

LETTER OF ACCEPTANCE

No: 32/VOL.10 No.2/02/2026

Dear Adinda Fahira, Zahriah, Juniar Afrida

Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh

It's great pleasure that we notify you regarding the acceptance of your paper:

Paper ID : 34084

Title : **Peforma Plant Microbial Fuel Cell Pada Tanaman C3 dan C4: Studi Adaptasi Sistem Perakaran Kangkung (*Ipomea aquatica*) dan Bayam (*Amaranthus Spp*)**

Has been **ACCEPTED** for publication in Circuit: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro in Volume 10 No 2, August 2026.

Congratulation! Thank you very much for contributing to Circuit.

Banda Aceh, February 3th, 2026



Sadrina
Sadrina, M.Sc
Editor in Chief



POTENSI TANAMAN KANGKUNG (IPOMEA AQUATICA) DAN BAYAM (AMARANTHUS SPP) DALAM MENGHASILKAN TEGANGAN LISTRIK BERBASIS MIKROBA-TANAMAN (PLANT MICROBIAL FUEL CELL)

Adinda Fahira¹, Zahriah², Juniar Afrida³

¹²³ Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Islam Negeri Ar-raniry Banda Aceh

E-mail: adindafahira96@gmail.com

Submitted:

Accepted:

Published:

Abstract

*The persistent reliance on fossil fuels, coupled with their long-term scarcity, has necessitated the continuous development of sustainable energy alternatives. While renewable energy sources are expected to be environmentally friendly and harvestable from the ecosystem, comparative studies on the influence of root morphological adaptability and photosynthetic pathways of local plants in Plant Microbial Fuel Cell (P-MFC) systems remain limited. This quantitative experimental study aims to analyze the bioelectricity performance comparison between water spinach (*Ipomoea aquatica*), characterized by a C3 photosynthetic pathway and an adventitious root system, and spinach (*Amaranthus spp.*), which possesses a C4 pathway and a taproot system. Open Circuit Voltage (OCV) measurements were conducted over a 30-day period using graphite felt electrodes, with data collection performed daily at 11:00-12:00 AM WIB to capture peak photosynthetic activity. The results demonstrate an upward trend in voltage correlating with plant growth, reaching maximum values on day 30 of 208.8 mV for *I. aquatica* and 158.9 mV for *Amaranthus spp.* The average daily voltage of water spinach (135.14 ± 58.75 mV) significantly outperformed that of spinach (106.89 ± 29.22 mV). Although spinach theoretically possesses higher carbon fixation efficiency due to its C4 pathway, the adventitious root structure of water spinach proved more adaptive to waterlogged conditions. This adaptability provides a more effective rhizosphere area for electrogenic microbial activity compared to the taproot system of spinach, which exhibits sensitivity to saturated environments. This research highlights that root morphological adaptability to hydraulic conditions is a more critical parameter for P-MFC performance than photosynthetic pathways alone. Despite the theoretical importance of photosynthesis, this study finds that limitations in root adaptation impose a more significant constraint on energy production, with electron stability remains heavily influenced by fluctuations in temperature and solar intensity.*

Keywords: *Plant Microbial Fuel Cell (PMFC), Ipomoea aquatica, Amaranthus spp, Renewable Energy.*

Abstrak

Kebutuhan energi yang selama ini berasal dari bahan bakar fosil tidak tersedia dalam jangka waktu panjang sehingga penelitian mengenai energi alternatif terus dikembangkan. Sumber energi alternatif diharapkan memiliki sifat energi yang ramah lingkungan dan merupakan energi yang dapat diperbaharui melalui pemanfaatan lingkungan, namun kajian yang membandingkan pengaruh adaptabilitas morfologi akar dan jalur fotosintesis tanaman lokal pada sistem PMFC masih terbatas. Penelitian eksperimen kuantitatif ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan performa bioelektrisitas antara kangkung (*Ipomoea aquatica*) yang memiliki jalur fotosintesis C3 dengan sistem akar adventif, dan bayam (*Amaranthus spp*) dengan jalur fotosintesis C4 dan sistem akar tunggang. Pengukuran *Open Circuit Voltage* (OCV) dilakukan selama 30 hari menggunakan elektroda *graphite felt* dengan pengambilan data setiap pukul 11.00 -12:00 WIB guna mendapatkan hasil fotosintesis maksimal. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan tegangan seiring pertumbuhan tanaman, dengan nilai maksimum pada hari ke-30 mencapai 208,8 mV untuk kangkung dan 158,9 mV untuk bayam. Rata-rata tegangan harian kangkung ($135,14 \pm 58,75$ mV) secara signifikan melampaui bayam ($106,89 \pm 29,22$ mV). Meskipun bayam memiliki efisiensi fiksasi karbon C4 yang lebih tinggi secara teoritis, struktur akar adventif kangkung terbukti lebih adaptif terhadap lingkungan basah, sehingga menyediakan luas rizosfer yang

lebih efektif bagi aktivitas mikroba elektrogenik dibandingkan akar tunggang bayam yang sensitif terhadap lingkungan basah. Penelitian ini menekankan bahwa adaptabilitas morfologi perakaran terhadap kondisi air merupakan parameter yang lebih kritical bagi performa PMFC, meskipun secara teoritis jalur fotosintesis berperan besar, namun dalam pengamatan ini ditemukan bahwa kendala pada adaptasi akar lebih membatasi produksi energi, dengan stabilitas produksi elektron yang sangat dipengaruhi oleh fluktuasi suhu dan intensitas cahaya matahari.

Kata Kunci: *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC), Kangkung, Bayam, Energi Terbarukan.

Introduction

Energi adalah sumber daya yang dapat digunakan untuk melakukan berbagai proses kegiatan termasuk bahan bakar, listrik, energi mekanik dan panas, yang diperoleh baik secara langsung maupun melalui proses konversi atau transformasi [1]. Kebutuhan akan energi semakin meningkat seiring dengan kemajuan teknologi dan penambahan penduduk, energi yang selama ini berasal dari bahan bakar fosil tidak tersedia dalam jangka waktu panjang. Oleh karena itu, diperlukan sumber energi alternatif baru untuk memenuhi kebutuhan energi saat ini.

Energi alternatif, juga disebut sebagai energi terbarukan, mencakup sumber energi yang berfungsi sebagai pengganti bahan bakar fosil [2]. Penelitian mengenai energi alternatif semakin banyak dilakukan terutama energi alternatif yang bersumber dari alam serta dapat diperbaharui [3]. Energi alternatif diharapkan memiliki sifat energi yang ramah lingkungan dan merupakan energi yang dapat diperbaharui melalui pemanfaatan lingkungan itu sendiri seperti tumbuhan, contoh pemanfaatan biomassa pada tumbuhan dapat diperoleh dari mikroba tanaman yang menghasilkan energi listrik dari aktivitas mikroba dalam tanah dengan tumbuhan [4]. Oleh karena itu salah satu jenis energi terbarukan yang mungkin dapat dikembangkan di Indonesia adalah Sel Bahan Bakar Berbasis Mikroba Tanaman atau disebut juga *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC) [5].

Sel bahan bakar mikroba tanaman (*Plant Microbial Fuel Cell/PMFC*) merupakan teknologi yang sedang berkembang dan mampu menghasilkan listrik secara berkelanjutan dari tanaman hidup. Senyawa organik hasil sekresi akar (*rhizodeposisi*) akan dioksidasi oleh bakteri elektrokimia aktif di anoda, sehingga menghasilkan elektron. Elektron-elektron tersebut dialirkan menuju anoda dalam kondisi *anaerob* dengan tujuan untuk mencegah masuknya oksigen dari udara ke area anoda, yang dapat mempengaruhi reaksi yang terjadi pada anoda agar dapat berkerja secara optimal. Jika oksigen masuk ke area anoda, maka elektron akan digunakan untuk mereduksi oksigen, bukan untuk menghasilkan listrik. Penggunaan lahan basah sangat menunjang proses oksidasi mikroorganisme dalam tanah secara optimal, oleh karena itu PMFC paling ideal diterapkan di lahan basah. [6] Prinsip PMFC serupa dengan MFC (*Microbial Fuel Cell*) namun terdapat sedikit perbedaan pada MFC, dimana MFC hanya memanfaatkan mikroba sebagai sumber energi, sistem PMFC memerlukan tanaman untuk menciptakan biomassa yang nantinya menjadi sumber energi bagi mikroba dengan hasil fotosintesis.

PMFC memanfaatkan proses alami untuk mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Proses ini terjadi ketika hasil fotosintesis yang tereduksi di dalam tanah atau lumpur dioksidasi oleh mikroorganisme sehingga menghasilkan elektron, proton, dan karbon dioksida (CO₂). Elektron yang dihasilkan akan mengalir menuju anoda, sedangkan proton yang terbentuk akan bergerak menuju katoda. Perbedaan potensial listrik antara anoda dan katoda yang kemudian menghasilkan energi listrik [7]. Pemilihan tanaman yang digunakan dalam sistem PMFC juga dipertimbangkan dari aspek jalur fotosintesis tumbuhan. Jalur fotosintesis pada tumbuhan dibagi ke dalam beberapa bagian umumnya dikategorikan menjadi C₃ dan C₄, tanaman dengan jalur fotosintesis C₄, yaitu tanaman yang mengikat CO₂ dengan empat atom karbon, lebih efisien dalam menghasilkan energi karena mampu beradaptasi dengan

baik pada kondisi panas[8]. Namun, efisiensi fotosintesis belum tentu berbanding lurus dengan performa PMFC pada kondisi anaerob. Sementara itu, tanaman C3 memiliki kapasitas fotosintesis yang lebih rendah karena tanaman dengan C3 tidak hanya mengikat CO₂ namun juga oksigen untuk berfotosintesis[9].

Cahaya matahari berperan penting dalam menentukan produksi energi dan pertumbuhan tanaman pada proses fotosintesis. Oleh karena itu, negara-negara beriklim tropis seperti Indonesia memiliki potensi untuk pengembangan PMFC, karena dukungan kondisi geografis. Sebaliknya, negara-negara subtropis menghadapi tantangan saat musim dingin, di mana tanaman memasuki fase dormansi sehingga fotosintesis dan aktivitas mikroba menurun. Dengan memanfaatkan potensi lokal seperti tanaman kangkung dan bayam yang mudah dibudidayakan dan memiliki karakteristik mendukung, P-MFC menjadi solusi energi ramah lingkungan yang relevan untuk diterapkan di wilayah pedesaan maupun daerah terpencil di Indonesia.

Jenis tanaman yang digunakan dalam penelitian ini yaitu kangkung (*Ipomoea aquatica*) dan bayam (*Amaranthus spp*), pemilihan kangkung (*Ipomoea aquatica*) dan bayam (*Amaranthus spp*) dalam penelitian ini didasarkan pada aksesibilitas dan ketersediaannya yang melimpah di Indonesia, sehingga keduanya berpotensi besar untuk diimplementasikan sebagai sumber biomassa energi terbarukan yang murah dan berkelanjutan. Didukung oleh penelitian Apollon. W dkk yang menyatakan selain aspek ketersediaan, kedua tanaman ini dipilih untuk merepresentasikan perbandingan jalur fotosintesis yang berbeda yaitu, tanaman bayam (*Amaranthus spp*) termasuk tanaman C4, dan kangkung (*Ipomoea aquatica*) yang merupakan tanaman C3. Kangkung (*Ipomoea aquatica*) termasuk tanaman semi-akuatik berdaun sempit yang membentuk akar adventif saat batang bersentuhan dengan air atau tanah lembap, sehingga memperluas rizosfer dan mendukung aktivitas mikroba. Sebaliknya, bayam (*Amaranthus spp*) sebagai tanaman dikotil memiliki akar tunggang dan akar lateral dengan cakupan rizosfer lebih terbatas. Perbedaan ini memungkinkan keduanya digunakan sebagai bahan perbandingan dalam sistem P-MFC, karena perbedaan ini diperkirakan memengaruhi produksi biomassa dan rhizodeposisi, yang berdampak pada besarnya tegangan listrik yang dihasilkan.

Beberapa penelitian terdahulu telah meneliti tentang tanaman dengan jalur fotosintesis C4 dan C3 dalam menghasilkan energi listrik. Tanaman C3 seperti padi dan ilalang air menghasilkan daya 6–80 mW/m², sedangkan tanaman C4 seperti rumput tali hibrida memiliki daya tertinggi, yaitu 222 mW/m, Namun, kajian tersebut menyatakan bahwa rendahnya output listrik dan efisiensi pengumpulan elektron tetap menjadi tantangan utama PMFC,[5]. Selain itu, tanaman C3 seperti rumput payung dan rumput manna besar menghasilkan daya antara 6 - 67 mW/m², sementara tanaman C4 seperti eceng gondok dan rumput tandan menunjukkan performa lebih tinggi, mencapai hingga 224,93 mW/m² dan 163 mW/m, penelitian ini menyoroti adanya hambatan besar pada rendahnya efisiensi energi dibanding sistem bioelektrokimia lain serta kendala dalam implementasi skala besar yang belum terstandarisasi dengan baik[8].

Selanjutnya penelitian jenis tanaman C4 yaitu rumput air mancur, menghasilkan daya sebesar 220 mV. Sementara itu, tanaman dengan jalur fotosintesis C3 seperti rumput gajah menghasilkan daya sebesar 137.12 ± 13.08 mV. Baik tanaman C3 maupun C4 memiliki potensi untuk dimanfaatkan dalam sistem PMFC, tergantung pada kebutuhan daya dan kemampuan remediasi yang diinginkan, akan tetapi adanya kendala pada kurangnya pemahaman mendalam mengenai interaksi spesifik antara struktur komunitas mikroba rizosfer dengan karakteristik lingkungan yang mempengaruhi stabilitas produksi

bioelektrisitas[10]. Perbedaan utama penelitian ini dengan penelitian terdahulu terletak pada jenis tanaman yang digunakan, yaitu membandingkan dua tanaman dengan karakteristik fotosintesis dan sistem perakaran yang berbeda seperti kangkung (*Ipomoea aquatica*) dan bayam (*Amaranthus spp*) yang diperkirakan berpengaruh terhadap kinerja sistem PMFC.

Berdasarkan uraian diatas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan performa kelistrikan yang dihasilkan antara tanaman kangkung (*Ipomoea aquatica*) dan bayam (*Amaranthus spp*) dalam sistem PMFC dan mengidentifikasi kriteria tanaman lokal yang paling efektif untuk produksi energi, mempertimbangkan adanya perberbedaan antara efisiensi fotosintesis jalur C4 dan ketahanan akar terhadap kondisi anaerob. Penelitian ini penting dilakukan untuk memberikan informasi mengenai pemanfaatan tanaman konsumsi harian sebagai sumber energi alternatif. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan teknologi energi.

Method

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif dengan desain studi komparatif. Sifat penelitian ini adalah eksploratif-komparatif, yang bertujuan untuk mengeksplorasi potensi bioelektrisitas tanaman lokal sekaligus membandingkan secara langsung performa antara dua jenis tanaman dengan jalur fotosintesis dan morfologi akar yang berbeda. Variabel bebas tunggal (*one-factor*) dalam desain ini adalah jenis tanaman, yaitu kangkung (*Ipomoea aquatica*) dan bayam (*Amaranthus spp.*), sedangkan variabel terikatnya adalah tegangan listrik (mV) yang dihasilkan.

Unit analisis dalam penelitian ini terdiri dari 20 unit reaktor P-MFC yang terbagi secara merata ke dalam dua kelompok perlakuan, yaitu 10 unit untuk tanaman kangkung dan 10 unit untuk tanaman bayam. Setiap unit menggunakan wadah plastik berukuran 17 cm × 9 cm × 10 cm yang diisi dengan media tanah sebagai substrat pertumbuhan. Pada setiap reaktor menggunakan sepasang elektroda grafit dengan ukuran 10 cm × 7 cm. Anoda ditanam pada bagian dasar wadah guna menciptakan kondisi anaerob di area rizosfer, sementara katoda diletakkan di permukaan tanah (kondisi aerob) dengan jarak horizontal sebesar 3 cm dari posisi tanaman. Jarak vertikal antara anoda dan katoda dijaga konstan mengikuti kedalaman media tanah di dalam wadah. Seluruh komponen elektroda tersebut dihubungkan melalui kabel penghantar dan penjepit buaya menuju alat pengukuran. Seluruh spesifikasi teknis, mulai dari ukuran material hingga kedalaman peletakan elektroda, dibuat identik pada kedua jenis tanaman untuk memastikan bahwa variasi tegangan listrik yang dihasilkan merupakan representasi murni dari perbedaan aktivitas metabolisme perakaran dan bukan akibat dari perbedaan konfigurasi sistem.

Preparasi komponen PMFC diawali dengan penyiapan media tanah yang bersumber dari lahan persawahan dalam kondisi tidak berlumpur. Tanah tersebut terlebih dahulu dibersihkan dari kerikil dan sisa material organik, kemudian dilakukan pengukuran pH awal yang menunjukkan nilai dalam rentang 5,6 hingga 6,4. Untuk mengembalikan kondisi jenuh air yang diperlukan dalam sistem bioelektrokimia, tanah diberikan penambahan air secara bertahap hingga mencapai tekstur seperti lumpur.

Sebelum dilakukan penanaman, dilakukan pengukuran tegangan dasar pada kedua reaktor 1 hari sebelum penanaman untuk memverifikasi aktivitas awal mikroba tanah. Hasil pengukuran awal menunjukkan tegangan berkisar antara 2,7

mV hingga 4,8 mV melalui mekanisme *Microbial Fuel Cell* (MFC) Setelah itu, menanam kangkung dan bayam padang masing-masing wadah plastik. Berikut ini menunjukkan urutan proses penelitian.



Gambar 1. Diagram alur pengujian dan pembuatan PMFC dari tanaman kangkung dan bayam.

Eksperimen dilaksanakan selama 30 hari sejak 28 Desember 2025 sampai 26 Januari 2026 di area semi-outdoor lingkungan tempat tinggal peneliti untuk memudahkan pemantauan harian. Lokasi ini dipilih agar tanaman tetap mendapat paparan cahaya matahari namun terlindungi atap transparan guna mencegah gangguan air hujan langsung pada media tanah. Kedua unit reaktor diukur setiap harinya pada pukul 11.00–12.00 WIB. Rentang waktu tersebut dipilih karena merupakan periode intensitas cahaya matahari optimal dalam fotosintesis, pengukuran dilakukan menggunakan *Open Circuit Voltage*. Sistem menggunakan elektroda jenis *graphite felt* yang diintegrasikan ke dalam media tanam masing-masing spesimen.

Teknik analisis yang digunakan adalah statistik deskriptif, meliputi perhitungan rata-rata (*mean*) untuk melihat tren performa harian dan simpangan baku (*standard deviation*) guna mengukur tingkat fluktuasi serta stabilitas tegangan pada masing-masing tanaman. Data kemudian disajikan dalam bentuk grafik batang (*bar chart*) untuk memvisualisasikan perbandingan. Keterbatasan penelitian ini terletak pada adanya variabel lingkungan yang tidak terkendali sepenuhnya, sehingga analisis deskriptif dianggap lebih representatif dalam menjelaskan fenomena fluktuasi data yang diperoleh di lapangan.

Result and Discussion

Sistem *Plant Microbial Fuel Cell* (P-MFC) dalam penelitian ini menggunakan desain reaktor tunggal yang memanfaatkan spesimen *Ipomoea aquatica* (kangkung) dan *Amaranthus* (bayam). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa *Ipomoea aquatica* (kangkung) menghasilkan tegangan paling tinggi dengan nilai maksimum mencapai 208,8 mV, melampaui *Amaranthus* (bayam) yang hanya mencapai 158,9 mV. Sebagaimana disajikan pada Gambar.2, perkembangan

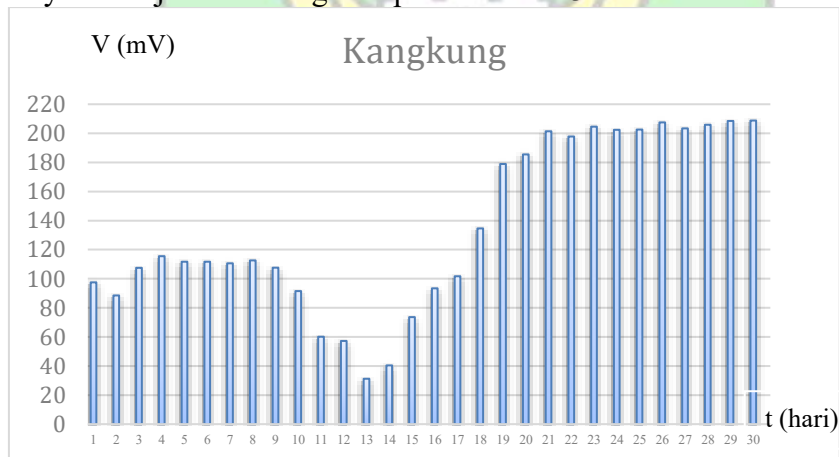
morfologi kedua spesimen setelah 30 hari.



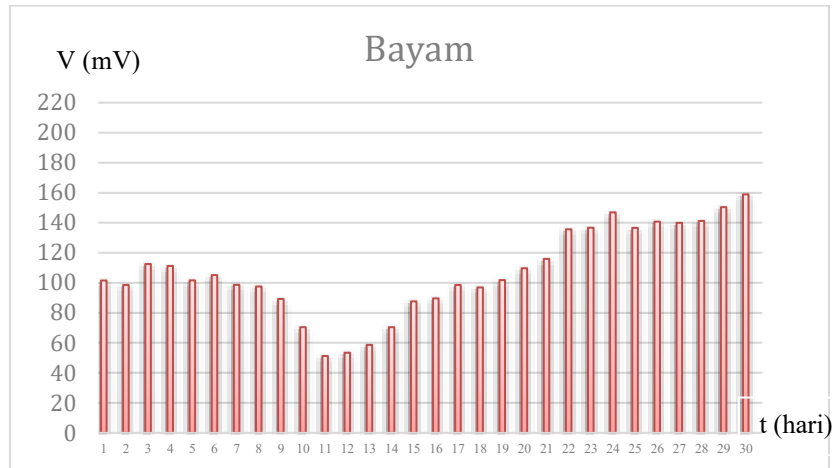
Gambar 2. Desain Penelitian PMFC

Berdasarkan Gambar.2, setelah 30 hari penelitian terlihat perbedaan signifikan pada adaptabilitas tanaman terhadap kondisi tergenang air. Kangkung menunjukkan pertumbuhan vegetatif yang stabil. Sebaliknya, bayam menunjukkan gejala hambatan pertumbuhan (*stunting*), yang mengindikasikan sensitivitas sistem akar tunggangnya terhadap kemampuan tanaman tumbuh dalam keadaan jenuh air. Hal ini dikarenakan bayam kurang mampu beradaptasi pada kondisi tanah tergenang karena kondisi anaerob membuat turunnya pertukaran gas antara tanah dan udara sehingga keadaan oksigen di tanah menjadi sedikit karena terdesak keluar oleh air dan menghambat laju difusi[11].

Performa tegangan listrik dari kedua jenis tanaman selama 30 hari masa observasi diukur dalam bentuk tegangan sirkuit terbuka (*Open Circuit Voltage*). Tren fluktuasi dan peningkatan tegangan harian yang dihasilkan oleh kangkung dan bayam disajikan dalam grafik pada Gambar.3 dan Gambar.4.



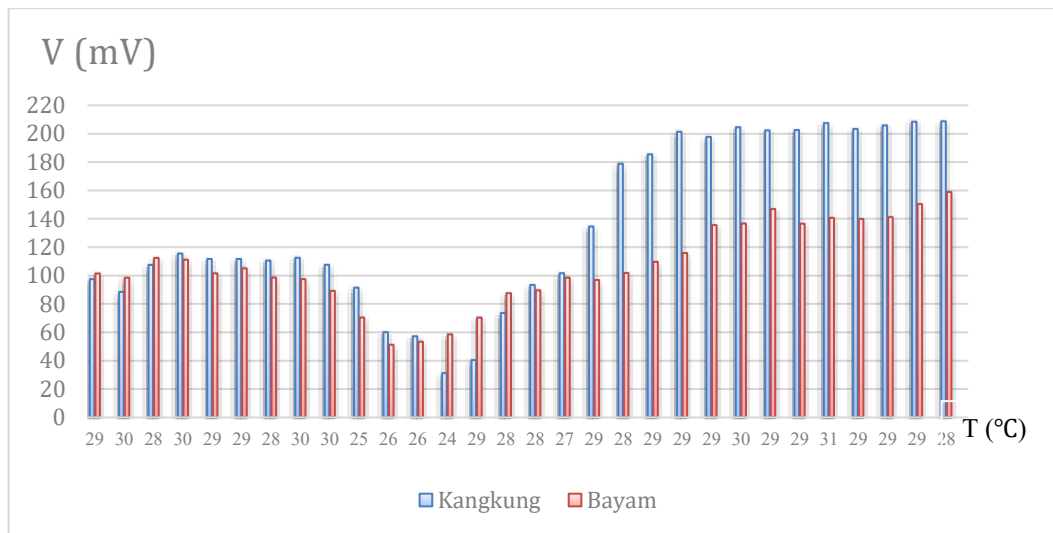
Gambar 3. Tegangan listrik kangkung selama 30 hari



Gambar 4. Tegangan listrik bayam selama 30 hari

Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa, tegangan listrik yang dihasilkan relatif meningkat seiring dengan pertumbuhan tanaman kangkung dan bayam, pada tujuh hari pertama tegangan masih fluktuatif dan relatif rendah karena disebabkan oleh fase adaptasi dari mikroorganisme dan juga perkembangan akar[12]. Memasuki minggu kedua terjadi penurunan suhu yang diakibatkan hujan yang terus menerus sehingga proses fotosintesis yang terjadi pada tumbuhan tidak optimal hal ini mengakibatkan tegangan listrik yang dihasilkan menurun. Hasil ini cocok dengan teori yang menyatakan bahwa mikroorganisme juga mereduksi eksudat akar dalam tanah[13]. Peningkatan tegangan terjadi secara signifikan akibat kenaikan suhu yang relatif stabil pada hari ke-15 sampai hari ke-30, sehingga voltase yang dihasilkan oleh kedua tanaman tidak menurun dan tegangan maximum yang dihasilkan oleh tanaman kangkung dan bayam terjadi pada hari ke-30 dengan tegangan sebesar 208,8 mV dan 158,9 dengan rata-rata tegangan yang dihasilkan oleh adalah 135,14 mV dan 106,89 mV.

Performa kelistrikan sistem PMFC sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama suhu harian yang memengaruhi metabolisme tanaman dan aktivitas mikroba elektrogenik. Untuk menganalisis hubungan tersebut, dilakukan pencatatan tegangan harian (*Open Circuit Voltage*) yang disandingkan dengan data suhu rata-rata pada saat pengukuran dilakukan. Kecenderungan variabel antara fluktuasi suhu dan *output* tegangan harian pada tanaman kangkung dan bayam selama 30 hari observasi disajikan pada Gambar.4 berikut.



Gambar 5. Tegangan listrik terhadap suhu

Berdasarkan Gambar 5. dapat diamati bahwa fluktuasi suhu lingkungan memiliki dampak linier terhadap tegangan listrik yang dihasilkan oleh kedua tanaman. Pada fase awal (hari ke-1 hingga ke-9), tegangan cenderung stabil pada kisaran 100–110 mV dengan suhu rata-rata 28°C–30°C. Rendahnya tegangan pada fase awal penelitian (minggu pertama) mengindikasikan adanya fase adaptasi mikroba. Fenomena ini terjadi karena mikroba memerlukan waktu untuk membentuk biofilm pada permukaan elektroda grafit guna transfer elektron yang stabil [14]. Kecepatan transisi dari fase adaptasi menuju produksi energi maksimal sangat bergantung pada kematangan sistem perakaran yang menyediakan eksudat akar sebagai sumber energi bagi mikroba rizosfer. Namun, terjadi penurunan tegangan yang drastis pada hari ke-10 hingga ke-13, di mana nilai tegangan mencapai titik terendah (berkisar antara 30 mV hingga 60 mV). Hal ini berkorelasi langsung dengan penurunan suhu lingkungan hingga mencapai 24°C yang disebabkan oleh curah hujan tinggi pada periode tersebut.

Nilai tegangan terendah tercatat pada saat suhu lingkungan mencapai 24°C, di mana tanaman bayam menghasilkan 58,6 mV dan kangkung sebesar 31,2 mV. Sebaliknya, performa optimal atau tegangan tertinggi dicapai pada kondisi suhu 30°C. Pada kondisi tersebut, kangkung mencatatkan nilai tegangan sebesar 208,8 mV, sementara pada hari yang sama, bayam menghasilkan 158,9 mV. Performa bioelektrisitas kangkung (*I. aquatica*) yang menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dibandingkan bayam (*Amaranthus spp*) menunjukkan bahwa struktur perakaran merupakan variabel determinan yang lebih dominan daripada efisiensi jalur fotosintesis. Hal ini terlihat dari selisih rata-rata tegangan harian sebesar 28,25 mV, di mana kangkung mencatat rata-rata $135,14 \pm 58,75$ mV, sedangkan bayam hanya mencapai $106,89 \pm 29,22$ mV. Meskipun bayam memiliki metabolisme C4 yang secara teoritis lebih efisien dalam memfiksasi CO₂, sensitivitas akar tunggangnya terhadap kondisi tergenang (*anoksik*) menghambat proses *rhizodeposisi*. Struktur akar tersebut membatasi interaksi antara akar dan mikroorganisme tanah, sehingga suplai substrat organik bagi mikroba elektrogenik menjadi lebih rendah dan berdampak pada kinerja sistem P-MFC [15].

Sebaliknya, kangkung sebagai tanaman semi-akuatik merespons kondisi tergenang dengan membentuk akar adventif [16]. Struktur ini memperluas area permukaan rizosfer, yang secara langsung meningkatkan situs keberadaan mikroba dan mempercepat difusi eksudat akar sebagai substrat karbon bagi bakteri [17]. Penurunan tegangan drastis pada hari ke-10 hingga ke-13 saat suhu mencapai 24°C membuktikan bahwa energi aktivasi mikroba sangat bergantung pada termal

lingkungan, suhu rendah menghambat transfer elektron dan aktivitas mikroba dalam mereduksi material organik di anoda. Sebaliknya, penguatan data terlihat ketika suhu kembali naik dan stabil pada rentang 28°C hingga 30°C, yang diikuti dengan peningkatan tegangan secara signifikan. Suhu yang lebih tinggi dalam rentang optimal tersebut meningkatkan laju reaksi biokimia dan mempercepat transfer elektron, sesuai dengan teori bahwa efisiensi bioelektrokimia sistem P-MFC sangat dipengaruhi oleh fluktuasi suhu dan intensitas cahaya matahari[18].

Nilai tegangan rata-rata yang diperoleh pada tanaman kangkung adalah $135,14 \pm 58,75$ mV dan pada bayam adalah $106,89 \pm 29,22$ mV. Jika dibandingkan dengan penelitian Pubianti, dkk (2025)[18]. yang mencapai 790 mV menggunakan eceng gondok, hasil ini memang lebih rendah. Dalam menghasilkan elektron aktivitas metabolik mikroba sangat bergantung pada rhizosfer tanaman[19]. Ketidakstabilan suhu yang dapat memengaruhi ketersediaan eksudat akar sehingga tegangan yang dihasilkan lebih rendah dan kemampuan adaptabilitas tanaman bayam dan kangkung tidak seoptimal tanaman air yang memiliki lingkungan lebih stabil.

Implikasi dari penelitian ini memberikan sudut pandang baru dalam seleksi jenis tanaman untuk sistem PMFC, yaitu dengan memprioritaskan karakteristik morfologi akar dan daya tahan tanaman terhadap kondisi jenuh air dibandingkan hanya terpaku pada jalur fotosintesisnya. Secara praktis, temuan ini membuka peluang besar bagi pengembangan energi alternatif berbasis masyarakat di Indonesia, khususnya di wilayah dengan karakteristik lahan basah atau pertanian tergenang seperti sawah. Namun demikian, penelitian ini masih terbatas pada pengamatan morfologi makro tanaman dan belum menjangkau analisis komunitas mikroba (biofilm) pada anoda. Hal ini menyebabkan mekanisme transfer elektron antara akar dan elektroda grafit belum dapat dijelaskan secara detail.

Berdasarkan hasil penelitian ini menunjukkan hasil tegangan listrik oleh kedua tanaman kangkung dan bayam dapat disimpulkan, bahwa pemanfaatan PMFC dapat ditinjau dari segi ketahanan tumbuhan hidup dalam air dan juga karakteristik akar tumbuhan, hal ini karena tegangan listrik yang dihasilkan oleh tanaman kangkung lebih besar daripada bayam. Namun, penelitian ini belum melakukan kontrol penuh terhadap variabel lingkungan. Sehingga hasil statistik jumlah tegangan yang dihasilkan oleh kedua tanaman menurun drastis pada suhu rendah hal ini diakibatkan oleh kurangnya cahaya matahari yang mengakibatkan fotosintesis yang terjadi pada kedua tumbuhan kurang optimal. Oleh karena itu hasil penelitian ini masih bersifat spesifik pada kondisi lingkungan non-kontrol dan memerlukan pengujian lebih lanjut dalam lingkungan yang stabil.

Conclusion

Berdasarkan hasil pengamatan selama 30 hari, tanaman kangkung dan bayam menunjukkan potensi dalam menghasilkan energi listrik melalui sistem P-MFC, masing-masing dengan rata-rata tegangan $135,14 \pm 58,75$ mV dan $106,89 \pm 29,22$ mV. Penelitian ini memberikan indikasi bahwa dalam kondisi media tanam jenuh air, variabel karakteristik perakaran dan adaptabilitas biologis tanaman dapat menjadi faktor yang lebih determinan terhadap performa bioelektrisitas dibandingkan jalur fotosintesisnya. Namun, temuan ini masih terbatas pada kondisi lingkungan non-terkontrol di mana intensitas hujan dan fluktuasi suhu menjadi pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas tegangan. Oleh karena itu, pengembangan penelitian selanjutnya sangat disarankan untuk dilakukan pada periode dengan curah hujan rendah (musim kemarau) guna mendapatkan stabilitas energi yang maksimal dan dapat mengontrol intensitas cahaya dan suhu secara lebih

presisi. Meskipun kedua tanaman terbukti mampu menghasilkan tegangan listrik, besaran tegangan yang diperoleh dalam penelitian ini masih tergolong rendah. Transfer elektron dan optimalisasi output daya masih menjadi tantangan utama dalam pengembangan teknologi P-MFC, terutama dalam mencapai stabilitas energi yang cukup untuk aplikasi praktis berskala luas

References

- [1] M. Azhar and D. A. Satriawan, "Implementasi Kebijakan Energi Baru dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional," vol. 1, no. November, pp. 398–412, 2018.
- [2] F. Y. Nagifea, "Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (Pltgl) Sebagai Energi Alternatif Di Indonesia," *J. Technopreneur*, vol. 10, no. 2, pp. 17–24, 2022, doi: 10.30869/jtech.v10i2.968.
- [3] S. W. Suciyati, S. Asmarani, and A. Supriyanto, "Analisis Jeruk dan Kulit Jeruk sebagai Larutan Elektrolit terhadap Kelistrikan Sel Volta," *Teor. dan Apl. Fis.*, vol. 7, no. 1, pp. 7–16, 2019.
- [4] L. Novelendah, M. H. Senoaji, F. Sinurat, A. M. H. Musthofa, and T. Istirokhatun, "Potensi Listrik dan Degradasi Fosfat Berteknologi Plant Microbial Fuel Cell Dengan Media Tanaman Eceng Gondok," *Semin. Nas. Sains dan Teknol.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2018.
- [5] D. Cahyani, A. Haryanto, D. S. S. Marpaung, and ..., "Plant Microbial Fuel Cell (P-MFC) as electricity source; working principle, working principle, design variations, potential and challenge.," *J. Tek. Pertan. ...*, pp. 112–121, 2020, [Online]. Available: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20203393470>
- [6] K. Wetser, K. Dieleman, C. Buisman, and D. Strik, "Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes," *Appl. Energy*, vol. 185, pp. 642–649, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.122.
- [7] R. Shaikh *et al.*, "Bioelectricity production using plant-microbial fuel cell: Present state of art," *South African J. Bot.*, vol. 140, pp. 393–408, 2021, doi: 10.1016/j.sajb.2020.09.025.
- [8] W. Apollon *et al.*, "Progress and recent trends in photosynthetic assisted microbial fuel cells: A review," *Biomass and Bioenergy*, vol. 148, no. March, 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106028.
- [9] A. I. Wibawani and A. N. Laily, "Identifikasi Tanaman Berdasarkan Tipe Fotosintesis Pada Beberapa Spesies Anggota Genus Ficus Melalui Pengamatan Anatomi Daun," *el-Hayah*, vol. 5, no. 2, p. 43, 2015, doi: 10.18860/elha.v5i2.3012.
- [10] V. Ancona *et al.*, "Plant microbial fuel cells for recovering contaminated environments," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 72, no. December 2023, pp. 1116–1126, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.457.
- [11] M. Reza, B. Pratama, and L. Purnamaningsih, "Keragaan Beberapa Genotipe Bayam (*Amaranthus tricolor* L .) terhadap Cekaman Genangan Performance Some of Spinach (*Amaranthus tricolor* L .) on Waterlogging Stress," vol. 7, no. 6, pp. 1121–1129, 2019.
- [12] J. P. Indonesia, F. Pertanian, F. Peternakan, and K. Gayam, "Kurva Pertumbuhan Isolat Bakteri Asam Laktat dari Saluran Pencernaan Itik Lokal Asal Aceh," vol. 24, no. 1, pp. 1–7, 2022, doi: 10.25077/jpi.24.1.1-7.2022.
- [13] N. Irawan *et al.*, "PERAN MIKROBIOMA TANAH DALAM MEMPENGARUHI PERKECAMBAHAN SEBAGAI FAKTOR PENDUKUNG PERTANIAN BERKELANJUTAN THE ROLE OF SOIL MICROBIOME IN INFLUENCING SEED GERMINATION AS A," vol. 13, no. 1, pp. 36–45, 2025.

- [14] M. Helder, D. P. B. T. B. Strik, R. A. Timmers, S. M. T. Raes, H. V. M. Hamelers, and C. J. N. Buisman, "Resilience of roof-top Plant-Microbial Fuel Cells during Dutch winter," *Biomass and Bioenergy*, vol. 51, no. 0, pp. 1–7, 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.10.011.
- [15] E. Roosma Ria, A. Komariah, and I. Iryadi, "Pengaruh Dosis Eco Enzyme Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Bayam (*Amaranthus Hybridus L.*) Varietas Giti Hijau," *J. Greenation Pertan. dan Perkeb.*, vol. 1, no. 4, pp. 196–201, 2025, doi: 10.38035/jgpp.v1i4.174.
- [16] Krisdayanti Maduwu, "Pemanfaatan Cangkang Telur Sebagai Pupuk Organik Pada Tanaman Kangkung Darat Di Desa Nanowa," *J. Sapta Agrica*, vol. 2, no. 1, pp. 11–24, 2023, doi: 10.57094/agrotek.v2i1.880.
- [17] R. Nurkemalasari, M. Sutisna, and E. K. A. Wardhani, "Fitoremediasi Limbah Cair Tapioka dengan menggunakan Tumbuhan Kangkung Air (*Ipomoea aquatica*)," *J. Inst. Teknol. Nas. Bandung*, vol. 1, no. 2, pp. 1–12, 2013.
- [18] I. Pubiyanti, S. W. Suciwati, D. K. Apriyanto, and A. Supriyanto, "Electrical Design and Characterization of Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) Using Water Hyacinth Plants with Variation of The Amount of Water and The Effect of Sunlight," vol. 6, no. 2, pp. 2–7, 2025.
- [19] G. W. Putra, Y. Ramona, and M. W. Proborini, "Eksplorasi Dan Identifikasi Mikroba Pada Rhizosfer Tanaman Stroberi (*Fragaria x ananassa Dutch.*) Di Kawasan Pancasari Bedugul," *Metamorf. J. Biol. Sci.*, vol. 7, no. 2, p. 62, 2020, doi: 10.24843/metamorfosa.2020.v07.i02.p09.
- [19] Ibnu, Nur Aisyah, and others, 'Mini Review : Potensi Bio-Nanokomposit Elektroda Ni / N Berbasis Limbah Ampas Tahu Untuk Microbial Fuel Cell (MFC)', 4.2 (2025), pp. 89–98
- [20] Putri, Nadia Shafira Eka, Nugraha Pramesti Eka Putri, and Ida Rahmawati, 'Struktur Morfologi Kangkung Air (*Ipomoea Aquatica*) Asal Area Kediri Raya', *Seminar Nasional Sains, Kesehatan, Dan Pembelajaran 3*, 2024, pp. 201–05