دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال پانزدهم، شماره ۵۸
بهار ۱٤۰۳، صفحات ٤٦-۲۷

"مقاله مروری"

مروری بر کاربرد نانومواد در تبدیل زیست توده به بیوسوخت

مجید میرزایی*[۱]، طیبه محبی[۲]

[۱]استادیار گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
[۲]دانشجوی دکتری تخصصی، گروه شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
* نویسنده مسئول مکاتبات: mjmirzaei@nri.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱٤۰۳/۰۲/۲۸ پذیرش نهایی: ۱٤۰۳/۰۵/۲۸)

چکیده

تولید انرژی جهانی که به شدت تحت تأثیر استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی قرار گرفته، اهمیت یافتن منابع جایگزین انرژی با پتانسیل بالا را برجسته کرده است. تلاش‌های مداومی در جریان است تا به چالش‌های مربوط به مراحل ابتدایی قبل از تبدیل به بیوانرژی نظیر پیش‌تیمار، هیدرولیز آنزیمی و پرورش زیست توده پاسخ داده شود. نانوفناوری قادر است با استفاده از سایت‌های فعال منحصر به فرد خود برای انواع واکنش‌ها و فرآیندها، مشکلات مرتبط با این منابع زیست توده را مرتفع سازد. در این مقاله مروری، پتانسیل نانوفناوری که به عنوان کمک یا افزودنی در این زیست توده‌ها برای تقویت کارایی تولید بیوانرژی ادغام شده، بررسی شده است. مبانی نانومواد به همراه کاربردهای متنوع آن‌ها در زمینه بیوانرژی به طور مفصل مورد بحث قرار گرفته‌اند. همچنین، بهینه‌سازی و افزایش تولید بیوانرژی از لیگنوسلولز، میکروجلبک‌ها و فاضلاب با استفاده از نانومواد به طور کامل ارزیابی شده است. ویژگی‌های برجسته این نانومواد که به بهبود عملکرد بیوسوخت‌ها، بیودیزل، آنزیم‌ها و سلول‌های سوختی میکروبی کمک می‌کنند نیز به طور دقیق مورد نقد و بررسی قرار گرفته‌اند. در پایان، بر اساس مطالعات موجود، روندهای آینده و نیازهای تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی: انرژی زیستی، زیست توده، بیوسوخت، فناوری نانو

مقدمه

مصرف اولیه انرژی در حال حاضر به طور عمده توسط سوخت‌های فسیلی سنتی مانند زغال سنگ، نفت و گاز انجام می‌شود (۱)، که این امر به مشکلاتی در زمینه پایداری مانند کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، تأثیرات منفی بر محیط زیست و نوسانات شدید قیمت منجر می‌گردد. افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرات اقلیمی جهانی و نیاز فزاینده به انرژی، متخصصان را به فکر توسعه راه‌حل‌های جدید برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی انداخته است. در میان منابع انرژی جایگزین، زیست توده تقریباً ۸۰٪ از انرژی تولیدی توسط حامل‌های انرژی تجدیدپذیر جهانی را به خود اختصاص داده است (۲). زیست توده قابلیت ذخیره‌سازی دارد و می‌توان از آن برای تولید گرما، سوخت و برق در زمان نیاز استفاده کرد. این نوع انرژی به بیوانرژی معروف است که شامل سوخت‌های جامد، مایع یا گازی تولید شده از منابع بیولوژیکی می‌باشد (۳).

بیوالکل‌های به دست آمده از ذرت، گندم، چغندرقند و نیشکر و بیودیزل‌های تولیدی از طریق ترانس‌استریفیکاسیون روغن‌های استخراجی از کلزا، نخل، سویا و آفتابگردان، نمونه‌هایی از بیوانرژی‌های تولید شده از مواد اولیه نسل اول هستند. مواد اولیه غیرغذایی مانند زیست توده لیگنوسلولزی و میکروجلبک‌ها به ترتیب به عنوان مواد اولیه نسل دوم و سوم برای تولید بیوانرژی به کار می‌روند. زیست توده می‌تواند با استفاده از فناوری‌های تبدیل حرارتی مانند احتراق، گازی‌سازی و پیرولیز پردازش شود که در نتیجه آن به بیو-نفت (سوخت مایع) و بیوچار (باقیمانده جامد) تبدیل می‌شود، در حالی که سین‌گاز[1]، که می‌تواند به بیوسوخت‌ها و برق تبدیل شود، از طریق گازی‌سازی زیست توده به دست می‌آید (٤). همچنین، هضم بی‌هوازی به صورت تجاری برای تولید بیوگاز، که یک نوع دیگر از بیوانرژی است، به کار گرفته شده است. بیوگاز تولیدی برای تأمین گرما و برق مورد استفاده قرار می‌گیرد و نقش مهمی در تأمین انرژی لازم برای مناطق روستایی جهت پخت و پز و روشنایی دارد (٤). علاوه بر این، بیوانرژی می‌تواند توسط سلول‌های سوختی میکروبی (MFCها) که از میکروارگانیسم‌های طبیعی با توانایی تولید برق بیولوژیکی استفاده می‌کنند، تولید شود. با وجود پیشرفت‌های علمی فراوان، همچنان چالش‌های فنی متعددی بر سر راه تولید بیوانرژی وجود دارد که باید برطرف شوند تا بتواند با سوخت‌های فسیلی رقابت کند. به عنوان مثال، در زمینه تولید بیوسوخت‌های میکروجلبکی، مسائلی مانند کشت مؤثر و کارآمد جلبک‌ها در مقیاس بزرگ، حفظ فرهنگ مورد نظر در برابر گونه‌های بیگانه، هزینه برداشت جلبک‌ها، کارایی انرژی و بهترین روش تبدیل به بیوسوخت‌ها هنوز مبهم است (٤). علاوه بر این، قبل از ادامه به فرآیندهای تولید بیوسوخت، نیاز به روش‌های پیش‌تیمار برای استخراج قندهای قابل تخمیر از زیست توده لیگنوسلولزی است (٥). چالش‌هایی مانند کمبود زیرساخت‌های موجود برای فرآیند تولید و هزینه‌های بالای تولید در مقایسه با بیوسوخت‌های نسل مربوط به پیش‌تیمار، آنزیم‌ها و تخمیر می‌تواند تولید بیوانرژی را کارآمدتر و اقتصادی‌تر سازد (٦).

[1] Syngas

نانومواد، ستون فقرات نانوعلم و کاربردهای نانوفناوری به شمار می‌آیند. کاربرد علم و فناوری نانوساختار، حوزه‌ای وسیع و چندرشته‌ای از فعالیت‌های تحقیقاتی و توسعه‌ای را در بر می‌گیرد که در دهه‌های اخیر به شکل چشمگیری در سراسر جهان گسترش یافته است. مواد نانومقیاس به مجموعه‌ای از موادی گفته می‌شود که حداقل یک بعد آن‌ها کم‌تر از حدود ۱۰۰ نانومتر باشد. این ابعاد بسیار ریز، نسبت سطح به حجم بالایی را فراهم می‌کند و تعداد سایت‌های فعال برای واکنش‌ها و فرآیندهای متنوع را افزایش می‌دهد (۷). این نانوذرات همچنین قادر به ارائه مورفولوژی‌های متفاوتی هستند که کاربردهای آن‌ها را در زمینه‌های مختلف توسعه داده است. علاوه بر این، مواد نانوساختاری در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر، واکنش‌های سریع‌تری با مولکول‌های دیگر دارند (۸). وجود نانومواد تأثیر گسترده‌ای بر بازارهای تجاری داشته و با توجه به خواص منحصر به فرد مقیاس نوری آن‌ها که در زمینه‌هایی مانند بیوانرژی، الکترونیک، مکاترونیک، پزشکی، داروسازی، مایعات یونی، پلیمر و بسیاری دیگر مؤثر است، آگاهی از نانومواد افزایش خواهد یافت (۹).

کاربردهای مستقیم و غیرمستقیم متعددی از نانومواد در تولید بیوانرژی گزارش شده است. نانومواد به دلیل داشتن سطوح وسیع (۹) و ویژگی‌های خاصی مانند فعالیت کاتالیزوری بالا، بلورینگی، دوام، ذخیره‌سازی مؤثر (۱۰)، ثبات و ظرفیت جذب (۱۱)، گزینه‌های برجسته‌ای در سیستم‌های مختلف بیوسوخت به شمار می‌روند. تأثیرات نانوذرات مانند نانوفیبرها، نانوذرات فلزی و نانولوله‌ها بر واکنش‌های متابولیکی فرآیندهای بیولوژیکی که بیوسوخت تولید می‌کنند، تقویت شده‌اند. نانوذرات علاوه بر عوامل کاتالیزوری که به کار می‌روند، در افزایش فعالیت کنسرسیوم‌های بی‌هوازی، کاهش ترکیبات مهارکننده و انتقال الکترون‌ها برای بهبود بازده فرآیندها نقش دارند. نانومواد مانند نانوکریستال‌ها، نانوقطرات و نانوآهنرباها نیز به عنوان نانوافزودنی‌ها برای افزایش کارایی ترکیب بیوسوخت با بنزین و دیزل استفاده می‌شوند (۱۲).

این مقاله به طور جامع رویکردها و کاربردهای اخیر مرتبط با فرآیندهای تولید بیوانرژی که نانوفناوری در آن‌ها ادغام شده است را مرور می‌کند. اصول نانوفناوری به همراه کاربردها و مزایای انواع نانوذرات معرفی می‌شوند. سپس بخش بعدی به کاربردهای نانوفناوری در زیست توده از جمله زیست توده میکروجلبکی و لیگنوسلولزی می‌پردازد. پس از آن، پیشرفت‌های اخیر در صنعت بیوسوخت مبتنی بر نانوفناوری از جمله نانوکاتالیزورها برای بازده‌های بالاتر بیوسوخت و نانوافزودنی‌ها برای عملکرد بهتر ترکیبات سوخت ارائه می‌شوند. تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی از طریق سلول‌های سوختی میکروبی با کمک نانوذرات نیز بحث می‌شود. علاوه بر این، کارهای آینده و چالش‌ها برجسته شده‌اند تا بینش‌هایی برای توسعه آینده تولید بیوانرژی با استفاده از نانومواد فراهم کنند. این پژوهش با بررسی دقیق و تحلیل مقایسه‌ای، به پیشرفت عرصه انرژی زیستی کمک شایانی می‌کند و با ارائه یک چهارچوب شفاف، راهنمایی‌های لازم را به پژوهشگران علاقه‌مند در زمینه بهره‌گیری از فناوری نانو برای افزایش تولید انرژی زیستی ارائه می‌دهد.

اصول نانومواد

بازطراحی یک ماده در سطح مولکولی، که به آن نانومواد مهندسی شده هم گفته می‌شود، فرآیندی است که در آن ماده‌ای به خاطر اندازه کوچک و خواص منحصر به فردش تغییر می‌کند، خواصی که معمولاً در حالت‌های متعارف و بالک آن مشاهده نمی‌شوند. ویژگی‌های خاص این مواد در مقیاس نانو، مانند سطح نسبتاً بزرگ‌شان، باعث پدید آمدن نظریه‌های جدیدی در مورد اثرات کوانتومی می‌شود. نانومواد به دلیل داشتن نسبت سطح به حجم بسیار بالاتر نسبت به حالت‌های متعارف، می‌توانند واکنش‌های شیمیایی قوی‌تری ایجاد کنند که این خود نتیجه‌ی تخصصی‌شان است. در نظر گرفتن واکنش‌ها در سطح نانو، خواص و ویژگی‌های مواد مانند رفتارهای نوین نوری، الکتریکی و مغناطیسی به دلیل اثرات کوانتومی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند (۱۳). اصطلاحات رایج برای توصیف مواد نانوساختار شامل نانوساختارهای صفر بعدی(0-D)، یک بعدی(1-D)، دو بعدی (2-D) و سه بعدی (3-D) است. این بعدیت‌های نانومواد با استفاده از دانه‌های بسیار ریز با اندازه کم‌تر از ۵۰ نانومتر یا محدود به ۵۰ نانومتر مشخص می‌شوند. می‌توان ابعاد مختلفی را شکل داد، مانند صفر بعدی (مثل خوشه‌های اتمی، فیلامنت‌ها و مجموعه‌های خوشه‌ای)، یک بعدی (مثل چندلایه‌ها)، دو بعدی (مثل لایه‌های رویی بسیار ریز یا لایه‌های دفن شده) و سه بعدی (مثل مواد نانوفازی که از دانه‌های نانومتری مساوی تشکیل شده‌اند). نانولوله‌ها، دندریمرها، نقاط کوانتومی و فولرن‌ها از انواع رایج نانومواد هستند. نانومواد کاربردهایی در زمینه نانوتکنولوژی دارند که در آن خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوتی از مواد شیمیایی با اندازه عادی نشان می‌دهند (۱٤).

اصلی‌ترین عنصر در ساختار نانو، نانوذرات هستند. نانوذرات (NPs) با اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت می‌توانند از طریق روش‌های سنتزی متعددی تولید شوند که کیفیت بالایی از NPs را به ارمغان می‌آورند، اما فرآیندهای تولید مانند بیوسنتز همچنان در حال پیشرفت برای بهبودیافتگی هستند (۱۵). تاکنون، نانوذرات آلی به طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، با استفاده از لیپوزوم‌ها، پلیمرزوم‌ها، ساختارهای پلیمری و میسل‌ها در روش‌های تصویربرداری یا انتقال دارو و ژن. در عین حال، نانوذرات غیرآلی نیز در چند سال اخیر به دلیل داشتن خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد که به مواد و اندازه‌شان بستگی دارد و با نانوذرات سنتی لیپیدی یا پلیمری قابل مقایسه نیستند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از دلایل جذابیت نانوذرات غیرآلی، خواص فیزیکی آن‌ها مانند نوری و مغناطیسی است، به علاوه خواص شیمیایی مانند بی‌تأثیری، پایداری و آسانی در افزودن عملکردهای جدید (۱٦). بنابراین، نانوذرات غیرآلی مانند مغناطیسی، طلا، نقاط کوانتومی و نانولوله‌های کربنی، پتانسیل وسیعی در کاربردهای نوین مختلف دارند. به عنوان نمونه، نانولوله‌های کربنی، نانوذرات اکسید فلز و نانوذرات مغناطیسی (MNPs) در تولید انرژی زیستی به کار گرفته می‌شوند. جدول ۱ مزایا و معایب نانوذرات مغناطیسی را به اختصار بیان می‌کند.

جدول (۱): مزایا و معایب نانوذرات مغناطیسی

مزایا	معایب
قابلیت تجزیه زیستی عالی	توانایی پراکندگی ضعیف
آماده برای سفارشی‌سازی	هزینه بالای مواد سنتز
سهولت در جداسازی	محدودیت در فرآیندهای تولید انبوه
سهولت در سنتز	حرکت وابسته به سازگاری‌های محیط
توانایی اتصال به ترکیبات هدف چندگانه	
سمیت پایین سلولی برای زیست توده	
نسبت سطح به حجم بالا	
حفظ ثبات پس از تغییرات مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی	

نانوذرات مغناطیسی (MNPs) که دارای یک هسته مغناطیسی هستند، مانند مگنتیت (Fe_3O_4) یا ماگمیت (γ-Fe_2O_3)، از جمله نانومواد غیرآلی بسیار مهم به شمار می‌روند. این نانوذرات به دلیل خواص مغناطیسی که دارند و بازیابی آسانی که فراهم می‌کنند، بیش‌ترین کاربرد را در میان تمام نانوذرات مورد بررسی برای تولید بیوانرژی دارند. آنزیم‌هایی که در تولید بیودیزل یا بیواتانول به کار می‌روند، می‌توانند روی MNPs به عنوان حامل ثابت شوند. خاصیت جبرانی بالا و ویژگی‌های پارامغناطیسی عالی MNPs در فرآیند تولید متان، آن‌ها را برای تولید بیوگاز نیز مفید می‌سازد (۱۷). اما فلزاتی مانند کبالت و نیکل که در ساخت این نانوذرات به کار می‌روند، ممکن است در فرآیند اکسیداسیون ترکیبات سمی و حساسی تولید کنند، به همین دلیل نیاز به تحقیقات بیش‌تری است تا این مشکلات حل شوند (۱۸).

زیست توده

افزایش شدید تولید CO_2 در جهان به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی در حال اتمام است. علاوه بر این، دغدغه‌های مربوط به امنیت انرژی و آلودگی محیط زیست به یک موضوع مهم در جستجو برای یافتن منابع جایگزین برای تولید بیوانرژی تبدیل شده است. زیست توده لیگنوسلولزی شامل گیاهان و باقیمانده‌های کشاورزی می‌شود که از سلولز، همی‌سلولز، لیگنین و دیگر اجزاء (مانند پروتئین‌ها، پکتین‌ها و مواد استخراجی) تشکیل شده‌اند. برآورد شده که تنها ۳ درصد از ۱۳ میلیارد تن باقیمانده‌های گیاهی در سال به محصولات تولیدی تبدیل شده و بقیه برای تجزیه رها شده‌اند (۱۹). بنابراین، باید این باقیمانده‌های لیگنوسلولزی را با تبدیل آن‌ها به بیوانرژی به شکل مناسبی مدیریت کرد، که محققان نشان داده‌اند ترکیب لیگنوسلولز توانایی تبدیل مونومرها یا بلوک‌های سازنده خود به بیوسوخت‌ها مانند بیواتانول و بیودیزل را دارد. از سوی دیگر، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که میکروارگانیسم‌های فیلامنتوس میکروسکوپی فتوسنتزی، که به عنوان "میکروجلبک‌ها" شناخته می‌شوند، قادر به تبدیل لیپیدهای جلبکی به بیوسوخت‌ها هستند. این بیوسوخت‌های مبتنی بر میکروجلبک‌ها دارای خواص شیمیایی مشابه با سوخت‌های فسیلی هستند و به عنوان یک منبع طبیعی بسیار امیدوارکننده برای تولید بیوانرژی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، استفاده از نانوتکنولوژی در این زیست توده‌های جایگزین می‌تواند به طور چشمگیری به تولید بیوانرژی کمک کند و به عنوان یک ابزار کمکی برای افزایش کارایی در زمینه‌های مختلف مانند تولید، منابع انرژی، حمل‌ونقل، مکاترونیک، مراقبت‌های بهداشتی و فناوری‌های دارویی عمل کند.

استفاده از لیگنوسلولز برای تبدیل سلولز به بیوسوخت

تبدیل سلولز به بیوسوخت‌ها با چالش‌هایی مانند ساختار مقاوم سلولز و سختی دیواره سلولی در زیست توده لیگنوسلولزی مواجه است. اولین گام شامل تجزیه پلیمر سلولز به مونومرهای تشکیل‌دهنده، جداسازی لیگنین از سلولز و تبدیل آن به آنزیم‌های سلولولیتیک، شکستن آنزیم‌های سلولولیتیک به کربوهیدرات‌ها و تبدیل قندهای هیدرولیز شده به بیوسوخت در فرآیند تخمیر است (۲۰). در برخی موارد، فرآیندهای هیدرولیز آنزیمی و تخمیر، مانند هضم همزمان (SS)، هضم همزمان و هم‌تخمیر (SSCF) و فرآیند بیوپردازش یکپارچه (CB)، با هم ترکیب می‌شوند تا مراحل اصلی درگیر در تولید بیوسوخت از زیست توده لیگنوسلولزی کاهش پیدا کنند.

یک مطالعه قابلیت‌های نانوتکنولوژی را به نمایش گذاشته که در آن از نانوذرات مغناطیسی (MNPs) با پوشش اسیدی به عنوان کاتالیزورهایی برای تجزیه سلوبیوز (β-گلوکز) از زیست توده لیگنوسلولزی استفاده می‌شود (۲۱). با این حال، یکی از مشکلات پراکندگی برخی نانوذرات، سختی پراکنده شدن آن‌ها در محلول‌های آبی است، جایی که یون‌های هیدرونیوم به دلیل خاصیت خیس‌پذیری نمونه کارایی ندارند. نتایج نشان داد که MNPs با پوشش اسیدی و دارای ٦ درصد گوگرد، تبدیل سلوبیوز را تا ۹٦ درصد افزایش می‌دهند که این میزان بسیار بیشتر از تبدیل معمولی (۳۲/۸ درصد) بدون کاتالیزور است (۲۱). وجود این MNPs با پوشش اسیدی می‌تواند واکنش هیدرولیز را با خصوصیات نانوبیوکاتالیزوری خود برای ثابت‌سازی آنزیم‌های متفاوت بهبود بخشد. علاوه بر این، نسبت سطح به حجم بالای این MNPs، سرعت هیدرولیز را در مقایسه با روش‌های پیش‌تیمار شیمیایی افزایش می‌دهد. همچنین، این نانوذرات مغناطیسی قابل بازیافت برای استفاده در فرآیندهای هیدرولیز بعدی هستند که از نظر کاهش هزینه‌های فرآیند بسیار مطلوب است، چرا که می‌توان آن‌ها را به صورت مغناطیسی از محیط واکنش جدا کرد. این موضوع توسط لی[2] و همکاران (۲۲) و اردم[3] و همکاران (۲۳) پشتیبانی شده است که نشان دادند نانوذرات سیلیکا MNPs با پشتیبانی سولفونات برای هیدرولیز زیست توده لیگنوسلولزی به عنوان یک کاتالیزور هیدرولیز بسیار امیدوارکننده به شمار می‌روند.

پوشش سیلیکایی روی MNPs به دلیل داشتن ساختار نسبتاً متخلخل و ثبات بیش‌تر هسته مغناطیسی، سرعت انتقال جرم را در واکنش‌های اسیدی افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، MNPs با پوشش اسید پروپیل–سولفونیک برای پیش‌تیمار و هیدرولیز زیست توده لیگنوسلولزی کاه گندم مورد استفاده قرار گرفتند، اما کارایی آن‌ها به اندازه مطالعات قبلی امیدوارکننده نبود. استفاده از فناوری‌های جدیدی که از مایکروویو، اولتراسونیک و برق به عنوان کمک استفاده می‌کنند نیز پیشنهاد می‌شود که در حوزه نانوتکنولوژی بررسی شوند. مطالعه‌ای توسط سو[4] و همکاران (۲٤) پتانسیل استفاده از فناوری مایکروویو به همراه MNPs اسیدی کربنی برای پیش‌تیمار و هیدرولیز باگاس نیشکر، پوسته‌های جاتروفا و پوسته‌های پلوکتیا را نشان داده است. کارایی هیدرولیز به دست آمده برای باگاس نیشکر، پوسته‌های جاتروفا و پوسته‌های پلوکتیا به

[2] Lai
[3] Erdem
[4] Su

ترتیب ۵۸/۳ ، ۳۵/۶ و ۳۵/۸ ٪ بوده است. جدول ۲ کارایی‌های MNPs در هیدرولیز زیست توده لیگنوسلولزی را به اختصار نشان می‌دهد. با این حال، محدودیت‌های MNPs با پیشرفت‌هایی در نانوبیوکاتالیزورها با استفاده از نانوذرات مبتنی بر سیلیکا(Si-NPs) ، نانوذرات مبتنی بر نیکل (Ni-NPs) و نانولوله‌های کربنی برطرف شده‌اند. Si-NPs معمولاً برای پوشش سطح نانوذرات به کار می‌روند و وظیفه ثابت‌سازی آنزیم‌های لیگنوسلولولیتیک مانند سلولاز را دارند. گزارش‌ها نشان می‌دهند که Si-NPs فعالیت کاتالیزوری را در واکنش هضم همزمان برای تولید بیواتانول از سلولاز Trichoderma viride بهبود می‌بخشند (۲۵). عواملی مانند اندازه ذره، اندازه منافذ و مساحت سطح نیز به عنوان نکات کلیدی مطرح شده‌اند، همانطور که چانگ[5] و همکاران (۲۶) نشان داده‌اند که دو نانوذره سیلیکای مزوپور (MS-NPs) را روی سلولز تجاری مورد ارزیابی قرار دادند. این MS-NPsقابلیت پیوند شیمیایی برای ثابت‌سازی سلولاز روی سطح منافذی خود را دارند که می‌توانند تبدیل سلولز به گلوکز را تا ۸۰ درصد انجام دهند. به طور متناوب، نانوذرات مبتنی بر نیکل (Ni-NPs) نیز به طور معمول برای فرآیند هیدروژناسیون و تبدیل گلوکز به مولکول سوربیتول استفاده می‌شوند (۲۷). گازی‌سازی زیست توده برای تولید گاز سنتز، که به عنوان سین‌گاز ($CO + H_2$) شناخته می‌شود، می‌تواند به عنوان واسطه‌هایی که به بیوسوخت‌ها تبدیل می‌شوند، مفید باشد. قرار دادن این آنزیم‌های ناپایدار در فرآیندهای کاتالیزوری با دما و فشار عملیاتی بالا ممکن است منجر به کاهش بازده تولید بیوسوخت‌ها شود.

جدول (۲): مقایسه مطالعاتی درباره کارآمدی نانو ذرات مغناطیسی

نانو ذرات مغناطیسی	نوع زیست توده	شرایط کاری	بازده (٪)	مراجع
نانو ذرات سیلیکای حمایت‌شده با سولفونات، Fe_3O_4-SBA-SO_3H	سلولز بدون شکل	۱/۰گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۳ ساعت	۵۰	[۲۲]
نانو ذرات سیلیکای حمایت‌شده با سولفونات، Fe_3O_4-SBA-SO_3H	سلولز	۱/۰ گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۳ ساعت	۲۶	[۲۲]
نانو ذرات سیلیکای حمایت‌شده با سولفونات، Fe_3O_4-SBA-SO_3H	نشاسته	۱/۰ گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۳ ساعت	۹۵	[۲۲]
نانو ذرات سیلیکای حمایت‌شده با سولفونات، Fe_3O_4-SBA-SO_3H	کلوخه ذرت	۱/۵ گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۳ ساعت	۴۵	[۲۲]
نانو ذرات پرفلوآلکیل سولفونیک، PFS-MNPs	کاه گندم	۲/۵٪ (وزن/حجم) بیوماس، در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت	۰/۹± ۶۶/۳	[۲۱]
نانو ذرات آلکیل سولفونیک، AS-MNPs	کاه گندم	۲/۵٪ (وزن/حجم) بیوماس، در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت	۱/۲± ۶۱	[۲۱]
نانو ذرات اسید کربنی، C-SO_3H-Fe_3O_4-MNPs	بگاس نیشکر	۰/۰۲۷ گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب، ۱۶۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد	۵۸/۳	[۲۴]
نانو ذرات اسید کربنی، C-SO_3H-Fe_3O_4-MNPs	پوست جاتروفا	۰/۰۲۷ گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب، ۱۶۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد	۵۸/۳	[۲۴]

[5] Chang

یک تحقیق جدید نشان داده است که استفاده از نانوذرات نیکل-کبالتیت بر روی ثبات آنزیم‌های قارچ آسپرژیلوس فومیگاتوس در غلظت‌های مختلفی از نانوذرات تأثیر دارد. مطالعه نشان داد که با اضافه کردن ۱ میلی‌مولار نانوذرات نیکل-کبالتیت، فعالیت آنزیم‌های اندوگلوکاناز، بتا-گلوکوزیداز و زایلاناز به ترتیب ٤٩٪، ٥٣٪ و ١٩/٨٪ افزایش یافته است (۲۸). در مقابل، نانولوله‌های کربنی به دلیل ویژگی‌های برجسته‌شان در زمینه‌های الکتریکی، حرارتی و مقاومت مکانیکی معروف هستند (۲۹). اکثر تحقیقات نشان داده‌اند که نانولوله‌های کربنی چنددیواره نسبت به نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره به دلیل هماهنگی بهتر با ساختار آن‌ها، که باعث بهبود فعالیت‌های کاتالیزوری آنزیم‌های ثابت شده، عملکرد بهتری داشته‌اند (۲۹). این نانولوله‌های چند دیواره در تجزیه سلولز از قارچ آسپرژیلوس نایجر با کارایی ۸۵٪ تا ۹۷٪ برتری نشان داده و توانسته‌اند فعالیت قابل بازیافت خود را پس از شش دوره تجزیه در ۵۲٪ تا ۷۵٪ حفظ کنند (۳۰).

کاربرد نانوتکنولوژی در تولید انرژی زیستی از جلبک‌های میکروسکوپی

جلبک‌های میکروسکوپی به عنوان ماده خام سوخت‌های زیستی نسل سوم با تنوع بالای گونه‌هایی که قابلیت فتوسنتز دارند، مورد توجه وسیع پژوهشگران قرار گرفته‌اند (۳۰). قابلیت رشد این جلبک‌ها در شرایط سخت محیطی، جذب بالای دی‌اکسید کربن و تولید سریع، آن‌ها را به یک گزینه جایگزین برای تولید سوخت‌های زیستی تبدیل کرده است. همچنین، ترکیبات غنی جلبک‌های میکروسکوپی شامل پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها و کاروتنوئیدها، آن‌ها را به گزینه‌ای برتر نسبت به زیست توده‌های لیگنوسلولزی تبدیل کرده است (۳۱). با این وجود، تولید سوخت‌های زیستی بر پایه جلبک‌های میکروسکوپی با چالش‌هایی همچون دشواری در مدیریت تولید در مقیاس صنعتی و هزینه‌های بالای تولید و برداشت زیست توده روبرو است، که این امر نیازمند به‌کارگیری فناوری‌های کارآمد برای تبدیل به سوخت‌های زیستی می‌باشد.

مطالعات پیشین امکان استفاده از نانوذرات مغناطیسی برای شکستن دیواره سلولی میکروجلبک‌ها را با قرار دادن آنزیم سلولاز روی این نانوذرات و پس از آن استخراج چربی‌ها نشان داده‌اند (۳۲). این فرآیند به دیواره سلولی میکروجلبک‌ها که از سلولز تشکیل شده است اجازه می‌دهد تا هیدرولیز شود و چربی‌های موجود آزاد گردند. در شرایط بهینه، بالاترین بازده بیودیزل (٩٣/٥٦٪) به دست آمد. یک مطالعه مشابه نیز از نانوذرات مغناطیسی استفاده کرد که با اکسید فلزی MgO جایگزین شده بود و به آنزیم سلولاز متصل شده بود تا فرآیند هیدرولیز سلولز از جلبک Chlorella sp. CYB2 را بهبود بخشد. نتایج نشان داد که بازده گلوکز به دست آمده ۹۱٪ بود که توسط فرآیندهای اکسید فلزی انجام شده بود. در همین راستا، نعمتیان و همکاران (۳۳) استفاده از نانوکاتالیزورهای فوق‌پارامغناطیسی برای تبدیل روغن‌های زیستی استخراج شده از جلبک Chlorella vulgaris به بیودیزل را گزارش کرده‌اند. نتایج نشان داد که واکنش ترانس‌استریفیکاسیون با استفاده از ۳-آمینوپروپیل تری‌اتیلن‌سیلان-گلوتارآلدئید (MNPs-AP-GA) ٦٩/٨ درصد وزنی بود. این مطالعه همچنین نشان داد که پیوند کووالانسی لیپاز به عنوان یک روش مطمئن برای افزایش بارگذاری آنزیم و بهره‌وری عمل می‌کند.

علاوه بر این، تقویت تولید بیوگاز و بیوهیدروژن از میکروجلبک‌ها با کمک نانوذرات مغناطیسی و فرآیندهای مایکروویو نیز مورد بررسی قرار گرفته است. تولید بیوگاز و هیدروژن به ترتیب ۳۲۸ میلی‌لیتر و ۵۱.۵٪ بوده‌اند (۳۴). با این حال، هنوز مطالعات کافی در مورد امکان‌سنجی و تجزیه و تحلیل اقتصادی این نانوذرات در تولیدات مقیاس بزرگ وجود ندارد، که این یک فرصت برای پژوهشگران در زمینه نانومواد است.

نقش نانومواد در ارتقاء تولید سوخت‌های زیستی

پیشرفت‌های حاصل در زمینه نانومواد با افزودن گروه‌های عملکردی متنوع (مانند گروه‌های مبتنی بر آمینو، نیکل، هیدروفوبیک، طلا) به منظور تقویت تولید سوخت‌های زیستی صورت گرفته است. نانومواد همچنین توانایی افزایش فعالیت آنزیم‌ها را دارند که با ورود آن‌ها به محیط کشت امکان‌پذیر می‌شود. خصوصیات این نانومواد نشان داده‌اند که می‌توانند در شرایط کشت، تنش ایجاد کنند، مانند وجود غلظت بالای فلزات (مانند آهن) که بر تجمع چربی‌ها در جلبک‌های Chlorella vulgaris تأثیر می‌گذارد. ورود این نانوذرات با ترکیبات سیلیکا و اکسید آهن به محیط کشت باعث ایجاد برش قوی بین نانوذرات و سلول‌ها می‌شود، چرا که این نانوذرات به عنوان رقبایی برای جذب مواد مغذی عمل می‌کنند. در زمینه استخراج و بازیابی چربی‌ها، این نانوذرات توانایی برجسته‌ای در استخراج به جای استفاده از حلال‌های سنتی (مانند کلروفرم، متانول و هگزان) نشان داده‌اند. مزیت‌های استفاده از این نانوذرات شامل جلوگیری از مرگ جلبک‌ها و تسهیل فرآیند بازکشت از این میکروجلبک‌های استخراج شده می‌باشد (۳۵).

به‌کارگیری نانومواد به عنوان نانوکاتالیزور در پردازش میکروجلبک‌ها

این نانومواد خاص با ایجاد یک وضعیت استرس خفیف، فرآیند فتوسنتز و رشد میکروجلبک‌ها را تقویت می‌کنند و در عین حال باعث انباشت چربی‌ها می‌شوند بدون اینکه به سلول‌ها آسیب برسانند. تحقیقات متعددی نانوذرات را به عنوان یک نوع ماده مغذی در محیط کشت‌ها (مانند آهن و منیزیم) مورد استفاده قرار داده‌اند. نانوذرات آهن همچنین انواع متفاوتی از گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) را از طریق واکنشی شبیه به فنتون تولید می‌کنند که استرس اکسیداتیو را بر میکروجلبک‌ها وارد می‌آورد. اما، مطالعه‌ای از کانگ[6] و همکاران (۳۶) نشان داده است که غلظت بالای نانوذرات TiO_2 در حضور نور می‌تواند به حیات سلول کمک کند. از سوی دیگر، نانوذرات Mg-aminoclay نیز برای رشد گونه‌های Chlorella sp. KR-1 و Chlorella vulgaris به صورت مثبت آزمایش شده‌اند، چرا که این نانوذرات آمینو کلی از کاتیون‌های فلزی مانند Ca^{2+}، Mg^{2+} و Fe^{3+} تشکیل شده‌اند که به صورت کووالانسی در مرکز نانوذرات پیوند خورده‌اند. استفاده از مکمل‌های $MgSO_4$-NPs نشان داده است که در بهبود فرآیند فتوسنتز و کاهش مصرف گلیسرول در کشت میکسوتروفیک C. vulgaris مؤثر است. به‌کارگیری $MgSO_4$-NPs باعث فلوکولاسیون میکروجلبک‌ها می‌شود، نفوذ نور را کاهش می‌دهد و محتوای کلروفیل

[6] Kang

را افزایش می‌دهد. تأثیر این نانوذرات نیز در قالب آنزیم‌های ثابت شده از طریق پیوندهای کووالانسی برای تولید بیودیزل مورد استفاده قرار گرفته است. گزارش‌های پیشین نشان داده‌اند که لیپازهای موجود در پانکراس خوک، لیپاز Candida rugosa و لیپاز Pseudomonas cepacia تحت تأثیر نانوذرات مغناطیسی که با گروه‌های آمینو تغییر یافته‌اند برای واکنش ترانس‌استریفیکاسیون[۷] آنزیمی قرار گرفته و توانسته‌اند تبدیل بیودیزل را تا ٦٧٪ افزایش دهند (۳۷). در یک مطالعه مشابه، نانوذرات مغناطیسی تغییر یافته با آمینو با استفاده از گلوتارآلدئید به عنوان عامل اتصال مورد استفاده قرار گرفته که به افزایش لیپاز ثابت شده بر روی سطح نانوذرات کمک کرده است. نتایج نشان داده‌اند که حضور این عامل اتصال روی نانوذرات در دستیابی به تبدیل بیودیزل تا ۹۰٪ مؤثر بوده و خواص برجسته گلوتارآلدئید سطح دسترسی برای ثابت‌سازی آنزیم را فعال کرده است. همچنین، نانوذرات مغناطیسی هیدروفوبیک برای ترانس‌استریفیکاسیون لیپاز ثابت شده به بیودیزل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این نانوذرات هیدروفوبیک می‌توانند لیپازها را جذب کنند یا لیپاز را بر روی سطوح هیدروفوبیک خود با استفاده از درپوش‌ها و زنجیره‌های پروتئینی ثابت کنند. تبدیل روغن استخراج شده به استرهای متیل اسید چرب تا ۷۰٪ بوده و نرخ تولید بیودیزل تا ٤٣/٥ گرم در لیتر در ساعت در شرایط بهینه‌سازی شده به دست آمده است (۳۸).

تقویت و جداسازی پروتئین C-phycocyanin از میکروجلبک Spirulina platensis با استفاده از یک غشاء نانوفیبری تغییر یافته با کیتوسان نیز به ضریب تصفیه‌ای معادل ۳/۳ برابر و بازیابی ٦٦ درصدی دست یافته است (۳۹). این غشاء نانوفیبری تغییر یافته با کیتوسان قادر است پروتئین‌های آلوده را از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی به خود ببندد و در طول فرآیند جداسازی، مولکول‌های C-phycocyanin مورد نظر را تصفیه کند. در یک مطالعه اخیر توسط چیا[۸] و همکاران (٤٠)، غشاء نانوفیبری تغییر یافته با کیتوسان در فعالیت ضد باکتریایی علیه باکتری Escherichia coli مورد استفاده قرار گرفته که تا ۹۹/٥ درصد به طور مؤثر فعالیت ضدباکتریایی اعمال کرده است. بار پلی‌کاتیونی موجود در این غشاء نانوفیبری تغییر یافته با کیتوسان می‌تواند با سایت‌های بار منفی روی دیواره سلول باکتریایی پیوند الکترواستاتیکی ایجاد کند، که این امر به تغییر شکل تراوایی دیواره سلول و در نهایت به لیز و مرگ سلول منجر می‌شود. نانومواد دیگری مانند نانولوله‌های کربنی، مزوپوروس‌ها، نانوفیبرها، نانوفیبرهای الکترواسپان، سیلیکا-آهنی و پشتیبان‌های مبتنی بر طلا نیز به عنوان نانوذرات مهندسی شده برای افزایش ثابت‌سازی آنزیم‌ها و ارتقاء تولید سوخت‌های زیستی به کار رفته‌اند (٤١). با این حال، همچنان کمبود دانش و تحقیقات در مورد شرایط بهینه برای آنزیم‌های ثابت شده ایده‌آل جهت تبدیل به بیودیزل وجود دارد. استفاده از نانومواد، به خصوص نانولوله‌های کربنی مانند Al_2O_3، CuO، ZnO و TiO_2، با چالش‌هایی مواجه است که از جمله آن‌ها سمیت برای میکروجلبک‌ها است که شامل استرس اکسیداتیو، تجمع و عدم تأمین یکنواخت مواد مغذی و هزینه‌های بالای سنتز این نانومواد می‌شود. علاوه بر این، در سطح شیمی مولکولی، مکانیزم‌های داخلی‌سازی این

[۷] استری شدن یا استریفیکاسیون یک نام عمومی برای واکنشی است که دو ماده یک مولکول استر را ایجاد می‌نمایند

[8] Cheah

نانوذرات عملکردی هنوز به طور کامل شناخته شده نیستند. این مسئله از محققان می‌خواهد که به ارزیابی بیشتر این مشکلات بپردازند، که تاکنون تحلیل‌های اقتصادی، ایمنی زیست‌محیطی و تحلیل چرخه حیات (LCA) به عنوان موضوعات مورد توجه و فرآیندهای استاندارد برای ارزیابی مناسب این کمبودها مطرح هستند.

استفاده از بیودیزل مخلوط با نانو-افزودنی‌ها در موتورهای دیزل

نانومواد به عنوان نانو-افزودنی‌هایی برای خواص سوخت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، زیرا خواص بارز نانوسیال آن‌ها می‌تواند خواص متعددی مانند ویسکوزیته، نقطه اشتعال، چگالی و عدد ستان را بهبود بخشد. یک آزمایش تأثیر خواص فیزیکوشیمیایی بیودیزل را با استفاده از نانوذرات اکسید فلزی به عنوان افزودنی سوخت مورد بررسی قرار داده است. این نانوذرات اکسید فلزی به عنوان یک بافر اکسیژن عمل می‌کنند که منجر به فرآیند اکسیداسیون همزمان هیدروکربن‌ها می‌شود و در نتیجه انتشار اکسیدهای نیتروژن را کاهش می‌دهد. نانوذرات اکسید فلزی دارای نسبت سطح به حجم بالایی هستند که بازدهی سوخت بیودیزل را در مقایسه با فرم‌های پودری معمولی بهبود می‌بخشد. نتایج نشان داده‌اند که مقدار بیش‌تری از نانوذرات اکسید سریم مقاومت لایه مایع و ویسکوزیته را افزایش می‌دهد، در حالی که ویسکوزیته پایین سوخت نمی‌تواند پمپ تزریق سوخت را روانکاری کند که منجر به نشتی و فرسودگی آسان می‌شود و در نهایت باعث کاهش عملکرد تحویل سوخت می‌گردد. این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که نانوذرات اکسید فلزی از ثبات حرارتی برخوردارند که به اکسیداسیون هیدروکربن‌ها و کاهش اکسید نیتروژن کمک می‌کنند .با افزودن نانو-افزودنی‌ها به سوخت، شاهد بهبود شماره ستان و ارزش حرارتی هستیم که این امر منجر به افزایش کارایی احتراق می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که نانوذرات مبتنی بر آلومینیوم و سیلیکون به بهبود کیفیت احتراق در موتورهای بیودیزل کمک می‌کنند (۴۲). مطالعه‌ای دیگر نیز با استفاده از نانوذرات اکسید روی در ترکیب با بیودیزل حاوی استئارین موم دیزل، بهبود قابل توجهی در ارزش حرارتی و شاخص ستان را گزارش کرده است (۴۳). استفاده از نانولوله‌های کربنی توسط سینگ[9] نیز نشان داد که با افزایش غلظت این نانولوله‌ها، شاخص ستان بهبود می‌یابد. نانوذرات دیگری مانند نانوذرات اکسید آهن نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که مزایای آن‌ها در افزایش شماره ستان و ارزش حرارتی برای دستیابی به کیفیت احتراق ایده‌آل و کاهش انتشار آلاینده‌ها از موتورهای دیزل را نشان می‌دهد (۴۴). نانوسیال‌ها به عنوان افزودنی‌ها نیز برای بهبود کارایی حرارتی ترمز موتورهای دیزل بسیار امیدوارکننده هستند، چرا که باعث احتراق کاملتر به دلیل نرخ تبخیر بالاتر، کاهش تأخیر در اشتعال، دمای شعله بالا و حفظ طولانی‌مدت شعله می‌شوند. افزودن این نانو-افزودنی‌ها به سوخت بیودیزل می‌تواند مشکلاتی مانند انتشار مونواکسید کربن، انتشار هیدروکربن، انتشار NO_x، احتراق و تبخیر را بهبود بخشد. با تمام فوایدی که دارند، هزینه‌های بالای تولید نانوذرات همچنان یکی از موانع اصلی برای ورود نانوسیال‌ها به بازار است. تحقیقات در زمینه استفاده از

[9] Singh

نانوذرات به عنوان افزودنی‌های سوخت هنوز به حدی نرسیده‌اند که بتوانند به طور کامل اجرایی شوند. مسائلی مانند تجمع، ته‌نشینی و سایش نانوذرات همچنان بدون راه‌حل باقی مانده‌اند و برای بهبود استفاده از نانوسیال‌ها نیاز به شناسایی دقیق‌تری داریم. علاوه بر این، کمبود داده‌های تجربی و درک ناکافی از مکانیزم‌های نظری انتقال حرارت از جمله مواردی هستند که باید قبل از تجاری‌سازی این نانو–افزودنی‌ها در موتورهای دیزل حل شوند (٤٥).

سیستم بیوالکتروشیمیایی(BES)

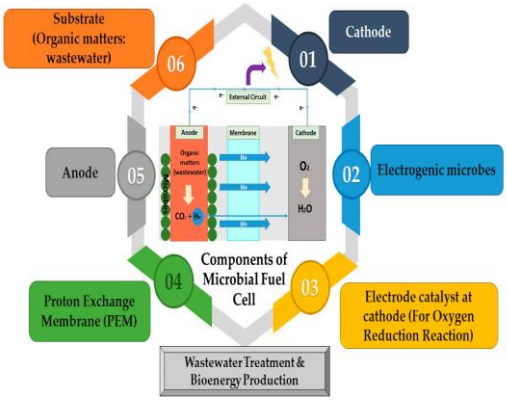
سیستم بیوالکتروشیمیایی (BES) ترکیبی از فرآیندهای زیستی و الکتروشیمیایی است که در آن از باکتری‌های فعال الکتروشیمیایی برای تجزیه مواد آلی در منابع متنوعی مانند پساب‌های صنعتی و زباله‌های زیست توده استفاده می‌شود. محصولات نهایی شامل برق، هیدروژن یا ترکیبات با ارزش دیگری مانند اتانول، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و اسید فرمیک (CH_2O_2)هستند. BES به طور گسترده برای تصفیه فاضلاب و همزمان تولید بیوانرژی به کار می‌رود. از این رو، BES به عنوان یک فناوری بسیار امیدبخش برای مقابله با آلودگی آب و بحران انرژی جهانی شناخته می‌شود (٤٦). سلول‌های سوختی میکروبی اولیه (MFC)، MFC فتوسنتزی، MFC گیاهی و بیوفتوولتائیک‌ها از انواع مختلف BES هستند (٤٧). به دلیل عملیات ساده و شرایط ملایم،MFC امروزه به عنوان یک منبع جدید و جذاب از بیوانرژی تجدیدپذیر آینده، توجه زیادی از محققان در سراسر جهان را به خود جذب کرده است.

MFC چیست؟

در سال ۱۹۱۱، پاتر برای اولین بار ایده تولید برق از طریق میکروب‌ها را مطرح کرد و پس از آن، کوهن در سال ۱۹۳۱ اولین نیم‌سلول‌های سوختی میکروبی را توسعه داد. MFC فرآیندی است که در آن میکروارگانیسم‌ها یا میکروب‌های تولیدکننده الکتریسیته با مواد آلی واکنش‌های الکتروشیمیایی دارند و الکترون‌ها از ماده اولیه به الکترود آند منتقل می‌شوند. این فرآیند به نام انتقال الکترون خارج سلولی (EET) شناخته می‌شود (٤٨). میکروب‌های تولیدکننده الکتریسیته، میکروارگانیسم‌هایی هستند که به عنوان کاتالیزورهای اصلی بیولوژیکی عمل می‌کنند و الکترون‌های حاصل از متابولیسم ترکیبات آلی را از طریق واکنش‌های شیمیایی متعدد به الکترود منتقل می‌کنند، مثلاً از طریق سیتوکروم‌های نوع c یا نانوسیم‌های باکتریایی[٤٩]. نمونه‌هایی از این میکروب‌ها شامل باکتری‌هایی مانند Geobacter sulfurreducens، Shewanella putrefaciens، Clostridium cellulolyticum، Enterobacter cloacae، Rhodoferax ferrireducens، Clostridium butyricum و قارچ‌هایی مانند Aspergillus awamori، Phanerochaete chrysosporium هستند. میکروب‌های روی آند وظیفه تولید الکترون و پروتون را با استفاده از مواد آلی بر عهده دارند. پروتون‌های تولید شده از طریق غشاء عبور کرده و الکترون‌ها از طریق مدار الکتریکی به سمت کاتد حرکت می‌کنند، جایی که واکنش کاهش اکسیژن (ORR) اتفاق می‌افتد (٥٠). در نهایت، این فرآیند منجر به تولید بیوالکتریسیته می‌شود. یک سلول سوختی میکروبی استاندارد (شکل ۱) از دو الکترود (آند و کاتد) و یک غشاء نیمه‌تراوا که به آن غشاء تبادل

پروتون گفته می‌شود، ساخته شده است. مواد مختلفی مانند فلزات برای ساخت الکترودها به کار رفته‌اند. پرکاربردترین مواد برای الکترودها، کربن و گرافیت هستند. در ساخت الکترودهای بدون کربن، فلزاتی مانند استیل ضدزنگ، کبالت، مس، نقره، نیکل، تیتانیوم و طلا استفاده می‌شوند. عوامل متعددی وجود دارند که بر تولید بیوالکتریسیته توسط MFC تأثیر می‌گذارند، از جمله مساحت سطح، پایداری، تخلخل و دوام آند، کاتد و غشاء. الکترودهای ایده‌آل باید دارای ویژگی‌های زیر باشند (۵۱):

- رسانایی الکتریکی عالی
- پایداری حرارتی بالا
- مقاومت پایین
- سازگاری بیولوژیکی مناسب با سیستم
- پایداری قوی و مقاومت در برابر خوردگی ناشی از مواد شیمیایی مورد استفاده درMFC
- مساحت سطح وسیع
- استحکام مکانیکی مناسب
- هزینه اقتصادی



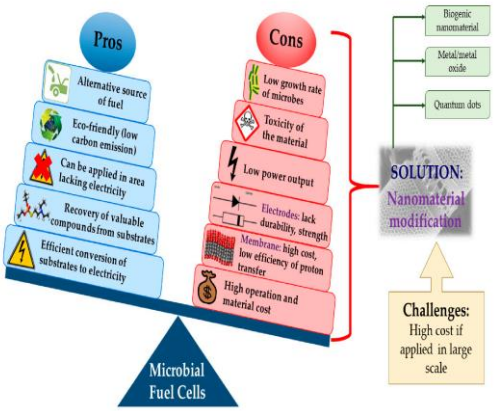
شکل (۱): اجزای پیل سوختی میکروبی

محفظه آندی یک سلول سوختی میکروبی از یک آند، باکتری‌ها و یک زیرلایه مانند پساب تشکیل شده است. آند که مهم‌ترین بخش MFC به شمار می‌رود و باکتری‌هایی که به آن متصل هستند، امکان جریان یافتن الکترون‌ها را از طریق واکنش‌های الکتروشیمیایی باکتری‌ها در هنگام تجزیه زیرلایه‌ها فراهم می‌کند. یکی از جنبه‌های حیاتی آند، توانایی باکتری‌ها در تسهیل تشکیل بیوفیلم‌ها و افزایش احتمال وقوع انتقال الکترون خارج سلولی (EET) است. متداول‌ترین موادی که در ساخت آند به کار می‌روند، گرافیت یا کربن هستند که در اشکال و اندازه‌های مختلفی مانند نانولوله‌های کربنی، میله‌ها، نمد، پارچه، کاغذ و صفحات موجودند (۵۲). در مقابل، کاتد الکترودی است که واکنش کاهش اکسیژن (ORR) در آن اتفاق می‌افتد. به طور کلی، ORR که در کاتد رخ می‌دهد، عامل محدودکننده‌ای برای MFC است و بر دانسیته توان حداکثر، کارایی و عملکرد کل MFC تأثیر می‌گذارد. کاتالیزورها برای بهبود ORR کاتدی ادغام شده‌اند. کاتالیزور مورد ترجیح برای کاتد پلاتین (Pt) است که علت آن مساحت سطح بالا است، اما هزینه تولید آن بالاست. به همین دلیل، گرافیت که ارزان‌تر از پلاتین است و دارای مساحت سطح بزرگی است به عنوان ماده کاتدی برای افزایش کارایی MFC استفاده می‌شود (۵۳). جزء دیگرMFC ، غشاء تبادل پروتون (PEM) است که یک غشاء فیزیکی است که آند و کاتد را از هم جدا می‌کند. انواع مختلفی از غشاءها وجود دارند؛ به عنوان مثال، غشاء تبادل کاتیونی یا آنیونی، الیاف نایلونی، غشاء الترافیلتراسیون، غشاء میکروفیلتراسیون، الیاف شیشه‌ای و پارچه‌های متخلخل، اما اکثر غشاءها از نظر هزینه مقرون به صرفه نیستند. این امر محققان را به جستجو برای مواد کم‌هزینه برای استفاده در تولید غشاء و همزمان افزایش

کارایی آن به عنوان مانع بین آند و کاتد و نرخ انتقال پروتون ترغیب می‌کند.

بهبود اجزای MFC با استفاده از نانومواد

برای تولید بیوانرژی در مقیاس آزمایشی با استفاده از سلول‌های سوختی میکروبی، چندین چالش وجود دارد که باید حل شوند. اولین و مهم‌ترین مشکل، دانسیته توان پایین است که برای تأمین انرژی یک جمعیت بزرگ کافی نیست. حداکثر تراکم قدرتی که توسط الکترودهای سنتی به دست آمده، حدود ۲۶ mw/m^2 برای میله‌های گرافیتی سه‌بعدی و ۶۱۱/۵ ± ۶ mw/m^2 برای پارچه کربنی دوبعدی است (۵۴). دما نیز بر عملکرد MFC تأثیر می‌گذارد، زیرا میکروب‌ها نمی‌توانند در دماهای بسیار پایین یا بسیار بالا رشد کرده و فعالیت‌های خود را انجام دهند. بنابراین، MFC باید در دمایی ایده‌آل که برای میکروب‌ها مناسب باشد، اجرا شود. علاوه بر این، فرآیند تولید اجزای MFC که پیچیده، سمی و پرهزینه است، می‌تواند مانع از کاربردهای عملی و استفاده اقتصادی از MFC شود (۵۵). به همین دلیل، محققان در جستجوی مواد جایگزین یا جدید برای تولید اجزای اصلی MFC مانند آند، کاتد و جداکننده هستند تا عملکرد را بهبود بخشیده و رسانایی الکترون‌ها را افزایش دهند. شکل ۲ مزایا و معایب MFC را به تصویر می‌کشد.



شکل (۲): مزایا و معایب پیل های سوختی

به تازگی، نانوتکنولوژی و استفاده از نانومواد تحولی در ساخت اجزای سلول‌های سوختی میکروبی ایجاد کرده‌اند تا عملکرد و کارآمدیMFCهای سنتی را از جنبه‌هایی مانند رسانایی الکترونی، دانسیته توان، هزینه، پایداری حرارتی، سرعت واکنش کاهش اکسیژن (ORR) و مقاومت در برابر خوردگی بهبود ببخشند (۵۶)، به‌خصوص در زمینه بهبود الکترودها (آند و کاتد) با استفاده از نانومواد. این امر به این دلیل است که مواد به کار رفته در ساخت الکترودها، که جزء اصلی MFC به شمار می‌روند، نقش مهمی در تعیین کلی عملکرد MFC دارند. در نتیجه، تولید بیوانرژی از طریق MFC بهبود خواهد یافت. نمونه‌هایی از نانومواد‌ی که می‌توانند عملکرد MFC را بهبود ببخشند شامل نانوذرات فلزی (مثل مس، طلا، پلاتین، پالادیوم و نقره)، نقاط کوانتومی) مثل Cds، CdSe، (ZnS، اکسیدهای فلزی) مثل CeO_2 ، TiO_2، ZnO، SiO_2، Al_2O_3 و (MnO_2، گرافن (نانومواد دوبعدی) ، نانولوله‌های کربنی و نانوکامپوزیت‌ها (مواد چندفازی) می‌باشند (۵۷). با این حال، استفاده از نانومواد برای بهبود اجزای MFC در مقیاس آزمایشی

به دلیل هزینه‌های بالای تولید هنوز در مرحله توسعه قرار دارد.

پژوهش‌های آتی

برای ایجاد یک سیستم تولید بیوانرژی که از نظر اقتصادی به صرفه باشد، باید ارزیابی‌های فنی و اقتصادی انجام شود که در آن هزینه‌های سنتز نانوذرات، که می‌تواند بر کل فرآیند تولید تأثیر بگذارد، در نظر گرفته شود. این موضوع همچنین بر توسعه نانوذراتی با قابلیت اجرای اقتصادی تأکید دارد تا کل فرآیند برای تجاری‌سازی از نظر اقتصادی ممکن باشد. انجام تحقیقات در مقیاس پایلوت برای بررسی امکان‌پذیری استفاده از نانوذرات در تولید بیوانرژی در مقیاس بزرگ ضروری است. علاوه بر این، تحقیقات آینده تنها به منابع و تولید بیوانرژی محدود نمی‌شوند، بلکه نانوتکنولوژی می‌تواند با کمک به زمینه‌های تبدیل، حمل‌ونقل، کارایی انرژی و ذخیره‌سازی، و همچنین استفاده از محصول نهایی بیوانرژی، محدودیت‌های فنی در علوم و مهندسی را برطرف کند. از طرف دیگر، هنوز مطالعات محدودی در استفاده از نانوذرات به عنوان افزودنی‌های سوخت وجود دارد و روش‌هایی برای حل مشکلات تجمع، فرسایش و ته‌نشینی نانوذرات همچنان مورد نیاز است. کمبود نتایج عملی و درک مکانیزم‌های انتقال حرارت برای تجاری‌سازی این نانوافزودنی‌ها در موتورهای دیزل وجود دارد. علاوه بر این، باید ارزیابی‌های ایمنی انجام شود، زیرا با افزایش استفاده از نانوذرات در کاربردهای بیوسوخت، اثرات قرار گرفتن در معرض آن‌ها از نظر انسان و محیط زیست بیش‌تر مشهود شده است. سمیت نانوذرات با استفاده از روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که در آن بیش‌تر تحقیقات in vitro نانوسمیت شامل می‌شود (۵۸). با این حال، باید تعاملات in vivo به طور گسترده مورد مطالعه قرار گیرند، به ویژه بر روی نانوذراتی که برای تولید بیوانرژی و بیوسوخت استفاده می‌شوند، تمرکز کند. این مسئله برای میکروارگانیسم‌ها نیز صدق می‌کند، زیرا نیاز است نانوذراتی تولید شوند که از نظر ایمنی بالا، عدم سمیت و سازگاری با آنزیم‌ها و میکروب‌ها مناسب باشند. به عنوان نمونه، نانوذرات برای میکروجلبک‌ها مضر هستند چون باعث تجمع، تنش اکسیداتیو و عدم تعادل در تأمین مواد مغذی می‌شوند. از این رو، انجام مطالعات غربالگری برای نانوذرات ضروری است تا تأثیرات متنوع آن‌ها بر فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی را در طیف وسیعی از غلظت‌ها مورد بررسی قرار دهیم. همچنین، باید تحقیقاتی در سطح مولکولی صورت گیرد تا مکانیزم‌های درگیر بین نانوذرات و پروتئین‌ها در فرایند تولید را کشف کنیم. در نهایت، این امکان را خواهیم داشت که شرایط بهینه‌ای برای فرآیند تولید انرژی زیستی تعیین کنیم.

نتیجه‌گیری

کمبود سوخت‌های فسیلی و تقاضای بالای انرژی باعث شده تا محققان به دنبال توسعه منابع جایگزین انرژی باشند. در میان فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر، بیوانرژی حاصل از زیست توده مزایای ویژه‌ای دارد. برای پاسخگویی به نیازهای انرژی آینده و غلبه بر چالش‌های فناوری تولید بیوانرژی، استفاده از نانومواد در تولید بیوانرژی مورد مطالعه قرار گرفته است، زیرا می‌تواند هم کیفیت و هم میزان بیوانرژی تولید شده از زیست توده، بیوسوخت و سلول‌های سوختی میکروبی را بهبود ببخشد. فرآیند تولید بیوانرژی

می‌تواند با استفاده از نانوذرات به روش‌های مختلف تقویت شود. به عنوان مثال، استفاده از نانوذرات مغناطیسی با عملکرد اسیدی می‌تواند واکنش هیدرولیز زیست توده را با استفاده از آنزیم‌های متصل شده بهبود ببخشد. همچنین، نانوذرات اکسید فلزی به عنوان نانوافزودنی‌ها برای افزایش عملکرد احتراق و ترکیب بیوسوخت با دیزل معمولی آزمایش شده‌اند. BES یا به طور دقیق‌تر MFC، که برای تصفیه فاضلاب و تولید بیوانرژی به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود، نیز با ساخت اجزای آن با استفاده از نانومواد برای بهبود عملکرد و کارایی اصلاح شده است. با این حال، هنوز شکاف‌های فنی در زمینه بیوانرژی مبتنی بر نانوتکنولوژی وجود دارد، که در آن تعداد محدودی مطالعه در مورد استفاده از نانوذرات به عنوان افزودنی‌های سوخت، سمیت in vitro نانوذرات و مکانیزم‌های مولکولی نانوذرات-پروتئین انجام شده است. در نهایت، تحلیل‌های اقتصادی، ارزیابی‌های ایمنی و تحلیل چرخه حیات (LCA) برای استفاده از نانومواد در تولید بیوانرژی برای فراهم کردن دیدگاه‌ها و راهنمایی‌های تحقیقات آینده ضروری هستند.

منابع

[1] Senjyu, T., Howlader, A.M., 2016, Operational aspects of distribution systems with massive DER penetrations, Integration of distributed energy resources in power systems, pp. 51-76.

[2] Lijó, L., González-García, S., Lovarelli, D., Moreira, M.T., Feijoo,G., Bacenetti, J., 2019, Life cycle assessment of renewable energy production from biomass, Life Cycle Assessment of Energy Systems and Sustainable Energy Technologies: The Italian Experience, 81-98.

[3] Strzalka, R., Schneider, D., Eicker, U., 2017, Current status of bioenergy technologies in Germany, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72 , 801-820.

[4] Li, Y., Khanal, S.K., 2016, Bioenergy: principles and applications, John Wiley & Sons.

[5] Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., Li, Y., 2014, Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production, Progress in energy and combustion science, 42, 35-53.

[6] Patumsawad, S., 2011, 2nd generation biofuels: technical challenge and R&D opportunity in Thailand, J Sustain Energy Environ (Special Issue), 1, 47–50.

[7] Hosseinpour, A., Abadchi, M.R., Mirzaee, M., Tabar, F.A., Ramezanzadeh, B., 2021, Recent advances and future perspectives for carbon nanostructures reinforced organic coating for anti-corrosion application, Surfaces and Interfaces, 23, 100994.

[8] Contreras, J., Rodriguez, E., Taha-Tijerina, J., 2017, Nanotechnology applications for electrical transformers—A review, Electric Power Systems Research, 143, 573-584.

[9] Mirzaee, M., Vaezi, M., Palizdar, Y., 2016, Synthesis and characterization of silver doped hydroxyapatite nanocomposite coatings and evaluation of their antibacterial and corrosion resistance properties in simulated body fluid, Materials Science and Engineering: C, 69 , 675-684.

[10] Mirzaee, M., Dehghanian, C., Bokati, K.S., 2018, One-step electrodeposition of reduced graphene oxide on three-dimensional porous nano nickel-copper foam electrode and its use in supercapacitor, Journal of Electroanalytical Chemistry, 813, 152-162.

[11] Mirzaee, M., Dehghanian, C., Bokati, K.S., 2018, ERGO grown on Ni-Cu foam frameworks by constant potential method as high performance electrodes for supercapacitors, Applied Surface Science, 436 , 1050-1060.

[12] Palaniappan, K., 2017, An overview of applications of nanotechnology in biofuel production, World Appl Sci J, 35,1305–1311.

[13] Bogani, L., Wernsdorfer, W., 2008, Molecular spintronics using single-molecule magnets, Nature materials, 7, 179-186.

[14] Tiwari, J.N., Tiwari, R.N., Kim, K.S., 2012, Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices, Progress in Materials Science, 57, 724-803.

[15] Siddiqi, K.S., Husen, A., 2016, Fabrication of metal and metal oxide nanoparticles by algae and their toxic effects, Nanoscale research letters ,11, 1–11.

[16] Lohse, S.E., Murphy, C.J., 2012, Applications of colloidal inorganic nanoparticles: from medicine to energy, Journal of the American Chemical Society, 134,15607-15620.

[17] Antunes, F.A.F., Gaikwad, S., A.P. Ingle, R. Pandit, J.C. dos Santos, M. Rai, S.S. da Silva., 2017, Bioenergy and biofuels: nanotechnological solutions for sustainable production, Nanotechnology for bioenergy and biofuel production, 3-18.

[18] Valko, M., H. Morris, Cronin, M., 2005, Metals, toxicity and oxidative stress, Current medicinal chemistry, 12, 1161-1208.

[19] Morganti, P., 2013, Saving the environment by nanotechnology and waste raw materials: Use of chitin nanofibrils by EU research projects, J. Appl. Cosmetol, 31, 89-96.

[20] Rahim, A.H.A., K.S. Khoo, N.M. Yunus, Hamzah, W.S.W., 2019, Ether-functionalized ionic liquids as solvent for Gigantochloa scortechini dissolution, AIP conference proceedings, AIP Publishing.

[21] Peña, L., K. Hohn, J. Li, X. Sun, Wang, D., 2014, Synthesis of propyl-sulfonic acid-functionalized nanoparticles as catalysts for cellobiose hydrolysis, Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology, 5, 241.

[22] Lai, D.-m., L. Deng, Q.-x. Guo, Fu, Y., 2011, Hydrolysis of biomass by magnetic solid acid, Energy & Environmental Science, 4, 3552-3557.

[23] Erdem, S., B. Erdem, Öksüzoğlu, R.M., 2018, Magnetic nano-sized solid acid catalyst bearing sulfonic acid groups for biodiesel synthesis, Open Chemistry, 16, 923-929.

[24] Su, T.-C., Z. Fang, F. Zhang, J. Luo, X.-K. Li., 2015, Hydrolysis of selected tropical plant wastes catalyzed by a magnetic carbonaceous acid with microwave, Scientific Reports, 5, 17538.

[25] Papadopoulou, A., D. Zarafeta, A.P. Galanopoulou, Stamatis, H., 2019, Enhanced catalytic performance of Trichoderma reesei cellulase immobilized on magnetic hierarchical porous carbon nanoparticles, The Protein Journal, 38, 640-648.

[26] Chang, R.H.-Y., J. Jang, Wu, K.C.-W., 2011, Cellulase immobilized mesoporous silica nanocatalysts for efficient cellulose-to-glucose conversion, Green Chemistry, 13.

[27] Kobayashi, H., Y. Hosaka, K. Hara, B. Feng, Y. Hirosaki, Fukuoka, A., 2014, Control of selectivity, activity and durability of simple supported nickel catalysts for hydrolytic hydrogenation of cellulose, Green chemistry, 16, 637-644.

[28] Srivastava, N., R. Rawat, R. Sharma, H.S. Oberoi, M. Srivastava, Singh, J., 2014, Effect of nickel–cobaltite nanoparticles on production and thermostability of cellulases from newly isolated thermotolerant Aspergillus fumigatus NS (Class: Eurotiomycetes), Applied biochemistry and biotechnology, 174, 1092-1103.

[29] Ahmad, R., Khare, S.K., 2018, Immobilization of Aspergillus niger cellulase on multiwall carbon nanotubes for cellulose hydrolysis, Bioresource technology, 252, 72-75.

[30] Mubarak, N., J. Wong, K .Tan, J. Sahu, E.

Abdullah, N. Jayakumar, Ganesan, P., 2014, Immobilization of cellulase enzyme on functionalized multiwall carbon nanotubes, Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 107, 124-131.

[31] Khoo, K.S., S.Y. Lee, C.W. Ooi, X. Fu, X. Miao, T.C .Ling, Show, P.L., 2019, Recent

advances in biorefinery of astaxanthin from Haematococcus pluvialis, Bioresource technology, 288, 121606.

[32] Duraiarasan, S., S.A. Razack, A. Manickam, A. Munusamy, M.B. Syed, M.Y. Ali, G.M. Ahmed, Mohiuddin, M.S., 2016, Direct conversion of lipids from marine microalga C. salina to biodiesel with

immobilised enzymes using magnetic nanoparticle, Journal of environmental chemical engineering, 4, 1393-1398.

[33] Nematian, T., Z. Salehi, Shakeri, A., 2020, Conversion of bio-oil extracted from Chlorella vulgaris micro algae to biodiesel via modified superparamagnetic nano-biocatalyst, Rene wable Energy, 146, 1796-1804.

[34] Zaidi, A.A., R. Feng, A. Malik, S.Z. Khan, Y. Shi, A.J. Bhutta, Shah, A.H., 2019, Combining microwave pretreatment with iron oxide nanoparticles enhanced biogas and hydrogen yield from green algae, Processes, 7 , 24.

[35] Lin, V., P. Mahoney, Gibson, K., 2009, Nanofarming technology extracts biofuel oil without harming algae, News released from Office of Public Affairs.

[36] Kang, N.K., B. Lee, G.-G. Choi, M. Moon, M.S. Park, J. Lim, Yang, J.-W., 2014, Enhancing lipid productivity of Chlorella vulgaris using oxidative stress by TiO_2 nanoparticles, Korean Journal of Chemical Engineering, 31, 861-867.

[37] Wang, X., P .Dou, P. Zhao, C. Zhao, Y. Ding, Xu, P., 2009, Immobilization of lipases onto magnetic Fe_3O_4 nanoparticles for application in biodiesel production, ChemSusChem: Chemistry & Sustainability Energy & Materials, 2, 947-950.

[38] Liu, C.-H., C.-C. Huang, Y.-W. Wang, D.-J. Lee, Chang, J.-S., 2012, Biodiesel production by enzymatic transesterification catalyzed by Burkholderia lipase immobilized on hydrophobic magnetic particles, Applied Energy, 100, 41-46.

[39] Ng, I.-S., M.S. Tang, P.L. Show, Z.-M. Chiou, J.-C. Tsai, Chang, Y.-K., 2019, Enhancement of C-phycocyanin purity using negative chromatography with chitosan-modified nanofiber membrane, International journal of biological macromolecules, 132, 615-628.

[40] Cheah, W.Y., P.-L. Show, I.-S. Ng, G.-Y. Lin, C.-Y. Chiu, Chang, Y.-K., 2019, Antibacterial activity of quaternized chitosan modified nanofiber membrane, International journal of biological macromolecules, 126, 569-577.

[41] Tran, D.-T., C.-L. Chen, Chang, J.-S., 2012, Immobilization of Burkholderia sp. lipase on a ferric silica nanocomposite for biodiesel production, Journal of biotechnology, 158, 112-119.

[42] Mehta, R.N., M. Chakraborty, Parikh, P.A., 2014, Impact of hydrogen generated by splitting water with nano-silicon and nano-aluminum on diesel engine performance, International journal of hydrogen energy, 39, 8098-8105.

[43] Karthikeyan, S., A. Elango, Prathima, A., 2014, Performance and emission study on zinc oxide nano particles addition with pomolion stearin wax biodiesel of CI engine.

[44] Singh, N., Bharj, R., 2015, Effect of CNT-emulsified fuel on performance emission and combustion characteristics of four stroke diesel engine, International Journal of Current Engineering and Technology, 5, 477-485.

[45] Mehta, R.N., M. Chakraborty, Parikh, P.A., 2014, Nanofuels: Combustion, engine performance and emissions, Fuel, 120, 91-97.

[46] Li, Z., Q. Fu, H. Kobayashi, Xiao, S., 2018, Biofuel production from bioelectrochemical systems, Bioreactors for microbial biomass and energy conversion, 435-461.

[47] Gul, M.M., Ahmad, K.S., 2019, Bioelectrochemical systems: sustainable bio-energy powerhouses, Biosensors and Bioelectronics, 142, 111576.

[48] Kalathil, S., Pant, D., 2016, Nanotechnology to rescue bacterial bidirectional extracellular electron transfer in bioelectrochemical systems, RSC advances, 6 , 30582-30597.

[49] Quan, X., B. Sun, Xu, H., 2015, Anode decoration with biogenic Pd nanoparticles improved power generation in microbial fuel cells, Electrochimica Acta, 182, 815-820.

[50] Rahimnejad, M., A. Adhami, S. Darvari, A. Zirepour, Oh, S.-E., 2015, Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review, Alexandria Engineering Journal, 54, 745-756.

[51] Logan, B.E., B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, W .Verstraete, Rabaey, K., 2006, Microbial fuel cells: methodology and technology, Environmental science & technology, 40 , 5181-5192.

[52] Erbay, C., X. Pu, W. Choi, M.-J. Choi, Y. Ryu, H. Hou, F. Lin, P. de Figueiredo, C. Yu, Han, A., 2015, Control of geometrical properties of carbon nanotube electrodes towards high-performance microbial fuel cells, Journal of Power Sources, 280, 347-354.

[53] Zhang, Y., J. Sun, Y. Hu, S. Li, Q. Xu., 2012, Bio-cathode materials evaluation in microbial fuel cells: a comparison of graphite felt, carbon paper and stainless steel mesh materials, International Journal of Hydrogen Energy, 37, 16935-16942.

[54] Liu, W., S. Cheng, Guo, J., 2014, Anode modification with formic acid: A simple and effective method to improve the power generation of microbial fuel cells, Applied surface science, 320, 281-286.

[55] Zhang, D., Z. Li, C. Zhang, X. Zhou, Z. Xiao, T. Awata, Katayama, A., 2017, Phenol-degrading anode biofilm with high coulombic efficiency in graphite electrodes microbial fuel cell, Journal of bioscience and bioengineering, 123, 364-369.

[56] Zou, L., Z. Lu, Y. Huang, Z.-e. Long, Qiao, Y., 2017, Nanoporous Mo_2C functionalized 3D carbon architecture anode for boosting flavins mediated interfacial bioelectrocatalysis in microbial fuel cells, Journal of Power Sources, 359, 549-555.

[57] Lead, J.R., Valsami-Jones, E., 2014, Nanoscience and the Environment, Elsevier.

[58] Malorni, L., V. Guida, M. Sirignano, G. Genovese, C. Petrarca, Pedata, P., 2017, Exposure to sub-10 nm particles emitted from a biodiesel-fueled diesel engine: In vitro toxicity and inflammatory potential, Toxicology letters, 270, 51-61.

“Review article”

A Review of the application of nanomaterials in biomass conversion to biofuel

Majid Mirzaee [1*],Tayyebeh Mohebbi[2]

[1]Assistant professor, Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
[2] Ph.D Student, Department of Chemistry, Kashan University, Kashan, Iran
*Corresponding author: mjmirzaei@nri.ac.ir

Abstract

Global energy production, heavily influenced by the widespread use of fossil fuels, has highlighted the importance of finding alternative energy sources with high potential. continuous efforts are underway to address challenges related to the initial stages before conversion to bioenergy, such as pretreatment, enzymatic hydrolysis, and biomass cultivation. nanotechnology can overcome problems associated with these biomass sources by using its unique active sites for various reactions and processes. in this review article, the potential of nanotechnology, which has been integrated as an aid or additive in these biomasses to enhance the efficiency of bioenergy production, is examined. the fundamentals of nanomaterials along with their diverse applications in the field of bioenergy are discussed in detail. Furthermore, the optimization and enhancement of bioenergy production from lignocelluloses, microalgae, and wastewater using nanomaterials have been fully evaluated. the prominent features of these nanomaterials that contribute to the improvement of the performance of biofuels, biodiesel, enzymes, and microbial fuel cells have also been critically reviewed. finally, based on existing studies, future trends and research needs have been considered.

Keywords: Bioenergy, Biomass, Biofuel, Nanotechnology