

Mini Review: Potensi Bio-Nanokomposit Elektroda Ni/N Berbasis Limbah Ampas Tahu Untuk *Microbial Fuel Cell* (MFC)

Nur Aisyah Ibnu^{*1}, Salsabila Khairunnisa², Udmatul Karimah³, Shara Suci Salsabillah⁴, Nabillah Bilqis Hafizhoh⁵, Mariyamah⁶

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Raden Fatah, Palembang, Indonesia

e-mail: ^{*1}nuraisyahibnu24@gmail.com, ²salsabilakhairunisa459@gmail.com,

³udmatul.karimah@gmail.com, ⁴sharasucisalsabillah9@gmail.com, ⁵nabillahbilqis06@gmail.com,

⁶mariyamah_uin@radenfatah.ac.id

Abstract

The increasing demand for clean energy has encouraged the development of Microbial Fuel Cell (MFC) technology as a sustainable solution. This article reviews the potential of tofu dregs-based bio-nanocomposite as electrode material in MFC systems. Tofu waste is rich in lignocellulose and can be converted into porous activated carbon, then nitrogen-doped to improve conductivity and electrocatalytic activity. Using dip coating and pyrolysis methods on nickel substrates, efficient and eco-friendly Ni/N electrodes are obtained. This review highlights that tofu waste-based electrodes not only enhance MFC performance but also support organic waste management and renewable energy initiatives.

Keywords: *Microbial Fuel Cell, carbon electrode, tofu waste, bio-nanocomposite, nitrogen doping*

Abstrak

Kebutuhan energi bersih yang terus meningkat mendorong pengembangan teknologi Microbial Fuel Cell (MFC) sebagai solusi berkelanjutan. Artikel ini mengulas potensi penggunaan bio-nanokomposit berbasis limbah ampas tahu sebagai material elektroda dalam sistem MFC. Ampas tahu kaya akan lignoselulosa yang dapat dikonversi menjadi karbon aktif berpori, dan didoping nitrogen untuk meningkatkan konduktivitas serta aktivitas elektrokatalitik. Dengan pendekatan pelapisan pada substrat nikel menggunakan metode dip coating dan pirolisis, diperoleh elektroda Ni/N yang efisien dan berkelanjutan. Review ini menegaskan bahwa penggunaan ampas tahu tidak hanya meningkatkan performa MFC, tetapi juga berkontribusi terhadap pengelolaan limbah organik dan energi terbarukan.

Kata kunci: *Microbial Fuel Cell, elektroda karbon, ampas tahu, bionanokomposit, doping nitrogen*

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik global terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan industri. Ketergantungan terhadap energi fosil yang tidak terbarukan mendorong urgensi pencarian sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang tengah dikembangkan adalah teknologi *fuel cell* (sel bahan bakar), yang mampu mengubah energi kimia menjadi energi listrik secara efisien tanpa menghasilkan emisi berbahaya (Attia et al., 2024 ; Setyono, 2021). Di antara berbagai jenis *fuel cell*, *Microbial Fuel Cell* (MFC) muncul sebagai solusi inovatif yang memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk menghasilkan listrik dari bahan organik.

Microbial Fuel Cell (MFC) bekerja berdasarkan prinsip bio-elektrokimia, dimana mikroorganisme mengoksidasi substrat organik dan menghasilkan elektron serta proton. Salah satu bagian penting dalam MFC adalah elektroda, yaitu anoda dan katoda. Elektroda merupakan permukaan padat tempat terjadinya reaksi kimia (reaksi redoks) yang berperan dalam menghilangkan polutan dari lingkungan dan menghasilkan listrik. Elektron mengalir melalui rangkaian eksternal menuju elektroda katoda, menghasilkan arus listrik. Teknologi ini tidak hanya menghasilkan energi bersih, tetapi juga digunakan dalam pengolahan limbah, sehingga mendukung kebijakan energi terbarukan sebagaimana tercantum dalam Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN),

yang menargetkan kontribusi energi baru dan terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2030 (Dewi, 2020).

Efisiensi dari sistem MFC sangat dipengaruhi oleh kualitas material elektroda, yang berfungsi sebagai tempat transfer elektron dan tempat tumbuhnya biofilm mikroorganisme. Material elektroda yang paling sering digunakan adalah karbon. Karbon tersedia dalam berbagai bentuk, seperti lembaran grafit padat, batang, butiran, bahan berserat (seperti kain, kertas, serat, dan busa), serta karbon kaca. Berbagai studi menunjukkan bahwa penggunaan nanomaterial pada elektroda mampu meningkatkan performa MFC secara signifikan. Attia (2022) mencatat bahwa modifikasi elektroda dengan lapisan nano dapat menghasilkan tegangan hingga 1,367 V, dengan kerapatan daya mencapai 116 mW m^{-2} , menunjukkan perbaikan efisiensi dibandingkan elektroda konvensional (Attia et al., 2024). Penelitian Ahmed et al. (2024) juga menunjukkan bahwa penambahan nanokomposit PANI/Inf meningkatkan daya keluaran hingga 1091 mW m^{-2} (Ahmed et al., 2024), sementara penelitian Al Gazali et al. (2023) menemukan bahwa elektroda karbon menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dibandingkan elektroda Cu/C, menandakan potensi besar nanomaterial dalam peningkatan efisiensi MFC (Al Gazali et al., 2023).

Sejalan dengan upaya efisiensi tersebut, pemanfaatan limbah organik sebagai sumber material elektroda menjadi strategi yang tidak hanya mendukung keberlanjutan, tetapi juga menambah nilai guna limbah itu sendiri. Salah satu limbah organik yang sangat melimpah namun belum dimanfaatkan optimal adalah ampas tahu, limbah padat dari industri pengolahan kedelai. Ampas tahu mengandung senyawa lignoselulosa seperti selulosa (19,15%) dan hemiselulosa (40,49%) (Yulianto et al., 2024), yang menjadikannya bahan potensial untuk dikonversi menjadi bio-nanokomposit berbasis karbon. Kandungan lignoselulosa ini memungkinkan pembentukan struktur karbon aktif dengan porositas tinggi, luas permukaan besar, dan konduktivitas yang baik, yang sangat cocok digunakan sebagai material elektroda dalam sistem MFC (Pertiwi et al., 2024). Penelitian lain menunjukkan elektroda berbahan dasar nikel berpori yang dikarbonisasi dengan biomassa menghasilkan peningkatan kerapatan daya hingga $0,064 \text{ mW/cm}^2$ dalam sistem MFC, yang dikaitkan dengan luas permukaan tinggi dan konektivitas struktur karbon konduktif terhadap substrat logam (Ge & He, 2015).

Dengan karakteristik tersebut, ampas tahu sebagai bahan dasar bio-nanokomposit karbon aktif dapat menjadi alternatif elektrode yang ramah lingkungan dan ekonomis untuk sistem MFC. Pemanfaatan ini tidak hanya menyumbang pada peningkatan efisiensi sistem konversi energi berbasis mikroorganisme, tetapi juga menjadi bagian dari strategi pengelolaan limbah organik secara berkelanjutan. Oleh karena itu, kajian mengenai pengolahan limbah ampas tahu menjadi elektroda bio-nanokomposit dalam aplikasi MFC menjadi penting untuk mendukung pengembangan teknologi energi terbarukan di masa depan.

METODE PENELITIAN

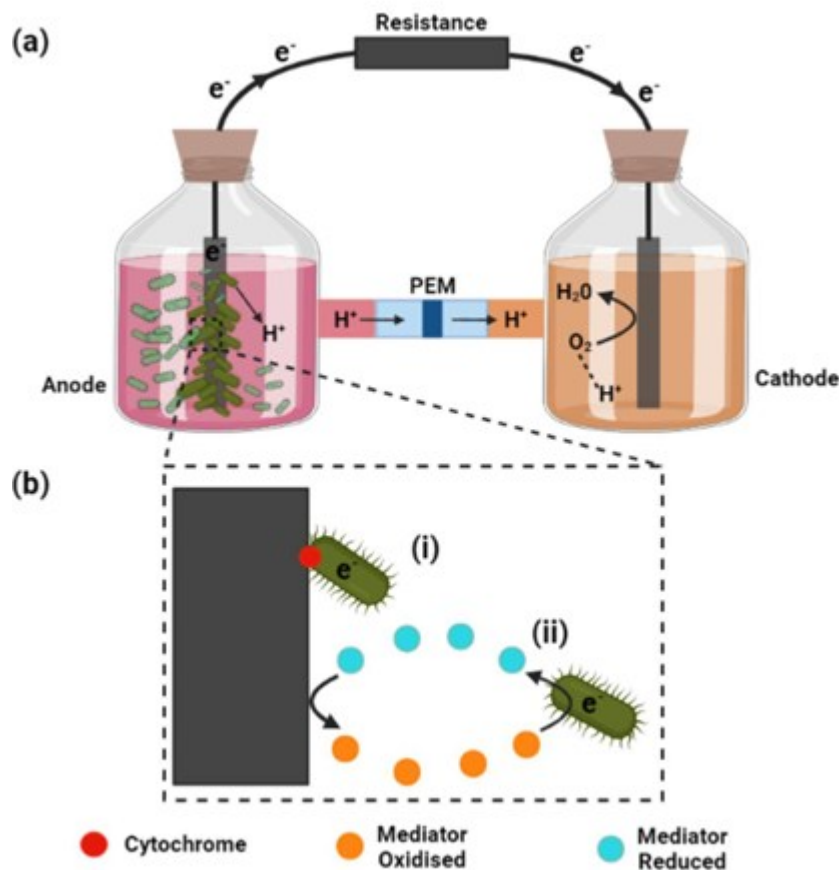
Penelitian ini dilaksanakan melalui pendekatan studi literatur sistematis dengan desain deskriptif-kualitatif, yang bertujuan untuk mengevaluasi dan mensintesis data sekunder terkait potensi pemanfaatan limbah ampas tahu sebagai material elektroda bio-nanokomposit dalam sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC). Proses pencarian data dilakukan secara terstruktur dengan mengakses berbagai basis data ilmiah bereputasi seperti *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Scopus*, *ResearchGate*, dan *Google Scholar*, dengan rentang publikasi antara tahun 2015 hingga 2025.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Cara kerja MFC

Teknologi *Microbial Fuel Cell* (MFC) merupakan sistem bio-elektrokimia yang memanfaatkan aktivitas metabolik mikroorganisme untuk mengubah energi kimia dalam senyawa organik menjadi energi listrik. Proses ini terjadi melalui mekanisme transfer elektron dari substrat organik ke elektroda anoda yang dimediasi langsung oleh mikroorganisme elektrogenik. MFC biasanya memiliki dua ruang – ruang anoda dan ruang katoda, dipisahkan oleh membran pertukaran proton (Ali et al., 2021). Di bagian anoda, mikroba disuspensikan dalam analit di bawah kondisi anaerobik, yang mengoksidasi substrat dan menghasilkan elektron, proton, dan metabolit lainnya di ruang anoda. Elektron yang dilepaskan oleh mikroba dikumpulkan oleh anoda dan melewatinya melalui sirkuit eksternal ke katoda. Untuk setiap

elektron yang dilewatkan, satu proton dibawa melalui membran untuk mencapai katoda (Naha et al., 2023; Pandit, 2018). Kompartemen katoda MFC umumnya menggunakan oksigen sebagai penerima elektron. Reduksi oksigen menjadi air adalah dicapai dengan transfer elektron dan proton yang diterima di ruang katoda, menghasilkan arus listrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Konsep ini didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh (Liu et al., 2023; Naha et al., 2023).



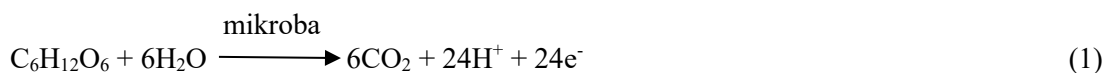
Gambar 1 Cara kerja MFC

(Liu et al., 2023; Naha et al., 2023).

Aliran elektron dalam sistem MFC sangat dipengaruhi oleh sifat elektroda, karena berperan penting dalam menghasilkan listrik dengan efisiensi tinggi. Salah satu upayanya adalah dengan memodifikasi elektroda menggunakan material semikonduktor, seperti oksida logam berstruktur nano atau menambahkan material komposit untuk meningkatkan kinerja MFC. Modifikasi ini bertujuan untuk memperluas luas permukaan spesifik, meningkatkan , stabilitas kimia, serta sifat konduktif. Material logam yang ada di katoda telah dimodifikasi menggunakan logam seperti platinum dan nanokomposit untuk meningkatkan reaksi redoks, konduktivitas listrik, dan luas permukaan.

Persamaan reaksi redoks berikut menggambarkan persamaan setengah reaksi (1) dan (2) untuk menjelaskan persamaan reaksi oksidasi -reduksi secara keseluruhan (3) menggunakan monosakarida (glukosa) sebagai bahan organik.

Reaksi oksidasi (anoda) :



Reaksi reduksi (katoda) :



Reaksi keseluruhan :



Karbon Aktif Ampas Tahu (KAT)

Limbah ampas tahu mengandung senyawa organik seperti 20,93% protein, 21,43% serat, 10,31% lemak kasar (Nurohman et al., 2021) serta lignoselulosa seperti selulosa (19,15%) dan hemiselulosa (40,49%) (Yulianto et al., 2024). Senyawa organik tersebut dapat dikarbonisasi menjadi karbon aktif. Dalam proses pembuatan karbon aktif dari ampas tahu, bahan awal dikeringkan dan dipanaskan pada suhu tinggi untuk mengubahnya menjadi karbon padat. Proses ini disebut karbonisasi, dan dilakukan pada suhu sekitar 600°C selama 5 jam dalam furnace tubular di bawah atmosfer N₂ dalam kondisi tanpa oksigen (menggunakan gas nitrogen). Untuk meningkatkan luas permukaan dan membentuk pori-pori, dilakukan aktivasi kimia menggunakan KOH (kalium hidroksida). Aktivasi ini dilakukan dengan mencampur karbon dengan larutan KOH, kemudian dipanaskan lagi pada suhu 700°C. Setelah itu, sisa KOH dicuci menggunakan larutan asam (HCl) dan air hingga bersih. Hasil akhirnya adalah karbon aktif berpori dengan luas permukaan tinggi, yang sangat cocok digunakan sebagai bahan elektroda karena memiliki daya serap yang tinggi terhadap ion dan gas. Berdasarkan penelitian Zhou didapatkan luas permukaan karbon kaya nitrogen sebelum aktivasi sebesar 30 m²/g⁻¹ dan setelah diaktivasi sebesar 521 m²/g⁻¹ (Zhou, 2014). Karbon aktif berpori dari tahu yang diaktivasi menggunakan KOH tidak hanya memiliki luas permukaan tinggi, tetapi juga menunjukkan kapasitansi spesifik yang tinggi hingga 207 F/g serta stabilitas siklus yang sangat baik hingga 2000 siklus, menjadikannya alternatif yang menjanjikan untuk bahan elektroda dengan kinerja elektrokimia tinggi dan biaya rendah (Lee et al., 2017).

Katoda Nikel menggunakan Karbon Aktif Ampas Tahu (KAT/Ni)

Katoda dalam sistem (MFC) berperan sebagai akseptor akhir elektron, tempat berlangsungnya reaksi reduksi, umumnya reduksi oksigen menjadi air. Efisiensi proses ini sangat mempengaruhi performa keseluruhan MFC, karena reaksi reduksi oksigen (*Oxygen Reduction Reaction/ORR*) cenderung berjalan lambat di kondisi netral dan basa yang umum dijumpai dalam MFC (Ge & He, 2015 ; Santoro et al., 2017). Oleh karena itu, material katoda harus memiliki aktivitas elektrokatalitik tinggi, stabil dalam kondisi operasi MFC, serta memiliki luas permukaan yang besar untuk mendukung proses difusi oksigen. Dalam sistem MFC, adsorpsi pada katoda merupakan proses kunci yang mempengaruhi efisiensi reaksi reduksi oksigen, yaitu reaksi elektrokimia di mana oksigen (O₂) direduksi menjadi air (H₂O) atau ion hidroksida (OH⁻), tergantung pada jenis elektrolit yang digunakan. Oksigen dari lingkungan harus terlebih dahulu teradsorpsi ke permukaan katoda sebelum dapat berpartisipasi dalam reaksi ini. Proses adsorpsi ini menentukan seberapa efektif oksigen dapat ditangkap dan direduksi, serta seberapa cepat ion H⁺ atau OH⁻ dapat berinteraksi dengan situs aktif di permukaan elektroda. Permukaan katoda yang memiliki luas permukaan tinggi, mikroporositas, dan situs aktif (misalnya doping nitrogen atau keberadaan gugus fungsional tertentu) dapat meningkatkan efisiensi adsorpsi oksigen.

Untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi dan aktivitas elektrokatalitik pada katoda, diperlukan material yang tidak hanya memiliki luas permukaan tinggi dan struktur mikropori, tetapi juga konduktivitas listrik yang baik serta kemampuan melekat kuat pada substrat logam. Salah satu nya yaitu penggunaan karbon aktif berbasis limbah biomassa seperti ampas tahu, yang setelah melalui proses aktivasi kimia KOH, dapat diaplikasikan ke permukaan elektroda nikel (Ni) menggunakan teknik pelapisan seperti dip coating, sehingga membentuk lapisan elektroaktif yang melekat kuat pada substrat logam yang akan digunakan sebagai katoda. Plat nikel yang akan digunakan sebagai elektroda pertama-tama dibersihkan untuk menghilangkan kontaminan permukaan yang dapat mengganggu penempelan karbon aktif. Proses pembersihan dilakukan dengan merendam plat nikel dalam campuran etanol dan aseton (1:1 v/v) sambil diberi perlakuan ultrasonik selama 10 menit, kemudian dibilas dengan akuades dan dikeringkan. Sementara itu, karbon aktif dari ampas tahu yang telah dikarbonisasi dan diaktivasi sebelumnya, disuspensikan dalam pelarut etanol sebanyak 100 mL, dengan penambahan 4–12 gram karbon aktif tergantung kebutuhan ketebalan lapisan. Untuk membantu karbon menempel kuat pada

permukaan logam, ditambahkan larutan pengikat (binder) berupa PTFE 60% sebanyak 2,5 mL. Campuran ini diaduk hingga homogen menggunakan pengaduk magnetik atau sonikator, membentuk slurry kental yang siap digunakan untuk pelapisan.

Proses pelapisan dilakukan dengan mencelupkan plat nikel secara perlahan ke dalam suspensi karbon aktif tersebut selama 2–5 detik, kemudian diangkat perlahan untuk menghasilkan lapisan yang merata. Setelah dicelup, plat dikeringkan pada suhu ruang atau oven bersuhu rendah (60–80°C) selama 15 menit. Untuk meningkatkan ketebalan dan kestabilan lapisan, pencelupan dapat diulang hingga tiga kali. Setelah lapisan selesai dibentuk, plat nikel yang telah dilapisi karbon aktif dipanaskan kembali dalam oven pada suhu 100°C selama 2 jam. Proses pemanasan ini bertujuan untuk memperkuat adhesi antara karbon aktif dan permukaan nikel. Pemanasan tambahan pada suhu lebih tinggi, seperti 350°C selama 30 menit, juga dapat dilakukan untuk meningkatkan kestabilan termal dan kekuatan ikatan antar lapisan.

Metode ini berdasarkan metode *dip coating* yang telah terbukti efektif dalam pelapisan karbon aktif untuk elektroda pada sel bahan bakar mikroba (Ge & He, 2015), serta pendekatan yang digunakan oleh Mitov (2015) dalam pelapisan logam NiB pada substrat karbon, di mana proses pengeringan pasca-pelapisan berperan penting dalam meningkatkan kekuatan dan performa elektrokatalitik dari lapisan yang terbentuk (Mitov et al., 2021). Proses pelapisan ini bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan aktif elektroda dan memperbaiki kemampuan transfer elektron antara biofilm mikroba dan elektroda dalam sistem MFC (Ge & He, 2015). Nikel berperan sebagai situs aktif elektrokatalitik yang dapat mempercepat reaksi redoks dan meningkatkan efisiensi transfer elektron pada permukaan elektroda. (Mahmoodzadeh et al., 2023). Nikel memiliki aktivitas katalitik yang baik terhadap ORR dan dapat dikombinasikan dengan struktur karbon konduktif untuk menghasilkan performa yang baik. Nikel sebagai substrat yang didoping karbon aktif berbasis biomassa juga menunjukkan potensi. Karbon yang diperoleh melalui proses pirolisis pada suhu 500 °C dari biomassa *hydrochar* menunjukkan efisiensi sebagai material doping, ditunjukkan dengan peningkatan daya hingga 0,055 mW/cm² dan kerapatan arus sebesar 0,15 mA/cm², atau sekitar 30% lebih tinggi dibandingkan elektroda nikel tanpa modifikasi. Peningkatan ini dikaitkan dengan terbentuknya struktur grafitik pada permukaan elektroda, yang secara signifikan menurunkan hambatan internal sistem dan meningkatkan konduktivitas listrik (Delgado et al., 2024).

Anoda Plat Nikel Karbon Aktif Ampas Tahu terdoping Nitrogen (Ni/N-KAT)

Bahan anoda harus memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, stabil secara kimia, biokompatibel, dan konduktivitas listrik yang baik, di antara karakteristik lainnya. Sifat konduktif bahan memberikan aliran elektron tinggi yang sangat penting bagi MFC untuk berfungsi dengan baik. Luas permukaan elektroda memainkan peran penting dalam aktivitas *microbial* sebagai antarmuka inti untuk transfer elektron. Sifat permukaan bahan anoda (seperti hidrofilisitas dan konduktivitas) secara langsung mempengaruhi kekuatan adhesi bakteri, struktur biofilm, dan komunitas mikroba, sehingga bahan anoda MFC yang ideal memerlukan kemampuan adhesi mikroba dan laju transfer elektron yang luar biasa (Chen et al., 2021).

Biokompatibilitas dan konduktivitas listrik dari bahan berbasis karbon jadi salah satu alasan karbon sering dipakai sebagai anoda dalam sel bahan bakar mikroba. Dalam (Banerjee, 2022), pemilihan bahan anoda dibantu oleh reaksi biokimia yang terjadi di ruang anoda. Sementara itu, Jing (2025) menjelaskan bahwa nano-biochar yang sudah dimodifikasi dengan menggunakan metode pertumbuhan *in situ*, yang menghasilkan permukaan luas, konduktivitas tinggi, biokompatibilitas baik, dan stabilitas yang bagus. Bahan ini diuji dalam MFC dengan membandingkan tiga jenis material yang dimodifikasi (PPy/CS, TiN/CS, PPy–TiN/CS), dan dua kelompok kontrol dianalisis. Hasilnya, dibandingkan dengan elektroda yang tidak dimodifikasi, elektroda yang dimodifikasi menunjukkan kinerja yang lebih baik, menyoroti kebutuhan untuk pengembangan material anoda yang hemat biaya, efisien, dan tahan lama (Jing, 2025).

Konversi elektron dan proton dalam sistem MFC sangat ditentukan oleh kinetika reaksi yang terjadi. Kinetika reaksi biokimia menentukan seberapa efektif elektron dan proton bisa dikonversi dari materi organik yang ada dalam limbah. Penggunaan bahan serat karbon sebagai anoda menunjukkan hasil yang lebih menjanjikan dalam output karena area permukaan yang lebih besar, struktur tiga dimensi, stabilitas kimia yang tinggi, dan konduktivitas listrik (Banerjee, 2022). Serat karbon, seperti

karbon felt dan karbon brush, menyediakan struktur pori yang luas dan permukaan yang mendukung pembentukan biofilm oleh mikroorganisme elektrogenik. Struktur ini meningkatkan area kontak antara mikroba dan elektroda, mempercepat transfer elektron dari sel mikroba ke anoda. Selain itu, konduktivitas listrik yang tinggi dari serat karbon memungkinkan aliran elektron yang menuju efisien sirkuit eksternal, meningkatkan daya output MFC (Line Schultz Jensen, 2022)

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan performa elektroda dalam sistem MFC dengan cara memodifikasi material dasar menggunakan material doping tertentu. Modifikasi ini bertujuan untuk meningkatkan daya hantar listrik, kestabilan kimia, dan efisiensi transfer elektron. Tabel berikut merangkum beberapa jenis material elektroda yang telah dimodifikasi.

No.	Material	Material doping	Hasil (sebutkan besarnya listrik yg dihasilkan)	Referensi (nama, tahun)
1.	Carbon nanofibers (CNFs) dari PAN	Spontan (self N-doping saat pirolisis PAN)	Mampu menghasilkan kerapatan daya sebesar $2,153 \pm 0,011$ mW/m ² , yang jauh lebih tinggi dibandingkan karbon komersial biasa.	(Massaglia et al., 2020)
2.	Karbon berpori dari jerami singkong	Aktivasi elektrokimia (dalam larutan (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈)	Kerapatan daya maksimum mencapai $2204,5 \pm 29$ W/m ³ , meningkat 1,90 kali dari anoda tak dimodifikasi.	(Chen et al., 2021)
3.	Carbon paper + N-doped carbon dots	Hidrotermal (ethylene glycol ethylenediamine) deposisi elektrostatis	Output daya 0,32 mW, meningkat 1,1 kali dibanding kertas karbon biasa. Meningkatkan ketebalan biofilm dan transfer elektron mikroba.	(Guan et al., 2019)
4.	N/PC dari melamin + sodium citrate	Pirolisis satu langkah (800 °C)	Menunjukkan kerapatan daya maksimum $2777,7$ mW m ⁻² , sekitar dua kali lebih tinggi daripada MFC dengan kain karbon komersial (CC) sebagai anoda.	(Bi et al., 2018)

5.	Karbon felt	Pelapisan polianilin melalui metode polimerisasi kimia	dengan (PANI) metode	Menghasilkan performa terbaik (Rajesh et al., 2020) dengan tegangan maksimum sebesar 593 ± 8 mV, kerapatan daya 216 mW/m^2
----	-------------	--	----------------------	--

Plat nikel karbon aktif ampas tahu pada katoda akan digunakan pada anoda dengan komposisi yang sama, dan sedikit modifikasi dengan mendoping plat menggunakan nitrogen. Pendopingan dilakukan melalui proses pirolisis termal menggunakan prekursor nitrogen seperti urea. Dalam metode ini, karbon aktif dicampurkan secara merata dengan urea padat dalam rasio massa 1:2 (Rangel-Sequeda et al., 2024) kemudian dimasukkan ke dalam wadah keramik dan dipanaskan dalam tungku pada atmosfer nitrogen. ((Nie et al., 2019; Tan et al., 2025; Wu et al., 2020), Pirolisis dilakukan dengan menaikkan suhu secara bertahap hingga mencapai 800°C , lalu dipertahankan selama dua jam dalam kondisi aliran gas nitrogen terus menerus. (Chen et al., 2021; Ding et al., 2021). Selama proses ini, urea akan terdekomposisi secara termal dan melepaskan gugus nitrogen yang akan menempel dan menyatu ke dalam struktur karbon, membentuk gugus fungsional seperti piridin-N, pirrol-N, dan grafitik-N. Pendopingan yang telah dilakukan membuatnya lebih aktif, konduktif, dan selektif. Misalnya, doping nitrogen pada bahan karbon telah terbukti meningkatkan konduktivitas listrik dan selektivitas reaksi mereka. Demikian pula, penggabungan partikel logam telah terbukti memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap mekanisme reaksi. Selain itu, doping nitrogen dan logam (Ni, Co, Cu, Mo) menciptakan efek sinergis yang sangat penting dalam reaksi elektrokatalitik, dengan meningkatkan laju reaksi, selektivitas, dan efisiensi energi. Karbon dilapisi menggunakan nitrogen untuk meningkatkan densitas elektron pada permukaan logam, memfasilitasi transfer elektron selama reaksi. Doping nitrogen menghasilkan lebih banyak situs aktif pada permukaan logam, memungkinkan adsorpsi (Chen et al., 2021; Wu & Zhao, 2025)

Doping nitrogen pada bahan karbon anoda memberikan peningkatan signifikan terhadap efisiensi dan performa elektrokimia dari MFC. Dalam penelitian oleh (Chen et al., 2021) anoda berbasis karbon dari jerami singkong yang di doping nitrogen melalui proses aktivasi elektrokimia menunjukkan peningkatan kerapatan daya sebesar $2204,5 \text{ W/m}^3$ lebih tinggi dibandingkan anoda tanpa modifikasi. Peningkatan ini disebabkan oleh adanya gugus fungsi nitrogen seperti pyridinic-N, pyrrolic-N, dan quaternary-N yang meningkatkan efisiensi transfer elektron di antarmuka mikroorganisme-karbon, serta menyediakan situs aktif tambahan untuk pertumbuhan biofilm mikroba. Penelitian oleh (Bi et al., 2018) juga memperkuat temuan tersebut dengan menyatakan bahwa doping nitrogen dalam struktur karbon tiga dimensi meningkatkan luas permukaan spesifik hingga $1009 \text{ m}^2/\text{g}$ dan daya keluaran mencapai $2777,7 \text{ mW/m}^2$ hampir dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan karbon komersial tanpa doping. Hal ini menunjukkan bahwa nitrogen tidak hanya berfungsi sebagai elemen doping, tetapi juga menyediakan mikro lingkungan yang lebih biokompatibel yang mendukung pertumbuhan mikroba dan menurunkan resistansi transfer muatan (charge transfer resistance). Lebih lanjut, dari jurnal ketiga oleh (Guan et al., 2019) doping nitrogen dikombinasikan dengan struktur pori yang teratur juga mendorong interaksi yang lebih efektif antara mikroorganisme dengan permukaan anoda, sehingga menghasilkan transfer elektron yang lebih cepat dan output listrik yang lebih stabil (data detail pada bagian elektrokimia dan SEM karakterisasi dalam jurnal tersebut). Gugus-gugus tersebut dapat menjadi situs koordinasi potensial bagi ion logam seperti Ni^{2+} , yang kemudian dapat membentuk ikatan koordinasi Ni-N atau Ni-O pada permukaan karbon.

(Gholami-Kermanshahi et al., 2024) menyatakan bahwa penggunaan busa nikel yang dimodifikasi plasma N_2 (Nitrogen) sebagai anoda, yang menunjukkan struktur seluler terbuka dengan morfologi kasar dan luas permukaan tinggi. Modifikasi ini menghasilkan sifat hidrofilik yang sangat baik akibat terbentuknya gugus fungsi Ni-N dan NH_3 , sehingga meningkatkan adhesi bakteri dan pembentukan biofilm. Penambahan unsur nitrogen pada karbon aktif dari ampas tahu yang dilapiskan ke permukaan plat nikel diharapkan dapat meningkatkan luas permukaan efektif dan menciptakan lebih

banyak situs aktif pada antarmuka mikroorganisme-karbon. Modifikasi ini berperan dalam memperbaiki efisiensi transfer elektron, sehingga mampu meningkatkan kerapatan daya serta menghasilkan keluaran daya listrik yang lebih optimal dalam sistem MFC.

Oleh karena itu, berdasarkan beberapa temuan dari literatur yang dikaji, penerapan karbon aktif yang berasal dari limbah tahu yang didoping nitrogen ke substrat nikel menunjukkan potensi yang menjanjikan sebagai bahan elektroda untuk sistem MFC. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi kinerja sel bahan bakar mikroba tetapi juga membuka kemungkinan pemanfaatan limbah organik yang berkelanjutan. Oleh karena itu, penting untuk melakukan penelitian lebih lanjut berdasarkan bahan ini untuk membantu transisi ke teknologi energi yang lebih bersih dan terbarukan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Pemanfaatan ampas tahu sebagai bahan baku elektroda bio-nanokomposit dalam sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC) menawarkan potensi besar dalam pengembangan teknologi energi terbarukan yang ramah lingkungan. Proses karbonisasi dan aktivasi kimia terhadap ampas tahu menghasilkan karbon aktif berpori dengan luas permukaan tinggi dan konduktivitas yang baik. Pendopingan nitrogen lebih lanjut meningkatkan efisiensi transfer elektron serta menyediakan situs aktif bagi biofilm mikroorganisme. Kombinasi karbon aktif dan substrat nikel melalui metode dip coating terbukti efektif dalam meningkatkan performa elektrokimia MFC. Penggunaan material berbasis limbah ini juga mendukung pengelolaan limbah organik secara berkelanjutan serta menekan biaya produksi elektroda.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan uji performa elektroda Ni/N berbasis ampas tahu dalam skala laboratorium dan semi pilot untuk mengevaluasi kestabilan jangka panjang, resistansi internal, dan kerapatan daya. Selain itu, eksplorasi terhadap metode doping lain dan variasi substrat logam dapat membuka peluang optimalisasi yang lebih lanjut dalam sistem MFC berbasis biomassa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Bagian ini bersifat opsional. Apabila ada, maka ucapan terimakasih ditujukan kepada **institusi** yang telah memberi **“dukungan financial”** terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, J., & Kim, S. (2024). Polyaniline nanofiber: An excellent anode material for microbial fuel cells. *RSC Advances*, 14(46), 34498–34503. <https://doi.org/10.1039/D4RA03774J>
- Al Gazali, M. H., Susilo, F. I., & Zaeni, A. (2023). Performa Microbial Fuel Cell (MFC) bersubstrat Sedimen Teluk Kendari dalam Menghasilkan Tenaga Listrik dengan Variasi Jenis Elektroda. *Arus Jurnal Sains Dan Teknologi*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.57250/ajst.v1i1.264>
- Ali, A. K. M., Ali, M. E. A., Younes, A. A., Abo El Fadl, M. M., & Farag, A. B. (2021). Proton exchange membrane based on graphene oxide/polysulfone hybrid nano-composite for simultaneous generation of electricity and wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 419, 126420. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126420>
- Attia, Y. A., Samer, M., Mohamed, M. S. M., Moustafa, E., Salah, M., & Abdelsalam, E. M. (2024). Nanocoating of microbial fuel cell electrodes for enhancing bioelectricity generation from wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(1), 847–858. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02321-7>
- Banerjee, A. C. (2022). Review on material and design of anode for microbial fuel cell. *Energies*, 15(6), 2283.
- Bi, L., Ci, S., Cai, P., Li, H., & Wen, Z. (2018). One-step pyrolysis route to three dimensional nitrogen-doped porous carbon as anode materials for microbial fuel cells. *Applied Surface Science*, 427, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.030>
- Chen, S. L. (2021). Enhancing microbial fuel cell performance through anode surface modification: A review. *Journal of Power Sources*, 482, 228926.
- Chen, M., Guo, W., Zhang, Y., Xiao, H., Lin, J., Rao, Y., Zhang, M., Cheng, F., & Lu, X. (2021). Activated nitrogen-doped ordered porous carbon as advanced anode for high-performance microbial fuel cells. *Electrochimica Acta*, 391, 138920. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138920>

- Delgado, Y., Tapia, N., Muñoz-Morales, M., Ramirez, Á., Llanos, J., Vargas, I., & Fernández-Morales, F. J. (2024). Effect of hydrochar-doping on the performance of carbon felt as anodic electrode in microbial fuel cells. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33338-2>
- Ding, Y., Li, Y., Dai, Y., Han, X., Xing, B., Zhu, L., Qiu, K., & Wang, S. (2021). A novel approach for preparing in-situ nitrogen doped carbon via pyrolysis of bean pulp for supercapacitors. *Energy*, 216, 119227. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119227>
- Ge, Z., & He, Z. (2015). An effective dipping method for coating activated carbon catalyst on the cathode electrodes of microbial fuel cells. *RSC Advances*, 5(46), 36933–36937. <https://doi.org/10.1039/C5RA05543A>
- Gholami-Kermanshahi, M., Lee, M.-C., Lange, G., & Chang, S.-H. (2024). Effects of N₂ plasma modification on the surface properties and electrochemical performance of Ni foam electrodes for double-chamber microbial fuel cells. *Materials Advances*, 5(13), 5554–5560. <https://doi.org/10.1039/D4MA00153B>
- Guan, Y.-F., Zhang, F., Huang, B.-C., & Yu, H.-Q. (2019). Enhancing electricity generation of microbial fuel cell for wastewater treatment using nitrogen-doped carbon dots-supported carbon paper anode. *Journal of Cleaner Production*, 229, 412–419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.040>
- Jing, X. C. (2025). Preparation of polypyrrole/titanium nitride composite modified biochar and its application research in microbial fuel cells. *RSC Advances*, 15, 6089–6099.
- Lee, D.-Y., An, G.-H., & Ahn, H.-J. (2017). High-surface-area tofu based activated porous carbon for electrical double-layer capacitors. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 52, 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.03.032>
- Line Schultz Jensen, C. K. (2022). Biohydrogen Production in Microbial Electrolysis Cells Utilizing Organic Residue Feedstock. *A review. Energies*.
- Liu, K., Ma, Z., Li, X., Qiu, Y., Liu, D., & Liu, S. (2023). N-Doped Carbon Nanowire-Modified Macroporous Carbon Foam Microbial Fuel Cell Anode: Enrichment of Exoelectrogens and Enhancement of Extracellular Electron Transfer. *Materials*, 17(1), 69. <https://doi.org/10.3390/ma17010069>
- Mahmoodzadeh, F., Navidjouy, N., Alizadeh, S., & Rahimnejad, M. (2023). Investigation of microbial fuel cell performance based on the nickel thin film modified electrodes. *Scientific Reports*, 13(1), 20755. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48290-3>
- Massaglia, G., Margaria, V., Fiorentin, M. R., Pasha, K., Sacco, A., Castellino, M., Chiodoni, A., Bianco, S., Pirri, F. C., & Quaglio, M. (2020). Nonwoven mats of N-doped carbon nanofibers as high-performing anodes in microbial fuel cells. *Materials Today Energy*, 16, 100385. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2020.100385>
- Mitov, M. Y., Chorbadzhiyska, E. Y., Nalbandian, L., & Hubenova, Y. V. (2021). *Synthesis and characterization of dip-coated CoB-, NiB- and CoNiB-carbon felt catalysts*.
- Naha, A., Debroy, R., Sharma, D., Shah, M. P., & Nath, S. (2023). Microbial fuel cell: A state-of-the-art and revolutionizing technology for efficient energy recovery. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 5, 100050. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2023.100050>
- Nie, Z., Huang, Y., Ma, B., Qiu, X., Zhang, N., Xie, X., & Wu, Z. (2019). Nitrogen-doped Carbon with Modulated Surface Chemistry and Porous Structure by a Stepwise Biomass Activation Process towards Enhanced Electrochemical Lithium-Ion Storage. *Scientific Reports*, 9(1), 15032. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50330-w>
- Nurohman, Y., Pratidhina, E., Sari, E. K., & Dwandaru, W. S. B. (2021). Carbon Dots Synthesized from Tofu Pulp for Liquid Tofu Waste Photo- degradation. . . P.
- Pandit, D. D. (2018). Principles of Microbial Fuel Cell for the Power Generation. *Springer, Cham*, 21–41.
- Rajesh, P. P., Noori, Md. T., & Ghangrekar, M. M. (2020). Improving Performance of Microbial Fuel Cell by Using Polyaniline-Coated Carbon–Felt Anode. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 24(3), 04020024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000512](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000512)

- Rangel-Sequeda, J. F., Loredó-Cancino, M., Águeda-Maté, V. I., & Martínez-Vargas, D. X. (2024). Tailoring Nitrogen-Doped Activated Carbons: Central Composite Design for Enhanced CO₂ Adsorption. *ChemistrySelect*, 9(7), e202302805. <https://doi.org/10.1002/slct.202302805>
- Santoro, C. A. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. *Journal of Power Sources*, 356, 225–244.
- Tan, S., Wang, R., Dong, J., Zhang, K., Zhao, Z., Yin, Q., Liu, J., Yang, W., & Cheng, J. (2025). Hydrothermal-mediated in-situ nitrogen doping to prepare biochar for enhancing oxygen reduction reactions in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 416, 131789. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131789>
- Wu, X., Qiao, Y., Guo, C., Shi, Z., & Li, C. M. (2020). Nitrogen doping to atomically match reaction sites in microbial fuel cells. *Communications Chemistry*, 3(1), 68. <https://doi.org/10.1038/s42004-020-0316-z>
- Wu, & Zhao, Z. (2025). Enhancing the activity and stability of Fe/Co-based nitrogen-doped carbon with richer nitrogen and metal-N active sites towards oxygen reduction reactions. *New Journal of Chemistry*, 49(1), 124–131. <https://doi.org/10.1039/D4NJ04380>
- Yulianto, A. R. D., Pangestu, B. D., Arrunata, D. Y., & Sriana, T. (2024). PERBANDINGAN KADAR BIOETANOL DARI HASIL HIDROLISIS LIMBAH BONGGOL JAGUNG DAN AMPAS TAHU.
- Zhou, L. Z. (2014). Nitrogen-doped hierarchical porous carbon from waste biomass for high-performance supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 130, 154–161.