

Integrasi Sains Terapan dalam Pengembangan Energi Terbarukan: Perspektif Islam pada Teknologi Plant Microbial Fuel Cell (PMFC)

Silva Damayanti^{1*}

¹Departemen Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta

Wipsar Sunu Brams Dwandaru²

²Departemen Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta

Imelda Zahra Tungga Dewi³

³Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Gajah Mada

Widayanti⁴

⁴Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

Corresponding author: *silvadamayanti.2023@student.uny.ac.id

Submitted: 30th July 2025 ; Accepted: 17th November 2025 ; Published: 23th Februari 2026

Abstrak

Peningkatan permintaan akan energi berkelanjutan mendorong inovasi dalam teknologi energi terbarukan ramah lingkungan, salah satunya adalah Plant Microbial Fuel Cell (PMFC), yang memanfaatkan aktivitas biokimia tanaman untuk menghasilkan listrik. Studi ini mengkaji potensi PMFC sebagai solusi energi ramah lingkungan dan relevansinya dengan ajaran Islam mengenai konservasi lingkungan dan penggunaan berkelanjutan sumber daya alam. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa PMFC dengan elektroda Aluminium-Tembaga (Al-Cu) menghasilkan arus maksimum 0,396 mA dan tegangan 0,393 V, sementara kombinasi Aluminium-Zink (Al-Zn) hanya menghasilkan 0,255 mA dan 0,222 V. Selain itu, kondisi tanah basah meningkatkan output daya menjadi 0,051 mW. Studi ini menunjukkan bahwa PMFC dapat mengubah energi kimia dalam tanaman menjadi listrik tanpa emisi berbahaya, sejalan dengan prinsip-prinsip Islam yang menekankan keberlanjutan dan pencegahan kerusakan lingkungan.

Kata kunci: Ilmu Terapan, Islam, PMFC, Tumbuhan, Energi Terbarukan

Abstract

The increasing demand for sustainable energy drives innovations in environmentally friendly renewable energy technologies, one of which is the Plant Microbial Fuel Cell (PMFC), which utilizes the biochemical activity of plants to generate electricity. This study examines the potential of PMFC as an eco-friendly energy solution and its relevance to Islami teachings on environmental conservation and the sustainable use of natural resources. Experimental results show that the PMFC with Aluminium-Copper (Al-Cu) electrodes generates a maximum current of 0.396 mA and a voltage of 0.393 V, while the Aluminium-Zinc (Al-Zn) combination only produces 0.255 mA and 0.222 V. Additionally, wet soil conditions enhance the power output to 0.051 mW. This study demonstrates that PMFC can convert the chemical energy in plants into electricity without harmful emissions, aligning with Islamic principles that emphasize sustainability and the prevention of environmental damage.

Keywords: Applied Science, Islam, PMFC, Plants, Renewable Energy

PENDAHULUAN

Seiring berkembangnya zaman, lonjakan kebutuhan energi terjadi seiring dengan pertumbuhan populasi dan ekspansi industri yang cepat di tingkat global. Ketergantungan pada bahan bakar fosil masih mendominasi sektor energi di banyak negara, termasuk Indonesia. Akan tetapi, pemanfaatan energi fosil berdampak buruk terhadap lingkungan, seperti meningkatnya emisi gas rumah kaca, polusi udara, serta eksploitasi sumber daya alam yang tidak berkelanjutan. Dalam mengatasi tantangan ini, dunia mulai beralih ke energi terbarukan sebagai solusi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (Wibowo et al., 2024). Indonesia sebagai negara berkembang menghadapi tantangan besar dalam memenuhi kebutuhan energi listrik yang terus meningkat. Permintaan listrik pada tahun 2025 diprediksi meningkat sebesar 11–12% (Cahyani et al., 2020). Pemerintah telah menerbitkan Peraturan Presiden Nomor 4 Tahun 2016 mengenai Percepatan Pembangunan Infrastruktur Ketenagalistrikan dengan menitikberatkan pada pentingnya pemanfaatan energi terbarukan. Salah satu inovasi dalam energi terbarukan yang berpeluang besar untuk dikembangkan adalah Plant Microbial Fuel Cell (PMFC), sebuah sel bahan bakar yang memanfaatkan interaksi antara mikroba dan tanaman.

PMFC adalah teknologi yang memanfaatkan aktivitas biokimia antara tanaman dan mikroorganisme untuk menghasilkan energi listrik. PMFC dikenalkan pertama kali pada tahun 2008 oleh Strik dkk. dan telah terbukti dapat menghasilkan listrik dengan menggunakan tanaman jenis rerumputan seperti Reed managragass (Strik et al., 2011). Mekanisme kerja PMFC didasarkan pada proses oksidasi mikroba di sekitar akar tanaman (rhizosphere), yang menghasilkan elektron dan menciptakan aliran listrik. Selain ramah lingkungan, teknologi ini tidak menghasilkan emisi karbon dan dapat diterapkan di lahan basah yang banyak tersedia di Indonesia, menjadikannya sebagai solusi energi terbarukan yang potensial (Nitorisavut & Regmi, 2017).

Dalam pengembangan energi terbarukan di Indonesia, integrasi ilmu pengetahuan dan agama berperan penting dalam membangun paradigma pembangunan yang berkelanjutan. Sebagai agama yang menekankan keseimbangan lingkungan, Islam mengajarkan bahwa manusia bertanggung jawab untuk melestarikan dan memanfaatkan alam dengan bijak. Perspektif Islam menekankan pentingnya keberlanjutan dan keseimbangan ekosistem sebagai bagian dari amanah manusia dalam menjaga bumi (khalifah fil ardh). Prinsip ini seiring dengan firman Allah dalam Al-Qur'an surah Al-A'raf ayat 31, yang menegaskan bahwa manusia harus menghindari sikap berlebihan dalam memanfaatkan sumber daya alam.

Pendekatan yang mengintegrasikan sains dan nilai-nilai Islam telah banyak dikaji dalam berbagai penelitian. Darmalaksana dan Busro menggarisbawahi pentingnya teologi sains, yaitu pendekatan yang menghubungkan nilai-nilai keislaman dengan ilmu pengetahuan dalam pengembangan teknologi. Pengembangan PMFC dapat menjadi bagian dari implementasi nilai-nilai Islam dalam kehidupan sehari-hari, terutama dalam mendorong pemanfaatan energi yang lebih bersih dan berkelanjutan (Darmalaksana & Busro, 2021). Selain sebagai solusi energi berkelanjutan, PMFC juga memiliki potensi besar dalam pendidikan dan pengembangan teknologi berbasis Islam. Integrasi PMFC dalam kurikulum pendidikan sains dan teknologi dapat membantu membekali generasi muda dengan pemahaman yang holistik (Irawati et al., 2021), serta tidak hanya berbasis pada pengetahuan ilmiah tetapi juga nilai-nilai moral dan spiritual. Dengan demikian, pengembangan teknologi ini tidak hanya mendukung keberlanjutan lingkungan tetapi juga memperkuat kesadaran umat Islam akan pentingnya menjaga keseimbangan ekosistem sesuai dengan ajaran agama.

Dengan mengembangkan teknologi PMFC dalam perspektif Islam, Indonesia dapat menciptakan sistem energi yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan berbasis pada nilai-nilai etika dan moral. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi solusi yang tidak hanya menjawab tantangan energi masa depan tetapi juga selaras dengan ajaran Islam dalam menjaga harmoni antara manusia dan lingkungan.

Dalam Islam, alam dan seluruh isinya merupakan amanah dari Allah SWT yang wajib dikelola dengan bijak. Allah mengingatkan umat manusia tentang kebesaran ciptaan-Nya dan mengajarkan pentingnya menjaga keberlanjutan alam seperti yang tertuang pada surah Al-Baqarah ayat 164 (Departemen Nasional Islam, 2024).

مِنَ اللَّهِ أَنْزَلَ وَمَا النَّاسَ يَنْفَعُ بِمَا الْبَحْرُ فِي تَجْرِي اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ اللَّيْلِ وَالاخْتِلَافِ وَالْأَرْضِ السَّمَاوَاتِ خَلَقَ فِي أَنْ يَتَفَكَّرُونَ لَقَوْمٍ آيَاتِ وَالْأَرْضِ وَالسَّمَاءِ الرِّيحَ وَتَصْرِيفِ ذَابَّةٍ كُلِّ مِنْ فِيهَا وَبَدَّ مَوْتَهَا بَعْدَ الْأَرْضِ بِهِ فَاحْيَا مَاءٍ مِنَ السَّمَاءِ

Artinya: "Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, pergantian siang dan malam, kapal-kapal yang

berlayar di lautan dengan muatan yang bermanfaat bagi manusia, air yang Allah turunkan dari langit untuk menghidupkan bumi yang kering, serta penyebaran berbagai jenis hewan di dalamnya, juga pergerakan angin dan awan yang dikendalikan antara langit dan bumi, semua itu merupakan tanda-tanda kebesaran Allah bagi orang-orang yang berpikir.”

PMFC yang menggunakan tanaman untuk menghasilkan listrik dapat dilihat sebagai penerapan prinsip tersebut, karena teknologi ini memanfaatkan sumber daya alam yang dianugerahkan oleh Allah dengan bijak tanpa menimbulkan kerusakan.

1. Prinsip Keberlanjutan dalam Islam dan PMFC

Islam mengajarkan umatnya untuk melestarikan keseimbangan alam dan menghindari tindakan yang merusaknya (Aripin & Mardani, 2024). Ajaran ini tercermin dalam konsep khalifah, di mana manusia diberi tanggung jawab sebagai pemimpin di bumi untuk mengelola sumber daya alam secara bijaksana (Iqbal, 2020). Dalam QS. Allah SWT melarang manusia untuk bersikap berlebihan (israf) dalam pemanfaatan sumber daya alam (Dewi et al., 2024) seperti yang tertuang pada surah Al-A'raf ayat 31.

المُسْرِفِينَ يُحِبُّ لَا إِنَّهُ تُسْرِفُوا وَلَا وَاشْرَبُوا وَكُلُوا مَسْجِدَ كُلِّ عِنْدَ زِينَتِكُمْ خُذُوا آمَنَ بَنِي يَا

Artinya: “Wahai anak cucu Adam, kenakanlah pakaian yang indah setiap kali memasuki masjid, serta makan, dan minumlah secukupnya, tetapi jangan berlebihan. Sesungguhnya, Allah tidak menyukai orang-orang yang berlebihan.”

PMFC sebagai teknologi yang tidak menghasilkan emisi dan tidak merusak lingkungan sangat selaras dengan ajaran tersebut, karena teknologi ini memungkinkan penggunaan sumber daya alam secara berkelanjutan. Selain itu, Allah SWT juga memperingatkan tentang kerusakan yang terjadi akibat perbuatan manusia yang tertuang pada surah Ar-Rum 41.

فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ ظَهَرَ الْفَسَادُ

Artinya: “Kerusakan di darat dan di laut telah nyata akibat perbuatan, tangan, manusia. Dengan itu, Allah memprelihatkan kepada mereka, sebagian dari akibat perbuatan, mereka agar mereka, kembali ke jalan yang benar.”

Kerusakan yang terjadi akibat perbuatan manusia ini dapat dihindari dengan menggunakan teknologi ramah lingkungan seperti PMFC. Dengan adanya teknologi ini, manusia mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil serta berkontribusi dalam menjaga keseimbangan ekosistem (Kadhafi, 2020).

2. PMFC sebagai Teknologi Ramah Lingkungan dalam Islam

PMFC menggunakan aktivitas mikroba dan tanaman untuk menghasilkan listrik tanpa menghasilkan polusi atau merusak lingkungan (Pubiyanti, 2022). Dalam Islam, menjaga lingkungan adalah bagian dari ibadah (Habibah et al., 2025), sebagaimana disebutkan dalam hadis Rasulullah:

“Barang siapa yang menanam pohon, maka selama pohon itu berbuah, manusia dan makhluk lainnya mendapatkan manfaatnya, maka baginya pahala sedekah.” (HR. Ahmad)

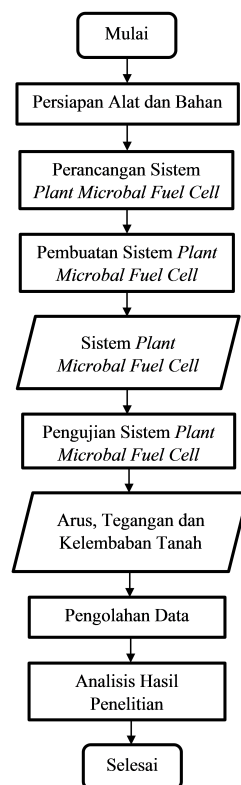
Teknologi berbasis tanaman seperti PMFC tidak hanya bermanfaat secara ilmiah, tetapi juga sejalan dengan nilai Islam yang menekankan keseimbangan alam sebagai amanah dari Allah. Islam mendorong pemanfaatan sumber daya secara bijak tanpa merusak ekosistem (Sukron, 2024), sebagaimana ajarannya untuk tidak berbuat kerusakan di bumi. Selain aspek ekologis, Islam juga menekankan pentingnya ilmu yang bermanfaat bagi umat. Pengembangan PMFC harus berorientasi pada kemaslahatan masyarakat tanpa eksploitasi berlebihan. Teknologi ini berpotensi menjadi solusi bagi daerah terpencil

yang belum memiliki akses listrik, mendukung konsep masalah dalam memenuhi kebutuhan dasar Masyarakat (Arif, 2018).

Lebih dari itu, PMFC dapat dikembangkan dalam kerangka waqf ilmiah, di mana hasil inovasi dimanfaatkan untuk kepentingan umum, mencerminkan prinsip keadilan sosial dalam ekonomi Islam. Dengan demikian, PMFC tidak hanya menjadi solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan tetapi juga mencerminkan nilai-nilai Islam dalam kesejahteraan dan keberlanjutan.

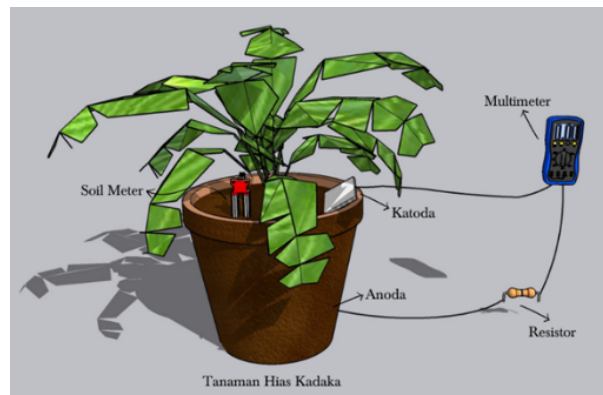
METODE PENELITIAN

Percobaan dilakukan untuk menguji potensi Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) dalam menghasilkan energi listrik menggunakan tanaman Kadaka (*Asplenium Nidus*) sebagai sumber utama energi melalui fotosintesis. Prosedur penelitian ini dibagi menjadi lima tahapan, yakni persiapan, perancangan, pembuatan, dan pengujian sistem PMFC serta analisis data.

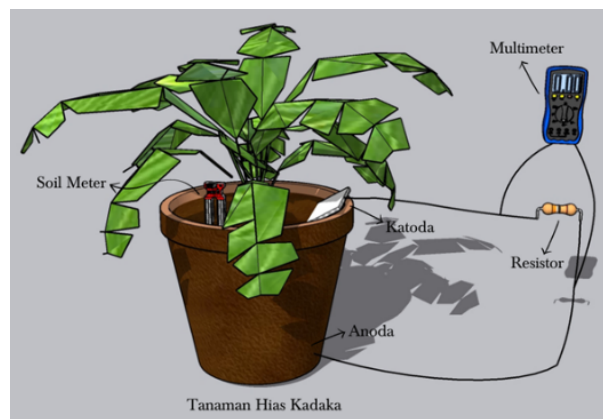


Gambar 1: Diagram Alir Tahapan Penelitian

Desain percobaan ini melibatkan beberapa tahap yang terstruktur. Pertama, bahan dan alat yang digunakan meliputi tanaman Kadaka yang ditanam dalam pot tanah, elektroda Aluminium (Al), Tembaga (Cu), dan Zeng (Zn), soil meter untuk mengukur kelembaban tanah, serta multimeter untuk mengukur arus dan tegangan yang dihasilkan (Dewi et al., 2021). Tanaman Kadaka ditanam dalam dua pot dengan media tanah yang serupa, namun dengan variasi jenis elektroda pada pot I menggunakan elektroda Al-Cu, dan pot II menggunakan elektroda Al-Zn. Tanah diatur dalam dua kondisi kelembaban yang berbeda: Wet (tanah basah) dan Moist (tanah lembap). Rancangan percobaan ini diilustrasikan seperti Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2: Desain Percobaan PMFC Variasi Arus



Gambar 3: Desain Percobaan PMFC Variasi Tegangan

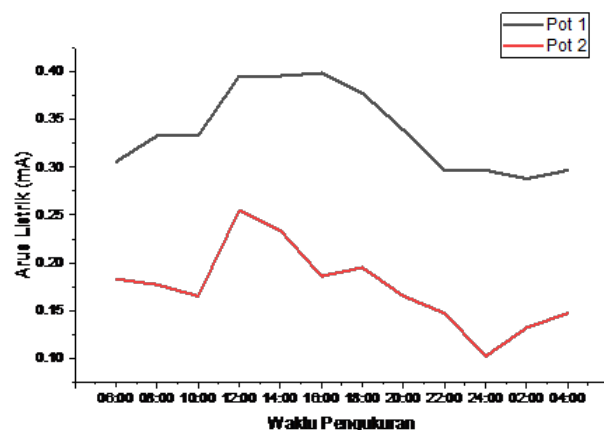
Setelah pengaturan tanaman dan elektroda, pengukuran tegangan dan arus dilakukan menggunakan multimeter untuk setiap sistem PMFC dalam kedua kondisi kelembaban tanah tersebut. Pengujian dilakukan dalam periode satu minggu, dengan pengukuran yang dilakukan setiap 24 jam untuk memantau variasi tegangan dan arus yang dihasilkan. Tanaman dipelihara dengan memberikan air sesuai dengan kondisi kelembaban yang telah ditentukan dan memastikan tanaman mendapatkan cahaya matahari yang cukup untuk mendukung proses fotosintesis. Selama proses ini, diharapkan tanaman dapat menghasilkan energi yang dibutuhkan oleh sistem PMFC. Data yang diperoleh dari pengukuran arus dan tegangan digunakan untuk menghitung daya listrik yang dihasilkan oleh sistem PMFC. Rumus yang digunakan dalam analisis daya adalah

$$P = V \times I \quad (1)$$

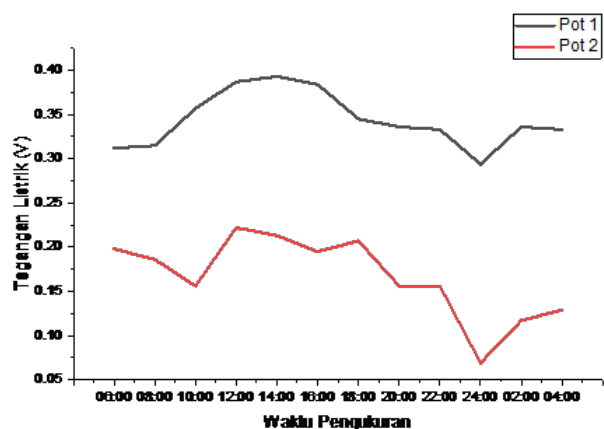
dengan, P adalah daya listrik dalam watt, V adalah tegangan dalam volt, dan I adalah arus dalam ampere.

HASIL DAN PEMBAHASAN

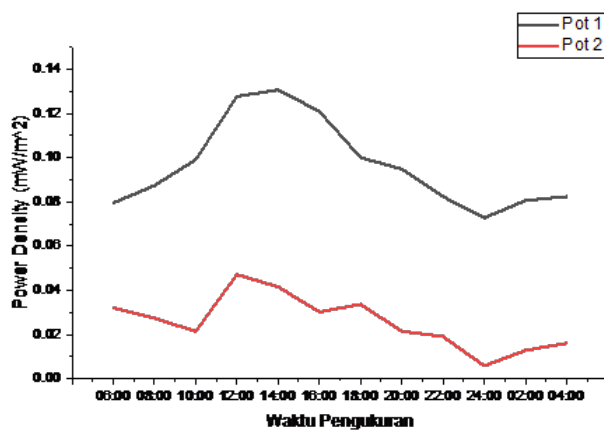
Sistem PMFC berhasil diuji dan sistem bekerja dengan baik. Hasil pengujian sistem PMFC berupa arus, tegangan serta perhitungan daya listrik rata-rata ditunjukkan pada Gambar 4, 5, dan 6.



Gambar 4: Arus Listrik yang di hasilkan sistem PMFC



Gambar 5: Tegangan Listrik yang di hasilkan sistem PMFC



Gambar 6: Daya Listrik yang di hasilkan sistem PMFC

Prinsip kerja sistem PMFC dimulai dengan penyerapan dan pelepasan CO_2 dalam proses respirasi dan fotosintesis di area rhizosphere akar (Cahyani et al., 2020). Di area ini, anoda ditanam dan dihubungkan ke

multimeter. Bahan organik dari eksudasi akar dimanfaatkan oleh mikroorganisme untuk proses metabolisme, menghasilkan CO_2 , proton, dan elektron. Elektron yang dilepaskan ditangkap oleh anoda dan mengalir ke katoda, sehingga menghasilkan listrik. Kondisi lahan basah mendukung pertukaran ion dalam sistem PMFC. Glukosa hasil fotosintesis digunakan sebagai sumber energi bagi mikroorganisme, yang kemudian memecahnya melalui respirasi seluler (Sahrir, 2021). Aktivitas fotosintesis berbanding lurus dengan produksi listrik, di mana nilai arus dan tegangan meningkat dari pagi ke siang dan menurun menjelang malam (Amin & Djoyowasito, 2017). Dengan sistem ini, energi listrik dapat dihasilkan secara alami dari interaksi tanaman dan mikroorganisme.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa PMFC dengan elektroda Al-Cu lebih efektif dibandingkan Al-Zn dalam menghasilkan listrik. Pot I (Al-Cu) menghasilkan arus maksimum 0,396 mA dan tegangan 0,393 V, sedangkan Pot II (Al-Zn) hanya mencapai 0,255 mA dan 0,222 V. Penelitian ini mendukung hasil studi (Logan & Regan, 2006) dan (Santoro et al., 2017) yang menyatakan bahwa material elektroda dengan konduktivitas tinggi dan kestabilan kimia yang baik mampu meningkatkan performa MFC dan PMFC. Sebaliknya, elektroda Zn cenderung mengalami korosi lebih cepat dalam lingkungan basah, yang dapat menghambat transfer elektron dan menurunkan output listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa produksi arus dan tegangan meningkat dari pagi ke siang hari, lalu menurun pada sore hingga malam. Pola ini konsisten dengan temuan (Amin & Djoyowasito, 2017) serta (Timmers et al., 2010) yang menyatakan bahwa intensitas fotosintesis berbanding lurus dengan jumlah senyawa organik yang dilepaskan melalui akar. Kenaikan nilai listrik terjadi dari pagi ke siang seiring meningkatnya fotosintesis, kemudian menurun di sore hingga malam akibat berkurangnya sinar matahari dan kelembaban tanah. Daya listrik juga menunjukkan pola serupa, dengan Pot I menghasilkan daya maksimum 0,051 mW dan Pot II hanya 0,01887 mW. Selain itu, kelembaban tanah berperan penting dalam produksi listrik. Tanah basah (WET) meningkatkan daya listrik dibandingkan tanah lembab (MOIST) karena mendukung aktivitas mikroba yang menghasilkan elektron. Temuan ini sejalan dengan (Situmeang, 2020), yang menyatakan bahwa tanah dengan kadar air tinggi meningkatkan konduktivitas ionik dan memfasilitasi pergerakan proton dari anoda ke katoda. Secara keseluruhan, elektroda Al-Cu lebih unggul dalam menangkap elektron, terutama pada keadaan saat tanah basah. Nilai listrik yang dihasilkan berbanding lurus dengan aktivitas fotosintesis, dengan puncaknya di siang hari, serta sebaliknya akan menurun pada malam hari. Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi elektroda yang tepat dan kelembaban tanah yang optimal dapat meningkatkan efisiensi sistem PMFC.

KESIMPULAN

PMFC merupakan teknologi yang menjanjikan dalam pengembangan energi terbarukan yang ramah lingkungan. Teknologi ini memanfaatkan aktivitas biokimia tanaman untuk menghasilkan energi listrik tanpa menghasilkan polusi, menjadikannya solusi yang sangat relevan dalam menghadapi tantangan global terkait ketergantungan pada energi fosil. Dalam perspektif Islam, penggunaan teknologi ini sangat sesuai dengan prinsip-prinsip agama yang mengajarkan untuk mengelola sumber daya alam dengan bijak tanpa berlebihan, dan dengan menjaga keseimbangan alam. Penelitian ini menunjukkan bahwa PMFC tidak hanya dapat menjadi solusi untuk memenuhi kebutuhan energi terbarukan, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap keberlanjutan dan kesejahteraan umat manusia, sejalan dengan nilai yang ada dalam ajaran agama Islam. Integrasi sains terapan dalam pengembangan energi terbarukan melalui teknologi PMFC dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan masyarakat. Dengan pendekatan yang berbasis pada nilai-nilai Islam, diharapkan teknologi ini dapat diterima dan diimplementasikan secara luas, memberikan manfaat yang optimal bagi umat manusia dan lingkungan.

Pustaka

- Amin, R. & Djoyowasito, G. (2017). Produksi bio-listrik dengan kompos dan urea pada sistem plant microbial fuel cell menggunakan tanaman padi (*oryza sativa* L.). *Journal of Tropical Agricultural Engineering and Biosystems*, 5(3):218–229.
- Arif, F. M. (2018). Muzara'ah dan pengembangan ekonomi umat di pedesaan. *Al-Amwal: Journal of Islamic Economic Law*, 3(2):108–136.
- Aripin, I. T. & Mardani, D. A. (2024). Islam, etika dan ekologi: Telaah ayat-ayat quran kewajiban memelihara lingkungan. *Unpublished Manuscript*.

- Cahyani, D., Haryanto, A., Marpaung, D. S., & Fil'aini, R. (2020). Plant microbial fuel cell (p-mfc) as electricity source: Working principle, design variations, potential and challenge. *Proceedings / Journal*, pages 112–121.
- Darmalaksana, W. & Busro, B. (2021). Challenges of scientific publication for theological academics in indonesia. *Edukasi Islami: Jurnal Pendidikan Islam*, 10(1):287.
- Departemen Nasional Islam (2024). Integrasi etika.
- Dewi, I. Z. T., Azizah, S. N., Rakhmadi, F. A., & Cahyadi, I. (2024). Kajian islam tentang sifat boros dan implementasinya pada pembuatan sistem pemantauan serta pengendalian bahan baku di gudang. *Kaunia: Integration and Interconnection Islam and Science Journal*, 20(2):63–71.
- Dewi, I. Z. T., Ulinuha, M. F., Mustofa, W. A., Kurniawan, A., & Rakhmadi, F. A. (2021). Smart farming: Sistem tanaman hidroponik terintegrasi iot mqtt panel berbasis android. *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*, 9(1):71–78.
- Habibah, W., Sofa, A. R., Aziz, A., Bukhori, I., & Islam, M. H. (2025). Integrasi nilai-nilai al-qur'an dan hadits dalam pendidikan untuk membangun tanggung jawab konservasi alam. *Jurnal Budi Pekerti Agama Islam*, 3(1):36–52.
- Iqbal, I. (2020). Pengelolaan dan pemanfaatan sumber daya alam dalam perspektif ekonomi islam. *Al Hisab: Jurnal Ekonomi Syariah*, 1(1):8–21.
- Irawati, F., Kartikasari, F. D., & Tarigan, E. (2021). Pengenalan energi terbarukan dengan fokus energi matahari kepada siswa sekolah dasar dan menengah. *Publikasi Pendidikan*, 11(2):164–169.
- Kadhafi, M. (2020). Studi potensi energi listrik dari plant microbial fuel cell (p-mfc) dengan variasi jenis elektroda.
- Logan, B. E. & Regan, J. M. (2006). Microbial fuel cells—challenges and applications. *Environmental Science & Technology*, 40(17):5172–5180.
- Nitisoravut, R. & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76:81–89, DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.064.
- Pubiyanti, I. (2022). Desain dan karakterisasi elektrik plant microbial fuel cell (pmfc).
- Sahrir, D. C. (2021). *Diklat Fisiologi Tumbuhan*.
- Santoro, C., Serov, A., Gokhale, R., Rojas-Carbonell, S., Stariha, L., Gordon, J., & Atanassov, P. (2017). A family of fe-nc oxygen reduction electrocatalysts for microbial fuel cell application. *Applied Catalysis B: Environmental*, 205:24–33.
- Situmeang, I. Y. P. (2020). *Biochar Bambu Perbaiki Kualitas Tanah dan Hasil Jagung*. Scopindo Media Pustaka.
- Strik, D. P., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2011). Microbial solar cells: Applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1):41–49.
- Sukron, M. (2024). Hadis tentang konsumsi berkelanjutan dalam mendukung gerakan zero waste muslim. *Jurnal Penelitian Agama*, 25(2):307–320.
- Timmers, R. A., Strik, D. P., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with spartina anglica. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86(3):973–981.
- Wibowo, C. A., Anindya, A. I., & Widya, K. S. (2024). Mengungkap pembangunan kota berkelanjutan: Studi bibliometrik pada infrastruktur energi terbarukan perkotaan. *Jurnal Pembangunan Wilayah dan Kota*, 20(2).