌ای با گرافیت به عنوان آند و کاتد استفاده کردند، سپس ثابت کردند که علاوه بر بازده توان، سنتز H_2O_2 در کاتولیت یک سیستم MFC نیز امکان‌پذیر است. H_2O_2 تولید شده از MFC را می‌توان با محلول آهن مخلوط کرد. یک سیستم فنتون الکتروشیمیایی بدون انرژی خارجی جدید ایجاد خواهد شد که آن‌چه را که ما سیستم MFC-Fenton می‌نامیم ایجاد می‌کند. سپس از این برای بررسی تخریب درجا تاج خروس (رنگ آزو) در ارتباط با تولید برق استفاده شد. هنگامی که 1 mmol/L Fe^{2+} استفاده شد، تاج خروس (75 mg/L) با نسبت ۸۲/۵ درصد در ۱ ساعت حذف شد. در پایان، آن‌ها حداکثر چگالی توان mW/m^2 ۲۸/۳ را تولید کردند [۴].

خان^۳ و همکاران تحقیقاتی در مورد تولید بیوالکتریک و تصفیه زیستی یک رنگ آزو در فرآیند لجن فعال همراه با سلول سوختی میکروبی انجام دادند. آن‌ها از یک فرآیند ترکیبی بی‌هوازی-هوازی استفاده کردند. سیستم بی‌هوازی یک MFC تک محفظه معمولی بود که از رنگ آبی اسیدی R (ANB) همراه با گلوکز به عنوان بستر رشد برای تولید برق استفاده می‌کرد. میله‌های گرافیت هم به عنوان آند و هم به عنوان کاتد مورد استفاده قرار گرفتند و نتیجه نشان داد که راندمان کلمبیک (CE) و چگالی توان به مقادیر اوج ۱۰/۳۶ درصد و 2236 mW/m^2 برای ۲۰۰ ppm ANB رسید. افزایش بیشتر در غلظت ANB منجر به

⁵ Mari

⁶ Acid orange 7

⁷ Eutrophication

¹ Brilliant blue R

² Włodarczyk

³ In-situ

⁴ Khan

جدول ۲. حذف رنگ استفاده شده در MFC

منبع	حداکثر دانسیته جریان	نوع رنگ	راندمان حذف (%)	نوع MFC	جداکننده
[۵۹]	۹۱ mW/m ²	نارنجی G	۹۷/۴	دو محفظه‌ای آند: میله گرافیت کاتد: میله گرافیت	غشای تبادل پروتون
[۲۸]	۱۰۸/۵ mW/m ²	رنگ آنتراکینون رامازول بلو آر.	۸۶	دو محفظه‌ای آند: ورقه‌های نواری کربن کاتد: ورقه‌های نواری کربن	غشای تبادل پروتون نافیون ۱۱۷
[۳۹]	۲۸/۳ mW/m ²	رنگ آزو تاج خروس	۸۲/۵۹	دو محفظه‌ای آند: گرافیت دانه‌ای کاتد: میله گرافیت	غشای تبادل پروتون نافیون ۱۱۲
[۱۸]	۲/۲۳۶ mW/m ²	آبی سرمه ای اسیدی R	۸۰	تک محفظه‌ای آند: میله گرافیت کاتد: میله گرافیت	
[۵۸]	۷۷/۲ ± ۴/۲ mW/m ²	آسپرژیلوس Sydowii NYKA 510	۹۴	دو محفظه‌ای آند: فیبر کربن کاتد: فیبر کربن	غشای تبادل کاتیونی

سوختی از غشای مبادله پروتون آگار ۲ درصد استفاده شد. فاضلاب تولید شده از خوابگاه دانشجویان به عنوان بستر مورد استفاده قرار گرفت و پس از ۱۴ روز کار، سلول‌های سوختی متصل به صورت سری حداکثر خروجی را به دست آوردند. ولتاژ ترکیبی mV ۱۳۸ به دست آمد. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که سلول سوختی مس-مس نتیجه بهتری نسبت به سلول سوختی کربن-کربن داشت [۴۳].

روزسنبرسکی^۴ و همکاران فرآیندهای تخریب بی‌هوازی جهت تولید انرژی زیستی از جزء مایع پسماند جامد فشرده را مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها پنج MFC را به کار گرفتند و آن‌ها را به صورت موازی با مکمل‌های مختلف ضایعات فشرده مایع (LPW) به کار بردند. آن‌ها از یک MFC دو محفظه‌ای با پارچه کربنی به عنوان آند و کاتد استفاده کردند. نتایج نشان داد که بازده انرژی انباشته، بین J ۲/۵۵ تا J ۱۸/۲۵ متغیر است که بسته به مقدار LPW

هریماوان^۱ و همکاران تأثیر فاصله الکترودها بر تولید برق از یک سلول سوختی میکروبی با استفاده از فاضلاب را مطالعه کردند. یک ورق گرافیت بدون کاتالیزور فلزی هم به عنوان کاتد و هم به عنوان آند استفاده شد. چهار تغییر فاصله الکترودها اعمال شد. یافته‌های آن‌ها نشان داد که MFC با طولانی‌ترین الکترودها به بالاترین OCV تعادل mV ۶۷۶ دست یافت، در حالی که MFC با کوتاه‌ترین فاصله الکترودها به بالاترین چگالی توان mW/m² ۷/۷۴ دست یافت. اندازه‌گیری طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) نشان داد که مقاومت انتقال بار در تمام پیکربندی‌های MFC غالب بود [۶۲].

آدلیه^۲ و اوکروندو^۳ بر روی تولید بیوالکتریسیته از فاضلاب خوابگاه دانشجویی با استفاده از یک سلول سوختی میکروبی کار کردند. آن‌ها از الکترودهای کربن و مس استفاده کردند و به ترتیب سلول سوختی کربن-کربن و مس-مس را تولید کردند. برای اتصال هر دو محفظه سلول

³ Okorundu

⁴ Rozsenberski

¹ Harimawan

² Adeleye

شدند. پس از کار به مدت ۲۰ روز، نتایج نشان داد که MFCها ۵/۰۵ V و ۴/۷۲ mA تولید کردند [۱۰].

نوسک^۴ و سیدزیک-کویاتکووسکا^۵ روی ساختار میکروبی و تولید انرژی در سلول‌های سوختی میکروبی که توسط یک هاضم بی‌هوازی زباله کار می‌کنند، کار کردند. دو مجموعه از MFC دو محفظه‌ای استفاده شد. آند در MFC 2 بزرگتر از آند در MFC 1 بود که منجر به نرخ بارگذاری آلی ۶۹/۱۲ و ۳۶/۲۱ mg اکسیژن شیمیایی در MFC 1 و MFC 2 شد. اگرچه آند در MFC 2 بزرگتر بود، اما منجر به تولید برق بهتری نشد زیرا ولتاژها فقط در ابتدا بیشتر از MFC 1 بودند، اما پس از رسیدن به یک نقطه، به یک سطح مشابه رسیدند. اما چگالی جریان در نهایت در MFC 1، $128 \pm 836 \text{ mA/m}^2$ بود در حالی که در MFC 2، $101 \pm 316 \text{ mA/m}^2$ بود. پس از کار با ضایعات اسیدهای چرب فرار و لجن دان‌های هوازی از تصفیه خانه‌های فاضلاب به مدت ۱۰۰ ساعت و اعمال مقاومت $1 \text{ K}\Omega$ ، ولتاژ پایین پایدار 174 mV تولید شد و چگالی توان $15/3 \text{ mW/m}^2$ بود. آن‌ها از نمود کربن هم به عنوان آند و هم به عنوان کاتد استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از ضایعات اسیدهای چرب فرار و هاضم‌های بی‌هوازی در MFCها به بازیافت انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کمک می‌کند [۴۵].

خان^۶ و همکاران تحقیقاتی در مورد تولید بیوالکتریسیته توسط سلول‌های سوختی میکروبی انجام دادند. آن‌ها بر عملکرد غشاهای تبادل پروتون و رزین تبادل کاتیونی برای انتقال یون تمرکز کردند. آن‌ها از فاضلاب به عنوان بستر، میله‌های گرافیتی به عنوان کاتد و آند استفاده کردند و راکتور سلول سوختی به عنوان یک سیستم بیج^۷، مشابه باتری، آزمایش شد. آن‌ها دو مجموعه MFC ساختند، یکی با PEM و دیگری بدون آن، و با رزین تبادل کاتیونی کار می‌کردند، و خاطرنشان کردند که PEM بسیار گران‌تر و سخت‌تر از رزین تبادل کاتیونی بازسازی می‌شود. همچنین، ماهیت ریز متخلخل رزین مورد استفاده در مطالعه آن‌ها، سینتیک تبادل یونی را تسهیل می‌کند. نتایج نشان داد که

اضافه شده به دست آمد. راندمان حذف COD اکثر MFCها از ۸۰ درصد فراتر رفت که نشان داد MFCها در تصفیه فاضلاب مفید هستند [۴۳].

کوک^۱ و همکاران تصفیه بیوالکتروشیمیایی مشروبات الکلی زباله شهری را در یک سلول سوختی میکروبی برای ارزیابی انرژی مورد مطالعه قرار داد. مواد الکتروود MFC دو محفظه‌ای و پارچه کربنی بود که روی یک میله گرافیتی ثابت شده بود. غشاء پروتون انتخابی نافیون ۱۱۵ بود. MFCها با یک مقاومت خارجی ۱۰۰ نصب شده بودند. پس از کار به مدت ۱۵ روز، نتایج نشان داد که بالاترین بازده انرژی $8-9 \text{ J.g}^{-1}$ و تغییر در COD را می‌توان در کمترین غلظت COD ورودی به دست آورد. حداکثر و متوسط راندمان حذف COD، ۹۴٪ و ۸۷٪ بودند [۴۴].

فلورس^۲ و همکاران، محصولات کشاورزی را برای تولید برق با استفاده از سلول‌های سوختی میکروبی آزمایش کردند. آن‌ها MFCهای ارزان قیمت را در غیاب غشای تبادل پروتون ساختند. کاتد از مس و آند از روی ساخته شده بود. ضایعات آلی مورد استفاده آن‌ها از پیاز، گوجه فرنگی و سیب زمینی بود. آن‌ها خرد شدند و 120 mL از هر بستر با یک همزن مغناطیسی همگن شده و در داخل سلول‌ها قرار گرفت. پس از ۲۱ روز کار، سیستم حداکثر چگالی توان $129 \mu\text{W/cm}^2$ و حداکثر جریان $128 \mu\text{A/cm}^2$ را تولید کرد و محدوده pH ۷/۵ تا ۱۰ بود. MFCها در روز آخر به صورت سری به هم متصل شدند که امکان تولید موفقیت آمیز $2/35 \text{ V}$ و در نتیجه روشن شدن چراغ LED را فراهم کردند [۵۷].

باروا^۳ و همکاران تحقیقاتی در مورد تولید برق با استفاده از یک سلول سوختی میکروبی انجام دادند. لجن فاضلاب با استفاده از بطری‌ها و کیسه‌های استریل برای مطالعات بیشتر جمع آوری شد. یک MFC دو محفظه‌ای استفاده شد و پنج تایی آن‌ها به صورت سری متصل شدند. MFCها از صفحات روی به عنوان آند و صفحات مسی به عنوان کاتد استفاده کردند که توسط یک پل نمکی U شکل از هم جدا

⁵ Cydzik-Kwiatkowska

⁶ Khan

⁷ Batch

¹ Kook

² Flores

³ Barua

⁴ Nosek

میدیوروا^۱ و ننوف^۲ روی تولید الکتریسیته در سلول‌های

منبع	حداکثر دانسیته جریان	تلقیح	راندمان حذف (%)	نوع MFC	سابستریت	جداکننده
[۲۹]	۷/۷۴ mW/m ²	مدفوع شکمبه	۴۶-۳۵	دو محفظه‌ای آند: ورق گرافیت کاتد: ورق گرافیت	فاضلاب تایپوکا	غشای تبادل پروتون نافیون ۲۰۲
[۴۳]	-	لجن مزوفیل درمان نشده	۷۱/۶	دو محفظه‌ای آند: پارچه کربن کاتد: پارچه کربن	جزء مایع ضایعات جامد فشرده	غشای تبادل پروتون نافیون ۱۱۵
[۴۵]	۱۵/۳ mW/m ²	لجن دانه‌ای هوازی	۸۵	دو محفظه‌ای آند: نمد کربنی کاتد: نمد کربنی	ضایعات اسیدهای چرب فرار	غشای تبادل پروتون نافیون ۱۱۷
[۴۱]	۱/۴ × ۱۰ ^{-۲} mW/m ²	فاضلاب از لبنیات	۹۰/۶۵	دو محفظه‌ای آند: میله گرافیت کاتد: میله گرافیت		بدون غشا
[۱۷]	۲۰۷/۷ ± ۱/۹ mW/m ²	لجن فاضلاب	۸۱/۱۰۰-۹	تک محفظه‌ای آند: فیبر کربن کاتد: کربن فعال	فاضلاب مصنوعی	غشای تبادل کاتیونی CMI- (7000)

سوختی میکروبی به عنوان تابعی از پیکربندی هوا و کاتد کار کردند. آن‌ها توانایی کاتدهای مختلف را بر اساس

استفاده از پلی تترا فلئورواتیلن (PTFE) و کربن سیاه در نسبت‌های مختلف به عنوان عناصر MFC و تأثیر آن‌ها بر عملکرد MFCها آزمایش کردند. آن‌ها متوجه شدند که کربن سیاه و PTFE در مقایسه با PEM ارزان هستند. کاتد از مش‌های فولادی ضدزنگ تشکیل شده است، در حالی که آند پارچه کربنی است که به یک مدار الکتریکی خارجی بارگذاری شده با یک مقاومت ۱۰۰ Ω متصل است. پس از چهار ساعت کار، حداکثر جریان ۲۹۱ μA را به دست آوردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که از تجزیه و تحلیل اولیه با کاتدهای هوا به نظر می‌رسد که استفاده از کربن سیاه (Vulcan) با چسب PTFE روی کاتد برای نسل فعلی MFCها مفیدتر خواهد بود [۴۰].

گاؤو^۳ و همکاران [۶۴] یک ماده کاتد-هوای پلی اتیلنی جدید برای یک سلول سوختی میکروبی ایجاد کردند. آن‌ها

نسل فعلی MFC باعث افزایش سطح مقطع بستر رزین شد. و همچنین، MFC با رزین بالاترین راندمان حذف COD را نشان داد که ۹۰/۶۵٪ بود [۴۱].

۴-۵- MFCهای کاتد-هوا جهت تولید الکتریسیته

MFC کاتد-هوا از سیستمی تشکیل شده است که دارای کاتدهایی است که یک طرف آن در معرض هوا و از طرف دیگر آب قرار دارد. این نوع MFC یک روش عملی برای ساخت کاتد MFC است زیرا نیازی به هوادهی آب ندارد. این به افزایش پایداری کاتد در حین ایجاد چگالی توان بالا کمک می‌کند [۴۰]. PEM در MFCها به دلیل نفوذپذیری پروتون بالا و پایداری حرارتی و شیمیایی استفاده می‌شود، اما گران است که کاربرد تجاری آن را محدود کرده است [۶۷].

³ Gao

¹ Midyurova

² Nenov

الکترودهای گرافیت لوله‌ای استفاده شده است و جریان حاصل بوسیله‌ی سیم‌های مسی به مدار بیرونی انتقال داده شده است. تصویر سیستم مورد استفاده شده در این مطالعه در شکل شماره ۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۷. سلول سوختی میکروبی دو محفظه‌ای طراحی شده برای تولید الکتریسیته؛ (۱) محفظه آند شامل محیط کشت، باکتری، بافر و نوترال رد (۲) محفظه کاتد شامل بافر و پذیرنده الکترون، (۳) حمام آب گرم برای تامین درجه حرارت مناسب رشد باکتری (۴) مولتی‌متر دیجیتال برای سنجش ولتاژ [۶۸]

برای ثبت عملکرد سلول سوختی در این کار، مقاومت‌های متغیر 300Ω تا 2000Ω در مدار قرار گرفت. نتایج کار نشان داد که سلول سوختی مورد استفاده با ولتاژ 765 mV و چگالی توان $140/817 \text{ mW/m}^2$ ، توانایی نسبتاً بالایی در تولید الکتریسیته دارد.

پراساد^۲ و تریپاتی^۳ [۲۶] روی افزایش مقیاس سلول‌های سوختی میکروبی رسوبی^۴ برای تامین انرژی روشنایی LED کار کردند. آن‌ها از هشت MFC مجزا استفاده کردند که به صورت سری و همچنین در یک اتصال هیبریدی روی هم چیده شده بودند. MFC‌های تک محفظه دارای یک آند از الکترومس و یک کاتد از الکترو روی بودند. پس از ۲۰ روز کار، حداکثر جریان اتصال کوتاه پایدار $1 \mu\text{A}$ در $435/25$ در پیکربندی سری به دست آمد. LEDها در پیکربندی سری سبک‌تر و در پیکربندی هیبریدی روشن‌تر بودند، که به گفته آن‌ها به دلیل افزایش جریان در اتصال

برای اولین بار نوع جدیدی از مواد کاتدی را توسعه دادند که حاوی صفحات پلی‌اتیلن متخلخل (PE) و یک لایه کربن فعال مخلوط (AC) و کربن سیاه (CB) بسیار رسانا بود. آن‌ها در نسبت‌های مختلف مخلوط شدند و سپس کاتدها در MFC‌های تک محفظه ارزیابی شدند. پس از حفظ عملیات در یک دوره ۲ ماهه، حداکثر چگالی توان به $1/4 \text{ W/m}^2$ افزایش یافت و در محدوده $1/1-1/4 \text{ W/m}^2$ حفظ شد. مطالعه آن‌ها نشان داد که این ماده کاتد پلی‌اتیلن جدید به دلیل عملکرد مناسب، فرآیند ساخت ساده و استفاده از مواد کم هزینه، پتانسیل زیادی برای استفاده در افزایش مقیاس سیستم‌های MFC دارد.

نام^۱ و همکاران [۶۵] مطالعه‌ای در مورد این که چگونه ساختارهای بهبود یافته جمع‌کننده‌های جریان فولاد ضد زنگ با کاهش امپدانس انتقال بار کاتدی، تولید توان سلول‌های سوختی میکروبی را افزایش می‌دهند، انجام دادند. آن‌ها یک MFC تک محفظه مکعبی ساختند. آن‌ها از سه جمع‌کننده جریان مختلف استفاده کردند که از صفحات فولادی ضدزنگ غیرخورنده ساخته شده بودند. رآکتور دارای یک الکترومدی بود که با یک برس فیبر کربن ساخته شده بود و به صورت افقی روی کاتد بدون جداکننده قرار داشت. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش سطح تماس یک کاتد پارچه کربنی روی یک جمع‌کننده‌ی جریان فلزی، قدرت، چگالی جریان، راندمان کلمبی و بازیابی انرژی MFC را با کاهش مقاومت کاتد، افزایش داد. حداکثر توان تولیدی 1136 mW/m^2 ، بیشترین جریان بهینه 3752 mA/m^2 و بالاترین حداکثر جریان 7610 mA/m^2 بود.

۴-۶- سایر کاربردهای MFCها

محسنی و اکرامی [۶۸] بر روی تولید الکتریسیته در سلول سوختی میکروبی دو محفظه‌ای توسط باکتری شوانلا اگزوالکتروژنیک جدا شده از رسوبات بستر دریای مازندران کار کردند. ایشان در این مطالعه سلول سوختی دو محفظه‌ای شامل آند بی‌هواری و کاتد هواری هر یک به حجم 150 mL استفاده کردند. غشا نافیون ۱۱۷ در این کار استفاده است. برای انتقال الکترون‌های تولید شده از

³ Tripathi

⁴ Sediment microbial fuel cells

¹ Nam

² Prasad

۵- محدودیت‌های MFCها

سلول‌های سوختی میکروبی دارای برخی عوامل هستند که مانع از کاربرد تجاری آن‌ها می‌شود. برخی از این عوامل عبارتند از:

۱. بسیاری از مدل‌های MFC در مقیاس کوچک کارآمد هستند، اما هنگامی که افزایش مقیاس داده می‌شوند، کارایی آن‌ها ناپایدار می‌شود و این یک چالش است [۴۴].
۲. تولید توان پیوسته توسط MFC به شکل گسترده‌ای به تشکیل بیوفیلم توسط میکروارگانیسم‌ها برای کمک به تسهیل حرکت الکترون‌ها از بیوفیلم به آند بستگی دارد. برخی از میکروارگانیسم‌ها مورد استفاده به کمک واسطه‌های الکترونی نیاز دارند، که می‌تواند ناخواسته کارایی MFC را کاهش دهد.
۳. تولید کارآمد الکتروسیسته به بسیاری از شرایط عملیاتی، مانند دمای عملیاتی، مقاومت داخلی، در دسترس بودن اکسیژن، پتانسیل الکتروود، و غیره بستگی دارد. محققان همچنین خاطرنشان کرده‌اند که موفقیت کاربردهای MFC تا حد زیادی به غلظت و زیست تخریب‌پذیری مواد آلی بستگی دارد [۱۰].

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله سلول‌های سوختی تک محفظه‌ای، دو محفظه‌ای و انباشته مورد بررسی قرار گرفتند، سپس ساختار کلی سلول‌های سوختی توضیح داده شد و پس از آن سلول‌های سوختی میکروبی که به انواع سلول‌های سوختی مبتنی بر میکروارگانیسم‌ها، مبتنی بر رنگ، مبتنی بر پساب، سلول‌های سوختی کاتد-هوا و ... تقسیم‌بندی شده‌اند، همچنین نحوه عملکرد آن‌ها، استراتژی‌های بهبود عملکرد و چشم‌انداز آینده آن‌ها بررسی گردید. MFC پتانسیل زیادی برای ارائه پایداری زیست محیطی در حین تولید انرژی دارد، با این حال، تجاری‌سازی آن در مقیاس بزرگ به دلیل مکانیسم‌های پیچیده درگیر در طراحی آن و هزینه بالای مواد مورد نیاز برای توسعه آن محقق نشده است. همچنین، الکتروسیسته بازیابی شده از MFC، به طور

هیبریدی است. غلظت COD، mg/L ۱۹۲ با مقدار pH محفظه آند ۷/۴ بود. آن‌ها دریافتند که MFC رسوبی هم مقرون به صرفه و هم سازگار با محیط زیست است. بنابراین، آن‌ها پیشنهاد کردند که توان MFC رسوبی با اتصال سری افزایش یابد و یک هیبرید می‌تواند در یک دستگاه استفاده شود.

یو^۱ و همکاران [۱۷] همچنین یک طراحی جدید سلول سوختی میکروبی تحلیلی را برای بهینه‌سازی سریع نرخ رقیق‌سازی و نرخ عرضه سابستریت از طریق جریان، کنترل حجم، و قرار دادن آند بررسی کردند. آن‌ها از MFC تک محفظه‌ای استفاده کردند. آند فیبر کربن ساده بود که در محفظه آند قرار می‌گرفت. یک غشای تبادل کاتیونی استفاده شد. کاتد کربن فعال فشرده گرم بود که در تماس با هوا بود. و طراحی تحلیلی یک سلول سوختی میکروبی با تغذیه مداوم سه تکراری بود. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان حذف COD با افزایش نرخ عرضه مواد مغذی در نرخ عرضه مواد مغذی بسیار کم (۰/۰۲-۰/۰۱ میلی مول در هکتار) کاهش یافت. نرخ کاهش COD بیش از ۹۰٪ بود که نشان می‌دهد که بیشتر منبع انرژی کربن به طور کامل برای رشد و نگهداری سلول استفاده شده است. آن‌ها همچنین دریافتند که وقتی از حجم آند بیشتر می‌شود و از ۱۰ mL به ۵۰ mL می‌رسد توان بالاتری تولید می‌شود.

شولر^۲ و همکاران سلول‌های سوختی میکروبی در مقیاس کوچک موثر برای تولید انرژی از ادرار را بررسی کردند. آن‌ها از MFC تک محفظه‌ای با پارچه کربنی به عنوان آند و کاتد استفاده کردند. کاتد هوا باز بود، در حالی که آند در داخل محفظه آند قرار داشت. یک غشای مبادله پروتون، نافیون ۱۱۵ با اعمال فشار فشرده شده و بعنوان کاتد استفاده شد. نتایج نشان داد که دوبرابر شدن طول الکتروود منجر به افزایش چگالی توان از 0.053 Wm^{-3} به 0.580 Wm^{-3} شد. وقتی سه MFC به صورت موازی روی هم چیده شدند، توان خروجی بیش از ۱۰ برابر بیشتر از واحدهای جداگانه بود. استفاده از کاتالیزور واکنش کاهش اکسیژن مشتق شده از زیست توده در کاتد، چگالی توان MFC را به Wm^{-3} ۱/۹۶ افزایش داد [۱۶].

² Chouler

¹ You

application. *Microorganisms*, **2019**, 7, 697, 1-13.

[6] U.S. Department of Energy. Energy efficiency and renewable energy, Retrieved November, Hydrogenandfuelcells.energy.gov **2015**.

[7] Yifeng, Z., Booki, M., Liping, H., Irini, A. Generation of electricity and analysis of microbial communities in wheat straw biomass-powered microbial fuel cells. *Applied and Environmental Microbiology*, **2009**, 75, 11, 3389-3395.

[8] Drendel, G., Mathews, E. R., Semenee, L., Franks, E. A., Microbial fuel cells, related technologies and their applications, *Applied Sciences*, **2018**, 8, 2384, 1-18.

[9] Parkash, A. Bio-electricity generation from different biomass using microbial fuel cell. *MOJ Proteomics Bioinform.*, **2016**, 3, 5, 124-127.

[10] Barua, E., Hossain, S. M., Shaha, M., Islam, E., Zohora, T. F., Prolity, T. A., Mukharjee, K. S., Sarker, K. P., Salimullah, M., Hashem, A., Generation of Electricity using microbial fuel cell (MFC) from sludge. *Bangladesh J. Microbiol.*, **2018**, 35, 1, 23-26.

[11] Pamintuan, K. R. S., Sanchez, K. M. Power generation in a plant-microbial fuel cell assembly with graphite and stainless steel electrodes growing *Vigna radiata*. *Material Science and Engineering*, **2019**, 703, 012037, 1-7.

[12] Pamintuan, K. R. S., Gonzales, A. J. S., Estefanio, B. M. M., Bartolo B. L. S.

کلی، هنوز ضعیف است، معمولاً کمتر از ۱۰ درصد از آنچه از نظر تئوری ممکن است، و مکانیسم انتقال الکترون خارج سلولی به خوبی درک نشده است. منابع انرژی تجدیدناپذیر محدود و رو به اتمام مانند سوخت‌های فسیلی منجر به افزایش هزینه برق معمولی با گذشت زمان می‌شود. بنابراین استفاده مناسب و تجاری‌سازی MFCها منجر به توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر، پایدار و سازگار با محیط زیست در سراسر جهان خواهد شد.

مراجع

[1] Yuta, Y., Kazunori, N., Masaji, K., Inoue K., Funuyoshi, O., Hitoshi, S., Satonu, K. Electricity generation from rice bran by a microbial fuel cell and the influence of hydrodynamic. *American Chemical Society*, **2018**, 3, 15267-15271.

[2] Mandanipour V., Noroozifar M., Modarresi-Alam A.R., Preparation of modified sulfonated poly (styrene divinylbenzene) with polyaniline as a new polymer electrolyte membrane for direct methanol fuel cell. *Int. J. Electrochem. Sci*, **2016**, 11, 5302-5317.

[3] Abhishek, J. C., Manisha, V. M., Veeraj, K. C. Microbial fuel cell functioning , developments and Application- A Review. *International journal of Scientific and Technology Research*, **2019**, 8, 12, 3620-3633.

[4] Włodarczyk, P.P., Włodarczyk, B. Microbial fuel cells with Ni-Co cathode powered with yeast wastewater. *Energies*, **2018**, 11, 3194, 1-9.

[5] Fang, C., Achal, V. The potential of microbial fuel cells for remediation of heavy metals from soil and water- review of

fuel cell coupled activated sludge process. *PLOS ONE*, **2015**, 10, 10, 1-18.

[19] Monier, J. M., Niard, L., Haddour, Allard, N., B., Buret, F., "Microbial Fuel Cells: From biomass (waste) to electricity," *MELECON 2008 - The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Ajaccio, France*, **2008**, 663-668.

[20] Aziz, S., Mamon, A. R., Shah, S. F., Soomra, S. A., Parkash, A. Prototype designing and operational aspect of microbial fuel cell-review paper. *Sci. Int. (Lahore)*, **2013**, 25, 1, 49-56.

[21] Yibrah, T., Demeke, A., Review on microbial fuel cell, **2015**.

[22] Yaqoob, A. A., Khatoon, A., Setapar, M. H. S., Parveen, T. U. K., Ibrahim, M. N. M., Ahmad, A., Rafatullah, M. Outlook on the role of microbial fuel cells in remediation of environmental pollutants with electricity generation. *Catalysis*, **2020**, 10, 819, 1-34.

[23] Chang, H., Zou, Y., Hu, R., Feng, H., Wu, H., Zhong, N., Hu, J. Membrane application for microbial energy conversion: A review. *Environmental Chemistry Letters*, **2020**, 18, 16, 1-12.

[24] Touqeer, T., Miran, W., Mumtaz, M.W., Mukhtar, H. "Design and configuration of microbial fuel cells." *Microbial Fuel Cells for Environmental Remediation. Singapore: Springer Nature Singapore*, **2022**. 25-39

[25] Aelterman, P., Rabaey, K., Pham, H.T. Continuous electricity generation at high voltages and current using stacked microbial

Simultaneous phytoremediation of Ni²⁺ and bioelectricity generation in plant-microbial fuel cell assembly using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *IOP Conf. Ser. Earth. Environ. Sci.*, **2018**, 191, 12093.

[13] Bhavya, R., Pavitha, V., Aarthi, S., Dharani, K., Prabhu, N. Fabrication of electricity from waste water by utilizing microbial fuel cell: A review. *International Journal of Research in Applied Sciences and Biotechnology*, **2020**, 7, 3, 1-12.

[14] Chaturvedi, V., and Pradeep, V., Microbial fuel cell: A green approach for the utilization of waste for the generation of bioelectricity. *Bioresources and Bioprocessing*, **2016**, 3, 38, 1-14.

[15] Fakhrial, F., Azura, A., Wan, W., Azlin, S., Electricity generation in microbial fuel cell (MFC) by bacterium isolated from rice paddy field soil. *E 3S Web of Conferences*, **2017**, 34, 02036, 1-9.

[16] Chouler, J., Padgett, G. A., Cameron, J. P., Preuss, K., Titirici, M., Ieropoulos, I., Lorenzo, D. M. Towards effective small scale microbial fuel cells for energy generation. *Electrochimica Acta.*, **2016**, 192, 89-98.

[17] You, J., Greenman, J., Ieropoulos, I. Novel analytical microbial fuel cell design for rapid in situ optimization of dilution rate and substrate supply rate, by flow, volume control and anode placement. *Energies*, **2018**, 11, 2377, 1-12.

[18] Khan, M. D., Abdulateif, H., Ismail, I. M., Sabir, S., Khan, M. Z. Bioelectricity generation and bioremediation of an azo dye in a microbial

- Wijasika, S., Sato, C. Enhancing electricity generation using a laccase-based microbial fuel cell with yeast galactomyces reessii on the cathode. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, **2018**, 28, 8, 1360-1366.
- [33] Mandanipour V., Noroozifar M., Modarresi-Alam A.R., Khorasani-Motlagh M., Fabrication and Characterization of a Conductive Proton Exchange Membrane Based on Sulfonated Polystyrenedivinylbenzene Resin-Polyethylene (SPSDR-PE): Application in Direct Methanol Fuel Cells, *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* **2017**, 36, 151-162.
- [34] V. Mandanipour, Chemical Modification of Proton Exchanger Sulfonated Polystyrene with Sulfonated Graphene Oxide for Application as a New Polymer Electrolyte Membrane in Direct Methanol Fuel Cell. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* **2021**, 40, 1973-1984.
- [35] Chen, S., Li, J., Liu, L., He, Q., Zhou, L., Yang, T., Wang, X., He, P., Zhang, H., Jia, B. Fabrication of Co/Pr co-doped Ti/PbO₂ anode for efficiently electrocatalytic degradation of β-Naphthoxyacetic acid. *Chemisphere*, **2020**, 256, 127139, 1-12.
- [36] Mustakeem, M. Electrode material for microbial fuel cells: nanomaterial approach. *Mater. Renew. Sustain. Energy*, **2015**, 4, 1-11.
- [37] Fu, L., You, S., Zhang, G., Yang, F., Fang, X. Degradation of azo dyes using in-situ fenton reaction incorporated into H₂O₂- producing microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*. **2010**, 160, 164-169.
- [38] Khan, A. M., Obaid, M. Comparative bioelectricity generation from waste citrus fruit fuel cells. *Journal of Environmental Science and Technology*, **2006**, 40, 10, 3388-3394.
- [26] Prasad, J., Tripathi, R. K. Scale up sediment microbial fuel cell for powering led lighting. *International Journal of Renewable Energy Development*, **2018**, 7, 1, 53-58.
- [27] Sekrecta-Belniak, A., Toczyłowska-maminska, R. Fungi-based microbial fuel cells. *Energies*, **2018**, 11, 2827, 1-18.
- [28] Simeos M. F., Maiorano, A. E., Dos santos, J. G., Peixoto, L., Brambilla de Souza, R. F., Neto, A. O., Brito, A. G., Ottoni, C. A. Microbial fuel cell-induced production of laccase to degrade the anthraquinone dye removal brilliant blue R. *Environmental Chemistry Letters*, **2019**, 17, 1413-1420.
- [29] Harimawan, A., Davianto, H., Al-Aziz R. M. T., Shofinita, D., Setiadi, T. Influence of electrode distance on electrical energy production on microbial fuel cell using tapioca waste water. *J. Eng. Technol. Sci.*, **2018**, 50, 6, 841-855.
- [30] Ezziat, L., Elabed, A., Ibensouda, S., El Abed S., Challenges of Microbial fuel cell architecture on heavy metal recovery and removal from waste water. *Frontiers in Energy Research*. **2019**, 7, 1, 1-13.
- [31] Arbianti, R., Utami, S. T., Herimansyah, H., Novitasari, D., Kristin, E., Trisnawnti, T. Performance optimization of microbial fuel cell (MFC) using *Lactobacillus bulgaricus*. *MaKara Seri Teknologi.*, **2013**, 17, 1, 32-38.
- [32] Chaijak, P., Sukkasem, C., Lertworapreecha, M., Boonsawang, P.,

- microbial fuel cell powered with waste anaerobic digestate. *Energies*, **2020**, 13, 4712, 1-12.
- [46] Gonzalez, J. M. L., Benitez, H. C., Juarez, A. Z., Perez, Z. E., Coutino, R. A. V., Robles, I., Godinez, A. L., Rodriguez-Valadez, J. F. Study of the effect of activated carbon cathode configuration on the performance of a membrane-less microbial fuel cell catalyst. *Catalysts*, **2020**, 10, 619, 1-10.
- [47] Morajian, M. J., Fang, Z., Yong-chun. Recent advances on biomass-fueled microbial fuel cell. *Bioresources and Bioprocessing*, **2021**, 8, 14, 1-13.
- [48] Shrestha, N., Fogg, A., Franco, D., Wilder, J., Komisar, S., Gadlamshetty, V. "Electricity generation from defective tomatoes." *Bioelectrochemistry*, **2016**, 112, 67-76.
- [49] Sasaki, D., Sasaki, K., Yota, T., Kondo, A. Less biomass and intracellular glutamate in anodic biofilm lead to efficient electricity generation by microbial fuel cells. *Biotechnology for Biofuels*, **2019**, 12, 72, 1-11.
- [50] Abdallah, K. Y., Etevez, T. A., Yantawy, M. D., Ibraheem, M. A., Khalit, M. N. Employing laccase-producing *Aspergillus sydowii* NYKA 510 as a cathodic biocatalyst in self-sufficient lighting microbial fuel cell. *J. Microbiol. Biotechnol.*, **2019**, 29, 12, 1861-1872.
- [51] Cao, Y., Mu, H., Liu, W., Zhang, R., Guo, J., Xian, M., Liu, H. Electricigens in the anode of microbial fuel cells: Pure cultures versus using galvanic cell, fuel cell and microbial fuel cell. *Journal of Energy in Southern Africa*, **2015**, 26, 4, 90-99.
- [39] Adeleye, S. A., Okorundu, S. I. Bioelectricity from students hostel waste water using microbial fuel cell. *International Journal of Biological and Chemical Science*, **2015**, 9, 2, 1038-1049.
- [40] Midyurova, B., Nenov, V. Electricity generation in microbial fuel cells as a function of air: cathode configuration. *International Journal of Alternative Fuels and Energy*, **2017**, 1, 1, 9-13.
- [41] Khan, R. M., Karim, M. R., Amin, M. S. A. Generation of bio-electricity by microbial fuel cells. *International Journal of Engineering and Technology*, **2012**, 1, 3, 231-237.
- [42] Tharali A. D., Namrata, S., Osborne, J. W. Microbial fuel cells in bioelectricity production. *Frontiers in Life Science*. **2016**, 9, 4, 252-266.
- [43] Rozsenberski, T, Kook, L., Hutvagner, D., Nemestothy, N., Belafi-Bako, K., Bakonyi, P., Kurdi, R., Sarkady, A. Comparism of anaerobic degradation process for bioenergy generation from liquid fraction of pressed solid waste. *Waste and Biomass Valorization*, **2015**, 1-14.
- [44] Kook, L., Rozsenberseki, T., Nemestothy, N., Belafi-Bako, K., Bakonyi, P. Bioelectrochemical treatment of municipal waste liquor in microbial fuel cells for energy volarization. *Journal of Cleaner Production*, **2016**, 112: 4406-4412.
- [45] Nosek, D., Cydzik-Kwiatkowska, A. Microbial structure and energy generation in

- metallic composite electrodes. *Sains Malaysiana*, **2019**, 40, 4, 791-801.
- [58] Cheng-Gan, N., Wang, Y., Zhang, X., Zeng, G., Huang, D., Ruan, M., Li, X. Decolourization of an azo dye orange G. in microbial fuel cell using Fe(II)-EDTA catalyzed persulfate. *Bioresource Technology*. **2012**, 126, 101-106.
- [59] Samarghandi, M. R., Dargahi, A., Shabanloo, A., Nasab, Z. H., Vaziri, Y., Ansari, A. Electrochemical degradation of methylene blue dye using a graphite doped PbO₂ anode: optimization of operational parameters, degradation pathway and improving the biodegradability of textile waste water. *Arabian Journal of Chemistry*, **2020**, 13, 6847-6864.
- [60] He, Z., Nealson, K. H., Mansfeld, F. Electricity generation using microbial fuel cells, United States Patent US 8, 524, 402, 132, 1-10, **2013**.
- [61] Flores, R. S., Naveda, N. R., Paredes, A. E., Orbegoso, A. J., Cespedes, C. T., Salvatierra, R. A., Rodrigues, S. M. Agricultural waste for electricity generation using microbial fuel cells. *The open biotechnology Journal*, **2020**, 14, 52-58.
- [62] Mari, P., Kumur, V. T. F., Keshavar, T., Chandra, T. S., Kyazze, G. "The role of natural laccase redox mediators in simultaneous dye decolorization and power production in microbial fuel cells." *Energies*, **2018**, 11, 12, 3455.
- [63] Zhiyong, Y., Kiwi-Minsker, L., Renken A., Kiwi, J. Detoxification of diluted azo dye at mixed communities. *Microbial Cell Factories*, **2019**, 18, 39, 1-14.
- [52] Angelacilincy, J. M., Krishnaraj, N. R., Shakambari, B. A., Kathiresan, S., Varalakshmi, P. Biofilm Engineering approaches for improving the performance of microbial fuel cells and bioelectrochemical systems. *Frontiers in Energy Research*, **2016**, 6, 63, 1-12.
- [53] Jung, S., Regan, M. J. Influence of external resistance on electrogenesis, methanogenesis, and anode prokaryotic communities in microbial fuel cells. *Applied and Environmental Microbiology*, **2011**, 77, 2, 564-571.
- [54] Adegunloye, D. V., Olotu, T. M. Generating electricity using microbial fuel cell powered benthic mud collected from two locations of Akure, Nigeria. *European Scientific Journal*, **2014**, 13, 18, 1857-7881.
- [55] Singh, S., Lien, L. S., Srivastava, C. V., Hiwarkar, D. A. "Comparative study of electrochemical oxidation for dye degradation: parametric optimization and mechanism identification." *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **2016**, 4, 3, 2911-2921.
- [56] Zhang, F., Pant, D., Logan, B. E. Long-term performance of activated carbon air cathode with different diffusion of layer porosities in microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, **2011**, 30, 49-55.
- [57] Zakaria, Z., Othman, M. R., Hasan, Z. S., Wan, A. W. Electrochemical degradation of reactive orange 16 by using charcoal based

source exoelectrogenic bacteria. *Front. Microbiol.*, **2016**, 7, 1776, 1-10.

[67] Salehi M., Karimipour G.R., Montazerzohoori M., Ghaedi M., Mandanipour V., New Proton-Exchange Membrane (PEM) based on the Modification of Sulfonated Polystyrene with MIL-53(Al)-NH₂ for Direct-Methanol Fuel Cell, *Iran. J. Chem. Chem. Eng*, **2022**, 41, 12, 4193- 4202.

[۶۸] محسنی م.، اکریمی س.م.، تولید الکتروسیسته در پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای توسط باکتری شوانلا اگزوالکتروژنیک جداشده از رسوبات بستر دریای مازندران، مجله پژوهش‌های سلولی و مولکولی (مجله زیست‌شناسی ایران)، ۱۳۹۶، جلد ۳۰، شماره ۲، ۱۸۷-۱۷۴.

biocompatible pH with the ozone/Co²⁺ reagent in dark and light processes. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, **2006**, 252, 113-119.

[64] Gao, N., Qu, B., Xing, Z., Ji, X., Zhang, E., Liu, H. "Development of novel polyethylene air-cathode material for microbial fuel cells." *Energy*, **2018**, 155, 763-771.

[65] Nam, T., Son, S., Kim, E., Tran, H. V. H., Koo, B., Chai, H., Kim, J., Pandit, S., Gurung, A., Oh, S., Kim, E. J., Choi, Y., Jung, P. S. Improved structures of stainless steel current collector increased power generation of microbial fuel cells by decreasing cathodic charge transfer impedance. *Environ. Eng. Res.*, **2018**, 23, 4, 383-389.

[66] Jiang, Y., Zhong, W., Han, C., Deng, H. Characterization of electricity generated by soil in microbial fuel cell and the isolation of soil

Abstract

Every country needs to properly manage the use of its resources for its economic development so as not to face energy problems. Energy production and its optimal use are of great importance in different parts of society, especially for industrial and agricultural purposes. Considering the urgent need for a healthy environment with sustainable energy, the government and industries should take a special look at carbon-based energy sources, which most developing countries are currently focusing on for their energy production, and in this context one of the sources of renewable energy is the fuel cell. Fuel cell is a type of galvanic cell that chemists suggest to provide energy and reduce environmental pollution. In addition to being more efficient, these cells can reduce the emission of carbon dioxide in the environment in order to be compatible with the environment and considered a source of green energy. A microbial fuel cell (MFC) is a type of bioelectrochemical fuel cell that generates electric current by transferring electrons produced by microbial oxidation from the external anode to the cathode through an electrical circuit. They can harness the chemical energy in various compounds such as wheat straw, tomatoes, citrus waste, rice bran, mushrooms, sewage, etc. and direct it to produce electrical energy, while providing environmental improvement. In this article, firstly, single-chamber, double-chamber and stacked fuel cells are explained in a general category, then the general structure of fuel cells is explained, and then microbial fuel cells which are divided into types of microorganism-based fuel cells, dye-based, wastewater-based, cathode-air fuel cells, etc., as well as their performance, performance improvement strategies and prospects Their future will be reviewed.

Keyword: Microbial fuel cell; dye-based fuel cell; Wastewater-based fuel cell; fuel cell based on microorganisms; Cathode-air fuel cell