

**EKSPLORASI SUBSTRAT SINGLE-CHAMBER AIR-CATHODE MICROBIAL FUEL CELLS DENGAN ELEKTRODA STAINLESS STEEL DAN KARBON AKTIF**

**Oktavius Yoseph Tuta Mago <sup>1)</sup>, Kristiana Nathalia Wea <sup>2)</sup>, Yohanes Nong Bunga <sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Prodi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Nusa Nipa

<sup>2)</sup>Prodi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Nusa Nipa

email: yota.mago@nusanipa.ac.id

**Abstrak**

*Pengembangan energi substitusi terbarukan dan ramah lingkungan harus dilakukan untuk menggantikan peran energi fosil. Salah satu teknologi untuk menghasilkan energi ini adalah microbial fuel cells (MFCs). Teknologi ini memanfaatkan mikroorganisme untuk menghasilkan listrik secara langsung melalui perombakan molekul organik dalam proses respirasi seluler. Penelitian ini merupakan penelitian awal yang bertujuan untuk mengeksplorasi substrat dan mikroorganisme yang berpotensi untuk digunakan dalam teknologi MFCs. Tipe reaktor MFCs yang digunakan adalah membraneless, single chamber air-cathode. Substrat yang diinokulasi ke dalam reaktor diambil dari tiga sumber yang berbeda, yaitu endapan lumpur bakau, tanah berlumpur dari kebun dan endapan saluran pembuangan rumah tangga. Material elektroda yang digunakan adalah kombinasi stainless steel mesh dan karbon aktif. MFCs dioperasikan selama 3 siklus (1 siklus = 7 hari), dan di akhir siklus, reaktor MFCs dibersihkan dan diganti dengan substrat yang baru. Hasil pengoperasian MFCs selama 3 siklus menunjukkan bahwa substrat dari endapan lumpur bakau menghasilkan tegangan listrik sebesar 101,54 mV. Sedangkan, substrat tanah berlumpur dan endapan saluran pembuangan rumah tangga menghasilkan tegangan sebesar 15,8 mV dan 13,06 mV. Dengan penelitian yang lebih mendalam, substrat endapan lumpur bakau berpotensi untuk digunakan dalam teknologi MFCs. Penelitian ini diharapkan dapat memperkenalkan teknologi MFCs kepada masyarakat, agar dapat dikembangkan untuk mengelola limbah dan menghasilkan energi terbarukan.*

**Kata Kunci:** *Energi terbarukan; listrik; microbial fuel cell; substrat*

**Abstract**

*The renewable environmentally-friendly substitution energy must have been developed to replace the fossil energy. One of this kind technologies is microbial fuel cells (MFCs). This technology harnesses the electron produced by anerobic digestion of substrate by microorganisms, to produce direct electricity. The aim of this preliminary research was to explore the potential substrates and microorganisms for MFCs technology. The type of reactor in this research was membrane-less single chamber air-cathode. The reactors were inoculated using substrates from three different sources: mangrove sediment, soil from garden and bog sediment. The materials used as electrode were the mixed of stainlees steel mesh and activated carbon. The MFCs has been operated in 3 cycles (1 cycle = 7 days), and at the end of each cycle, all reactors were cleaned and refill with new substrate. The result showed that during three cycles, the reactor with mangrove sediment produced the highest voltage of 101,45 mV. Soil form garden and bog sediment, whereas, produced lower voltage of 15,8 and 13,06 mV*

*respectively. By further researches, the mangrove sediment is potential to be used as microorganisms' source in MFCs technology. This research was expected can introduced MFCs technologies to the people, so it can be used in waste management and producing renewable energy at a time.*

**Keywords:** *Renewable energy; electric; microbial fuel cell; substrate*

## **1. PENDAHULUAN**

Suplai listrik yang dinikmati masyarakat Indonesia saat ini, berasal dari bahan bakar fosil. Batu bara dan gas bumi merupakan bahan bakar utama pembangkit listrik PLN Indonesia (Arifin, 2015; Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019). Kedua bahan bakar ini bersifat *non-renewable*, sehingga suatu saat akan habis. Bahan bakar fosil juga menghasilkan emisi karbon yang besar. Penggunaan dalam waktu lama dapat memicu perubahan iklim global.

Di sisi lain, masih ada daerah terpencil di pelosok Indonesia yang belum menikmati aliran listrik. Hal ini disebabkan karena masalah infrastruktur, keamanan dan sumber energi pembangkit listrik. Pemerintah telah mengarahkan penggunaan tabung listrik (talis) sebagai langkah Program Indonesia Terang, namun hingga saat ini belum semua desa merasakan manfaatnya (Indonesia.go.id, 2020). Salah satu cara untuk membantu program pemerintah adalah memanfaatkan sumber yang ada di daerah tersebut untuk menghasilkan energi yang terbarukan.

Dalam dua dekade terakhir, telah dilakukan banyak penelitian tentang bahan bakar hayati (*biofuel*). Biogas diproduksi dari bahan lignoselulosa, sisa makanan, limbah tahu dan kotoran ternak (Chairani, 2014; Ihsan et al., 2013; Mago et al., 2021; Morales-Polo et al., 2019; Ridhuan, 2016; Ritonga & Masrukhi, 2017). Biodiesel juga diproduksi dari bahan lignoselulosa dengan proses yang berbeda (Putri & Sudiyo, 2012; Wenten, 2010). Tetapi, bahan baku ini juga digunakan dalam sektor peternakan sebagai pakan, sehingga akan menimbulkan persaingan. Padahal, ada bahan baku lain yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi, yaitu limbah.

Limbah yang dijumpai sehari-hari dapat berupa limbah domestik dan limbah industri. Limbah domestik biasanya dibuang ke lingkungan tanpa ada pengelolaan

terlebih dahulu, sedangkan limbah industri biasanya diberikan *treatment* sebelum dilepaskan ke lingkungan. Proses pengelolaan limbah memakan biaya dan energi yang besar, padahal di dalam limbah tersebut justru terdapat energi tersembunyi yang dapat dimanfaatkan (Huarachi-Olivera *et al.*, 2018; Prayogo *et al.*, 2017; Tharali *et al.*, 2016; Yates *et al.*, 2012).

*Microbial Fuel Cell* (MFCs) adalah suatu teknologi yang memanfaatkan mikroorganisme khusus untuk menghasilkan listrik secara langsung dari limbah. Mikroorganisme yang digunakan dalam teknologi ini, termasuk dalam kelompok *exoelectrogen*, yaitu mikroorganisme yang menghasilkan dan melepaskan elektron ke lingkungan. Mikroorganisme ini mampu mengekstrak energi kimia senyawa organik dalam limbah dan mengonversinya menjadi elektron. Jika diberi rangkaian eksternal (elektroda dan penghantar arus), elektron akan mengalir dari anoda ke katoda dalam bioreaktor MFCs, sehingga menghasilkan arus listrik (Deval & Dikshit, 2013; Logan & Regan, 2006; Songera, 2012).

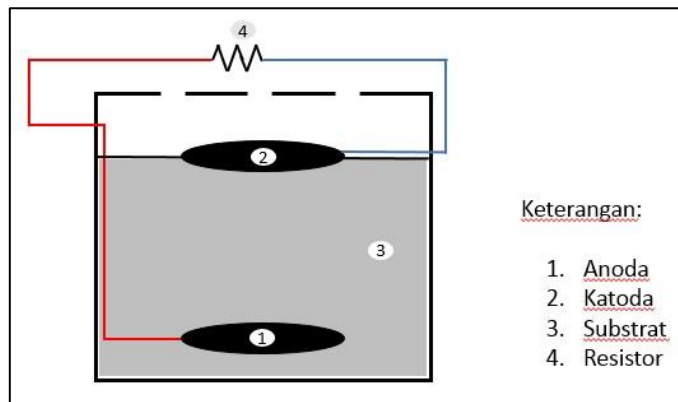
Bahan yang telah dimanfaatkan sebagai elektroda adalah kertas karbon, grafit, *carbon brush*, platinum dan *stainless steel mesh* (Rahimnejad *et al.*, 2015). Platinum adalah elektroda terbaik, tetapi tidak efisien dalam hal harga dan korosif (Santoro *et al.*, 2018). Elektroda berbahan grafit harus diaktifkan sebelum digunakan, dengan cara perendaman di dalam NaOH dan HCl (Januarita & Azizah, 2015; Prayogo *et al.*, 2017). Karbon dan *stainless steel* bersifat konduktor listrik yang baik serta mudah diperoleh (Dumas *et al.*, 2007; Guerrini *et al.*, 2014), tetapi belum ada penelitian yang melaporkan penggunaan elektroda kombinasi dari dua material tersebut.

Penelitian ini merupakan penelitian awal dengan tujuan mengkaji performa bahan elektroda yang digunakan dan mengeksplorasi sumber limbah yang berpotensi untuk digunakan sebagai inokula dan substrat dalam MFCs di kawasan Kabupaten Sikka. Penelitian ini diharapkan dapat memperkenalkan teknologi MFCs kepada masyarakat, agar dapat dikembangkan dan dimanfaatkan untuk mengelola limbah sekaligus menghasilkan energi listrik terbarukan.

**2. METODE PENELITIAN**

*2.1. Persiapan Reaktor Microbial Fuel Cell (MFCs)*

Reaktor *microbial fuel cell* yang dibuat berjenis *membraneless, single chamber – air cathode*, dengan ukuran 5x5x10 cm, dari bahan akrilik dengan ketebalan 3 mm. Pada sisi kiri dan kanan reaktor dibuat lubang sebagai tempat keluar kabel dari anoda dan katoda. Penutup reaktor diberi lubang sebagai jalur masuk udara. Anoda diletakkan pada bagian dasar reaktor, sedangkan katoda diletakkan di atas permukaan reaktor. Katoda diatur sedemikian rupa sehingga memiliki kontak dengan substrat dan udara. Rancangan reaktor dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rancangan Reaktor MFCs

*2.2. Persiapan Elektroda*

Anoda dan katoda dibuat dari bahan yang sama (*stainless steel mesh* + karbon aktif). Elektroda berukuran 4,5 x 4,5 cm, dibuat tiga lapisan *stainless steel mesh* dan di antara lapisan diberi karbon aktif yang direkat dengan lem epoksi. Selama proses pengeringan, perekatan dibantu dengan penjepit kayu model F. Kabel tembaga disambungkan dengan elektroda sebagai pengumpul arus.

*2.3. Persiapan Substrat*

Substrat yang digunakan diambil dari sedimen pantai berlumpur (daerah bakau Kampung Garam, Maumere), tanah berlumpur (tanah kebun + air) dan endapan saluran pembuangan rumah tangga di daerah tempat pelelangan ikan (TPI) Maumere. Pemilihan substrat dilakukan atas pertimbangan bahwa di lingkungan tersebut terdapat

bahan organik yang melimpah, sehingga memiliki keanekaragaman bakteri yang tinggi (González-Gamboa *et al.*, 2021; Samudro *et al.*, 2017; Yates *et al.*, 2012).

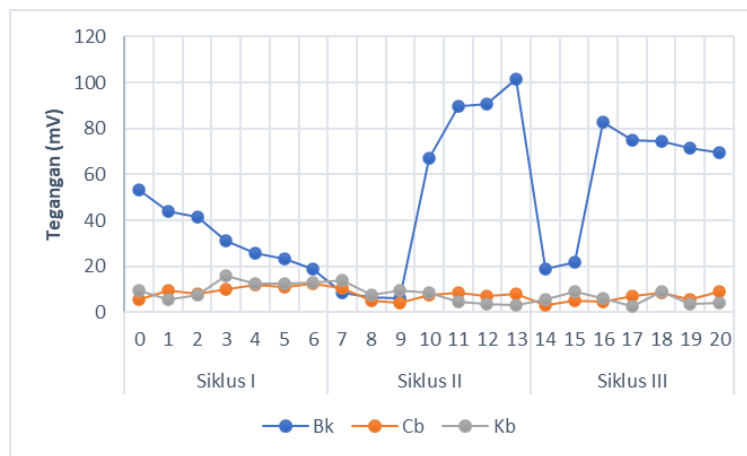
#### 2.4. Pengoperasian MFCs dan Pengumpulan Data

Substrat dimasukkan sebanyak 80 ml ke dalam reaktor, kemudian diletakkan anoda di atasnya. Setelah itu, substrat sebanyak 150 ml ditambahkan, sehingga menutupi anoda. Katoda diletakkan di atas permukaan substrat, kemudian diberi penutup reaktor. Semua reaktor dikosongkan dan diganti dengan substrat yang baru setiap 7 hari (7 hari = 1 siklus) (Yates *et al.*, 2012) selama 3 siklus. Di antara anoda dan katoda, dipasang resistor (R) 1 k $\Omega$ . Pengukuran tegangan (V) dilakukan setiap hari dengan multimeter digital (Zotek ZT111). Reaktor setiap substrat dibuat sebanyak 3 ulangan dan perhitungan statistik dilakukan dengan uji t (Yates *et al.*, 2012).

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada awal siklus I, reaktor dengan substrat dari endapan lumpur bakau (Bk) menunjukkan tegangan yang lebih tinggi (53,25 mV) dibandingkan dengan kedua reaktor dengan jenis substrat lainnya. Namun, semakin hari, reaktor ini menunjukkan penurunan tegangan. Pada akhir siklus I, tegangan yang dihasilkan oleh reaktor Bk hampir sama dengan reaktor Cb dan Kb (18,97 mV) (Gambar 2.). Penurunan tegangan pada reaktor Bk dan kecilnya tegangan pada reaktor Cb dan Kb pada siklus I disebabkan karena bakteri masih mengalami aklimatisasi. Dalam proses ini, bakteri harus beradaptasi dengan bahan anoda sebelum membentuk biofilm, melekat pada anoda dan bertumbuh (Kiely *et al.*, 2010; Pant *et al.*, 2009; Songera, 2012; Yates *et al.*, 2012). Selain itu, pada substrat alami, mikroorganisme *exoelectrogens* tidak hidup sendiri, melainkan bersama dengan jenis bakteri lain, membentuk konsorsium. Tidak semua jenis bakteri menempel secara langsung pada anoda. Beberapa bakteri menempel pada bakteri lain dan membentuk suatu komunitas elektroda (*biofilm*). Komunitas bakteri ini saling membutuhkan dalam hal penyediaan substrat bagi jenis

bakteri lainnya untuk menghasilkan elektron selama proses respirasinya (Heidrich *et al.*, 2018; Pinto, 2016; Rahimnejad *et al.*, 2015; Schröder, 2007). Hasil yang serupa juga ditemukan dalam beberapa penelitian, yang mencatat bahwa dalam waktu 1-7 hari, tegangan yang dihasilkan oleh reaktor MFCs dengan beberapa jenis substrat masih berkisar antara 1 – 20 mV (Deval & Dikshit, 2013; Guerrini *et al.*, 2014; Yates *et al.*, 2012).



Gambar 2. Rerata tegangan yang dihasilkan oleh reaktor MFCs. Masing-masing reaktor dengan dibuat dalam 3 ulangan dan perhitungan statistika dilakukan dengan uji t.

Reaktor Bk menghasilkan tegangan maksimal (101,54 mV) pada siklus II. Di hari kesepuluh, reaktor mulai menunjukkan kenaikan tegangan, sampai pada tegangan maksimal di hari ke-13. Peningkatan tegangan dari hari ke-9 sampai akhir siklus II menunjukkan bahwa bakteri telah membentuk koloni yang stabil pada elektroda reaktor Bk. Sedangkan pada dua reaktor lain, tegangan yang dihasilkan relatif sama dengan pada siklus I. Hal ini dapat terjadi karena bakteri belum membentuk koloni pada elektroda, atau tidak terdapat bakteri *exoelectrogen* pada kedua jenis substrat tersebut (Kiely *et al.*, 2010; Songera, 2012).

Setelah proses adaptasi, bakteri mulai memanfaatkan substrat secara optimal untuk metabolisme. Dalam kondisi anaerob, mikroorganisme *exoelectrogen* akan menghasilkan elektron, proton dan CO<sub>2</sub>. Elektron ditarik ke anoda dan dialirkan dalam

rangkaian tertutup (kabel tembaga), sedangkan proton naik ke permukaan substrat. Elektron yang sampai ke katoda akan tereduksi pada saat bereaksi dengan oksigen ( $O_2$ ), sehingga menimbulkan kontinuitas aliran elektron dan proton dari anoda. Hal ini menyebabkan kenaikan tegangan listrik (Logan & Regan, 2006; Nealsen & Rowe, 2016; Schröder, 2007). Penelitian Yates *et al.* (2012) mencatat bahwa mulai dari siklus ke-4 (1 siklus = 3 hari) sampai siklus ke-20, reaktor MFCs mulai menghasilkan tegangan yang maksimal dan stabil.

Siklus ketiga reaktor Bk menghasilkan tegangan dengan pola yang hampir sama dengan siklus kedua. Pada hari ke-14 dan 15, tegangan yang dihasilkan oleh reaktor Bk masih rendah karena pergantian substrat. Tegangan mulai meningkat dan stabil di hari ke-16 sampai pada akhir siklus. Hal ini mengasumsikan bahwa di dalam substrat Bk, terdapat bakteri *exoelectrogen* yang berpotensi digunakan dalam teknologi MFCs. Tetapi, perlu penelitian lebih lanjut untuk membuktikannya secara pasti serta mengetahui jenis bakteri tersebut.

Adanya aktivitas elektrokemikal pada substrat endapan lumpur bakau, menambah laporan tentang bakteri *exoelectrogen* dari lingkungan laut. Selama ini, masih sedikit laporan penelitian tentang substrat dari lingkungan laut yang memiliki bakteri yang berpotensi untuk digunakan dalam MFCs (Songera, 2012). Beberapa penelitian melaporkan bahwa reaktor MFCs bersubstrat sedimen laut, menghasilkan potensial tegangan serta densitas daya yang rendah. Hal ini disebabkan karena elektroda berbahan *stainless steel* mengalami korosi seiring waktu pengoperasian MFCs (Dumas *et al.*, 2007; González-Gamboa *et al.*, 2021; Scott *et al.*, 2008).

Reaktor dengan substrat berupa endapan saluran pembuangan rumah tangga serta tanah berlumpur dari kebun tidak menunjukkan peningkatan tegangan selama pengoperasian. Tegangan yang dihasilkan selama 3 siklus hanya di bawah 20 mV. Hal ini mungkin disebabkan oleh waktu aklimasi yang singkat, sehingga jenis bakteri yang terdapat di dalam substrat ini belum beradaptasi sempurna. Yates *et al.* (2012)

mengoperasikan MFCs dengan substrat dari sedimen saluran pembuangan limbah selama 20 siklus (1 siklus = 3 hari). Heidrich *et al* (2018) melakukan aklimasi untuk reaktor bertemperatur dingin sampai dengan 840 jam, sedangkan untuk reaktor temperatur hangat membutuhkan waktu 280 jam. Selain itu, endapan tempat pengambilan kedua sampel memiliki ketebalan kurang dari 20 cm, sehingga bakteri yang terkandung di dalamnya tidak bersifat anaerob obligat. Sedikitnya jenis bakteri anaerob obligat membuat komunitas bakteri pada anoda tidak terbentuk secara optimal, sehingga tidak mampu mendukung pertumbuhan bakteri *exoelectrogen*. Padahal, untuk dapat menghasilkan aliran elektron di dalam rangkaian MFC, bakteri *exoelectrogen* pada anoda harus mengoksidasi substrat secara anaerob sehingga menghasilkan proton, elektron dan CO<sub>2</sub> (Hodgson *et al.*, 2016; Nealson & Rowe, 2016; Songera, 2012).

Semua reaktor yang digunakan dalam penelitian ini dapat menghasilkan tegangan, meskipun bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa selain terdapat bakteri *exoelectrogen* di setiap substrat, elektroda di dalam reaktor juga mampu menghantar listrik. Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini merupakan kombinasi antara dua bahan yang telah diketahui memiliki kemampuan untuk menghantarkan elektron, yaitu *stainless steel mesh* dan karbon aktif (Dumas *et al.*, 2007; Guerrini *et al.*, 2014; Masoudi *et al.*, 2020; Nam *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2015; Sudirjo *et al.*, 2019; Yamashita *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2008).

Bahan yang telah dimanfaatkan sebagai elektroda di antaranya adalah kertas karbon, grafit, *carbon brush*, platinum dan *stainless steel mesh* (Rahimnejad *et al.*, 2015). Elektroda berbahan karbon dan *stainless steel* memiliki keuntungan dibandingkan dengan platinum dalam hal biaya produksi dan tahan korosi. Bahan karbon juga memiliki konduktivitas listrik yang baik serta memiliki luar permukaan yang besar (Ahn & Logan, 2012; Logan *et al.*, 2006). Sedangkan *stainless steel*, selain merupakan konduktor listrik yang baik, juga tahan korosi dan lebih mudah diperoleh (De La Fuente *et al.*, 2020; Guerrini *et al.*, 2014; Yamashita *et al.*, 2016).



## **4. KESIMPULAN DAN SARAN**

### *4.1 Kesimpulan*

Substrat MFCs yang berasal dari endapan lumpur bakau menghasilkan tegangan listrik paling tinggi (101,54 mV) dibandingkan dengan substrat endapan saluran pembuangan rumah tangga dan tanah berlumpur dari kebun. Perlu ada kajian lanjutan untuk mengetahui jenis bakteri yang terdapat di dalam substrat ini. Elektroda berbahan kombinasi *stainless steel mesh* dan karbon aktif dapat digunakan sebagai bahan alternatif yang lebih murah dan mudah diperoleh, karena memiliki kemampuan sebagai konduktor listrik serta luas permukaan yang besar sebagai tempat pembentukan komunitas bakteri pada anoda.

### *4.2 Saran*

1. Perlu ada penelitian lanjutan yang menggunakan waktu siklus lebih panjang, agar proses aklimatisasi bakteri lebih optimal.
2. Perlu dieksplorasi sumber substrat yang lebih bervariasi agar dapat menemukan bakteri *exoelectrogen* yang potensial.

## **5. UCAPAN TERIMA KASIH**

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi dan L2Dikti wilayah XV yang telah membiayai penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada LP2M Universitas Nusa Nipa yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian ini.

## **6. REFERENSI**

- Ahn, Y., & Logan, B. (2012). A Multi-Electrode Continuous Flow Microbial Fuel Cell with Separator Electrode Assembly Design. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 93, 2241–2248. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3916-4>
- Arifin, Z. (2015). Konsumsi Bbm Untuk Pembangkit Listrik Di Indonesia; Kecenderungan, Permasalahan Dan Solusinya. *M & E*, 13(2), 85–95.
- Chairani, S. (2014). Anaerobik Co-digesti Limbah Tanaman Jagung (*Zea mays*) dan

Digested Manure Sapi Terhadap Peningkatan Produksi Biogas Sebagai Energi Terbarukan dengan Menggunakan Reaktor Mesophilic. *Prosiding Seminar Nasional PERTETA dan HIPI*, 10.

De La Fuente, M., Daille, L., De la Iglesia, R., Walczak, M., Armijo, J., Pizarro, G., & Vargas, I. (2020). Electrochemical Bacterial Enrichment from Natural Seawater and Its Implications in Biocorrosion of Stainless-Steel Electrodes. *Materials*, 13, 2327. <https://doi.org/10.3390/ma13102327>

Deval, A., & Dikshit, A. K. (2013). Construction, Working and Standardization of Microbial Fuel Cell. *APCBEE Procedia*, 5, 59–63. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.011>

Dumas, C., Mollica, A., Féron, D., Basseguy, R., Etcheverry, L., & Bergel, A. (2007). Marine Microbial Fuel Cell: Use of Stainless Steel Electrodes as Anode and Cathode Materials. *Electrochimica Acta*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.06.069>

González-Gamboa, N., Tapia-Tussell, R., Kamaraj, S. K., Valdés-Lozano, D., Domínguez-Maldonado, J., & Alzate-Gaviria, L. (2021). Scale Up of a Marine Sediment Microbial Fuel Cells Stack with a Floating Aerated Cathode Using a Circuit Storage Energy from Ultra-Low Power. *Waste and Biomass Valorization*, 12(7), 3977–3985. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01289-7>

Guerrini, E., Cristiani, P., Grattieri, M., Santoro, C., Li, B., & Trasatti, S. (2014). Electrochemical Behavior of Stainless Steel Anodes in Membraneless Microbial Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 161, H62–H67. <https://doi.org/10.1149/2.096401jes>

Heidrich, E. S., Dolfing, J., Wade, M. J., Sloan, W. T., Quince, C., & Curtis, T. P. (2018). Temperature, Inocula and Substrate: Contrasting Electroactive Consortia, Diversity and Performance in Microbial Fuel Cells. *Bioelectrochemistry*, 119, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2017.07.006>

Hodgson, D. M., Smith, A., Dahale, S., Stratford, J. P., Li, J. V., Grüning, A., Bushell, M. E., Marchesi, J. R., & Avignone Rossa, C. (2016). Segregation of the Anodic Microbial Communities in a Microbial Fuel Cell Cascade. *Frontiers in Microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00699>

Huarachi-Olivera, R., Dueñas-Gonza, A., Yapo-Pari, U., Vega, P., Romero-Ugarte, M., Tapia, J., Molina, L., Lazarte-Rivera, A., Pacheco-Salazar, D. G., & Esparza, M.

- (2018). Bioelectrogenesis with Microbial Fuel Cells (mfcs) Using the Microalga *Chlorella Vulgaris* and Bacterial Communities. *Electronic Journal of Biotechnology*, 31, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.10.013>
- Ihsan, A., Bahri, S., & Musafira, M. (2013). Produksi Biogas Menggunakan Cairan Isi Rumen Sapi dengan Limbah Cair Tempe. *Natural Science: Journal of Science and Technology*, 2(2), Article 2. <https://doi.org/10.22487/25411969.2013.v2.i2.1644>
- Indonesia.go.id. (2020). *Tabung Listrik Mungil untuk Daerah Terpencil*. Indonesia.Go.Id. <https://www.indonesia.go.id/narasi/indonesia-dalam-angka/ekonomi/tabung-listrik-mungil-untuk-daerah-terpencil>
- Januarita, R., & Azizah, A. (2015). MFCs 2 in 1: Microbial Fuel Cells Pengolah Air Limbah Dan Penghasil Listrik (alternatif: Limbah Isi Rumen Sapi Dengan Pengaruh Variasi Cod Dan Ph). *Artikel Ilmiah - Universitas Diponegoro*, 6. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php>
- Kiely, P., Call, D., Yates, M., Regan, J., & Logan, B. (2010). Anodic Biofilms in Microbial Fuel Cells Harbor Low Numbers of Higher-Power-Producing Bacteria Than Abundant Genera. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 88, 371–380. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2757-2>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology <sup>†</sup>. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Logan, B. E., & Regan, J. M. (2006). Electricity-Producing Bacterial Communities in Microbial Fuel Cells. *Trends in Microbiology*, 14(12), 512–518. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.10.003>
- Mago, O. Y. T., Nirmalasari, M. A. Y., Kuki, A. D., Bunga, Y. N., & Misa, A. (2021). Effect of the Type of Organic Waste and Retention Time on Biogas Production from Cow Dung. *Biota : Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 5(3), 155–162. <https://doi.org/10.24002/biota.v5i3.3682>
- Masoudi, M., Rahimnejad, M., & Mashkour, M. (2020). Fabrication of Anode Electrode by a Novel Acrylic Based Graphite Paint on Stainless Steel Mesh and Investigating Biofilm Effect on Electrochemical Behavior of Anode in a Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Electrochimica Acta*, 344, 136168. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136168>

- Morales-Polo, C., Cledera-Castro, M. del M., & Soria, B. Y. M. (2019). Biogas Production from Vegetable and Fruit Markets Waste—Compositional and Batch Characterizations. *Sustainability*, *11*(23), 6790. <https://doi.org/10.3390/su11236790>
- Nam, T., Son, S., Kim, E., Tran, H. V. H., Koo, B., Chai, H., Kim, J., Pandit, S., Gurung, A., Oh, S.-E., Kim, E. J., Choi, Y., & Jung, S. P. (2018). Improved Structures of Stainless Steel Current Collector Increase Power Generation of Microbial Fuel Cells by Decreasing Cathodic Charge Transfer Impedance. *Environmental Engineering Research*, *23*(4), 383–389. <https://doi.org/10.4491/eer.2017.171>
- Nealson, K. H., & Rowe, A. R. (2016). Electromicrobiology: Realities, Grand Challenges, Goals and Predictions. *Microbial Biotechnology*, *9*(5), 595–600. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12400>
- Pant, D., Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2009). A Review of the Substrates Used in Microbial Fuel Cells (mfcs) for Sustainable Energy Production. *Bioresource Technology*, *101*, 1533–1543. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>
- Peng, X. H., Chu, X. Z., Huang, P. F., & Shan, K. (2015). Improved Power Performance of Activated Carbon Anode by Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Addition in Microbial Fuel Cells. *Applied Mechanics and Materials*, *700*, 170–174. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.700.170>
- Pinto, D. (2016). *Electronic Transfer Within a Microbial Fuel Cell. Better Understanding of Experimental and Structural Parameters at the Interface Between Electro-Active Bacteria and Carbon-Based Electrodes* [Doctoral thesis of Material Chemistry]. Université Pierre et Marie Curie.
- Prayogo, F. A., Supriyadi, A., & Raharjo, B. (2017). Microbial Fuel Cell (MFC) Menggunakan Bakteri Bacillus Subtilis dengan Substrat Limbah Septic Tank Serta Pengaruhnya Terhadap Kualitas Limbah. *Jurnal Biologi*, *6*(2), 10.
- Putri, S. K., & Sudiyo, R. (2012). Studi Proses Pembuatan Biodiesel dari Minyak Kelapa (Coconut Oil) dengan Bantuan Gelombang Ultrasonik. *Jurnal Rekayasa Proses*, *6*(1), 6.
- Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., & Oh, S.-E. (2015). Microbial Fuel Cell as New Technology for Bioelectricity Generation: A Review. *Alexandria Engineering Journal*, *54*(3), 745–756.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.031>

Ridhuan, K. (2016). Pengolahan Limbah Cair Tahu Sebagai Energi Alternatif Biogas yang ramah lingkungan. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 1(1). <https://doi.org/10.24127/trb.v1i1.81>

Ritonga, A. M., & Masrukhi, M. (2017). Optimasi Kandungan Metana (CH<sub>4</sub>) Biogas Kotoran Sapi Menggunakan Berbagai Jenis Adsorben. *Jurnal Rona Teknik Pertanian*, 10(2). <https://doi.org/10.17969/rtp.v10i2.8493>

Samudro, G., Syafrudin, S., Nugraha, W. D., Priyambada, I. B., Muthi'ah, H., Sinaga, G. N., & Hakiem, R. T. (2017). Kajian Pemilihan Sumber Mikroorganisme Solid Phase Microbial Fuel Cell (SMFC) Berdasarkan Jenis dan Volume Sampah, Power Density dan Efisiensi Penurunan COD. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 9(2), 114–121. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol9.iss2.art5>

Santoro, C., Flores-Cadengo, C., Soavi, F., Kodali, M., Merino-Jimenez, I., Gajda, I., Greenman, J., Ieropoulos, I., & Atanassov, P. (2018). Ceramic Microbial Fuel Cells Stack: Power Generation in Standard and Supercapacitive Mode. *Scientific Reports*, 8(1), 3281. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21404-y>

Schröder, U. (2007). Anodic Electron Transfer Mechanisms in Microbial Fuel Cells and Their Energy Efficiency. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 9(21), 2619–2629. <https://doi.org/10.1039/B703627M>

Scott, K., Cotlarciuc, I., Hall, D., Lakeman, J., & Browning, D. (2008). Power from Marine Sediment Fuel Cells: The Influence of Anode Material. *Journal of Applied Electrochemistry*, 38, 1313–1319. <https://doi.org/10.1007/s10800-008-9561-z>

Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional. (2019). *Outlook Energi Indonesia 2019*. <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-outlook-energi-indonesia-2019-bahasa-indonesia.pdf>

Songera, D. (2012). A Review on Microbial Fuel Cell Using Organic Waste as Feed. *CIBTech Journal of Biotechnology*, Vol. 2, 17–22.

Sudirjo, E., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2019). Marine Sediment Mixed With Activated Carbon Allows Electricity Production and Storage From Internal and External Energy Sources: A New Rechargeable Bio-Battery With Bi-Directional Electron Transfer Properties. *Frontiers in Microbiology*, 10, 934. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00934>

Tharali, A. D., Sain, N., & Osborne, W. J. (2016). Microbial Fuel Cells in Bioelectricity

Production. *Frontiers in Life Science*, 9(4), 252–266.  
<https://doi.org/10.1080/21553769.2016.1230787>

Wenten, I. G. (2010). Review Proses Produksi Biodiesel Dengan Menggunakan Membran Reaktor. *Seminar Rekayasa Kimia Dan Proses 2010*, 9.

Yamashita, T., Ishida, M., Asakawa, S., Kanamori, H., Sasaki, H., Ogino, A., Katayose, Y., Hatta, T., & Yokoyama, H. (2016). Enhanced Electrical Power Generation Using Flame-Oxidized Stainless Steel Anode in Microbial Fuel Cells and the Anodic Community Structure. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), 1–10.  
<https://doi.org/10.1186/s13068-016-0480-7>

Yates, M. D., Kiely, P. D., Call, D. F., Rismani-Yazdi, H., Bibby, K., Peccia, J., Regan, J. M., & Logan, B. E. (2012). Convergent Development of Anodic Bacterial Communities in Microbial Fuel Cells. *The ISME Journal*, 6(11), 2002–2013.  
<https://doi.org/10.1038/ismej.2012.42>

Zhao, F., Rahunen, N., Varcoe, J. R., Chandra, A., Avignone-Rossa, C., Thumser, A. E., & Slade, R. C. T. (2008). Activated Carbon Cloth as Anode for Sulfate Removal in a Microbial Fuel Cell. *Environmental Science & Technology*, 42(13), 4971–4976. <https://doi.org/10.1021/es8003766>