

Optimizing Bioelectricity Production from Thermophilic Bioelectrogens Consortium Using Agricultural Waste in Microbial Fuel Cells

Apriansa¹ & Irdawati^{1*}

¹Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

Article History

Received : March 06th, 2025

Revised : April 27th, 2025

Accepted : May 05th, 2025

*Corresponding Author:

Irdawati,

Departemen Biologi,
Universitas Negeri Padang,
Padang, Indonesia

Email:

irdawati.amor40@gmail.com

Abstract: Significant economic and population growth around the world has led to various problems, especially fossil fuel scarcity, energy production, as well as an increase in the volume of organic waste (agricultural, municipal, and industrial waste). As an alternative energy source, Microbial Fuel Cell (MFC) was chosen due to its promising prospects. The use of thermophilic bacteria and consortiums were chosen for their potential advantages in MFC systems. This study aims to explore the potential of thermophilic bioelectrogenous bacterial isolates of Sungai Sapan Aro (SSA) consortium 14&16 in producing bioenergy using various agricultural waste substrates (corn cob, rice straw, rice husk, and glucose as control). The results showed no significant difference in the use of agricultural waste substrates in the MFC system. Quantitatively, corn cobs produced voltages almost equivalent to glucose (control), while rice straw and rice husk produced lower voltages. The resulting voltages were glucose (0.59467 V), corn cob (0.57633 V), rice straw (0.43300 V), and rice husk (0.40400 V). The results of this study show better performance compared to previous studies in the field of electricity generation through MFCs.

Keywords: consortium; microbial fuel cell; thermophilic bioelectrigens; waste agricultural substrates

Pendahuluan

Pertumbuhan populasi dan aktivitas ekonomi global yang pesat telah menimbulkan tantangan serius dalam pengelolaan sumber daya alam dan lingkungan. Salah satu masalah utama adalah kelangkaan bahan bakar fosil dan peningkatan emisi gas rumah kaca hingga mencapai 16% dari total emisi global, serta akumulasi limbah organik dari sektor pertanian, domestik, dan industri (Zhang *et al.*, 2022; Flores, 2022). Untuk mengatasi tantangan ini, teknologi energi terbarukan yang memanfaatkan limbah organik sebagai sumber energi telah menjadi fokus penelitian global (Li *et al.*, 2018).

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan salah satu teknologi menjanjikan yang memanfaatkan mikroorganisme untuk mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Selain menghasilkan bioenergi, MFC juga mendukung pengolahan limbah organik,

sehingga memiliki manfaat ganda bagi lingkungan (Verma *et al.*, 2021; Savvidou *et al.*, 2022). Mikroba ini dikenal sebagai *bioelectrigens*, karena dapat memanfaatkan substrat organik, mengoksidasinya, dan menghasilkan elektron dan arus listrik (Mohammadi *et al.*, 2023).

Dalam pengembangan lebih lanjut, pemilihan jenis mikroba yang digunakan sebagai *bioelectrigens* menjadi faktor penting untuk meningkatkan kinerja MFC. Mikroba termofilik sebagai *bioelectrigens* memiliki keunggulan dibandingkan mikroba mesofilik, termasuk efisiensi degradasi substrat yang lebih tinggi, laju metabolisme yang cepat, dan kemampuan beroperasi pada suhu tinggi, yang mengurangi risiko kontaminasi (Dai *et al.*, 2017; Yadav *et al.*, 2021). Studi menunjukkan bahwa konsorsium mikroba dalam MFC cenderung lebih produktif dibandingkan kultur murni karena interaksi metabolik antar mikroorganisme yang memperkuat

kemampuan degradasi substrat kompleks (Li *et al.*, 2018; Verma *et al.*, 2021).

Sejalan dengan pentingnya ketersediaan substrat kompleks untuk mendukung aktivitas konsorsium mikroba dalam MFC, limbah lignoselulosa mulai dipertimbangkan sebagai sumber bahan baku potensial yang berlimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal. Limbah pertanian, seperti tongkol jagung, jerami padi, dan sekam padi, merupakan sumber biomassa lignoselulosa yang melimpah dan sering kali belum dimanfaatkan secara optimal. Limbah ini mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang dapat menjadi sumber karbon untuk pertumbuhan mikroba. Tongkol jagung mengandung lignoselulosa dan ketersediaannya berlimpah di alam (Fachry *et al.*, 2013) dengan komposisi lignoselulosa (hemiselulosa 35, selulosa 45%), dan lignin 15% yang merupakan substrat sebagai sumber karbon (Fitriani *et al.*, 2013). Penelitian menunjukkan bahwa tongkol jagung dengan konsentrasi substrat tertentu mampu menghasilkan voltase hingga 905 mV (Arigeni, Kirom & Qurthobi, 2019).

Jerami padi tersusun dari kandungan selulosa 37,71%, hemiselulosa 21,99%, dan lignin 16,62% (Pratiwi *et al.*, 2016), kedua kandungan tersebut merupakan sumber makanan bagi bakteri pada proses metabolisme bakteri. Khoirunnisa, Santosa & Syaiful (2020) menunjukkan penggunaan substrat jerami padi sebagai substrat menghasilkan voltase 352 mV. Sekam padi memiliki komponen utama seperti selulosa 35%, hemiselulosa 25%, dan lignin 20% (Ma'ruf, Pramudono & Aryanti, 2017; Utomo & Fadila, 2020). dan sekam padi menghasilkan 264 mV dengan variasi kondisi operasional (Wang *et al.*, 2013).

Penelitian terhadap konsorsium mikroba termofilik dari Sungai Sapan Aro telah mengidentifikasi kombinasi isolat yang kompatibel, seperti SSA 14 & SSA 16, yang menghasilkan daya listrik hingga 914 mV (Vestimarta, 2024). Konsorsium mikroba ini diharapkan mampu mengoptimalkan produksi bioenergi pada MFC dengan memanfaatkan substrat berbasis limbah pertanian. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi limbah pertanian sebagai substrat bagi

konsorsium bikultur mikroba termofilik dalam menghasilkan biolistrik pada sistem MFC. Penelitian ini diharapkan ikut andil dalam memberikan kontribusi terhadap pengembangan energi terbarukan yang efisien, ramah lingkungan, dan mendukung pengelolaan limbah organik secara berkelanjutan.

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada Oktober–Desember 2024 bertempat di Laboratorium Mikrobiologi, Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang.

Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang dilakukan bersifat eksperimen dengan menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) empat perlakuan dan tiga kali ulangan.

Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian meliputi *beaker glass*, lampu bunsen, *shaker incubator*, spiritus, tabung reaksi, rak tabung reaksi, Erlenmeyer, spatula, gelas ukur, vortex, *stirrer*, jarum ose, *hot plate*, timbangan digital, oven, pH meter, pipet tetes, *autoclave*, *magnetic stirrer*, *petridish*, label, *eppendorf*, mikropipet, multimeter digital, elektroda (plat *zinc* dan plat tembaga), kabel jepit buaya, botol silinder plastik, tali sumbu, dan lakban hitam. Bahan penelitian meliputi isolat konsorsium bakteri termofilik SSA14 & SSA16 serta variasi limbah substrat pertanian (tongkol jagung, jerami padi, sekam padi, serta glukosa sebagai kontrol).

Tahapan Penelitian

Persiapan Penelitian

Semua alat dicuci, dikeringkan, dan disterilisasi menggunakan *autoclave*. *Broth Thermophilic Medium* dibuat sesuai formulasi Khater *et al* (2015) (NaHCO_3 2,5; NH_4Cl 0,2; KH_2PO_4 0,42; KCl 0,33; NaCl 0,3; K_2HPO_4 1,26; $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,15; MgCl_2 3,15; glukosa 5;

dan *yeast extract* 1) dalam gram/liter dan dilarutkan dengan aquadest hingga 1000 mL, dipanaskan menggunakan *hot plate* hingga homogen, dan disterilisasi menggunakan *autoclave* pada suhu 121°C dengan tekanan 15 psi selama 15 menit. Sementara untuk ekstrak limbah pertanian dicuci, dikeringkan di bawah sinar matahari, lalu dioven pada suhu 50°C selama 7 hari. Tahap selanjutnya dihaluskan hingga menjadi serbuk untuk substrat (Irdawati *et al.*, 2020). Sebanyak 50 g serbuk direndam dalam larutan NaCl selama 5 jam pada suhu 28°C, dibilas, dan kembali direndam dalam larutan NaOH 10% selama 24 jam. Filtrat disentrifugasi pada 4000 rpm selama 30 menit. Supernatant dinetralkan dengan HCl 6N dan kembali disentrifugasi lagi pada 4000 rpm selama 30 menit. Supernatant kemudian ditambahkan etanol 95% (1:3) dan disentrifugasi pada 4000 rpm selama 30 menit. Tahap akhir, pellet diambil dan menjadi substrat limbah pertanian sesuai yang diinginkan (Richana, 2007).

Regenerasi Bakteri

Biakan bakteri SSA14 dan SSA16 diambil menggunakan jarum ose, diinokulasi ke medium agar miring, dan diinkubasi pada inkubator di suhu 50°C selama 3–5 hari.

Persiapan Bioreaktor MFC

Dual-chamber reactor disiapkan dengan kompartemen anoda berisi medium cair (*Broth Thermophilic Medium*) yang glukosanya diganti dengan substrat variasi limbah pertanian, sedangkan katoda diisi dengan akuades. Elektroda Zn digunakan untuk anoda sedangkan Cu pada katoda, dihubungkan ke multimeter digital melalui jembatan garam.

Pembuatan Konsorsium Bikultur Bakteri Termofilik SSA

Pada variasi substrat isolat SSA 14 dan SSA 16 masing-masing diambil sebanyak 5 ose dari agar miring lalu dimasukkan ke dalam tabung reaksi berisi garam fisiologis (NaCl 0,85%) sebanyak 5 mL dan disetarakan dengan larutan Mc Farland 1. Sebanyak 2,5 mL suspensi bakteri dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang berisi medium cair (*Broth*

Thermophilic Medium) 22,5 mL, inkubasi dilakukan di dalam *incubator shaker* selama 24 jam pada suhu 60°C. Konsentrasi substrat dimasukkan ke dalam tabung anoda 250 ml yang berisi medium cair sebanyak 200 mL yang berisi substrat sesuai dengan perlakuan, glukosa sebagai kontrol, jerami padi 5gr/l, sekam padi 5 gr/l, bongkol jagung 5 gr/l, dan diinkubasi selama 24 jam dengan pengulangan dilakukan secara triplo (Irdawati *et al.*, 2023). Konsorsium bikultur bakteri termofilik SSA 14 dan SSA 16 diambil dengan perbandingan 1:1 (Fu *et al.*, 2015), lalu dicampurkan dengan medium cair sebagai kontrol dan medium cair yang glukosanya telah diganti menjadi substrat pertanian (sekam padi, jerami padi, dan tongkol jagung).

Pengukuran Kinerja MFC

Pengukuran dilakukan selama 24 jam, dengan setiap 2 jam sekali dilakukan pengukuran kemudian dicatat (Sulistiyawati, Rahayu & Purwitaningrum, 2020). Hasil pengukuran dihitung dalam tegangan (mV) yang dihasilkan dari konsorsium bikultur bakteri termofilik dengan variasi substrat yang berbeda menggunakan alat digital multimeter dan untuk melihat seberapa banyak daya atau energi yang dihasilkan (*Power Density*) (Nugroho, Amaliyah & Kirom, 2020).

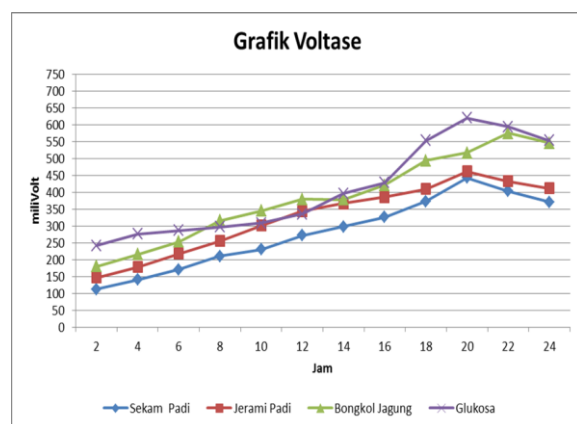
Analisis Data

Data hasil pengukuran penelitian dianalisis secara deskriptif dan diinformasikan dalam bentuk grafik.

Hasil dan Pembahasan

1. Grafik Voltase Variasi Limbah Substrat Pertanian

Grafik voltase dalam sistem MFC konsorsium bakteri termofilik SSA 14 & 16 dengan memanfaatkan variasi limbah substrat pertanian menunjukkan pola pertumbuhan bakteri yang seimbang. Keseluruhan siklus pertumbuhan bakteri dapat terlihat melalui kurva pertumbuhan pada setiap fasenya yaitu: fase lag, eksponensial, stasioner dan fase kematian. Setiap fase dapat merepresentasikan naik atau turunnya hasil dari pola pertumbuhan bakteri (Suherman, Irdawati & Andrian, 2024).



Gambar 1. Grafik pertumbuhan dan hasil voltase isolate konsorsium SSA 14&16 pada variasi substrat limbah pertanian

Pada fenomena penurunan tegangan terjadi karena sumber karbon membatasi metabolisme bakteri di dalam MFC. Dengan kata lain, setiap kali bahan organik mulai menipis, pembangkitan listrik akan mereda karena rendahnya metabolisme mikroba yang terjadi di dalam MFC (Barua & Deka, 2010).

2. Rata-rata Voltase Optimum

Hasil pengukuran voltase dianalisis berdasarkan performa terbaik yang dicapai pada jam ke-22. Data yang diperoleh kemudian dirata-ratakan guna memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai efektivitas masing-masing substrat dalam mendukung produksi biolistrik.

Tabel 1. Hasil voltase isolat konsorsium SSA 14&16 pada variasi substrat limbah pertanian

No	Perlakuan	Rata-rata
1	Sekam Padi	0,40400
2	Jerami Padi	0,43300
3	Bongkol Jagung	0,57633
4	Glukosa (kontrol)	0,59467

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan tongkol jagung sebagai substrat dalam sistem bioelektrokimia mampu menghasilkan voltase sebesar 0,57633 Volt, nilai yang mendekati voltase dari substrat kontrol berbasis glukosa yang mencapai 0,59467 Volt. Hasil ini mengindikasikan bahwa bongkol jagung memiliki potensi sebagai sumber bahan

organik yang dapat mendukung aktivitas elektrogenik mikroorganisme. Sementara itu, penggunaan sekam padi dan jerami padi menghasilkan voltase yang lebih rendah, masing-masing sebesar 0,40400 Volt dan 0,43300 Volt. Secara kuantitatif, terdapat kecenderungan bahwa tongkol jagung memiliki kemampuan menghasilkan voltase yang lebih tinggi sebagai substrat bagi konsorsium bakteri termofilik dibandingkan substrat limbah pertanian yang lain dalam penelitian ini. Meskipun glukosa tetap menghasilkan voltase tertinggi dalam penelitian ini, hasil yang diperoleh dari limbah pertanian, khususnya tongkol jagung, tetap menunjukkan potensi yang menjanjikan dalam aplikasi *Microbial Fuel Cell* (MFC).

Pembahasan

1. Grafik Voltase Variasi Limbah Substrat Pertanian

Grafik voltase yang diperoleh dari sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC) menggunakan konsorsium bakteri termofilik SSA 14&16 dengan variasi substrat limbah pertanian menunjukkan dinamika bioelektrokimia yang selaras dengan fase-fase pertumbuhan mikroorganisme. Pola ini mencerminkan bagaimana kemampuan metabolik mikroba dalam merombak substrat organik berkontribusi secara langsung terhadap listrik yang dihasilkan. Pada awal inkubasi, voltase meningkat secara bertahap, mencerminkan fase lag di mana sel-sel bakteri mulai beradaptasi dengan lingkungan substrat yang tersedia. Adaptasi ini melibatkan aktivasi jalur metabolisme khusus untuk degradasi lignoselulosa, sintesis enzim ekstraseluler, serta pembentukan struktur biofilm pada permukaan elektroda. Selama fase ini, transfer elektron relatif rendah karena aktivitas metabolik belum optimal. Fase eksponensial ditandai dengan kenaikan voltase yang signifikan, menunjukkan percepatan aktivitas metabolik bakteri. Pada titik ini, konversi substrat organik menjadi senyawa perantara berlangsung intensif, yang kemudian digunakan dalam proses respirasi aerobik untuk menghasilkan elektron. Elektron yang dihasilkan selanjutnya ditransfer ke elektroda anoda, sementara kestabilan sistem dipertahankan melalui penggunaan jembatan garam yang memungkinkan aliran ion dan menjaga

keseimbangan muatan antara ruang anoda dan katoda.

Menurut Saha *et al.* (2019), produksi listrik mengalami peningkatan seiring berlangsungnya fase eksponensial dalam pertumbuhan mikroorganisme, namun kemudian mengalami penurunan ketika ketersediaan nutrisi di medium fermentasi mulai terbatas. Fenomena ini terlihat dari penurunan voltase yang teramati pada jam ke-24, yang mengindikasikan peralihan dari fase logaritmik menuju fase stasioner akibat keterbatasan substrat. Sejalan dengan hal tersebut, Sulistijowati (2012) menjelaskan bahwa fase stasioner ditandai dengan akumulasi metabolit hasil aktivitas seluler serta berkurangnya kandungan nutrisi di lingkungan, sehingga memicu terjadinya kompetisi antar sel untuk memperoleh nutrisi, yang pada akhirnya menyebabkan sebagian sel mengalami kematian sementara sebagian lainnya mampu mempertahankan pertumbuhan. Puncak voltase terjadi pada jam ke-22, sementara pada jam ke-24 grafik menunjukkan penurunan voltase secara bertahap. Fase ini mengindikasikan peralihan ke fase stasioner dan akhirnya fase kematian. Berkurangnya tegangan disebabkan oleh dua faktor utama: berkurangnya ketersediaan substrat organik sebagai sumber karbon utama dan akumulasi produk metabolit toksik yang menghambat aktivitas enzimatik serta efisiensi transfer elektron. Mekanisme ini juga sejalan dengan laporan Vestimarta & Irdawati (2024), yang menegaskan bahwa keberlanjutan energi listrik dalam MFC sangat tergantung pada ketersediaan substrat yang mudah didegradasi dan lingkungan yang mendukung pertumbuhan mikroba secara optimal.

2. Voltase Optimal dari Variasi Limbah Substrat Pertanian

Keunggulan tongkol jagung dibandingkan sekam padi dan jerami padi salah satunya dapat dikaitkan dengan komposisi lignoselulosa. Tongkol jagung memiliki kandungan hemiselulosa yang tinggi, yang dapat dihidrolisis menjadi gula sederhana dan mendukung metabolisme mikroorganisme elektrogenik dalam menghasilkan elektron dan proton. Sebaliknya, kandungan lignin yang lebih tinggi pada jerami dan sekam padi dapat menghambat proses degradasi dan mengurangi efisiensi konversi energi (Lynd *et al.*, 2002; Chandra,

Takeuchi & Hasagawa, 2007). Kandungan lignin yang relatif rendah mempermudah akses enzim terhadap hemiselulosa dan selulosa, menjadikan tongkol jagung sebagai substrat yang unggul dalam penelitian ini.

Lignin yang bersifat hidrofobik dan resisten terhadap degradasi mikroba, sering menjadi penghambat dalam proses konversi energi. Kandungan lignin pada sekam padi turut menjadi tantangan karena lignin sulit didegradasi oleh bakteri (Matin & Hadiyanto, 2018). Lignin merupakan senyawa kompleks yang menyusun dinding sel tanaman dan cukup sulit didegradasi secara alami (Prakoso *et al.*, 2014). Lignin memiliki struktur yang kompleks dan heterogen yang berikatan dengan selulosa dan hemiselulosa (Karim, Syahrudin & Bahri, 2022). Lignin membentuk struktur pelindung yang menghalangi akses bakteri ke selulosa dan hemiselulosa, sehingga mengurangi efisiensi transfer elektron (Hendriks & Zeeman, 2009). Lignin perlu dihilangkan agar selulosa dan hemiselulosa dapat dikonversi (Novia *et al.*, 2017). Semakin sederhana senyawa yang dimiliki maka akan semakin baik bagi perolehan listrik karena proses metabolisme bisa dilakukan dengan waktu yang singkat (Zulfikar, Tamjidillah & Ramadhan, 2021).

Periode stabil untuk pembangkit listrik dengan jerami padi biasanya lebih lama dibandingkan substrat murni lainnya seperti glukosa, asetat (Bond & Lovley, 2003), dan xilosa (Huang, Zeng & Angelidaki, 2008). Periode stabil yang lebih lama untuk pembangkit listrik ini disebabkan oleh komposisi substrat lignoselulosa yang berbeda dari jerami padi (Hassan *et al.*, 2014). Penelitian Singh dan Kumar (2019) menunjukkan terdapat tiga faktor utama yang menyebabkan jerami padi dan sekam padi tidak dapat didegradasi secara sempurna oleh bakteri, yaitu struktur lignoselulosa yang kaku, kandungan silika yang tinggi, dan rasio C/N (*Carbon and Nitrogen*) yang tidak seimbang. Degradasi lignoselulosa memerlukan enzim seperti selulase dan hemiselulase yang sering kali diproduksi dalam jumlah terbatas oleh mikroorganisme tertentu. Struktur lignoselulosa yang kaku pada jerami padi bertindak sebagai perisai alami untuk perlindungan struktural yang membatasi mikroba untuk mendegradasi dua komponen karbohidrat secara efisien (yaitu selulosa dan

hemiselulosa) (Kaur & Phutela, 2016). Sementara sekam padi juga memiliki struktur lignoselulosa yang terdiri dari serat-serat selulosa yang dilapisi matriks lignin, sehingga memberikan sifat yang kuat dan kaku (Wijaksono, Rakhmawati & Amandha, 2021). Hal ini menambah kompleksitas proses degradasi pada jerami dan sekam padi (Rabaey & Verstraete, 2005).

Liu, Xu & Long (2011) melaporkan kandungan silika yang tinggi sebagai komponen unsur dalam jerami padi, hadir dalam bentuk silika oksida sekitar 75%. Struktur sekam padi dan jerami padi cenderung lebih kompak, dengan lapisan silika yang menghambat aksesibilitas enzim dan mikroba ke jaringan lignoselulosa (Khaleghian, Molaverdi & Karimi, 2017; Bazargan *et al.*, 2020). Rasio C/N jerami padi adalah faktor lain yang mempengaruhi keseimbangan nutrisi mikroba dan penyangga pH dari proses degradasi. Jerami padi mengandung 51,76% C organik, 0,65% nitrogen, 0,20% fosfor, 0,30% kalium dan memiliki rasio C: N yang tinggi (Goyal & Sindhu, 2011). Sementara untuk sekam padi mengandung rasio C: N yang tinggi sekitar 85:1 dan kaya akan silika dan lignin yang membuatnya sulit untuk didegradasi (Thiyageshwari *et al.*, 2018). Sedangkan untuk tongkol jagung dicirikan oleh rasio C/N sekitar 50, yang membuat penggunaan co-substrat yang kaya N sangat direkomendasikan (Surra *et al.*, 2019).

Krishania *et al* (2013) telah melaporkan kisaran optimum rasio C/N antara 20 dan 30, dan menyebutkan bahwa di luar batas ini, akan terjadi proses penghambatan degradasi. Hal ini menjadi tantangan yang menyebabkan biodegradabilitas jerami dan sekam padi menurun. Karbon berperan sebagai sumber energi bagi mikroorganisme, sedangkan nitrogen berperan besar dalam meningkatkan populasi mikroba (Veluchamy & Kalamdhad, 2017). Kandungan nitrogen yang tinggi bisa menyebabkan akumulasi amonia (NH₃), yang dapat bersifat toksik bagi bakteri elektrogenik dalam anoda MFC. Hal ini bisa menghambat pertumbuhan bakteri, menurunkan efisiensi pemecahan substrat, dan akhirnya mengurangi produksi elektron, sehingga voltase lebih rendah.

Tariq *et al* (2021) melakukan penelitian terhadap konsentrasi rasio C/N dan pengaruhnya terhadap voltase yang dihasilkan. Pada

konsentrasi rasio C/N terbaik dalam menghasilkan voltase ada di rasio perbandingan 20:1 (557 mV). Hal ini disebabkan oleh jumlah bahan organik yang lebih tinggi pada 20:1 yang dapat didegradasi oleh mikroorganisme. Lebih banyak degradasi bahan organik berarti lebih banyak jumlah elektron yang tersedia untuk mengurangi ion nutrisi bertindak sebagai akseptor elektron akhir. Elektron dan proton yang dilepaskan oleh reaksi redoks di anoda berpindah ke katoda yang menghasilkan biopotensial yang membantu dalam pembangkitan tegangan (Mohan *et al.*, 2009). Penelitian oleh Khudzari, Tartakovsky & Ragahavan (2016) juga turut menunjukkan rasio (C/N 24) memiliki produksi daya yang lebih besar dengan kepadatan daya maksimum 5,29 mW/m² (71,43 mW/m³), yang menunjukkan kondisi yang lebih menguntungkan untuk pertumbuhan mikroba. Berbagai metode diteliti untuk mengatasi persoalan ini, salah satunya adalah dengan menggunakan kultur campuran untuk mendegradasi substrat yang ada. Hal ini memungkinkan untuk menemukan strain baru dengan kapasitas degradasi selulosa yang baik atau membangun sistem ko-kultur baru untuk menghasilkan listrik dengan limbah pertanian sebagai sumber karbon (Cao *et al.*, 2023). Strategi yang dapat dilakukan salah satunya dengan penggunaan konsorsium bakteri. MFC dengan komunitas kultur campuran cenderung menunjukkan kinerja lebih baik dibandingkan kultur murni, karena kerjasama metabolik antar mikroorganisme yang berbeda memperkuat toleransi dan kemampuan metabolisme substrat kompleks, sehingga mengoptimalkan kerja sama komunitas bakteri yang bertujuan untuk meningkatkan performa MFC (Li *et al.*, 2018). Selain itu, kultur campuran diketahui lebih produktif dan tahan lama dibandingkan kultur murni, karena tidak memerlukan kondisi steril yang ketat dan lebih efisien dalam memanfaatkan substrat yang kompleks (Verma *et al.*, 2021).

Penelitian ini menunjukkan hasil yang lebih baik dalam penggunaan limbah substrat pertanian daripada penelitian sebelumnya. Penggunaan sekam padi sebagai substrat dalam MFC dalam penelitian Wang *et al* (2013) menghasilkan voltase listrik sebesar 264 mV, penelitian Khoirunnisa *et al* (2020) menggunakan limbah jerami padi mendapatkan

hasil 352 mV, sedangkan penelitian Wang *et al* (2018) menggunakan limbah substrat jagung menghasilkan voltase sebesar 248 mV. Penggunaan konsorsium bakteri termofilik (SSA 14 & 16) dalam penelitian ini menunjukkan bahwa pemakaian konsorsium lebih baik dalam mendegradasi limbah substrat pertanian. Mikroba dalam konsorsium mempunyai peluang yang besar untuk memperoleh energi dan bertahan hidup karena dapat saling memanfaatkan koenzim atau eksoenzim yang diekskresikan oleh mikroba lainnya, selain itu mikroba lainnya dapat menguraikan substrat yang telah didegradasi sebelumnya oleh mikroba (Septiningrum, Apriana & Chandra, 2011). Secara keseluruhan, biofilm anoda yang diperkaya untuk substrat tertentu memiliki potensi untuk menyesuaikan diri dengan substrat lain dalam waktu singkat tergantung pada jenis substrat (Chae *et al.*, 2009).

Kesimpulan

Penggunaan isolat konsorsium *bioelectrigens* termofilik SSA 14&16 dan pemanfaatan variasi limbah substrat pertanian berpotensi menghasilkan energi listrik (voltase). Pola grafik voltase menunjukkan bagaimana kemampuan metabolik mikroba dalam merombak substrat organik berkontribusi secara langsung terhadap listrik yang dihasilkan. Hasil voltase pada pengukuran optimum dengan tongkol jagung (0,57633 V) memiliki hasil yang hampir sama dengan glukosa (0,59467 V) sebagai kontrol. Sementara sekam padi (0,40400 V) dan jerami padi (0,43300 V) lebih rendah tegangan listrik yang dihasilkan. Perbedaan dalam menghasilkan voltase tertinggi disebabkan adanya komposisi selulosa, hemiselulosa lignin, kandungan silika, dan rasio C/N yang berbeda-beda.

Referensi

Arigeni, R., Kirom, M. R., & Qurthobi, A. (2019). Analisis Produksi Energi Listrik Pada Microbial Fuel Cell Menggunakan Substrat Tongkol Jagung Dengan Kontrol Suhu. *eProceedings of Engineering*, 6(1): 1091-1096.
<https://openlibrarypublications.telkomuni>

- [versity.ac.id/index.php/engineering/article/view/8883/0](https://www.versity.ac.id/index.php/engineering/article/view/8883/0)
- Barua, P. K., & Deka, D. (2010). Electricity Generation from Biowaste Based Microbial Fuel Cell. *International Journal of Energy, Information, and Communications*, 1(1): 77-92. DOI : https://www.researchgate.net/publication/281767156_Electricity_generation_from_biowaste_based_microbial_fuel_cells
- Bazargan, A., Wang, Z., Barford, J. P., Saleem, J., & McKay, G. (2020). Optimization of the Removal of Lignin and Silica from Rice Husks with Alkaline Peroxide. *Journal of Cleaner Production*, 260. 120848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120848>
- Bond, D. R. & Lovley, D. R. (2003). Electricity Production by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes. *Appl Environ Microbiology* 69(3):1548-1555. DOI: 10.1128/AEM.69.3.1548-1555.2003
- Cao, L., Sun., H., Ma, Y., Lu, M., Zhao, M., Li, E., & Liu, Y. (2023). Analysis and Enhancement of the Energy Utilization Efficiency of Corn Stover using Strain Lsc-8 in a Bioelectrochemical System. *Microbial Cell Factories*, 22 (54). DOI: <https://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12934-023-02058-6>
- Chae, K. J., Choi, M. J., Lee, J. W., Kim, K. Y & Kim, I. S. (2009). Effect of Different Substrates on Performance, Bacterial Diversity, and Bacterial Viability in Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 3518-3525. DOI:10.1016/j.biortech.2009.02.065.
- Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2007). Methane Production from Lignocellulosic Agricultural Crop Wastes: A Eeview in Context to Second-Generation Biofuel Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3): 1462-1476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.035>
- Dai, K., Wen, J. L., Zhang, F., Ma, X. W., Cui, X. Y., Zhang, Q., Zhao, T. J., & Zeng, R. J. (2017). Electricity Production and Microbial Characterization of Thermophilic Microbial Fuel Cells.

- Bioresour Technology*, 243:512-519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.167>
- Flores, S. R. (2022). Generation of Electricity from Agricultural Waste. *Green Energy and Environmental Technology*: 1–6. DOI: <https://doi.org/10.5772/geet.11>
- Fu, Q., Fukushima, N., Maeda, H., Sato, K., & Kobayashi, H. (2015). Analisis Bioelektrokimia Sel Bahan Bakar Mikroba Hipertermofilik yang Menghasilkan Listrik pada Suhu di atas 80⁰ C. *Biosains, Bioteknologi, dan Biokimia*, 79 (7), 1200-1206. DOI: <https://doi.org/10.1080/09168451.2015.1015952>
- Goyal, S. & Sindhu, S. S. (2011). Composting of Rice Straw Using Different Inocula and Analysis of Compost Quality. *Microbiology Journal*, 1(4):126-138. DOI:10.3923/mj.2011.126.138. <https://scialert.net/abstract/?doi=mj.2011.126.138>
- Hassan, S. H. A., Sanaa, M. F., Rab, G. E., Rahimnejad, M., Ghasemi, M., Joo, J.H., Ok, Y. S., Kim, I. S., & Oh, S.E. (2014). Electricity Generation from Rice Straw using a Microbial Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy XXX*, 1-7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.259>.
- Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to Enhance the Digestibility of Lignocellulosic Biomass. *Bioresour Technology*, 100(1), 10-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>
- Huang, L., Zeng R. J., & Angelidaki I. (2008). Electricity Production from Xylose using a Mediator-less Microbial Fuel Cell. *Bioresour Technol*, 99(10):4178-4184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.067>
- Irdawati, I., Auliya, P. R., Putri, D. H., Handayani, D., & Yusrizal, Y. (2023). Kemampuan Konsorsium Trikultur Bakteri Termofilik dari Sumber Air Panas Mudiak Sapan untuk Menghasilkan Biofuel. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9 (4): 2265-2270. DOI: 10.29303/jppipa.v9i4.3480
- Irdawati, I., Sofiyana, A., Advinda, L., Fiffendy, M., Syamsuardi, S., Agustien, A., Rilda, Y., & Yahya, Y. (2020). Optimizing of Agricultural Waste Substrate as an Alternative Medium for Xylan in Producing Xylanase Enzymes by Thermophilic Bacteria. *Journal of Physics: Conference Series* 1940 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/1940/1/012052.
- Karim, I., Syahrudin., & Bahri, S. (2022). Kandungan Selulosa, Hemiselulosa, dan Lignin Jerami Padi yang Difermentasi dengan Berbagai Probiotik. *Jambura Journal Animal Science*, 6(1): 13-21. DOI: <https://doi.org/10.35900/jjas.v6i1.19241>
- Kaur, K., & Phutela, U. G. (2016). Enhancement of Paddy Straw Digestibility and Biogas Production by Sodium Hydroxide-microwave Pretreatment. *Renew. Energy* 92, 178-184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.083>
- Khoirunnisa, N. S., Santosa, D. A., & Syaiful, A. (2020). *Performa Microbial Fuel Cell dengan Substrat Jerami Padi Hasil Pra-Perlakuan NaOH-Gelombang Mikro dan Inokulasi Bakteri Selulolitik*. Thesis. Institut Pertanian Bogor. Jawa Barat, Indonesia. DOI: <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/105198>
- Khaleghian, H., Molaverdi, M., & Karimi, K. (2017). Silica Removal from Rice Straw to Improve its Hydrolysis and Ethanol Production, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(35). DOI:10.1021/acs.iecr.7b02830.
- Khudzari, J. M., Tartakovsky, B. & Raghavan, G. S. V. (2016). Effect of C/N Ratio and Salinity on Power Generation in Compost Microbial Fuel Cells. *Waste Management*, 48 :135-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.022>
- Krishania, M., Kumar, V., Vijay, V. K., & Malik, A., (2013). Analysis of different techniques used for improvement of biomethanation process: a review. *Fuel*

- 106, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.007>
- Liu, Z., Xu, A., & Long, B. (2011). Energy from combustion of rice straw: status and challenges to China. *Energy Power Eng.* 03, 325-331. DOI: <https://doi.org/10.4236/epe.2011.33040>
- Li, M., Zhou, M., Tian, X., Tan, C., McDaniel, C. T., Hassett D. J., & Gu, T. (2018). Microbial Fuel Cell (MFC) Power Performance Improvement through Enhanced Microbial Electrogenicity. *Biotechnol Adv.* 36(4):1316-1327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.04.010>
- Lynd, L. R., Weimer, P. J., Zyl, V. W. H., & Pretorius, I. S. (2002). Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 66(3): 506-577. DOI: 10.1128/MMBR.66.3.506-577.2002.
- Ma'Ruf, A., Pramudono, B., & Aryanti, N. (2017). Lignin Isolation Process from Rice Husk by Alkaline Hydrogen Peroxide: Lignin and Silica Extracted. *AIP Conference Proceedings*, 1823. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4978086>
- Matin, H. H. A. & Hadiyanto, H. (2018). Produksi Biogas dari Limbah Sekam Padi dengan Metode State Anaerobic Digestion (SSAD). *E3S Web of Conference* 31, 02007. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183102007>
- Mohammadi, F., Nezhaad, G. R. V., Rahawi, N. A., & Gholipour, S. (2023). Microbial Electrochemical Systems for Bioelectricity Generation: Current State and Future Directions. *Results in Engineering* 20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101619>
- Novia., Wijaya, D. & Yanti, P. (2017). Pengaruh Waktu Delinifikasi terhadap Lignin dan Waktu SSF Terhadap Etanol Pembuatan Bioetanol dari Sekam Padi. *Jurnal Teknik Kimia*, 23(1): 19-27. DOI: <https://garuda.kemdikbud.go.id/documents/detail/2396628>
- Nugroho, I., Amaliyah, R. I. U., & Kirom, M. R. (2020). Pengaruh Lama Pembusukan Nasi Basi dan Rasio Volume Variasi Substrat Terhadap Produksi Energi Listrik pada Sistem MFC. *e-Proceeding of Engineering*. 7(1): 1230-1236. DOI: https://www.academia.edu/79317999/Pengaruh_Lama_Pembusukan_Nasi_Basi_Dan_Rasio_Volume_Variasi_Substrat_Terdapat_Produksi_Energi_Listrik_Pada_Sistem_MFC
- Prakoso, H. T., Widiastuti, H., Suharyanto., & Siswanto (2014). Eksplorasi dan Karakterisasi Bakteri Aerob Ligninolitik serta Aplikasinya untuk Pengomposan Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Menara Perkebunan*, 82(1): 15-24. DOI: <https://doi.org/10.22302/iribb.jur.mp.v82i1.27>
- Pratiwi, R., Rahayu, D. & Barliana, M. I. (2016). Pemanfaatan Selulosa dari Limbah Jerami Padi (*Oryza sativa*) sebagai Bahan Bioplastik. *Jurnal Sains dan Teknologi Farmasi Indonesia*, 3(3):83-91. DOI: <https://doi.org/10.15416/ijpst.v3i3.9406>
- Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial Fuel Cells: Novel Biotechnology for Energy Generation. *Trends in Biotechnology*, 23(6): 291-298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.008>
- Saha, T. C., Protity, A. T., Zohora, F. T., Shaha, M., Ahmed, I., Barua, E., & Salimullah, M. (2019). Aplikasi Sel Bahan Bakar Mikroba (MFC) untuk Pembangkitan Listrik dari Pembuangan Sampah dan Identifikasi Bakteri Elektrogenik Potensial. *Adv. Ind. Biotechnologi*, 2 (010). https://www.researchgate.net/profile/Abu-Hashem-2/publication/335881556_Microbial_Fuel_Cell_MFC_Application_for_Generation_of_Electricity_from_Dumping_Rubbish_and_Identification_of_Potential_Electrogenic_Bacteria_Adv_Ind_Bio-technol_2_010/links/5d81cbda92851c22d5e09cf5/Microbial-Fuel-Cell-MFC-Application-for-Generation-of-Electricity-from-Dumping-Rubbish-and-Identification-of-Potential-Electrogenic-Bacteria-Adv-Ind-Bio-technol-2-010.pdf
- Savvidou, M. G., Pandis, P. K., Mamma, D., Sourkouni, G., & Argirusis, C. (2022).

- Organic Waste Substrates for Bioenergy Production via Microbial Fuel Cells: A Key Point Review. *Energies* 15(15): 5616. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155616>
- Septiningrum, K., Apriana, & Chandra (2011). Produksi Xilanase dari Tongkol Jagung dengan Sistem Bioproses menggunakan *Bacillus circulans* untuk Pra-pemutihan Pulp. *Journal of Industrial Research (Jurnal Riset Industri)*. 5(1): 87-89. DOI: <https://www.neliti.com/id/publications/71909/produksi-xilanase-dari-tongkol-jagung-dengan-sistem-bioproses-menggunakan-bacill>
- Singh, R. & Kumar, S. (2019). A Review on Biomethane Potential of paddy straw and Diverse Prospects to Enhance its Biodigestibility. *Journal of Cleaner Production*, 217: 295-307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.207>
- Suherman, D., Irdawati, & Andrian (2024). Growth Pattern of Thermophilic Bacterial Isolate SSA-16 from Sapan Sungai Aro Hot Springs. *Serambi Biologi*, 9(2): 193-198. DOI: <https://doi.org/10.24036/srmb.v9i2.350>
- Sulistijowati, R. (2012). Potensi Filtrat *Lactobacillus acidophilus* ATCC 4796 sebagai Biopreservatif pada Rebusan Daging Ikan Tongkol. *Indonesian Journal of Applied Sciences*, 2(2). DOI: <https://doi.org/10.24198/ijas.v2i2.2734>
- Sulistiyawati, I., Rahayu, N. L., & Purwitaningrum, F. S. (2020). Produksi Biolistrik Menggunakan *Microbial Fuel Cell* (MFC) *Lactobacillus bulgaricus* dengan Substrat Limbah Tempe dan Tahu. *Majalah Ilmiah Biologi BIOSFERA: A Scientific Journal*, 37(2): 112-117. DOI: https://www.academia.edu/90286483/Produksi_Biolistrik_menggunakan_Microbial_Fuel_Cell_MFC_Lactobacillus_bulgaricus_dengan_Substrat_Limbah_Tempe_dan_Tahu
- Surra, E., Bernardo, M., Lapa, N., Esteves, I. A. A. C., Fonseca, I. & Mota, J. P. B. (2019). Biomethane Production Through Anaerobic Co-digestion with Maize Cob Waste Based on a Biorefinery Concept: A Review. *Journal of Environmental Management*, 249 109351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109351>
- Tariq, M., Wang, J., Malik, A. J., Akhter, M. S. & Mahmood, Q. (2021). Effect of Substrate Ratios on the Simultaneous Carbon, Nitrogen, Sulfur, and Phosphorous Conversions in Microbial Fuel Cells. *Heliyon*, 7(6). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07338>
- Thiyageshwari, S., Gayathri, P., Krishnamoorthy, R., Anandham, R. & Paul, D. (2018). Exploration of Rice Husk Compost as an Alternate Organic Manure to Enhance the Productivity of Blackgram in *Typic Haplustalf* and *Typic Rhodustalf*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2):358. DOI: 10.3390/ijerph15020358
- Utomo, Y. & Fadila, E. N. (2020). Isolasi Lignin dari Sekam Padi (*Oriza sativa* L.) serta Pemanfaatannya sebagai Adsorben Ion Cd (II). *Journal Cis-Trans*, 4(2): 19-26. DOI: 10.17977/um0260v4i22020p019.
- Veluchamy, C. & Kalamdhad, A. S. (2017). Influence of Pretreatment Techniques on Anaerobic Digestion of Pulp and Paper Mill Sludge : A Review. *Bioresource Technology*, 245: 1206-1219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.179>
- Verma, J., Kumar, D., Singh, N., Katti, S. S., & Shah, Y. T. (2021). Electricigens and Microbial Fuel Cells for Bioremediation and Bioenergy Production: A Review. *Environmental Chemistry Letters*. 19: 2091-2126. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-021-01199-7>
- Verma, P., Daverey, A., Kumar, A., & Arunachalam, K. (2021). Microbial Fuel Cell–A Sustainable Approach for Simultaneous Wastewater Treatment and Energy Recovery. *Journal of Water Process Engineering* 40, 101768. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101768>
- Vestimarta, A. W. & Irdawati. (2024). Produksi

- Biolistrik dengan Microbial Fuel Cell (MFC) dari Bakteri Termofilik. *Jurnal Pendidikan dan Sains*. 4(1): 359-366. DOI: 10.58578/masaliq.v4i1.2632
- Vestimarta, A. W., & Irdawati. (2024). Profil Kurva Pertumbuhan Bakteri Termofilik Isolat SSA-8 dari Sumber Air Panas Sapan Sungai Aro. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 8 (1): 15802-15808. DOI: <https://doi.org/10.31004/jptam.v8i1.14597>
- Vestimarta, A. W. (2024). *Potensi Konsorsium Bikultur Bakteri Termofilik Electrigens sebagai Microbial Fuel Cell (MFC) dalam Menghasilkan Energi Listrik*. Skripsi. Padang ID: Universitas Negeri Padang, Indonesia.
- Wang, M.C., Liu, T.T., Zhang, X.J., Wu, D. & F, L.P. (2018). Effect of Anode Substrate on the Performance of Microbial Fuel Cells for Dealing with the Straw Hydrolysate. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. 46(6). DOI: https://www.researchgate.net/publication/327988887_Effect_of_anode_substrate_on_the_performance_of_microbial_fuel_cells_for_dealing_with_the_straw_hydrolysate
- Wijaksono, T., Rakhmawati, A. & Arnandha, Y. (2021). Sekam Padi dan Batang Bambu sebagai Bahan Balok Komposit dengan menggunakan Matriks Resin Polyester. *Jurnal Reviews in Civil Engineering*, 5(2): 83-86. DOI:10.31002/rice.v5i2.4813
- Yadav, M., Sehrawat, N., Singh, M., Kumar, V., Sharma, A. K., & Kumar, S. (2021). Thermophilic Microbes-based Fuel Cells: an Eco-friendly Approach for Sustainable Energy Production. *Bioremediation for Environmental Sustainability*. pp. 235-246. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820318-7.00011-3>
- Zhang, Y., Fan., S., Liu, T., Omar, M. M. & Li, B. (2022). Perspectives into Intensification for Aviation Oil Production from Microwave Pyrolysis of Organic Wastes. *Chemical Engineering and Processing*. 176 108939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108939>.
- Zulfikar, E. S., Tamjidillah, M., & Ramadhan, M. N. (2021). Produktivitas Listrik Microbial Fuel Cell pada Substrat Limbah Air Rebusan Mie Instan. *Rotary*, 3(1): 69-80. DOI: https://scholar.google.co.id/citations?view_op=view_citation&hl=id&user=vC5nX4kAAAAJ&citation_for_view=vC5nX4kAAAAJ:maZDTaKrznsC