

# جایگاه فناوری پیل سوختی میکروبی در تصفیه انواع فاضلاب‌های صنعتی، خانگی و شهری

فاطمه نوربخش<sup>۱\*</sup>، فهامه ذوالفقارزاده<sup>۲</sup>، محمد پازوکی<sup>۴</sup>، محمد جعفر رضایانی<sup>۵</sup>

۱- دکتری شیمی فیزیک، پژوهشگاه نیرو

۲- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE)، شرکت ملی گاز ایران

۴- دکتری مهندسی بیوتکنولوژی، پژوهشگاه مواد و انرژی

۵- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه اراک

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۰۳

پیام‌نگار: [nourbakhsh@nri.ac.ir](mailto:nourbakhsh@nri.ac.ir)

## چکیده

فاضلاب‌ها منشأ اصلی بسیاری از آلودگی‌های آبی در ایران و جهان به‌شمار می‌آیند. آلودگی زیست‌محیطی گسترده، خطری است که موجودات کنونی و آیندگان را به شدت تهدید می‌کند. پیل سوختی میکروبی (MFC) به عنوان فناوری انرژی تجدید پذیر چند منظوره به طور همزمان می‌تواند در تصفیه فاضلاب‌های مختلف و تولید برق یا زیست‌هیدوژن به طور گسترده مصرف شود. در این مقاله، عملکرد انواع MFC از نظر تولید توان، حذف آلاینده‌های سمی نظیر فلزات سنگین و کارایی تصفیه فاضلاب با معیار پارامترهایی چون مصرف اکسیژن شیمیایی (COD) و بازده کولونی (CE) مرور شده است. در این مقاله، فاضلاب‌ها در چند گروه کلی فاضلاب‌های سنتزی، صنایع غذایی، صنعتی، خانگی و شهری تقسیم بندی شده‌اند. توان خروجی پیل سوختی میکروبی و میزان تصفیه فاضلاب در آن به شرایط عملیاتی نظیر نوع فاضلاب و قدرت یونی آن، دبی ورودی، دما، pH، میزان بارگیری آلی، زمان ماند هیدرولیکی، نوع کنسرسیوم میکروبی و کارایی روی‌اندودی، و مقاومت درونی وابسته است.

**کلیدواژه‌ها:** پیل سوختی میکروبی، تصفیه فاضلاب، تولید الکتروسیته، زیست‌انرژی، فاضلاب صنایع غذایی، فاضلاب صنعتی، فاضلاب‌های خانگی و شهری

## ۱. مقدمه

تجاری با عنوان فاضلاب محیطی اجتماع<sup>۱</sup> نامیده می‌شود که شامل حجم زیاد آب و مقداری مواد جامد ترکیبات کربن چون پسماندهای انسانی، کاغذ و گیاه و جز آنها هستند. در کنار این گروه از فاضلاب‌ها، فاضلاب‌های صنعتی نیز وجود دارند که در این گستره غالباً ترکیبات آلی متاثر از واکنش‌های شیمیایی، فیزیکی یا زیستی‌اند [۱].

اساساً فاضلاب به گندابی حاوی مجموعه‌ای از آلاینده‌های بیماری‌زا گفته می‌شود که منشأ آن می‌تواند منابعی چون پسماندهای خانگی، سازمانی، مؤسسات تجاری و صنعتی باشد، و غالباً با آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی ناشی از بارش همراه می‌شوند. معمولاً فاضلاب‌های ناشی از پسماندهای خانگی، سازمانی و مؤسسات

\* ایران، تهران، پژوهشگاه نیرو، گروه مواد غیرفلزی

1. Sewage/Community Wastewater

فرایند تصفیه نیز می‌شود [۸-۱۱]. همچنین، کاربرد گسترده پیل سوختی میکروبی برای انواع فاضلاب اعم از شهری، کشاورزی، کارخانجات مختلف از جمله آب‌میوه و نوشیدنی و صنایع چوب و کاغذ، پالایشگاه‌ها و شرکت‌های نفتی، و حتی شیرابه زباله‌ها آن را در کانون توجه قرار داده است [۱۴-۱۲].

پیل (یاخته) سوختی میکروبی<sup>۳</sup> به دلیل کاربرد دوگانه در زمینه تصفیه و نیز تولید انرژی پاک بسیار مورد توجه پژوهشگران دنیا، به خصوص در دهه‌های اخیر، بوده است [۲۱-۱۵]. این فناوری را می‌توان از لحاظ تولید انرژی از فاضلاب، در شمار انرژی‌های تجدیدپذیر و از سوی دیگر، از نظر تصفیه آلاینده‌های مختلف، از جمله روش‌های حذف آلاینده‌های زیست محیطی به حساب آورد. میزان اندک تولید انرژی در این فناوری یکی از چالش‌های مهم پیش‌روی پژوهشگران به‌شمار می‌آید که امروزه تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه در حال انجام است [۲۵-۲۲]. البته همین میزان اندک تولید انرژی پاک، در کنار صرفه‌جویی در مصرف انرژی‌ای که در این فناوری تحقق می‌یابد، توجه پدافند جهانی امروز را که با چالش‌های بزرگ گرمایش زمین ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی روبرو است، به خود جلب کرده است. از سوی دیگر، توانایی حذف انواع متنوعی از آلاینده‌ها و تولید لجن فعال اندک، در این روش تصفیه سبب شده تا این فناوری به عنوان یک روش سازگار با محیط زیست جایگاه ارزشمندی به خود اختصاص دهد، به خصوص در کشورهایی مانند کشور ما که با مشکلات عمده زیست محیطی روبرو هستند.

اجزای تشکیل‌دهنده هر پیل سوختی میکروبی عبارتند از: آند، کاتد و گاهی غشاء تبادل پروتون است. در مخزن آند، ریزاندامگان‌ها به صورت بی‌هوازی موجب اکسایش ترکیبات سوخت می‌شوند که در اثر این فرایند الکترون و پروتون و کربن‌دی‌اکسید تولید می‌شود. الکترون تولید شده از طریق الکتروود آند به سمت مدار خارجی هدایت می‌شود و پس از آن به الکتروود کاتد می‌رسد که در این میان الکترون‌های انتقال‌یافته از طریق مدار خارجی منشأ تولید نیروی الکتریسیته خواهند بود. از سوی دیگر، پروتون تولید شده در فرایند اکسایش سوخت توسط ریزاندامگانها در مخزن آند از طریق غشاء تبادل پروتونی به سمت مخزن کاتدی نفوذ می‌کند (به‌خاطر برقراری تعادل بار در سیستم). در مخزن کاتد نیز پذیرنده الکترون (معمولاً اکسیژن) به وسیله الکترون‌های انتقال یافته از مدار و پروتون‌های

سیستم‌های تصفیه فاضلاب وقتی مورد توجه جدی قرار گرفت که منشأ بسیاری از بیماری‌های واگیردار عفونی، باکتری‌های به دست آمده از فاضلاب شناخته شد. تا قبل از سال ۱۸۰۰ میلادی، تمامی فاضلاب‌ها آزادانه در محیط رها می‌شدند. نخستین تلاش‌ها برای جمع‌آوری فاضلاب در سال ۱۹۰۰ صورت گرفت که در آن زمان فاضلاب‌ها را در زمین‌های کشاورزی و یا در آب‌های آزاد رها می‌کردند [۲ و ۳]. پژوهشگران به سرعت پی بردند که رها کردن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی و آب‌های آزاد به دلیل پخش ریزاندامگان‌ها و کاهش کیفیت زمین‌های کشاورزی و آب دریاها و به مخاطره انداختن حیات دریایی، راهکارهای نایجابی‌اند و طبیعت تحمل این حجم فاضلاب را نخواهد داشت.

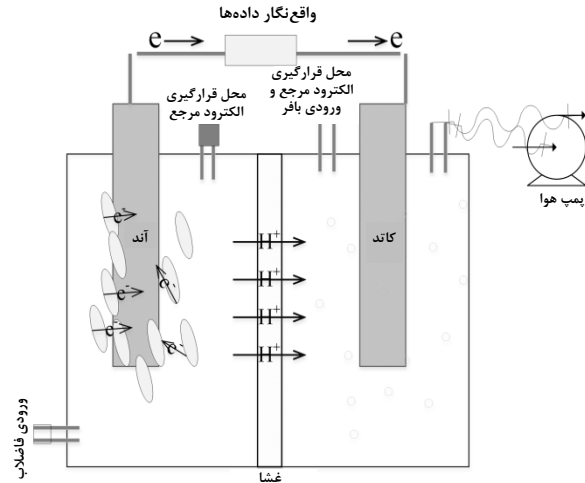
به طور کلی، بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۰، تمرکز برای حل مسئله تصفیه فاضلاب محدود به حذف مواد معلق و سوسپانسیون از آن، کاهش BOD<sup>۲</sup> و حذف ریزاندامگان‌های بیماری‌زا محدود بوده است و از اوایل ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ موضوعاتی چون حذف نیتروژن و فسفات نیز مورد توجه قرار گرفتند [۴ و ۵]. به طور کلی، در این سال‌ها تلاش‌های جهانی به ارتقای کیفیت آب‌های سطحی از طریق گسترش روش‌های تصفیه فاضلاب، معطوف شد. از سال ۱۹۹۰ به بعد نیز این روند با توجه به یافته‌های آسیب‌های آثار بلند مدت این آلاینده‌ها در سلامتی انسان‌ها و ایجاد دگرگونی در محیط زیست، شتاب داده شد [۶].

روش‌های متداول تصفیه هوازی فاضلاب‌هایی چون فاضلاب‌های خانگی، نه تنها مستلزم هزینه‌های گزاف است، بلکه انرژی بسیاری هم صرف عملیاتی کردن آن‌ها می‌شود (مثلاً، هوادهی فاضلاب حدود ۰/۵ کیلووات بر متر مکعب انرژی نیاز دارد). علاوه بر آن، مقدار زیاد لجن تولید شده خود به مرحله تصفیه جداگانه نیاز دارد و یکی از مشکلات عمده به‌شمار می‌آید که یافتن راه حل برای آن تا ۶۰٪ از کل هزینه عملیات تصفیه را به خود اختصاص می‌دهد [۷]. و اما در فناوری‌های دنیای امروز، فرایندهایی مورد توجه‌اند که با توجه به حجم انرژی ذخیره شده در فاضلاب علاوه بر تصفیه، توانایی بازیابی این انرژی را نیز داشته باشند. یکی از این فناوری‌ها پیل سوختی میکروبی است که علاوه بر توانایی بازیابی انرژی از فاضلاب، سبب کاهش هزینه مصرف انرژی و کاهش تولید لجن در انتهای

1. Microorganisms  
2. Biological Oxygen Demand

3. Microbial Fuel Cell (MFC)

نفوذی از طریق غشا کاهیده شده و آب تولید می‌کند (شکل (۱)) [۲۸-۲۶]. یکی از موانع در سر راه گسترش فناوری پیل سوختی میکروبی، توان خروجی اندک است که محققان امروزه با ارائه راه حل‌های متفاوتی چون اصلاح الکترودی [۲۵ و ۲۴]، اصلاح ساختاری [۲۹] و شرایط عملیاتی [۳۰] در صدد برطرف کردن آن هستند.



شکل ۱. نمودار شماتیک پیل سوختی میکروبی دو مخزنی.

علاوه بر عوامل یادشده، پارامترهای دیگری نیز در بهینه‌سازی عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی نقش به سزا دارند که به اختصار بیان خواهند شد.

#### الف. جنس و فاصله الکترودهای به کار رفته

علاوه بر جنس الکترودها به کار رفته که تأثیر بسیار زیادی در کارایی پیل سوختی میکروبی دارد، فاصله بین الکترودها نیز بسیار پراهمیت است [۳۱]. از مطالعات چنین برمی‌آید که کاهش فاصله بین الکترودها به دلیل کاهش مقاومت اهمی، تولید الکتروسیسته و توان خروجی را افزایش خواهد داد. کاهش فاصله بین آند و کاتد علاوه بر کاستن مقاومت داخلی سبب تسهیل انتقال پروتون از غشا نیز می‌شود. از این رو، پیل‌های سوختی میکروبی که در آن کاتد، غشا و آند به هم چسبیده‌اند، رواج بیشتری پیدا کرده‌اند. نکته درخور توجه این است که این کاهش فاصله اگر منجر به تخریب عملکرد باکتری‌های آنودی توسط اکسیژن نفوذی از سمت کاتد شود، مفید نخواهد بود. بنابراین یافتن فاصله بهینه بین الکترودها بسیار مهم است [۳۲].

#### ب. تأثیر pH

وجود گرادیان غلظت pH در اطراف، محدودیت الکتروشیمیایی/ترمودینامیکی در پیل را به بار خواهد آورد. افزایش pH در مخزن کاتدی، بنابر معادله نرنست، به طور چشم‌گیری سبب کاهش جریان تولیدی در پیل سوختی میکروبی خواهد شد. (بنابر معادله نرنست پتانسیل کاهش اکسیژن با کاهش مقدار pH افزایش می‌یابد). در واقع، کاهش pH سبب بهبود در فرایند کاهش اکسیژن و در نتیجه جریان خروجی از پیل سوختی میکروبی می‌شود [۳۳ و ۳۴]. از سوی دیگر، شرایط رشد بهینه برای باکتری‌ها pH نزدیک به خنثی است و فعالیت باکتری‌ها نیز بسیار به pH داخل سلولی و خارج سلولی آن‌ها وابسته است. بسته به نوع باکتری و شرایط رشد آن، تغییرات pH به پارامترهای فیزیولوژیکی دیگری چون غلظت یون‌ها، پتانسیل غشا و نیروی محرکه پروتون و تشکیل زیست‌فیلم نیز تأثیر می‌گذارد. البته مشخص شده است که تنها مقادیر pH‌های نزدیک به محدوده ۶ تا ۹ برای رشد و عملکرد باکتری‌ها در مخزن آنودی مناسب‌اند. با این حال pH آنودی پایین نیز سبب افزایش سرعت انتقال پروتون و افزایش دسترسی به پروتون در کاتد می‌شود. به هر حال اختلاف pH در مخازن آنودی و کاتدی در عملکرد و تولید توان خروجی پیل سوختی میکروبی تأثیر مثبتی می‌گذارد. از آنجا که در پیل‌های سوختی میکروبی تک مخزنی به دلیل وجود تنها یک الکترولیت امکان تفاوت pH آنودی و کاتدی وجود ندارد، عملکرد پیل با ترکیبی از تأثیرات pH بر واکنش‌های آنودی و کاتدی روبه‌رو می‌شود. در این حالت، فعالیت باکتریایی و واکنش کاهش اکسیژن نه تنها تحت تأثیر pH الکترولیت قرار می‌گیرد، بلکه خود نیز با مصرف و یا تولید پروتون به تغییر pH الکترولیت خواهند انجامید. بنا به دلایل بیان شده، از بافر در الکترولیت به منظور کمک به کاهش تغییرات pH و ثابت نگه‌داشتن pH در گستره مناسب برای رشد ریزاندامگانها بهره برده شده است. بافر مناسب در این زمینه باید علاوه بر ثابت نگه‌داشتن pH در گستره مناسب، در واکنش‌های شیمیایی و فیزیولوژی میکروبی دخالت نکند و انتقال پروتون به سمت کاتد را نیز سهولت بخشد [۳۵ و ۳۶].

#### ب. قدرت یونی

قدرت یونی الکترولیت با تأثیر بر رسانایی محلول، در مقاومت داخلی

### ج. زمان ماند هیدرولیکی<sup>۲</sup>

زمان ماند هیدرولیکی به متوسط مدت زمانی می‌گویند که ترکیبات محلول در مخزن پیل باقی می‌مانند. زمان ماند هیدرولیکی به پارامترهایی چون حذف COD و BOD و تولید چگالی توان در پیل سوختی میکروبی به شدت وابسته است. زمان ماند طولانی هیدرولیکی به دلیل در اختیار نهادن مدت زمان طولانی‌تر برای ریزاندامگانها در جهت تجزیه مواد آلی، سبب افزایش کارایی کولونی می‌شود [۴۰]. از سوی دیگر، افزایش سرعت ورود خوراک (مواد آلی) به پیل به افزایش چگالی توان می‌انجامد. در واقع، سرعت تزریق خوراک<sup>۳</sup> (OLR) مفهومی عکس زمان ماند هیدرولیکی دارد. از آنجا که مقدار مقاومت داخلی پیل با افزایش سرعت تزریق خوراک کاهش می‌یابد، تأثیر به سزایی در چگالی توان تولیدی پیل دارد. افزایش سرعت تزریق خوراک، به دلیل ارتقای قدرت یونی محلول آندی ناشی از افزایش غلظت اسیدهای چرب فرار در آن، به افزایش فعالیت کاتالیستی و چگالی ریزاندامگان‌های آند منجر می‌شود. البته، افزایش سرعت تزریق خوراک بیش از میزان بهینه، به رقابت بین ریزاندامگان‌های اگزوالکتروژن و متانوژن‌ها منجر می‌شود که در این رقابت ممکن است متانوژن‌ها با تجزیه مواد آلی سبب کاهش کارایی کولونی و افزایش مقاومت داخلی شوند. به طور کلی، سرعت بهینه تزریق خوراک زمانی است که هر دو عامل کارایی کولونی و چگالی توان بیشینه باشند.

### چ. سرعت ریزش زیست‌فیلم<sup>۴</sup>

قدرت هیدرودینامیکی یکی از پارامترهای کلیدی موثر بر تشکیل زیست‌فیلم و چسبندگی میکروبی است. سرعت بالای ریزش زیست‌فیلم (به دلیل چسبندگی پایین) در ضخامت آن و در نتیجه انتقال الکترون بسیار موثر است که همین عامل به طور مستقیم در چگالی توان خروجی پیل تأثیر می‌گذارد. افزایش ضخامت زیست‌فیلم معمولاً ناشی از چسبندگی بالای آن به آند است که سبب افزایش انتقال جرم خواهد شد. افزایش ریزش زیست‌فیلم، با کاهش اتصال باکتری‌ها به سطح آند سبب تغییر سیستم انتقال الکترونی می‌شود. به طور کلی، بنابر نتایج تحقیقات، سرعت بالای

پیل سوختی میکروبی به شدت تأثیر می‌گذارد. افزایش قدرت محلول، با افزودن ترکیباتی چون NaCl و غیره، تأثیر به سزایی در کاهش مقاومت اهمی داشته است. با این حال، توجه به این نکته درخور اهمیت است که افزایش قدرت یونی تا زمانی قابل قبول است که تأثیر نامناسب بر رشد باکتریایی نداشته باشد، چون این قدرت یونی بالا ممکن است سبب به خطر انداختن فشار اسمزی غشای سلول باکتری‌ها شود.

### ت. DO<sup>۱</sup>

از آنجا که اکسیژن به عنوان پذیرنده الکترون می‌تواند نقش بازدارندگی را نیز در عملکرد بی‌هوازی باکتری‌ها در آند بازی کند، مقدار DO در محلول بر کارایی پیل سوختی میکروبی تأثیر بسزایی می‌گذارد. به بیان دیگر، افزایش DO در محلول الکترولیت به دلیل رشد نامطلوب باکتری‌های دگرپرورد (هتروتروپیک) به جای الکتروژن‌ها سبب کاهش کارایی کولونی و نیروی خروجی می‌شود [۳۷].

### ث. دما

پیل‌های سوختی میکروبی به دلیل متاثر بودن پارامترهای مختلف دخیل در آن به دما، به شدت به این عامل وابسته است. از پارامترهایی که در پیل سوختی میکروبی به دما وابسته‌اند می‌توان به سینتیک سیستم، فرایند انتقال جرم (انرژی فعالساز، ضریب انتقال جرم و رسانش محلول)، ترمودینامیک (انرژی آزاد گیبس و پتانسیل الکترودها) و نوع و نحوه توزیع تجمع میکروبی اشاره کرد. با این‌که تا امروز مطالعات مختلفی صورت گرفته است، ولی اطلاعات مناسبی در مورد چگونگی تأثیر دما در پیل سوختی میکروبی به دست نیامده است؛ تنها تأثیر آن بر حذف COD و افزایش تولید الکتربسته روشن شده است. افزایش چگالی نیرو ناشی از افزایش دما، احتمالاً به افزایش سوخت‌وساز میکروبی، نفوذپذیری غشا، افزایش رسانایی محلول و کاهش مقاومت اهمی وابسته است. یکی دیگر از عواملی که به شدت از دما متأثر می‌شود، رشد و ثبات زیست‌فیلم است. بنابر نتایج مطالعات، دمای اولیه بالاتر در پیل سوختی میکروبی به پایداری زیست‌فیلم در آن منجر می‌شود. گستره دمای بهینه برای پیل سوختی میکروبی در محدوده ۳۰ تا ۴۵ درجه سلسیوس است [۳۸ و ۳۹].

1. Dissolve Oxygen

2. Hydraulic Retention time  
3. Organic Loading rate  
4. Shear Stress

## ۲. فاضلاب‌های ارزیابی شده با فناوری پیل سوختی میکروبی

به منظور سهولت در بیان مطالب، به دلیل تنوع گسترده فاضلاب‌های مورد بررسی در طول سال‌های گذشته، فاضلاب‌ها در چند گروه کلی سنتزی، صنایع غذایی، صنعتی، خانگی و شهری تقسیم بندی و بیان شده‌اند (جدول (۱)).

ریزش زیست‌فیلم به کارایی بهتر اجتماعات میکروبی در آند منجر می‌شود [۴۱].

به طور کلی، در این مقاله مروری تلاش می‌شود قابلیت پیل سوختی میکروبی در تصفیه فاضلاب‌هایی که تا به حال مطالعه شده‌اند و میزان انرژی تولیدی از آنها بررسی شود.

جدول ۱. دسته‌بندی فاضلاب‌های بررسی شده در پیل سوختی میکروبی

منبع	بیشینه چگالی توان و یا جریان خروجی	نوع فاضلاب	
[۴۳, ۴۴]	$1/79 \text{ W/m}^2 - 124 \text{ mW/m}^2$	کربوهیدرات‌ها (گلوکز - لاکتات - فروکتوز - ساکاروز - رامنوز - مانوز - ریبوز - آرابینوز - زایلوز)	سنتزی
[۴۳]	$1480 - 2770 \text{ mW/m}^2$	مشتقات شکر (گالاکترونیك اسید - گلوکرونیك اسید - گلوکرونیك اسید - گلوکونیك اسید)	
[۴۵]	$488 - 2650 \text{ mW/m}^2$	الکل‌ها (گالاکتیتول - مانیتول - سریتول)	
[۴۶]	$556 - 768 \text{ mW/m}^2$	آمینواسیدها (سرین - اسپرژین - هیستیدین - آرژنین - آسپارتیک اسید - گلوتامیک اسید - آلانین - لیزین)	
[۴۷-۵۰]	$62 - 825 \text{ mW/m}^2$	اسیدهای آلی (استیک اسید - فرمیک اسید - لاکتیک اسید - سوکسینیک اسید - استات - بوتیرات - فرمات - پروپیونات - لاکتات)	
[۵۱]	$86 - 95 \text{ mW/m}^2$	ترکیبات نیتروژن‌دار (پیریدین - کینولین - ایندول)	
[۵۲]	$31/3 \text{ mW/m}^2$	آروماتیک (فنول)	
[۵۳-۵۵]	$54 - 37 \text{ mW/m}^2$	لینی	صنایع غذایی
[۵۶-۵۸]	$63 \text{ mW/m}^2 - 3/8 \text{ W/m}^2$	نوشیدنی	
[۵۹]	$0/302 \text{ mA/cm}^2$	شکلات سازی	
[۶۰-۶۳]	$622 \text{ mW/m}^2$	تولید روغن و روغن پالم	
[۶۴]	$57/38 \text{ mW/m}^2$	بسته بندی سبزیجات	
[۶۵]	$132 \text{ mW/m}^2$	فرآوری گوچه فرنگی	
[۶۶, ۶۷]	$239 \text{ mW/m}^2$	فرآوری سیب زمینی	
[۶۸-۷۲]	$145 \text{ mW/m}^2$	فرآوری برنج	
[۷۳]	$400 \text{ mW/m}^2$	تولید ترشیجات و شوربیجات	
[۷۴]	$0/115115 \text{ mA/cm}^2$	فرآوری گوشت	
[۷۵, ۷۶]	$0/1115 - 25/27 \text{ mA/cm}^2$	چوب و کاغذ	صنعتی
[۱۰۸-۱۱۷]	$1/7 - 8 \text{ W/m}^2$	نساجی و رنگ	
[۱۲۸]	$290 \text{ mW/m}^2$	معدن و صنایع وابسته	
[۱۲۹-۱۳۰]	$2/19 \text{ W/m}^2$	دامداری	
[۷۷]	$13 \text{ mA/m}^2$	کشاورزی	
[۱۳۲-۱۳۵]	$22 - 217/2 \text{ mW/m}^2$	دارویی	
[۷۸]	$1 - 14 \text{ W/m}^2$	بیمارستانی	
[۷۹, ۸۰]	$422 \text{ mW/m}^2 - 3/7 \text{ W/m}^2$	شهری	خانگی و شهری
[۱۳۵-۱۳۹]	$70/8 \text{ mW/m}^2 - 14/32 \text{ W/m}^2$	خانگی	
[۸۱, ۸۲]	$344 \text{ mW/m}^2 - 20 \text{ W/m}^2$	شیرابه زباله	

## ۱-۲ فاضلاب‌های سنتزی

این دسته از فاضلاب‌ها در آزمایشگاه تولید می‌شوند و روش‌های مشخصی برای تهیه آن‌ها در دسترس است. همچنین، بیشتر این فاضلاب‌ها به صورت استریل (سترون) و با سیستم میکروبی خاص به منظور بررسی اثر آنها در تولید توان در پیل‌های سوختی میکروبی به کار می‌روند. از معروف‌ترین پیش‌ماده‌های اصلی این نوع فاضلاب‌ها باید به استات اشاره کرد. به دلیل ساده بودن ساختار این ترکیب کربنی، با وزن مولکولی کم، در بسیاری مطالعات انجام شده در زمینه پیل‌های سوختی میکروبی، استات پیش‌ماده انتخاب شده بوده است. استات ترکیب ساده‌ای است که به عنوان منبع کربن مصرف‌پردازنده‌ای دارد تا ریزاندامگانهای الکتروفعال را فعال کند [۳۳]. علاوه بر این، در بسیاری از واکنش‌ها که کربن در واکنش‌دهنده‌ها بیشتر است، مانند گلوکز یا لاکتات، محصول نهایی واکنش استات است. از آن جا که این ماده نسبت به واکنش‌های میکروبی متداول، از جمله تخمیر و متان‌سازی در دمای اتاق خنثی است [۳۴]، برای آزمایش‌های تأثیر ساختار مانند محک زدن اجزای جدید MFC و طراحی‌های جدید راکتورها یا شرایط عملیاتی متفاوت، معمولاً به عنوان پیش‌ماده به کار می‌رود.

چا و همکاران (۲۰۰۹) عملکرد چهار پیش‌ماده مختلف را به نسبت عوامل بازده کولونی<sup>۱</sup> و توان خروجی مقایسه کردند. MFC با پیش‌ماده استات بیشترین بازده کولونی را بروز داد و به دنبال آن بوتیرات، پروپیونات و گلوکز قرار گرفتند. همچنین، در این تحقیقات مشخص شد که استات نسبت به سه پیش‌ماده‌ی دیگر در مدت زمان کمتری به بیشینه توان رسیده است. استات در مقایسه با پیش‌ماده غنی از پروتئین، بیشینه توان الکتریکی بیش از دوبرابر را نشان داد. اگرچه باید این نکته را نیز در نظر گرفت که پیش‌ماده‌های پیچیده‌تر نسبت به استات امکان تجمع طیف بیشتری از گونه‌های میکروبی را فراهم می‌آورند [۴۲].

پیش‌ماده دیگری که در این دسته قرار می‌گیرد، گلوکز<sup>۲</sup> است. گلوکز نیز یکی از پیش‌ماده‌هایی است که معمولاً در MFC به کار می‌رود. محدودیت استفاده از گلوکز این است که یک پیش‌ماده تخمیری است؛ یعنی، این پیش‌ماده در سایر سوخت‌وسازهای رقابت‌کننده مانند تخمیر و متان‌سازی نیز مشارکت می‌کند. سوخت‌وسازهای

تخمیر و متان‌سازی منجر به تولید الکتریسیته نخواهند شد. این موضوع به افت بیش از اندازه بازده کولونی هنگام استفاده از گلوکز به عنوان پیش‌ماده منجر می‌شود [۴۲].

در همین مطالعه، مشاهده شده است که گلوکز چگالی توان و ولتاژ بالاتری به نسبت سایر پیش‌ماده‌ها دارد، هرچند که مدت زمان رسیدن به بیشینه توان با این پیش‌ماده طولانی‌تر است. از آنجا که رشد ریزاندامگانها در محیط گلوکز به دلیل ساختار ویژه آن بیشتر و گلوکز پیش‌ماده ارجح برای ریزاندامگانهاست، ریزاندامگانهای متنوع تری امکان رشد در محیط حاوی گلوکز را دارند و همین عامل سبب افزایش آهنگ مصرف پیش‌ماده می‌شود. وجود تنوع گونه‌های مختلف ریزاندامگان در پیل سوختی میکروبی حاوی گلوکز سبب می‌شود که مسیرهای سوخت‌وسازی متفاوتی برای تجزیه پیش‌ماده ایجاد شود و از این رو توانایی اکسایش استات نیز در آن وجود خواهد داشت. در نتیجه، گلوکز ولتاژ بیشتری نسبت به سایر پیش‌ماده‌ها برقرار می‌کند، اما به دلیل وجود سایر واکنش‌های سوخت‌وسازی متفاوت، کاربرد گلوکز بازده کولونی کمتری پیش می‌آورد.

در مرحله بعدی، می‌توان از سلولز<sup>۳</sup> به عنوان پیش‌ماده نام برد که البته به طور گسترده‌ای از آن استفاده نشده است. سلولز فراوان‌ترین زیست‌بساطی موجود در جهان است و گرایش زیادی به مصرف آن به عنوان پیش‌ماده در پیل سوختی میکروبی وجود دارد. سلولز ماده زیست‌بساطی ارزان و آسان در دسترس است و می‌توان از آن در تولید الکتریسیته بهره جست. این پیش‌ماده تجدیدپذیر بخش اعظمی از مواد آلی موجود در فاضلاب شهری و صنعتی را نیز تشکیل می‌دهد [۸۳]. مصرف شدن سلولز در پیل سوختی میکروبی به دلیل وجود پیوندهای بتا در ساختارش، معمولاً شامل دو مرحله جداگانه است؛ ابتدا باید هیدرولیز سلولز، و در مرحله بعد، تولید الکترون توسط باکتری‌های اگزوالکتروژن صورت گیرد. برای شکستن پیوندهای بتای موجود در سلولز به آنزیم‌های متفاوتی نیاز است که این آنزیم‌ها معمولاً از طریق یک نوع ریزاندامگان تولید نمی‌شوند. در تحقیقات رضایی و همکاران (۲۰۰۹) مشخص شد که ای. کلوکا<sup>۴</sup> به تنهایی توانایی اکسایش سلولز در پیل سوختی میکروبی را دارد. البته باید این نکته را در نظر گرفت که استفاده از

3. Cellulose  
4. Enterobacter Clocae

1. Coulombic Efficiency (CE)  
2. Glucose

سوربیتول<sup>۱۸</sup> بوده‌اند که ترتیب تولید چگالی توان بالاتر برای آنها به صورت گالاکتیتول < ریبیتول < زیلیتول < ارایتول < سوربیتول < مانیتول بوده است. بازدهی حذف COD برای تمامی پلی‌الکل‌های اشاره شده، در محدوده ۷۱٪ تا ۹۲٪ بوده است [۶۳]. این نتایج حاکی از آنند که میکروب‌ها می‌توانند از این الکل‌ها برای تولید الکتروسیسته بهره‌گیرند که در واقع گویای این واقعیت خواهد بود که نمی‌توانند به طور کامل به مصرف سوخت‌وساز انسان برسند.

گروه دیگری از مواد که به عنوان یک جز اصلی در فاضلاب‌های آلی از قبیل فاضلاب‌های خانگی، فرایندهای غذایی و صنعتی وجود دارند، پروتئین‌ها هستند. تحقیقات یانگ و همکاران [۴۶] در زمینه استفاده از آمینواسیدهای با گروه‌های جانبی R مختلف، نشان داده است که توان تولیدی از آنها در پیل سوختی میکروبی به تعداد گروه‌های جانبی R آنها کاملاً وابسته است. در این تحقیقات حذف COD بیشتر از ۹۱٪ و کارایی کولونی بین ۱۳٪ تا ۳۰٪ نیز حاصل شده است. این نتایج نشان دهنده این معناست که گروه‌های R نقش به‌سزایی در تولید توان از آمینو اسیدها در MFCها بازی می‌کنند.

استیک و بوتیریک اسید محصولات انتهایی تخمیر اولیه در فرایند تولید زیست‌هیدروژن‌اند. این نوع اسیدهای آلی نیز به عنوان خوراک در پیل سوختی میکروبی به کار رفته‌اند [۸۷ و ۵۰]. اسیدهای چرب فرار نیز که فراوانی در فاضلاب‌ها یافت می‌شوند، به تنهایی در پیل سوختی میکروبی بررسی شده‌اند. اسیدهای چرب کوتاه زنجیره نسبت به اسیدهای چرب بلند زنجیره، به دلیل تخریب سریع‌شان، الکتروسیسته بیشتری تولید می‌کنند. چگالی توان تولیدی از اسیدهای آلی و اسیدهای چرب فرار در حدود  $240 \text{ mWm}^{-2}$  تا  $506 \text{ mWm}^{-2}$  بوده است و میزان حذف COD آنها در حدود ۹۰ درصد گزارش شده است [۸۸ و ۸۷]. سایر ترکیبات اولیه‌ای که به عنوان پیش ماده در MFCها بررسی شده‌اند شامل سوکسینات<sup>۱۹</sup> دکستران<sup>۲۰</sup> و گلیسرین و جز آنها هستند.

## ۲-۲ فاضلاب‌های صنایع غذایی

اتلاف مواد غذایی که در انتهای زنجیره غذایی (فروش و مصرف نهایی) اتفاق می‌افتد، پسماندهای مواد غذایی به حساب می‌آیند. مقدار بسیار زیادی تلفات مواد غذایی غنی از کربوهیدرات در سطح

یک پیش‌ماده جامد مانند سلولز، تولید توان را به علت آهنگ کند هیدرولیز مواد دانه‌ای محدود می‌کند [۸۴].

به طور کلی، تولید الکتروسیسته از کربوهیدرات‌ها در این سال‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۸۵]. مثلاً، توانایی تولید الکتروسیسته از شش ترکیب هگزوز (گلوکز، گلاکتوز<sup>۱</sup>، فراکتوز<sup>۲</sup>، فوکوز<sup>۳</sup>، رامنوز<sup>۴</sup> و منوز<sup>۵</sup>) و سه ترکیب پنتوز (زیلوز<sup>۶</sup>، ارایینوز<sup>۷</sup> و ریپوز<sup>۸</sup>) و سه مشتق از قند (گالاکترونیک اسید<sup>۹</sup>، گلاکرونیک اسید<sup>۱۰</sup>، گلوکونیک اسید<sup>۱۱</sup>) در پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای با سیستم کشت باکتریایی مختلط مورد بررسی قرار گرفته است [۴۳]. بیشترین چگالی توان را ترکیبی از گلوکرونیک اسید همراه با زیلوز و گلوکز در حدود  $2770 \text{ mWm}^{-2}$  به دست داده و پایین‌ترین چگالی توان نیز از مانوز در حدود  $1240 \text{ mWm}^{-2}$  حاصل شده است. مقدار کارایی کولونی بین ۲۲٪ تا ۳۴٪ و حذف COD بیشتر از ۸۰٪ نیز از تصفیه این ترکیبات حاصل شده است. این نتایج نشان می‌دهند که تمام مونوساکاریدهایی که از هیدولیز اسیدی ترکیبات لیگنوسلولوزیک<sup>۱۲</sup> (مواد خامی که به صورت زیست‌توده به عنوان زیست‌سوخت مصرف می‌شوند و حاوی مشتقات بسپارهای کربوهیدرات نظیر سلولز و بسپارهای آروماتیک را گرفته‌اند) حاصل می‌شوند و از قابلیت تولید الکتروسیسته در پیل سوختی میکروبی برخوردارند. امروزه، افزودنی‌های تجاری شیرین شده با قند الکل‌ها نظیر ایزومالت، لاکتیتول، مالتیتول، سوربیتول و زیلیتول به عنوان شیرین کننده برای افراد دیابتی استفاده می‌شوند [۸۶]. از این نوع الکل‌ها به عنوان خوراک ورودی در پیل سوختی میکروبی به‌کار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که تولید چگالی توان در حدود  $1490 \text{ mWm}^{-2}$  تا  $2650 \text{ mWm}^{-2}$  بوده است. الکل‌های مورد آزمون زیلیتول<sup>۱۳</sup>، ارایتول<sup>۱۴</sup>، ریبیتول<sup>۱۵</sup>، گالاکتیتول<sup>۱۶</sup>، مانیتول<sup>۱۷</sup> و

1. Galactose
2. Fructose
3. Fucose
4. Rhamnose
5. Mannose
6. Xylose
7. Arabinose
8. Ribose
9. Galacturonic Acid
10. Glucuronic Acid
11. Gluconic Acid
12. Lignocellulosic
13. Xylitol
14. Arabitol
15. Ribitol
16. Galactitol
17. Mannitol

18. Sorbitol  
19. Succinate  
20. Dextran

در تحقیق دیگری که در این زمینه انجام شد، این فاضلاب به مدت چهار هفته در یک پیل سوختی دو محفظه‌ای قرار داده و با پیش ماده سنتزی استات و گلوکز مقایسه شد. نتایج حاصل نشان از تولید ولتاژ نزدیک به فاضلاب سنتزی داشت، در صورتی که شدت جریان مشاهده شده بسیار کم بوده است که علت، هدررفت انتقال جرمی فاضلاب ماء‌الشعیر است [۴۹]. فاضلاب کارخانه‌های تولید نوشیدنی‌های مختلف نیز به همین صورت می‌توانند به خوبی به عنوان پیش ماده در پیل سوختی میکروبی به کار روند [۵۴-۵۰].

فاضلابی دیگر که محققان بررسی کرده‌اند، آب پنیر<sup>۱</sup> است. مطالعه‌های مختلفی در زمینه استفاده از آب پنیر به عنوان پیش ماده انجام شده است. آب پنیر یکی از محصولات جانبی هنگام تولید پنیر است که آبکی و غنی از لاکتوز است. این محصول شامل مواد مغذی مانند پروتئین‌های محلول، چربی، لاکتوز و نمک‌های معدنی است. به دلیل بالا بودن میزان COD این فاضلاب، دفع آن یکی از مسائل زیست‌محیطی مهم به شمار می‌آید، از این رو، تصفیه این نوع فاضلاب با MFC می‌تواند راهکاری جدید باشد. آنتونوپلو و همکاران (۲۰۱۰)، امکان تولید الکتریسیته از این نوع فاضلاب را بررسی و آن را با پیش‌ماده‌های گلوکز و لاکتوز مقایسه کردند. در این بررسی‌ها، دیده شد که زمان رسیدن به بیشینه توان و مقدار بیشینه چگالی توان، تفاوتی با محیط‌های خالص مانند گلوکز و لاکتوز ندارد، اما مدت زمان حذف COD و افت ولتاژ در این MFC بسیار کوتاه‌تر بوده که این موضوع حاکی از وجود ریزاندامگانهایی است که در سایر سوخت‌وسازهای غیر الکتروژنیک مانند تخمیر و متان‌سازی مشارکت می‌کنند و باعث افت ولتاژ شدید در MFC می‌شوند.

در نتیجه، این پیشنهاد مطرح شد که این فاضلاب قبل از استفاده در پیل سوختی میکروبی یک مرحله پیش تصفیه را نیز بگذرانند [۹۲]. در بررسی‌های بعدی تیمولی و همکاران (۲۰۱۳) ابتدا آب پنیر از صافی سترون از گذرانده‌اند تا ریزاندامگانهای باقیمانده از فرایند تهیه پنیر در آن از بین بروند. سپس مخلوط آب پنیر غلیظ سترون (استریل) با ترکیب بافر مغذی، جایگزین گلوکز شد. با انجام این کار بازده کولونی، نسبت به زمانی که از آب پنیر خام استفاده شد، افزایش یافت [۹۳]. در این مطالعه که غلظت‌های مختلفی فاضلاب آب پنیر در آن به کار رفت، مشاهده شد که فاضلاب با بیشترین میزان COD بیشینه توان را نیز تولید می‌کند. همچنین، مشاهده

جهان تولید می‌شود که حدود ۲۷٪ کل فاضلاب جامد شهری را شامل می‌شود [۸۹]. به طور کلی، اتلاف یک سوم بخش خوراکی محصولات غذایی تولید شده (حدود ۱/۳ میلیارد تن در سال) موضوع نگران‌کننده‌ای است. این دلایل سبب شده است تا پژوهشگران در مورد مصرف تلفات مواد غذایی به عنوان خوراک در MFCها تحقیق و بررسی بیشتری به عمل آورند. این فاضلاب‌ها غیرسمی‌اند و مقدار زیادی BOD تولید می‌کنند و غنی از شکر و نشاسته‌اند [۹۰ و ۹۱].

از معروفترین فاضلاب‌های صنایع غذایی، فاضلاب ماء‌الشعیر است. برای تصفیه فاضلابی که از کارخانه‌های آبجوسازی یا ماء‌الشعیر گرفته می‌شود معمولاً از روش‌های زیستی بهره می‌گیرند. فرایندهای تصفیه زیستی برای تصفیه این نوع فاضلاب بسیار مناسب‌اند، اما انرژی اولیه بسیار زیادی نیاز دارند. در نتیجه باید روشی وجود داشته باشد که مقدار انرژی مورد نیاز را کم کند. یکی از بهترین روش‌ها، استفاده از پیل سوختی میکروبی است. این فاضلاب COD بسیار بالایی دارد، اما از آنجا که اکثر مواد آلی موجود در آن شامل قند، نشاسته و پروتئین است و ترکیباتی غیر سمی‌اند، تصفیه آن به وسیله MFC در میان محققان بسیار مطلوب است؛ همچنین، این فاضلاب به علت وجود مواد مغذی آلی و غلظت کم آمونیاک و نیترژن مورد بسیار مناسبی برای تولید الکتریسیته است [۴۸]. اگرچه غلظت فاضلاب ماء‌الشعیر ممکن است متغیر باشد، معمولاً بین ۳۰۰۰-۵۰۰۰ mg COD/L، که تقریباً ده برابر فاضلاب خانگی است اما بیشینه توان به دست آمده از این فاضلاب کمتر از میزانی است که با استفاده از فاضلاب خانگی به دست آمده است. با استفاده از مدلی بر اساس نمودار تکلیس MFC، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد MFC هنگام تصفیه فاضلاب ماء‌الشعیر، هدررفت سینتیکی واکنش و هدررفت انتقال جرمی گزارش شده است. همچنین، در این تحقیقات مشخص شده است که غلظت پیش ماده تأثیر زیادی بر عملکرد پیل دارد. این گروه تحقیقاتی فاضلاب ماء‌الشعیر را در سه غلظت مختلف آزمایش کردند که مشخص شد در شدت جریان‌های زیاد میان غلظت پیش ماده و عملکرد پیل همبستگی مثبتی وجود دارد؛ از این معلوم می‌شود که غلظت زیاد در شدت جریان‌های بالا تأثیر خود را بیشتر نشان می‌دهد؛ یعنی، جایی که انتقال جرم نقش مهم‌تری ایفا می‌کند.

1. Cheese Whey



شد که هنگامی که غلظت این فاضلاب در بافر مغذی مشابه غلظت گلوکز باشد، چگالی توان و جریان هر دو پیل برابر خواهد بود. در مطالعات دیگری که انجام شد، آب پنیر در دو ساختار مشابه از MFC در دو زمان ماند هیدرولیکی متفاوت ۱ و ۳ ماه مورد مقایسه شدند که اختلاف مشاهده شده در حذف COD و ماکزیمم جریان و توان به ریخت زیست‌فیلم تشکیل شده بر آند نسبت داده شد [۹۴]. نصیراحمدی و همکاران (۲۰۱۱) نیز از آب پنیر به عنوان پیش ماده در پیل سوختی دو محفظه‌ای استفاده کردند. در این تحقیق از ریبوفلاوین<sup>۱</sup> و هیومیک اسید به عنوان واسطه‌های انتقال الکترونی و نیز مواد شیمیایی مانند  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ،  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  و KI در  $\text{FeCl}_2(\text{III})$  کاتولیت استفاده کردند که نتایج به دست آمده نشان داد هیومیک اسید بسیار مؤثرتر از ریبوفلاوین عمل می‌کند و بررسی نمودار قطبش نشان داد که  $\text{FeCl}_2(\text{III})$  بیشترین تأثیر را در شدت جریان و توان تولیدی دارد [۹۵].

از فاضلاب فرایندهای تولید نشاسته<sup>۲</sup> نظیر فاضلاب کارخانجات فراوری سیب زمینی نیز در تولید الکتریسیته توسط پیل سوختی میکروبی استفاده شده است. نشاسته پلی ساکاریدی است که در طبیعت به عنوان انرژی ذخیره شده گیاهان فراوان یافت می‌شود. تولید محصولات نشاسته ای آب زیادی نیاز دارد که به تولید مقادیر زیادی فاضلاب در این صنایع منجر می‌شود. COD فاضلاب این صنایع معمولاً در گسترده ۶۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر قرار می‌گیرد و شامل مقادیر زیادی کربوهیدرات، سلولز، پروتئین و مواد مغذی است که منبع غنی از انرژی را فراهم می‌آورد که پتانسیل تبدیل شدن به گستره وسیعی از محصولات مفید را دارد. مثلاً، فاضلاب فرایند تولید نشاسته با  $4852 \text{ mg/l COD}$  در پیل سوختی میکروبی سبب تولید بیشینه چگالی توانی در حدود  $239 \text{ mW/m}^2$  و بازدهی کولونی ۸٪ و بازدهی حذف COD ۹۸٪ و حذف ۹۱٪ از آمونیاک و نیتروژن شده است [۶۶ و ۶۷].

لو و همکاران (۲۰۰۹) امکان استفاده از فاضلاب نشاسته به عنوان پیش ماده در پیل سوختی میکروبی را بررسی کردند. در این تحقیقات، جمع آوری داده‌ها در چهار چرخه انجام شد. افزایش آنی ولتاژ هنگام تعویض پیش ماده، نشان می‌دهد که ریزاندامگانهای متصل به سطح آند (زیست‌فیلم آندی) نسبت به ریزاندامگانهای

معلق، در تولید الکتریسیته نقش پررنگ‌تری دارند؛ در غیر این صورت با تعویض آنولیت ولتاژ کاهش می‌یافت. این پیش ماده فاز راکد طولانی‌تری نسبت به منابع قندی مانند گلوکز یا لاکتات بروز داد. بعد از سه چرخه پی در پی (هر کدام به مدت ۳۵ روز)، بیشینه ولتاژ ( $490 \text{ mV}$ ) به دست آمد و در چرخه چهارم دوباره کاهش یافت که این کاهش ولتاژ را می‌توان ناشی از تغییر مقاومت داخلی دانست [۶۷]. کاهش مقاومت داخلی، می‌تواند نتیجه ی افزایش فعالیت ریزاندامگانی ناشی از رشد و تکامل زیست‌فیلم باشد و افزایش مقاومت داخلی ممکن است از کمتر شدن فعالیت ریزاندامگانی به دلیل ریزش و کهنه شدن زیست‌فیلم و یا افت عملکرد پیل در حالت کلی ناشی شود. مشکل عمده در کاربرد فاضلاب واقعی به عنوان پیش ماده، کم بودن بازده کولونی است. دلیل اصلی مطرح شده برای این مشکل وجود سایر پذیرنده‌های الکترونی مانند سولفات و نیترات در این فاضلاب است که الکترون‌ها را مصرف می‌کنند و در نتیجه به افت بازده کولونی منجر می‌شوند. تأثیر نفوذ اکسیژن به محفظه آندی را نیز باید در نظر گرفت که منجر به احیای هوازی پیش ماده می‌شود و به کم شدن مواد آلی در دسترس برای تولید الکتریسیته می‌انجامد که نهایتاً افت بازده کولونی را در پی دارد. البته واکنش‌های تخمیر و متان‌سازی نیز بر افت بازده کولونی تأثیر می‌گذارند.

در تحقیقات کیم و همکاران (۲۰۰۴) به فاضلاب نشاسته لجن فعال اضافه شد تا محیط از نظر باکتریایی غنی‌تر و اثر آن بررسی شود. نتایج این بررسی نشان داد هنگامی که به فاضلاب نشاسته لجن فعال (به عنوان منبع ریزاندامگان) اضافه شد، ولتاژ پیل در مقایسه با زمانی که این فاضلاب بدون اضافه کردن هیچ ریزاندامگان دیگری در پیل استفاده شده بود افزایش نشان می‌دهد که میزان این افزایش به مقدار لجن اضافه شده بستگی دارد و نمایانگر وجود ریزاندامگانهای الکتروفعال در لجن فعال است. حذف COD پیل‌هایی که لجن فعال به آنها اضافه شده بود نیز سریع‌تر انجام شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که باکتری‌های لجن فعال در حالت مدار بسته نسبت به حالت مدار باز از فعالیت بیشتری بروز می‌دهند و غلظت باکتری‌های اگزوالکتروژن در فاضلاب نسبت به لجن فعال کمتر بوده است [۹۶].

1. Riboflavin  
2. Starch Processing Wastewater (SPW)

است [۱۰۱]. در آزمایش دیگری در MFC دو محفظه‌ای از فاضلاب حاوی وانادیم به عنوان الکترون گیرنده کاتد استفاده شد که پس از ده روز میزان ۷۵٪ حذف  $V(V)$  و بیشینه چگالی توان  $970 \text{ mWm}^{-2}$  را نشان داده است [۱۰۳]. در مطالعه‌ای دیگر، یک MFC دو محفظه‌ای بیشترین میزان توان  $431 \text{ mWm}^{-2}$  و بیشتر از ۹۹/۵٪ حذف  $Hg^{2+}$  را نشان داده است (در این مطالعه جیوه به عنوان الکترون گیرنده به کار گرفته شده است) [۱۰۴]. همچنین، ترکیبات آمونیاک-مس (II) با بهره‌گیری از فناوری MFC ارزیابی شده‌اند. در این تحقیق  $Cu(NH_3)_4^{2+}$  می‌تواند به  $Cu$  یا  $Cu_2O$  کاهش یابد. در این مطالعه ۹۶٪ مس پس از ۱۲ ساعت کارکرد MFC با موفقیت حذف شده است [۱۰۲]. همچنین، در پیل‌های سوختی میکروبی از ریزاندامگانهای کلرزدا می‌توان برای تصفیه زیستی پنتاکلرواتان و تری کلرواتان و تبدیل آن‌ها به محصول غیر سمی اتان استفاده کرد. استریپاز و همکارانش از باکتری ژئوبکتور و الکترودهای گرافیتی برای کلرزدایی این ترکیبات استفاده کردند [۱۰۸].

جدول ۲. آلاینده‌های فلزی بازیابی شده با استفاده از فناوری پیل سوختی میکروبی.

منبع	بیشینه میزان حذف صورت گرفته	نوع آلاینده فلزی
[۱۰۹-۱۱۱]	٪ ۹۹/۵	Cr(IV)
[۱۰۸]	٪ ۹۹/۵	$Hg^{2+}$
[۱۱۲]	٪ ۹۹/۹۱	$Au^{3+}$
[۱۱۳]	٪ ۹۷/۸	$Cu^{2+}$
[۱۰۸]	٪ ۹۶	فلزی $O_2Cu$ و $Cu$
[۱۱۴]	٪ ۷۰ (کاتدی)	Cu(II)
[۱۱۵, ۱۱۶]	٪ ۹۸	Se
[۱۰۸]	٪ ۹۰	Cd
[۱۰۸]	٪ ۹۷	Zn
[۱۱۷]	نرخ بازیابی $0.079 \text{ mmol l}^{-1} \text{ h}^{-1}$	Co (II)
[۱۱۸]	٪ ۸۹ (کاتدی)	Fe (III)
[۱۰۸]	٪ ۷۵/۸	$NaVO_3$

باکتری ژئوبکتور در پیل سوختی میکروبی، همچنین توانایی کاهش U(VI) محلول به U(IV) محلول را نیز بروز داده است [۱۱۹].

فاضلاب صنایع غذایی دیگر نیز نظیر کارخانجات فرآوری گوجه فرنگی [۶۵]، صنایع لبنی [۹۷]، صنایع تولید و آسیاب برنج [۶۸]، کارخانجات تولید شوریجات و ترشیجات [۷۳]، کارخانجات تولید سبزیجات بسته‌بندی شده [۶۴]، صنعت شکلات‌سازی [۵۹]، تولید روغن و روغن پالم [۹۸] در پیل سوختی میکروبی آزموده شدند و نتایج موفقیت‌آمیزی نظیر حذف COD در حدود حداقل ۷۵٪ تا حداکثر ۹۶٪ و حذف حدود ۹۰٪ نیترژن حاصل شده است [۱۰۰ و ۹۹].

### ۲-۳ فاضلاب‌های صنعتی

غلظت بالای فلزات سنگین سمی (کادمیم، سرب، آرسنیک و کرم و دیگر فلزات) در فاضلاب‌های صنعتی برای سوخت‌وساز سلولی گیاهانی که در کره زمین حیات خود را سپری می‌کنند بسیار زیاد است. بنابراین فاضلاب‌های حاوی مواد فلزی سنگین قبل از این‌که به طبیعت راه یابند باید تصفیه شوند و غلظت آلاینده‌های آنها کاهش یابد. MFCها پتانسیل بسیار مطلوبی برای کاهش این مواد سمی، چه در آنولیت و چه در کاتولیت، بروز داده‌اند [۱۰۶-۱۰۱]. عموماً فلزات سنگین با پتانسیل اکسایش-کاهش بالا، به دلیل ایجاد توان خروجی بالاتر برای کاربرد به عنوان الکترون گیرنده در MFCها بسیار مورد علاقه‌اند. فلزات سنگین مختلفی در محفظه آند و همچنین کاتد MFCها بررسی شده‌اند. عموماً برای حذف آندی غلظت خاصی از فلزات سنگین و یا عناصر سمی به آنولیت اضافه می‌شوند و دیگر فلزات سنگین با پتانسیل اکسایش-کاهش بالاتر به عنوان الکترون گیرنده در محفظه کاتد به کار می‌روند [۱۰۷ و ۱۰۳]. زیست‌مولکول‌هایی مانند پلی ساکاریدها، پروتئین‌ها و لیپیدها شامل گروه‌های فعالی از قبیل آمین، سولفات، کربوکسیلات، هیدروکسیل و فسفات‌اند که به فرایند جذب زیستی برای حذف فلزات سنگین و الودگی‌های سمی کمک می‌کنند. این زیست‌مولکول‌ها ممکن است در آنولیت یا در دیواره سلول باکتریایی حضور داشته باشند که نقش اساسی در حذف الودگی‌های سمی ایفا می‌کنند. علاوه بر این، برخی فرایندها از قبیل اکسایش زیستی، اکسایش شیمیایی و فراریت و جذب الکترون آند عامل حذف سولفید در طی عملیات MFC هستند. مثلاً، MFC تک محفظه‌ای با آلاینده‌های کادمیم و روی، بازدهی بالایی حذف، به ترتیب ۹۰٪ و ۹۷٪ را نشان داده

MFCها توانایی کاهش Cr(VI) (سمی) به Cr(III) (با سمیت بسیار پایین) و ته نشینی  $Cr(OH)_3$  و حذف ۹۹/۵ درصد سیانید و حذف COD حدود ۸۸٪ از فاضلاب‌های حاوی سیانید را نیز دارند [۱۲۳-۱۲۰]. فاضلاب‌های صنعتی متنوعی به عنوان خوراک ورودی پیل سوختی میکروبی تا به حال به کار رفته‌اند و با توجه به قابلیت‌های این فناوری این روند می‌تواند گسترش نیز بیابد.

### ۲-۳-۱ فاضلاب صنایع چوب و کاغذ

با افزایش مداوم مصرف محصولات کاغذ و الیاف طبیعی، بازیافت این محصولات در سطح جهان با دامنه فراوانی افزایش یافته است. با افزایش مقادیر بازیافت، میزان کاغذ تولید شده نیز بیشتر خواهد شد که به افزایش مقادیر فاضلاب منجر شده است. این افزایش مقدار فاضلاب، افزایش مصرف انرژی برای تصفیه با فرایندهای معمول را نیز در پی دارد. همچنین، این فاضلاب مقادیر زیادی مواد آلی محلول و مواد دانه‌ای مانند سلولز را نیز شامل می‌شود که در روش‌های معمول تصفیه به طور موثر از بین نمی‌روند. در صورت تصفیه، این فاضلاب با پیل سوختی میکروبی، باکتری‌ها سلولز را تجزیه و الکتریسیته تولید می‌کنند [۴۵]. در پژوهش هوانگ و همکاران (۲۰۰۸) پی بردند که تصفیه فاضلاب صنایع کاغذ با پیل سوختی میکروبی از نظر فنی شدنی است، اما رسانایی محلول و ظرفیت بافر عوامل مؤثری‌اند که توان تولید الکتریسیته در این فاضلاب را محدود می‌کنند. همچنین، همان گونه که قبلاً اشاره شد، تصفیه سلولز در پیل سوختی میکروبی بسیار پیچیده‌تر از پیش ماده‌های با مواد آلی محلول است. نتایج این تحقیق نشان داد که MFCها بعد از حدود سه هفته به بازدهی حذف COD برابر با ۷۶٪ رسیدند، در حالیکه ۹۶٪ سلولز توسط باکتری‌ها حذف شده است [۷۶ و ۷۵].

### ۲-۳-۲ صنایع نساجی و رنگ

یکی دیگر از صنایع آلاینده، صنعت نساجی است که دفع فاضلاب آن همواره محیط زیست و صنعت را دچار مشکل کرده است. صنایع نساجی یکی از پیچیده‌ترین فاضلاب‌های صنعتی را تولید می‌کنند.  $10^5 \times 7$  تن فاضلاب رنگ تولید شده در سال حاوی مولکول‌های آلی سخت به همراه مواد سمی، جهش‌زا و سرطان‌زا به‌شمار می‌آیند [۱۲۴ و ۱۲۵]. تخلیه چنین فاضلاب‌هایی برای طبیعت،

جانوران و گیاهان به شدت زیانبار است. بنابراین، تصفیه چنین فاضلاب‌هایی قبل از تخلیه آن‌ها در طبیعت بسیار حیاتی است. اکثر روش‌های شیمی- فیزیکی توان حذف مؤثر رنگ را دارند اما به دلیل هزینه‌گزاف، تطبیق‌پذیری کم و حساسیت به سایر ترکیبات فاضلاب عملاً امکان‌پذیر نیست. از سوی دیگر، با توجه به توان باکتری‌ها در رنگ‌زدایی رنگ‌های آزو، تصفیه زیستی روشی ارزان و مطمئن برای حذف این آلاینده ارائه می‌دهد. اخیراً، تلاش‌هایی در زمینه استفاده از این رنگ‌ها به عنوان پیش ماده در MFC به عمل آمده است که به حذف رنگ از این فاضلاب‌ها و تولید همزمان الکتریسیته منجر شده است [۱۲۶]. فناوری MFC یک راهکار دوستدار محیط زیست برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی رنگ و تولید همزمان نیروی الکتریکی معرفی کرده است. MFCها از ریزاندامگانها استفاده می‌کنند، بنابراین رنگ‌ها با برخی از سازوکارهای رنگ‌زدایی مانند استفاده از آنزیم‌ها، واسطه‌های اکسایش- کاهش با وزن مولکولی کم و کاهش شیمیایی با کاهش دهنده‌های بایوژنی می‌توانند کاهش یابند. در MFCها واکنش رنگ‌زدایی در محفظه آند و در روند زیستی و تحت شرایط بی‌هوازی انجام می‌پذیرد. به طور کلی، ۶۰٪ تمام رنگ‌های تولید شده رنگ‌ها آزو است [۱۲۷ و ۱۲۸]. ترکیبات آزو<sup>۱</sup> بزرگترین دسته شیمیایی رنگ‌های سنتزی را تشکیل می‌دهند و به طور گسترده‌ای در فاضلاب خروجی صنایع نساجی، رنگ‌سازی و مصرف‌کنندگان رنگ یافت می‌شود. مقدار زیاد رنگ موجود در این فاضلاب باعث صدمات شدید زیست محیطی مانند ممانعت نفوذ نور و اکسیژن به درون آب می‌شود که برای حیات آبیان خطرآفرین است. در نتیجه، حذف آن‌ها از فاضلاب بسیار اهمیت دارد. مثلاً، در پیل سوختی میکروبی، اتصالات آزوی رنگ‌های کنگو<sup>۲</sup> به اتصالات ساده‌تری از قبیل آروماتیک آمین‌ها شکسته می‌شوند که می‌توانند کاملاً به صورت فیزیکی در محفظه کاتد تخریب شوند. در یک آزمایش از MFC با همراه با آند و کاتد زیستی برای رنگ‌زدایی رنگ آزوی کنگو استفاده شد. بعد از عملیات یک روزه بیشتر از ۹۸٪ رنگ‌زدایی رنگ

۱. در شیمی به ترکیب‌هایی ترکیب‌های آزو گفته می‌شود که دارای شکل مولکولی  $R-N=N-R'$  باشند؛ که در آن R و R' هر کدام می‌توانند آروماتیک یا آلیفاتیک باشند. گروه  $N=N$  گروه عاملی آزو یا دی‌ایمید نامیده می‌شود.

۲. رنگ کنگو (Congo) جزء رنگ‌های تترا آزونیم است. در این رنگ‌ها ماده کوپلاسون با یک ترکیب تترا آزونیم جفت می‌شود. از مهمترین این رنگ‌ها قرمز کنگو است که از جفت شدن بنزیدین با دو گروه نفتونیک اسید تهیه می‌شود. این رنگ‌ها از فراوان‌ترین رنگ‌های دسپس آزو هستند.

MFC مطالعه و بررسی شد که نتایج حاکی از تولید چگالی توان  $290 \text{ mWm}^{-2}$  و کارایی کولونی ۹۷٪ بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که نه تنها تولید الکتریسیته، بلکه حذف فلزات سنگین، تولید مواد مفید و بازیافت فلزات از زهاب اسیدی معادن با بهره‌گیری از فناوری پیل سوختی میکروبی با موفقیت همراه خواهد بود [۱۴۴].

### ۳-۲-۵ فاضلاب صنایع گوشتی و دامداری

فاضلاب صنایع دامداری، گوشتی و لاشه حیوانات عمدتاً حاوی مقدار زیادی مواد آلی زیست تخریب پذیر، مقدار زیادی مواد آلی و غلظت زیاد فسفات و نیترات است [۱۴۵]. بیشترین کاهش COD به دست آمده از تصفیه این نوع فاضلاب‌ها در پیل سوختی میکروبی بیشتر از ۵۰٪ بوده و بازدهی حذف نیترات از آن در حدود ۸۰٪ گزارش شده است [۱۴۶].

### ۳-۲-۶ فاضلاب صنایع دارویی

یکی دیگر از صنایعی که فاضلاب خروجی از کارخانجات آنها شدیداً سمی است، صنایع دارویی است. به عنوان نمونه فاضلاب کارخانه تولید پنی سیلین سنتزی مورد بررسی ون و همکاران قرار گرفت. این تحقیقات نشان دهنده این حقیقت بودند که مواد سمی و مقاوم به تجزیه مانند فاضلاب آنتی بیوتیک‌ها نیز می‌تواند یک منبع خوراک ورودی خوب برای MFC باشند [۱۴۷]. فاضلاب صنایع دارویی سخت و داروهای استروئیدی مانند تولید هیدروکورتیزون که از مهمترین حد واسط‌های تولید داروهای استروئیدی است و در مرحله هیدرولیز اسیدی مقدار بسیار زیادی فاضلاب‌های شدیداً سمی تولید می‌کند، نیز در پیل سوختی میکروبی مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج چگالی توان تولیدی به ترتیب  $217/27 \text{ mWm}^{-2}$  و

$22/3 \text{ mWm}^{-2}$  و حذف COD ۳۰٪ تا ۸۰٪ برای فاضلاب داروهای سخت و استروئیدی را نشان داده است [۱۴۸-۱۵۰].

### ۳-۲-۴ فاضلاب‌های خانگی و شهری

در مقایسه با فاضلاب‌های صنعتی، فاضلاب‌های خانگی و شهری تخریب پذیرترند و به سادگی می‌توانند برای تولید انرژی زیستی به کار روند.

کنگو صورت پذیرفته است. انتقال الکترون‌ها از ریزاندامگانها، به آند و انتقال پروتون‌ها از طریق غشای تبادل کاتیونی، به تخریب اتصالات آزو ( $-N = N-$ ) در محفظه کاتدی منجر شده است. کاهش اتصالات آزو سبب شکل‌گیری آمین‌های آروماتیک زیست تخریب‌پذیر و بی‌رنگ می‌شود [۱۳۳-۱۲۹].

### ۳-۲-۳ فاضلاب صنایع پالایشگاه و پتروشیمی

فاضلاب پالایشگاهی، حاصل پالایش و تقطیر فرآورده‌های نفتی، حاوی مقادیر زیادی آلاینده‌های آلی مانند هیدروکربن‌های نفتی و انواع فلزات سنگین است. یک گروه عمده از این فاضلاب‌ها از تولید زیست‌گازوئیل‌ها حاصل می‌شود که شامل قندها، ۵-فورفورال، فنولیک‌ها، سایر پیش تصفیه‌کننده‌ها، محصولات جانبی تخمیر، ترکیبات فنولیک و مشتقات فوران آلدهید هستند. تصفیه زیست‌گازوئیل به تنهایی و فاضلاب حاصل از آن، هر دو با پیل سوختی میکروبی آزمایش شده که چگالی توان خروجی از آنها، به ترتیب،  $23 \text{ Wm}^{-2}$  و  $2110 \text{ mWm}^{-2}$  بوده است [۱۳۴ و ۱۳۵]. فاضلاب‌های منابع ذخیره اتانول و جزء هیدرولیزات مایع بخار نیز در پیل سوختی میکروبی بررسی شده است [۱۳۷ و ۱۳۶ و ۹۷]. فاضلاب صنایع پتروشیمی نیز یکی دیگر از اهداف تحقیقات برای بررسی کاربری فناوری MFC برای تصفیه مؤثر سایتهای آلوده بوده است [۱۲۰-۱۳۸]. اسید ترفتالاتیک خالص (PTA) یک ماده خام برای تولید محصولات پتروشیمی است که تولید یک تن از آن به تولید ۳ تا ۱۰ مترمکعب فاضلاب منجر می‌شود. بنابراین، حجم بالای فاضلاب تولیدی در این صنایع نیاز مبرم به روش تصفیه مقرون به صرفه را روشن می‌کند. نتایج تحقیقاتی در زمینه تصفیه این فاضلاب‌ها با پیل سوختی میکروبی، به تولید چگالی توانی مابین  $50 \text{ mWm}^{-2}$  تا  $2200 \text{ mWm}^{-2}$  و حذف COD در حدود ۷۰ درصد شده است [۱۴۳-۱۴۱].

### ۳-۲-۴ فاضلاب معادن و صنایع وابسته

زهاب اسیدی معدن<sup>۱</sup> که به دلیل اکسایش زیستی سولفید فلزات به سولفات آنها تولید می‌شود، حاوی فلزات محلول از قبیل سرب، مس، کادمیم و آرسنیک است که خطرات جدی در محیط‌های آبی پدید می‌آورد. تصفیه زهاب اسیدی معادن با استفاده از فناوری

1. Acid-Mine Drainage (AMD)

محیط زیست را با مشکلات زیادی روبه‌رو می‌کند و در نتیجه تلاش‌های بسیاری در این مورد انجام شده است. پژوهشگران



شکل ۲. پیل‌های سوختی میکروبی چندتایی با ورودی ادرار [۱۵۴].

بسیاری بهره‌گیری از شیرابه زباله در پیل سوختی میکروبی را امکان‌سنجی کرده‌اند [۱۵۵ و ۱۵۶]. در بعضی تحقیقات از سیستم‌های پیوسته نیز بهره گرفته شد تا شدت جریان خروجی افزایش یابد [۱۵۷]. گلاوز و همکاران در پژوهشی سه پیل سوختی میکروبی را به صورت متوالی به کار بردند و نشان دادند که وقتی فاضلاب یک حلقه قرار می‌گیرد (برگشت خروجی پیل سوختی میکروبی سوم به جریان خوراک و ورود دوباره آن به پیل سوختی میکروبی اول) میزان حذف COD و BOD بسیار گسترده‌ای حاصل می‌شود که حاکی از مناسب بودن این روش برای تصفیه این نوع فاضلاب است [۱۵۸].

### ۳. نتیجه‌گیری کلی

بنابر نتایج بررسی‌های گسترده در زمینه کاربرد پیل سوختی میکروبی در تصفیه انواع مختلف فاضلاب، چشم‌انداز آینده توسعه این فناوری را می‌توان بسیار روشن ارزیابی کرد. طیف گسترده فاضلاب‌ها به عنوان خوراک در پیل سوختی میکروبی آزموده شده‌اند. این گستره شامل فاضلاب‌های حاوی منابع کربن (مانند گلوکوز، گلوکونیک اسید، گالاکتیتول، ریبیتول، زایلوز، گلوکز، گالاکتوز، گلوکونیک اسید، کزولیتول و مانند آنها)، منابع نیتروژن (مانند سربین، هیستیدین، آرژنین و غیره)، اسیدهای آلی (نظیر استیک اسید، لاکتیک اسید و غیره)، صنایع مختلف (همچون تولید نوشابه، شکلات‌سازی، کشاورزی، تولید مواد غذایی، لبنی، صنعت سیمان، تولید زیست‌گازوئیل، کشتارگاه‌ها، شهرداری‌ها، پالایشگاه و پتروشیمی، خانگی و غیره) است. البته توجه به این نکته لازم است

یکی از روش‌های کاربرد فناوری پیل سوختی میکروبی در تصفیه فاضلاب خانگی، ساخت توالت‌های دوستدار محیط زیست است که می‌توانند علاوه بر تولید انرژی، تأثیر به‌سزایی بر تمیز نگه داشتن محیط بگذارند. مثلاً، از MFC تک محفظه‌ای برای تصفیه ادرار انسان و استخراج هم‌زمان استروویت<sup>۱</sup> ( $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) استفاده شده است. استروویت تولید شده از ادرار درست مانند هر کود دیگر دوستدار محیط زیست مصرف کاربرد گسترده‌ای خواهد داشت [۷۹]. توان حاصل از ادرار انسان همراه با ۰/۵٪ مخمر و ۱٪ تریپتون معادل  $14/32 \text{ Wm}^{-3}$  بوده است که بعد از سه مرحله به  $11/76 \text{ Wm}^{-3}$  کاهش یافته است [۱۵۱]. هیدرولیز اوره نیز که برای فرایند ته‌نشینی استروویت بسیار مفید است، در این فناوری عملی شده است. در این مطالعات نشان داده شد که اضافه کردن نمک دریایی به ادرار باعث افزایش تولید الکتریسیته و استخراج استروویت خواهد شد. افزایش ۱۰٪ توان و افزایش استخراج استروویت از ۲۱٪ به ۹۴٪ و افزایش حذف COD از ۱۶٪ به ۱۸٪ از نتایج افزودن نمک دریایی بوده است [۱۵۲]. تحقیقات دیگری در همین راستا در دانشگاه Bristol صورت گرفت. در این تحقیقات، یک محفظه جمع‌آوری ادرار ساخته و ادرارهای جمع‌آوری شده به MFCها منتقل شد (شکل (۲)). MFCها مستقیماً به دیود نوری متصل شده بودند تا میزان تولید الکتریسیته را نشان دهند. این آزمایش به مدت ۳-۲ ماه انجام شد و روزانه ۳ تا ۲ لیتر ادرار به توان (نیروی برق) تبدیل شده است. به مدت ۵ هفته، به طور متوسط هر روز ۷۵ میلی‌وات توان به‌دست آمده و طی آزمایش حداکثر حذف COD به میزان ۹۸٪ مشاهده شده است. علاوه بر ادرار از مدفوع انسان نیز برای تولید الکتریسیته در MFCها استفاده شد. مثلاً، در MFC دو محفظه‌ای، مدفوع انسان را برای تصفیه و تولید الکتریسیته به کار گرفتند. قبل از استفاده در MFCها، برای بهبود تولید نیرو فرایند تخمیر اجرا شد. بنابر نتایج به‌دست آمده، MFC بیشترین چگالی تولید توان  $70/8 \text{ mWm}^{-2}$  و حذف کلی COD بعد از ۱۹۰ ساعت ۷۸٪ بوده است [۱۵۳].

ماهیت شیرابه‌های خاکچال، پیچیده و غلظت آن زیاد است، که شامل اجزایی مقاوم و سمی مانند فلزات سنگین و یا مواد آلی زئوبیوتیک<sup>۲</sup> می‌شود. از آنجا که این ماده بسیار آلوده است، دفع آن

1. Struvite  
2. Xenobiotic

- [6] Henze, M., Harremoës, P., "Anaerobic Treatment of Wastewater, A Literature Review", *Water Sci Technol*, 15 1-101, (1983).
- [7] Huggins, T., Fallgren, P. H., Jin, S., Ren, Z. J., "Energy and Performance Comparison of Microbial Fuel Cell and Conventional Aeration Treating of Wastewater", *J Microb Biochem Technol*, 6 1-5, (2013).
- [8] Aelterman, P., Rabaey, K., Clauwaert, P., Verstraete, W., "Microbial fuel cells for wastewater treatment", *Water Sci Technol*, 54 9-15, (2006).
- [9] Gagol, M., Przyjazny, A., Boczkaj, G., "Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review", *Chem Eng J*, 338 599-627, (2018).
- [10] Roccaro, P., "Treatment processes for municipal wastewater reclamation: The challenges of emerging contaminants and direct potable reuse", *Current Opinion Environ Sci Health*, 2 46-54, (2018).
- [11] Salgot, M., Folch, M., "Wastewater treatment and water reuse", *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2 64-74, (2018).
- [12] Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., Vanbroekhoven, K., "A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production", *Bioresour Technol*, 101 1533-43, (2010).
- [13] Kumar, R., Singh, L., Zularisam, A. W., Hai, F. I., "Microbial fuel cell is emerging as a versatile technology: a review on its possible applications", challenges and strategies to improve the performances. *Int J Energy Res*, 42 369-394, (2017).
- [14] Pandey, P., Shinde, V. N., Deopurkar, R. L., Kale, S. P., Patil, S. A., Pant, D., "Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery", *Applied Energy*, 168 706-23, (2016).
- [15] Zuo, Y., Cheng, S., Call, D., Logan, B. E., "Tubular membrane cathodes for scalable power generation in microbial fuel cells", *Environ Sci Technol*, 41 3347-53, (2007).
- [16] Sonune, A., Ghate, R., "Developments in wastewater treatment methods", *Desalination*, 167 55-63, (2004).
- [17] Rakesh, C., Meda, U. S., Suresh, R., "Performance studies of microbial fuel cell", *Inter J Research Eng Technol*, 3 169-73, (2014).
- [18] Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., Oh, S. E., "Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review", *Alexandria Engin J*, 54 745-756, (2015).
- [19] Rabaey, K., Verstraete, W., "Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation", *Trends Biotechnol*, 23 291-298, (2005).
- [20] Rabaey, K., Lissens, G., Verstraete, W., "Microbial fuel cells: performances and perspectives. In: Piet Lens PW, Marianne Haberbauer and Angelo Moreno, editor. *Biofuels for fuel cells: renewable energy from biomass fermentation*. London: IWA Publishing, p. 377-399, (2005).

که شرایط عملیاتی نظیر انتخاب فاضلاب و قدرت یونی آن، دبی ورودی، دما، pH، میزان بارگیری آلی، زمان ماند هیدرولیکی، نوع اجتماع میکروبی و کارایی کلونیزاسیون، مقاومت درونی و جز آنها، نقش مهمی در میزان توان خروجی از پیل سوختی میکروبی و میزان تصفیه فاضلاب بازی می‌کنند و برای دستیابی به حداکثر کارایی پیل، بهینه‌سازی این شرایط بسیار اهمیت دارد. پارامترهای ساختاری پیل سوختی میکروبی نیز در میزان تولید توان حاصل بسیار تأثیرگذارند. از این پارامترها می‌توان به طراحی مناسبی که منجر به کاهش مقاومت داخلی شود، استفاده از نانوذرات برای اصلاح الکترودها به منظور افزایش فرایند انتقال الکترونی، بهره‌گیری از ریزاندامگانه‌های مهندسی ژنتیکی شده و کنترل فرایند سوخت‌وسازی آنها، کاهش زمان اولیه شروع به کار پیل سوختی میکروبی نام برد.

به طور کلی، قابلیت پیل سوختی میکروبی در تصفیه فاضلاب‌های مختلف به ویژه فاضلاب‌های سمی و حاوی فلزات سنگین، و تولید همزمان انرژی در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است و امید می‌رود این روند به کاربرد گسترده این فناوری در عرصه‌های مختلف می‌انجامد.

#### ۴. سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور و پژوهشگاه مواد و انرژی سپاسگزاری می‌کنند.

#### مراجع

- [1] Topare, N. S., Attar, S. J., Manfe M. M., *Sewage/wastewater treatment technology*. *Sci Revs Chem Commun*, 1 18-24, (2011).
- [2] [www.EPA.gov](http://www.EPA.gov). (سایت آژانس حفاظت از محیط زیست).
- [3] Zhang, X., Li, K., Yan, P., Liu, Z., Pu, L., "N-type Cu<sub>2</sub>O doped activated carbon as catalyst for improving power generation of air cathode microbial fuel cells", *Bioresour Technol*, 187, 299-304 (2015).
- [4] Chevalier, P., Proulx, D., Lessard, P., Vincent, W. F., de la Noüe J., "Nitrogen and phosphorus removal by high latitude mat-forming cyanobacteria for potential use in tertiary wastewater treatment", *J Appl Phycol*, 12 105-12 (2000).
- [5] Jenkins, D., Ferguson, J. F., Menar A. B., "Chemical processes for phosphate removal", *Water Res*, 5 369-89, (1971).

- [21] Abourached, C., English, M. J., Liu, H., "Wastewater treatment by Microbial Fuel Cell (MFC) prior irrigation water reuse", *J Cleaner Production*, 137 144-149, (2016).
- [22] Karthikeyan, R., Krishnaraj, N., Selvam, A., Wong, J. W., Lee, P. K., Leung, M. K., Berchmans, S., "Effect of composites based nickel foam anode in microbial fuel cell using *Acetobacter acetii* and *Gluconobacter roseus* as a biocatalysts", *Bioresour Technol*, 217 113-20, (2016).
- [23] Ahn, Y., Logan, B. E., "Domestic wastewater treatment using microbial fuel cells and electrical energy production", *Bioresour Technol*, 101 469-75, (2009).
- [24] Nourbakhsh, F., Mohsennia, M., Pazouki, M., "Nickel oxide/carbon nanotube/polyaniline nanocomposite as bifunctional anode catalyst for high-performance *Shewanella*-based dual-chamber microbial fuel cell", *Bioprocess Biosyst Eng*, 40 1669-1677, (2017).
- [25] Nourbakhsh, F., Pazouki, M., Mohsennia, M., "Impact of modified electrodes on boosting power density of microbial fuel cell for effective domestic wastewater treatment: A case study of Tehran", *J Fuel Chem Technol*, 45 871-9, (2017).
- [26] Logan, B. E., Amelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguia, S., "Microbial fuel cells: methodology and technology", *Environ Sci Technol*, 40 5181-92, (2007).
- [27] Logan, B. E., "Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells", *Trends Microbiol*, 14 512-8, (2006).
- [28] Logan, B. E., Wallack, M. J., Kim, K. Y., Feng, Y., Saikaly, P. E., "Assessment of microbial fuel cell configurations and power densities", *Environ Sci Technol Lett*, 2 206-14, (2015).
- [29] Boasa, J., V., Oliveiraa, V., B., Marcona, L., R., C., Pintoa, D., P., Simõesb, M., Pintoa, A., "Effect of operating and design parameters on the performance of a microbial fuel cell with *Lactobacillus pentosus*", *Biochem Eng J*, 104 34-40, (2015).
- [30] He, Z., Huang, Y., Manohar, A., K., Mansfeld, F., "Effect of electrolyte pH on the rate of the anodic and cathodic reactions in an air-cathode microbial fuel cell", *Bioelectrochem*, 74 78-82, (2008).
- [31] Lee, C. Y., Huang, Y. N., "The effects of electrode spacing on the performance of microbial fuel cells under different substrate concentrations", *Water Sci Technol*, 68 2028-33, (2013).
- [32] Pandit, S., Ghosh, S., Ghangrekar, M. M., Das, D., "Performance of an anion exchange membrane in association with cathodic parameters in a dual chamber microbial fuel cell", *Int J Hydrogen Energy*, 37 9383-92, (2012).
- [33] Winfield, J., Ieropoulos, I., Greenman, J., Dennis, J., "The overshoot phenomenon as a function of internal resistance in microbial fuel cells", *Bioelectrochem*, 81 22-7, (2012).
- [34] Zhuang, L., Zhou, S., Li, Y., Yuan, Y., "Enhanced performance of air-cathode two-chamber microbial fuel cells with high-pH anode and low-pH cathode", *Bioresour Technol*, 101 3514-3519, (2010).
- [35] Nam, J. Y., Kim, H. W., Lim, K. H., Shin, H. S., Logan, B. E., "Variation of power generation at different buffer types and conductivities in single chamber microbial fuel cells", *Biosens Bioelectron*, 25 1155-1159, (2010).
- [36] Qiang, L., Yuan, L. J., Ding, Q., "Influence of buffer solutions on the performance of microbial fuel cell electricity generation", *Huanjing Kexue/Environ Sci*, 32 1524-1528, (2011).
- [37] Heijne, A. T., Liu, F., Rijnsoever, L. S., Saakes, M., Hamelers, H. V., M., Buisman, C. J., "Performance of a scaled-up microbial fuel cell with iron reduction as the cathode reaction", *J Power Sources*, 196 7572-7577, (2011).
- [38] Michie, I. S., Kim, J. R., Dinsdale R. M., Guwy A. J., Premier G. C. "The influence of psychrophilic and mesophilic start-up temperature on microbial fuel cell system performance", *Environ Sci Technol*, 4 1011-1019, (2011).
- [39] Michie, I. S., Kim, J. R., Dinsdale, R. M., Guwy, A. J., Premier, G. C., "Operational temperature regulates anodic biofilm growth and the development of electrogenic activity", *Appl Microbiol Biotechnol*, 92 419-30, (2011).
- [40] Juang, D. F., Yang, P. C., Kuo, T. H., "Effects of flow rate and chemical oxygen demand removal characteristics on power generation performance of microbial fuel cells", *Int J Environ Sci Technol*, 9 267-280, (2012).
- [41] Oliveirab, V. B., Simõesb, M., Melob, L. F., Pintoa, A., "Overview on the developments of microbial fuel cells", *Biochem Eng j*, 73 53-64, (2013).
- [42] Chae, K. J., Choi, M. J., Lee, J. W., Kim, K. Y., Kim, I. S., "Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells", *Bioresour Technol*, 100 3518-25, (2009).
- [43] Catal, T., Li, K., Bermek, H., Liu, H., "Electricity production from twelve monosaccharides using microbial fuel cells", *J Power Sources*, 175 196-200, (2008).
- [44] Feng, Y., Wang, X., Logan, B. E., Lee, H., "Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells", *App Microbiol Biotechnol*, 78 873-80, (2008).
- [45] Catal, T., Xu, S., Li, K., Bermek, H., Liu, H., "Electricity production from polyalcohols in single-chamber microbial fuel cells", *biosens bioelectron*, 24 855-60, (2008).
- [46] Yang, Q., Wang, X., Feng, Y., Lee, H., Liu, J., Shi, X., "Electricity generation using eight amino acids by air-cathode microbial fuel cells", *Fuel*, 102 478-82, (2012).

- [47] Cárcer, D. A., Ha, P. T., Jang, J. K., Chang, I. S., "Microbial community differences between propionate-fed MFC systems under open and closed circuit conditions", *Appl Microbiol Biot*, 89 605-612, (2011).
- [48] Futamata, H., Bretschger, O., Cheung, A., Kan, J., Owen, R., Neelson, K. H., "Adaptation of soil microbes during establishment of microbial fuel cell consortium fed with lactate", *J Biosci Bioeng*, 115 58-63, (2013).
- [49] Kiely, P. D., Rader, G., Regan, J. M., Logan, B. E., "Long-term cathode performance and the microbial communities that develop in microbial fuel cells fed different fermentation endproducts", *Bioresour Technol*, 102 361-366, (2011).
- [50] Liu, H., Cheng, S., Logan, B. E., "Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell", *Environ Sci Technol*, 39 658-62, (2005).
- [51] Hu, W. J., Niu, C. G., Wang, Y., Zeng, G., M., Wu, Z., "Nitrogenous heterocyclic compounds degradation in the microbial fuel cells", *Process Saf Environ*, 89 133-140, (2011).
- [52] Song, T. S., Wu, X. Y., Zhou, C. C., "Effect of different acclimation methods on the performance of microbial fuel cells using phenol as substrate", *Bioprocess Biosyst Eng*, 37 133-138, (2014).
- [53] Drisya, C. M., Manjunath, N. T., "Dairy Wastewater Treatment and Electricity Generation Using Microbial Fuel Cell", *Int Research J Engin Technol*, 4 1293-1296, (2017).
- [54] Mansoorian, H. J., Mahvi, A. H., Jafari, A. J., Khanjani, N., "Evaluation of dairy industry wastewater treatment and simultaneous bioelectricity generation in a catalyst-less and mediator-less membrane microbial fuel cell", *J Saudi Chemical Society*, 20 88-100, (2016).
- [55] Parkash, A., Aziz, S., Unar, I. N., Soomro, S., "Utilizing Dairy Wastewater For Electricity generation using environment-friendly double chambered microbial fuel cell", *J engin sci*, 8 44-50, (2016).
- [56] Pant, D., Adholeya, A., "Biological approaches for treatment of distillery wastewater: a review", *Bioresour Technol*, 98 2321-34, (2007).
- [57] Samsudeen, N., Radhakrishnan, T. K., Matheswaran, M., "Bioelectricity production from microbial fuel cell using mixed bacterial culture isolated from distillery wastewater", *Bioresour Technol*, 195 242-247, (2015).
- [58] Tiwari, B. R., Ghangrekar, M. M., "Electricity production during distillery wastewater treatment in a microbial fuel cell equipped with low cost PVA-Nafion-Borosilicate membrane", *J clean energy technol*, 6 158-165, (2018).
- [59] Patil, S. A., Surakasi, V. P., Koul, S., Ijmulwar, S., Vivek, A., Shouche, Y. S., Kapadnis, B. P., "Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber", *Bioresour Technol*, 100 5132-5139, (2009).
- [60] Baranitharan, E., Khan, M. R., Prasad, D. R., "Bioelectricity Generation from Palm Oil Mill Effluent in Microbial Fuel Cell Using Polacrylonitrile Carbon Felt as Electrode", *Water Air Soil Pollut*, 224 1533-40, (2013).
- [61] Cheng, J., Zhu, X., Ni, J., Borthwick, A., "Palm oil mill effluent treatment using a two-stage microbial fuel cells system integrated with immobilized biological aerated filters", *Bioresour Technol*, 101 2729-2734, (2010).
- [62] Jong, B. C., Liew, P. W., Lebai, J. M., Kim, B. H., Mohd, A. Z., Leo, K. W., Awang, M. R., "Performance and microbial diversity of palm oil mill effluent microbial fuel cell", *Lett Appl Microbiol*, 660 7-53, (2011).
- [63] Nor, M. h., M., Mubarak, M., Elmi, H., Ibrahim, N., Wahab, M., Ibrahim, Z., "Bioelectricity generation in microbial fuel cell using natural microflora and isolated pure culture bacteria from anaerobic palm oil mill effluent sludge", *Bioresour Technol*, 190 458-65, (2015).
- [64] Venkata, M. S., Mohanakrishna, G., Sarma, P. N., "Composite vegetable waste as renewable resource for bioelectricity generation through non-catalyzed open-air cathode microbial fuel cell", *Bioresour Technol*, 101 970-976, (2010).
- [65] Fogg, A., Gadhamshetty, V., Franco, D., Wilder, J., Agapi, S., Komisar, S., "Can a microbial fuel cell resist the oxidation of tomato pomace?", *J Power Sourc*, 279 781-790, (2015).
- [66] Durruty, I., Bonanni, P. S., Gonzalez, J. F., Busalmen, J. P., "Evaluation of potato-processing wastewater treatment in a microbial fuel cell", *Bioresour Technol*, 105 81-7, (2012).
- [67] Lu, N., Zhou, S., Zhuang, L., Zhang, J., Ni, J., "Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology", *Biochem Eng J*, 43 246-251, (2009).
- [68] Behera, M., Jana, P. S., More, T. T., Ghangrekar, M. M., "Rice mill wastewater treatment in microbial fuel cells fabricated using proton exchange membrane and earthen pot at different pH", *Bioelectrochem*, 79 228-233M (2010).
- [69] Gurung, A., Oh, S. E., "Rice Straw as a Potential Biomass for Generation of Bioelectrical Energy Using Microbial Fuel Cells (MFCs)", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 37 2625-2631, (2015).
- [70] Takahashi, S., Miyahara, M., Kouzuma, A., Watanabe, K., "Electricity generation from rice bran in microbial fuel cells", *Bioresources and Bioprocessing*, 74 1271-1273, (2010).
- [71] Takanezawa, K., Nishio, K., Kato, S., Hashimoto, K., Watanabe, K., "Factors Affecting Electric Output from Rice-Paddy Microbial Fuel Cells", *Bioscience*,



- Biotechnology, and Biochemistry, 74 1271-1273, (2010)
- [72] Fakhiruddin, F., Amid, A., Salim, W. A., Azmi, A. S., "Electricity Generation in Microbial Fuel Cell (MFC) by Bacterium Isolated from Rice Paddy Field Soil", E3S Web of Conferences, 168 1664-1671, (2012).
- [73] Chai, H., Kang, W., "Influence of biofilm density on anaerobic sequencing batch biofilm reactor treating mustard tuber wastewater", Appl Biochem Biotechnol, 78 531-537, (2006).
- [74] Heilmann, J., Logan, B. E., "Production of electricity from proteins using a microbial fuel cell", Water Environ Res, 78 531-537, (2006)
- [75] Huang, L., Zeng, R. J., Angelidaki, I., "Electricity production from xylose using a mediator-less microbial fuel cell", Bioresour Technol, 99 4178-4184, (2008).
- [76] Wang, X., Feng, Y., Wang, H., Qu, Y., Yu, Y., Ren, N., Li, N., Wang, E., Lee, H., Logan, B. E., "Bioaugmentation for electricity generation from corn stover biomass using microbial fuel cells", Environm Sci Technol, 43 6088-6093, (2009).
- [77] Nimje, V. R., Chen, C. Y., Chen, H. R., Chen, C. C., Huang, Y. M., Tseng, M. J., Cheng, K. C., Chang, Y. F., "Comparative bioelectricity production from various wastewaters in microbial fuel cells using mixed cultures and a pure strain of *Shewanella oneidensis*", Bioresour Technol, 104 315-23, (2012).
- [78] Aelterman, P., Rabaey, K., Clauwaert, P., Verstraete, W., "Microbial fuel cells for wastewater treatment", Water Sci Technol, 54 9-15, (2006).
- [79] Lefebvre, O., Uzabiaga, A., Chang, I. S., Kim, B. H., Ng, H. Y., "Microbial fuel cells for energy self-sufficient domestic wastewater treatment-a review and discussion from energetic consideration", Appl Microbiol Biotechnol, 89 259-70, (2011).
- [80] Puig, S., Serra, M., Coma, M., Balaguer, M. D., Colprim, J., "Simultaneous domestic wastewater treatment and renewable energy production using microbial fuel cells (MFCs)", Water Sci Technol, 64 904-909, (2011).
- [81] Ganesh, K., Jambeck, J. R., "Treatment of landfill leachate using microbial fuel cells: Alternative anodes and semi-continuous operation", Bioresour Technol, 139 383-387, (2013).
- [82] Puig, S., Serra, M., Coma, M., Cabré, M., Dolors, B. M., Colprim, J., "Microbial fuel cell application in landfill leachate treatment", J Hazardous Materials, 185:763-767, (2011).
- [83] Rezaei, F., Richard, T., L., Logan, B. E., "Analysis of chitin particle size on maximum power generation, power longevity, and Coulombic efficiency in solid-substrate microbial fuel cells", J Power Sources, 192:304-309, (2009).
- [84] Rezaei, F., Xing, D., Wagner, R., Regan, J. M., Richard, T. L., Logan, B. E., "Simultaneous cellulose degradation and electricity production by *Enterobacter cloacae* in a microbial fuel cell" Appl Environm Microbiol, 75:3673-3678, (2009).
- [85] Scott, K., Murano, C., "Microbial fuel cells utilizing carbohydrates", J Chem Technol Biotechnol, 82 92-100, (2007).
- [86] Wolever, T. S., Piekarz, A., Hollands, M., Younker, K., "Sugar alcohol and diabetes: a review", Can J Diabetes, 26 356-62, (2002).
- [87] Pant, D., Arslan, D., Bogaert, G. V., Gallego, Y. A., Wever, H. D., Diels, L., "Integrated conversion of food waste diluted with sewage into volatile fatty acids through fermentation and electricity through a fuel cell", Environ Technol, 34 1935-45, (2013).
- [88] Choi, J., Chang, H. N., Han, J., "Performance of microbial fuel cell with volatile fatty acids from food wastes", Biotechnol Lett, 33 705-14, (2011).
- [89] Behera, S. K., Park, J. M., Kim, K. H., Park, H. S., "Methane production from food waste leachate in laboratory-scale simulated landfill", Waste Manage, 30:1502-1508, (2010).
- [90] Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Otterdijk, R., Meybeck, A., "Global food losses and food waste", Rome: Food and Agriculture organization of the United Nations Publishing, (2011).
- [91] Parfitt, J., Barthel, M., Macnaughton, S., "Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050", Philos Trans R Soc B, 365 3065-81, (2010).
- [92] Antonopoulou, G., Stamatelatos, K., Bebelis, S., Lyberatos, G., "Electricity generation from synthetic substrates and cheese whey using a two chamber microbial fuel cell", Biochem Eng J. 50 10-15, (2010).
- [93] Tremouli, A., Antonopoulou, G., Bebelis, S., Lyberatos, G., "Operation and characterization of a microbial fuel cell fed with pretreated cheese whey at different organic loads", Bioresour Technol, 131 380-389, (2013).
- [94] Kassongo, J., Togo, C. A., "Performance improvement of whey-driven microbial fuel cells by acclimation of indigenous anodophilic microbes", African J Biotechnol, 10 7846-7852, (2011).
- [95] Nasirahmadi, S., Safekordi, A. A., "Whey as a substrate for generation of bioelectricity in microbial fuel cell using *E.coli*", Environ Sci Technol, 8 823-830, (2011).
- [96] Kim, B. H., Park, H. S., Kim, H. J., Kim, G. T., Chang, I. S., Lee, J., "Enrichment of microbial community generating electricity using a fuel cell-type electrochemical cell", App Microbiol Biotechnol, 63 672-81, (2004).
- [97] Cercado-Quezada, B., Delia, M., Bergel, A., "Testing various food-industry wastes for electricity production in microbial fuel cell", Bioresour Technol, 101 2748-2754, (2010).

- [98] Santosa, S. J., "Palm oil boom in Indonesia: from plantation to downstream products and biodiesel", *Clean*, 36 453-65, (2008).
- [99] Boghani, H., Kim, J. R., Dinsdale, R. M., Guwy, A. J., Premier, G. C., "Reducing the burden of food processing washdown wastewaters using microbial fuel cells", *Biochem Eng J*, 117 210-217, (2017).
- [100] Li, H., Tian, Y., Zuo, W., Zhang, J., Pan, X., Li, L., "Electricity generation from food wastes and characteristics of organic matters in microbial fuel cell", *Bioresour Technol*, 205 104-110, (2016).
- [101] Abourached, C., Catal, T., Liu, H., "Efficacy of single chamber microbial fuel cells for removal of cadmium and zinc with simultaneous electricity production", *Water Research*, 51 228-33, (2014).
- [102] Wang, Z., Lim, B., Choi, C., "Removal of Hg<sup>2+</sup> as an electron acceptor coupled with power generation using a microbial fuel cell", *Bioresour Technol*, 102 6304-6307, (2011).
- [103] Zhang, B., Feng, C., Ni, J., Zhang, J., Huang, W., "Simultaneous reduction of vanadium(V) and chromium(VI) with enhanced energy recovery based on microbial fuel cell technology", *J Power Sources*, 204 34-39, (2012).
- [104] Zhang, L. J., Tao, H. C., Wei, X. Y., Lei, T., Li, J. B., Wang, A. J., "Bioelectrochemical recovery of ammonia-copper(II) complexes from wastewater using a dual chamber microbial fuel cell", *Chemosphere*, 89 1177-1182, (2012).
- [105] Mirzaenia, F., Asadipour, A., Jafari, A. J., Malakootian, M., "Removal efficiency of nickel and lead from industrial wastewater using microbial desalination cell", *Appl Water Sci*, 7:3617-3624, (2017).
- [106] Mathuriya, A. S., Yakhmi, J. V., "Microbial fuel cells to recover heavy metals", *Environ Chem Lett*, 12:483-494, (2014).
- [107] Gajda, I., Stinchcombe, A., Greenman, J., Melhuish, C., Ieropoulos, I., "Microbial fuel cell – A novel self-powered wastewater electrolyser for electrocoagulation of heavy metals", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42:1813-1819, (2017).
- [108] Strycharz, S. M., Woodard, T. L., Johnson, J. P., Nevin, K. P., Sanford, R., Löffler, F. E., "Graphite electrode as a sole electron donor for reductive dechlorination of tetrachlorethene by *Geobacter lovleyi*", *Appl Environm Microbiol*, 74 5943-5947, (2008).
- [109] Shi, J., Zhao, W., Liu, C., Jiang, T., Ding, H., "Enhanced Performance for Treatment of Cr (VI)-Containing Wastewater by Microbial Fuel Cells with Natural Pyrrhotite-Coated Cathode", *Water*, 9 979-985, (2017).
- [110] Tandukar, M., Tezel, U., Pavlostathis, S. G., "Biological Chromium(VI) Reduction in Microbial Fuel Cell: A Three in One Approach. Proceedings of the Water Environment Federation", 9 527-535, (2009).
- [111] Wang, G., Huang, L., Zhang, Y., "Cathodic reduction of hexavalent chromium [Cr(VI)] coupled with electricity generation in microbial fuel cells", *Biotechnol Lett*, 30 1959-66, (2008).
- [112] Choi, C., Hu, N., "The modeling of gold recovery from tetrachloroaurate wastewater using a microbial fuel cell", *Bioresour Technol*, 133 589-598, (2013).
- [113] Tao, H. C., Liang, M., Li, W., Zhang, L. J., Ni, J. R., Wu, W. M., "Removal of copper from aqueous solution by electrodeposition in cathode chamber of microbial fuel cell", *Journal of Hazardous Materials*, 189 186-192, (2011).
- [114] Tao, H. C., Li, W., Liang, M., Xu, N., Ni, J. R., Wu, W. M., "A membrane-free baffled microbial fuel cell for cathodic reduction of Cu(II) with electricity generation", *Bioresour Technol*, 102 4774-4778, (2011).
- [115] Catal, T., Bermek, H., Liu, H., "Removal of selenite from wastewater using microbial fuel cells", *Biotechnol Lett*, 31 1211-1216, (2009).
- [116] Yang, L., Wu, Z., Wu, J., Zhang, Y., Li, M., Lin, Z. Q., Bañuelos, G., "Simultaneous removal of selenite and electricity production from Se-laden wastewater by constructed wetland coupled with microbial fuel cells", *Selenium in the Environment and Human Health: CRC Press*, p. 212-5, (2013).
- [117] Huang, L., Liu, Y., Yu, L., Quan, X., Chen, G., "A new clean approach for production of cobalt dihydroxide from aqueous Co(II) using oxygen-reducing biocathode microbial fuel cells", *Journal of Cleaner Production*, 86 441-446, (2015).
- [118] Ter Heijne, A., Liu, F., Rijnsoever, L. S., Saakes, M., Hamelers, H. M., Buisman, C. N., "Performance of a scaled-up Microbial Fuel Cell with iron reduction as the cathode reaction", *Journal of Power Sources*, 196 7572-7577, (2011).
- [119] Orellana, R., Leavitt, J. J., Comolli, L. R., Csencsits, R., Janot, N., Flanagan, K. A., Gray, A. S., Leang, C., Izallalen, M., Mester, T., "U(VI) reduction by a diversity of outer surface c-type cytochromes of *Geobacter sulfurreducens*", *Appl Environm Microbiol*, 6369 74-79, (2013).
- [120] Huang, L., Chai, X., Chen, G., Logan, B. E., "Effect of set potential on hexavalent chromium reduction and electricity generation from biocathode microbial fuel cells", *Environm Sci Technol*, 45 5025-5031, (2011).
- [121] Wang, W., Feng, Y., Tang, X., Li, H., Du, Z., Yang, Z., Du, Y., "Isolation and characterization of an electrochemically active and cyanide-degrading bacterium isolated from a microbial fuel cell", *RSC Advances*, 4 36458-6463, (2014).
- [122] Xafenias, N., Zhang, Y., Banks, C. J., "Enhanced

- performance of hexavalent chromium reducing cathodes in the presence of *Shewanella oneidensis* MR-1 and lactate", *Environm Sci Technol*, 47 4512–20, (2013).
- [123] Zhang, B., Zhang, J., Liu, Y., Hao, C., Tian, C., Feng, C., "Identification of removal principles and involved bacteria in microbial fuel cells for sulfide removal and electricity generation", *J Hydrogen Energy*, 38 14348–14355, (2013).
- [124] Husain, Q., "Peroxidase mediated decolorization and remediation of wastewater containing industrial dyes: a review", *Rev Environ Sci Biotechnol*, 11 40-47, (2010).
- [125] Pearce, C. I., Lloyd, J. R., Guthrie, J. T., "The removal of colour from textiles wastewater using whole bacteria cells: a review", *Dyes Pigments*, 58 179-96, (2003).
- [126] Sun, J., Hu, Y. Y., Bi, Z., Cao, Y. Q., "Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single-chamber microbial fuel cell", *Bioresour Technol*, 100 3185–3192, (2009).
- [127] Pant, D., Singh, A., Satyawali, Y., Gupta, R. K., "Effect of carbon and nitrogen source amendment on synthetic dyes decolorizing efficiency of white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*", *J Environ Biol*, 29 79-84, (2008).
- [128] Solanki, K., Subramanian, S., Basu, S., "Microbial fuel cells for azo dye treatment with electricity generation: A review", *Bioresour Technol*, 131 564-571, (2013).
- [129] Chen, S. F., Mowery, R. A., Scarlata, C. J., Chambliss, C. K., "Compositional analysis of water-soluble materials in corn stover", *J Agric Food Chem*, 55 5912-5918, (2007).
- [130] Grattieri, M., Minteer, S. D., "Microbial fuel cells in saline and hypersaline environments: Advancements, challenges and future perspectives", *Bioelectrochem*, 120 127-37 (2018).
- [131] Long, X., Pan, Q., Wang, C., Wang, H., Li, H., Li, X., "Microbial fuel cell-photoelectrocatalytic cell combined system for the removal of azo dye wastewater", *Bioresour Technol*; 91 188-244., (2017)
- [132] Oon, Y. L., Ong, S., A., Ho, L., N., Wong, Y., S., Dahalan, F., A., Oon, Y., S., Leh, H. K., Thung, W. E., Nordin, N., "Up-flow constructed wetland-microbial fuel cell for azo dye, saline, nitrate remediation and bioelectricity generation: From waste to energy approach", *Bioresour Technol*, 97 108-266, (2018).
- [133] Oon, Y. S., Ong, S. A., Ho, L. N., Wong, Y. S., Oon, Y. L., Lehl, H. K., "Disclosing the synergistic mechanisms of azo dye degradation and bioelectricity generation in a microbial fuel cell", *Chem Eng J*, 344 236-45, (2018).
- [134] Clauwaert, P., Ha, D., Verstraete, W., "Energy recovery from energy rich vegetable products with microbial fuel cells", *Biotechnol Lett*, 30 1947-1951, (2008).
- [135] Feng, Y., Yang, Q., Wang, X., Liu, Y., Lee, H., Ren, N., "Treatment of biodiesel production wastes with simultaneous electricity generation using a single chamber microbial fuel cell", *Bioresour Technol*, 102 411-415, (2011).
- [136] Borole, A. P., Hamilton, C. Y., Schell, D. J., "Conversion of residual organics in corn stover-derived biorefinery stream to bioenergy via a microbial fuel cell", *Environ Sci Technol*, 47 642-648, (2013).
- [137] Sakdaronnarong, C. K., Thanosawan, S., Chaithong, S., Sinbuathong, N., Jeraputra, C., "Electricity production from ethanol stillage in two-compartment MFC", *Fuel*, 107 382-386, (2013).
- [138] Chandrasekhar, K., Venkata Mohan, S., "Bio-electrochemical remediation of real field petroleum sludge as an electron donor with simultaneous power generation facilitates biotransformation of PAH: effect of substrate concentration", *Bioresour Technol*, 110 517-25, (2012).
- [139] Morris, J. M., Jin, S., "Enhanced biodegradation of hydrocarbon contaminated sediments using microbial fuel cells", *J Hazard Mater*, 213 474-477, (2012).
- [140] Morris, J. M., Jin, S., Crimi, B., Pruden, A., "Microbial fuel cell in enhancing anaerobic biodegradation of diesel", *Chem Eng J*, 146 161-167, (2009).
- [141] Foad, M., Kariminia, H. R., Savizi, I. P., "Bimodal electricity generation and aromatic compounds removal from purified terephthalic acid plant wastewater in a microbial fuel cell", *Biotechnol Lett*, 35 197-203, (2013).
- [142] Foad Marashi, S. K., Kariminia, H. R., "Performance of a single chamber microbial fuel cell at different organic loads and pH values using purified terephthalic acid wastewater", *J Environ Health Sci Eng*, 13 27-35, (2015).
- [143] Joung, J. Y., Lee, H. W., Choi, H., Lee, M. W., Park, J. M., "Influences of organic loading disturbances on the performance of anaerobic filter process to treat purified terephthalic acid wastewater", *Bioresour Technol*, 100 2457-2461, (2009).
- [144] Chengm, S., Dempsey, B. A., Logan, B. E., "Electricity generation from synthetic acidmine drainage (AMD) water using fuel cell technologies", *Environ Sci Technol*, 41 8149-8153, (2007).
- [145] Das, K. C., "Co-composting of alkaline tissue digester effluent with yard trimmings", *Waste Manage*, 28 1785-1790, (2008).
- [146] Li, X., Zhu, N., Wang, Y., Li, P., Wu, P., Wu, J., "Animal carcass wastewater treatment and

- bioelectricity generation in up-flow tubular microbial fuel cells: effects of HRT and non-precious metallic catalyst", *Bioresour Technol*, 128 454–460, (2013).
- [147] Wen, Q., Kong, F., Zheng, H., Cao, D., Ren, Y., Yin, J., "Electricity generation from synthetic penicillin wastewater in an air-cathode single chamber microbial fuel cell", *Chem Eng J*. 168 572-576, (2011).
- [148] Cheng, P., Zhao, H., Z., Zhao, B., Ni, J. R., "Pilot treatment of wastewater from *Dioscorea zingiberensis* CH-Wright production by anaerobic digestion combined with a biological aerated filter", *Bioresour Technol*, 100 2918-2925, (2009).
- [149] Li, H., Ni, J. R., Liu, W., Zhu, Y. L., "Cleaner production alternatives for saponin industry by recycling starch", *Resour Conserv Recy*, 54 1145-1151, (2010).
- [150] Zhang, L., Yin, X., Li, S. Y., "Bio-electrochemical degradation of paracetamol in a microbial fuel cell-fenton system", *Chem Eng J*, 276 185-192, (2015).
- [151] You, J., Greenman, J., Melhuish, C., Ieropoulos, I., "Electricity generation and struvite recovery from human urine using microbial fuel cells", *J Chem Technol Biotechnol*, 91 647–654, (2016).
- [152] Merino-Jimenez, I., Celorrio, V., Fermin, D. J., Greenman, J., Ieropoulos, I., "Enhanced MFC power production and struvite recovery by the addition of sea salts to urine", *Water Research*, 109 46-53, (2017).
- [153] Du, F., Li, Z., Yang, S., Xie, B., Liu, H., "Electricity generation directly using human feces wastewater for life support system", *Acta Astronautica*, 68 1537-1547, (2011).
- [154] Ieropoulos, I. A., Stinchcombe, A., Gajda, I., Forbes, S., Merino-Jimenez, I., Pasternak, G., "Pee power urinal—microbial fuel cell technology field trials in the context of sanitation", *Environ Sci Water Research Technol*, 2 336-343, (2016).
- [155] Greenman, J., Glvez, A., Giusti, L., Ieropoulos, I., "Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells: comparison with a biological aerated filter", *Enzyme. Microb Technol*. 44 112-119, (2009).
- [156] Habermann, W., Pommer, E. H., "Biological fuel cells with sulfide storage capacity", *App Microbiol Biotechnol*, 35 128-133, (1991).
- [157] Aelterman, P., *Microbial fuel cells for the treatment of waste streams with energy recovery: Gent University*, (2009).
- [158] Glvez, A., Greenman, J., Ieropoulos, I., "Landfill leachate treatment with microbial fuel cells; scale-up through plurality", *Bioresour Technol*, 100 5085–5091, (2009).