

Potensi Air Lindi dari TPA Puuwatu sebagai Sumber Energi Alternatif Berbasis Teknologi *Microbial Fuel Cell*

Muhammad Hijir Al Gazali^{*1}, Ahmad Zaeni², Prima Endang Susilowati³, Alwahab⁴, Rustam Efendi⁵

¹Jurusan Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Tenggara, Kendari – Indonesia

²Jurusan Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Halu Oleo, Kendari – Indonesia

³Jurusan Gizi, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Siliwangi, Tasikmalaya – Indonesia

⁴Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Kesehatan, ISTEK 'Aisyiyah, Kendari – Indonesia

⁵Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Tenggara, Kendari – Indonesia

E-mail: * hijir-al-gazali@un-sultra.ac.id

Abstrak

Telah dilakukan penelitian mengenai potensi air lindi TPA Puuwatu sebagai sumber energi alternatif berbasis teknologi *microbial fuel cell*. Sampel air lindi diperoleh dari situs TPA Puuwatu digunakan sebagai substrat dan sumber mikroba dalam perangkat MFC untuk menghasilkan energi. Secara garis besar pengamatan yang dilakukan mencakup pengukuran energi listrik MFC dan analisis karakteristik sampel air lindi. MFC dibuat dalam model dual chamber (dua kamar) dengan variasi oksidator yaitu $KMnO_4$ dan $K_2Cr_2O_7$. Sel MFC dibuat sebanyak enam unit lalu diukur tegangan dan kuat arusnya. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa MFC dengan oksidator $KMnO_4$ menghasilkan energi listrik yang lebih tinggi. Tegangan maksimum satu unit sel MFC- $KMnO_4$ mencapai 1102,33mV tepatnya di hari ke-9 masa pengoperasian. MFC- $KMnO_4$ yang disusun dalam rangkaian seri menghasilkan tegangan maksimum 6460 mV dengan kuat arus sebesar 0,528 mA pada hari ke-6 pengoperasian, sedangkan dalam MFC yang tersusun paralel menghasilkan tegangan listrik sebesar 1053 mV dengan kuat arus sebesar 2 mA. Hasil uji pewarnaan gram bakteri sampel air lindi menunjukkan bahwa sampel air lindi mengandung berbagai macam bakteri. Dengan demikian berdasarkan keseluruhan hasil yang diperoleh dapat disimpulkan air lindi memiliki potensi sebagai substrat MFC.

Kata kunci: air lindi, *microbial fuel cell*, listrik, oksidator, tegangan.

Abstract

Research has been conducted on the potential of leachate from Puuwatu Landfill as an alternative energy source based on *microbial fuel cell* (MFC) technology. Leachate samples were obtained from the Puuwatu Landfill site and used as substrates and a source of microbes in the MFC devices to generate energy. Broadly, the observations included measuring the electrical energy produced by the MFCs and analyzing the characteristics of the leachate samples. The MFCs were created in a dual-chamber model with variations in oxidizers, specifically $KMnO_4$ and $K_2Cr_2O_7$. Six MFC units were constructed and their voltage and current were measured. The results showed that the MFC with $KMnO_4$ as the oxidizer produced higher electrical energy. The maximum voltage for one unit of the MFC- $KMnO_4$ reached 1102.33 mV precisely on the 9th day of operation. The MFC- $KMnO_4$ units arranged in series generated a maximum voltage of 6460 mV with a current of 0.528 mA on the 6th day of operation. On the other hand, in the MFC units arranged in parallel, the electrical voltage was 1053 mV with a current of 2 mA. Gram staining of the bacteria in the leachate sample indicated the presence of various types of bacteria. Therefore, based on the overall results obtained, it can be concluded that leachate has the potential as a substrate for MFCs.

Keywords: *electricity, leachate, microbial fuel cell, oxidizer, voltage.*

1. PENDAHULUAN

Isu tentang energi masih menjadi topik yang hangat untuk dibahas karena persoalan energi dari waktu ke waktu semakin krusial. Bahan bakar fosil yang selama ini menjadi sumber energi utama dalam memenuhi kebutuhan energi manusia memiliki ketersediaan yang terbatas dan suatu saat akan habis. Meski Indonesia pernah mengalami swasembada minyak bumi (*oil boom*) di tahun 1977 [1], minyak bumi merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui. Selain itu persoalan energi fosil tidak saja mencakup masalah deposit yang terbatas, namun penggunaan bahan bakar fosil dalam jangka waktu yang lama menyebabkan terjadinya pemanasan global. Pemanasan global disebabkan oleh meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca seperti CO₂, akibat pembakaran minyak bumi [2].

Dalam rangka menanggulangi persoalan energi, para ilmuwan berusaha untuk menemukan sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui (*renewable*), berkelanjutan (*sustainable*) dan lebih ramah lingkungan. Beberapa sumber energi alternatif yang telah dikembangkan, antara lain sel surya, biogas, air dan angin. Teknologi yang telah dikembangkan tersebut memiliki prospek yang cukup menjanjikan karena tidak menghasilkan emisi gas berbahaya. Riset tentang sumber energi alternatif tidak pernah berhenti. Beberapa tahun terakhir, para ilmuwan memperkenalkan suatu teknologi yang merupakan inovasi terbaru dari *fuel cell* (sel bahan bakar).

Fuel cell sendiri merupakan perangkat yang sudah sejak lama dimanfaatkan [3]. Prinsip kerja Fuel cell yakni mengubah secara langsung energi potensial yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi listrik melalui proses oksidasi-reduksi. Teknologi yang merupakan inovasi terbaru dari fuel cell yang sekarang sedang dikembangkan adalah *Microbial Fuel Cell* (MFC). Prinsip MFC hampir sama dengan *fuel cell* konvensional yang telah dikembangkan sebelumnya, perbedaannya adalah MFC memanfaatkan aktivitas metabolisme substrat organik oleh mikroba untuk menghasilkan elektron.

Beberapa substrat organik dilaporkan pernah digunakan sebagai substrat MFC seperti glukosa [4, 5], pati [6], asam amino dan protein [7]. Selain itu, beberapa jenis air limbah dilaporkan dapat digunakan sebagai substrat MFC [8] karena dapat menjadi nutrisi bagi mikroba, seperti limbah cair industri tahu [9], limbah cair perikanan [10], limbah cair organik tapioca [11], dan limbah cair biogas [12].

Air lindi merupakan limbah cair yang terbentuk pada tumpukan sampah organik. Air lindi memiliki banyak kandungan senyawa organik maupun anorganik serta sejumlah bakteri patogen [13]. Dengan adanya kandungan senyawa organik dan kultur bakteri dalam air lindi maka sampel air lindi berpotensi untuk diterapkan sebagai substrat MFC. Telah dilaporkan pula bahwa air lindi dapat digunakan sebagai substrat MFC untuk menghasilkan energi listrik tanpa penambahan zat kimia maupun inokulum.

Secara garis besar penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar potensi dari air lindi TPA Puuwatu sebagai substrat MFC berdasarkan jenis oksidator yang digunakan serta adanya perlakuan optimasi tegangan dan kuat arus dengan penerapan rangkaian seri dan paralel.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Bahan Kimia

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain sampel air lindi, aquades, HCl, NaOH 1 N, glukosa, K₂Cr₂O₇, KMnO₄, asam borat 1 % (b/v), NaOH 40 %, H₂SO₄, KCl 1 M, KCl 0,01 M, NaCl, NH₄Cl, KH₂PO₄, MgSO₄.7H₂O, NaHCO₃, dan agar.

2.2 Peralatan dan Instrumen

Alat-alat yang digunakan meliputi peralatan untuk pengambilan sampel air lindi di TPA Puuwatu yaitu gelas volume dan jerigen 5 L. Peralatan yang digunakan dalam pembuatan

rangkaian dan pengukuran potensial listrik LMFC antara lain gelas kimia 500 mL, kabel tunggal (1 x 2,5 mm), elektroda karbon grafit, dan multimeter. Uji konduktivitas air lindi digunakan konduktometer (OAKTON *waterproof*). Peralatan yang digunakan untuk uji bakteri sampel air lindi antara lain cawan petri, pipet mikro, *autoclave* (All American), timbangan analitik (CHEETAH FA2204B), *hotplate* (Stuart CB160), labu takar, gelas ukur, dan piper ukur.

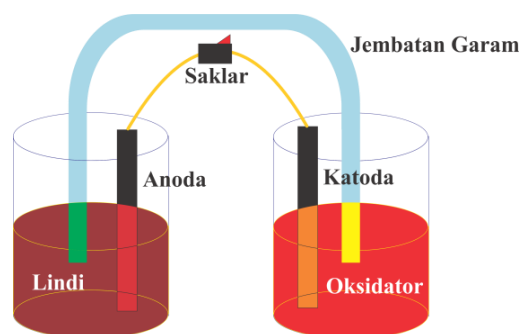
2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Gambaran Umum Penelitian

Penelitian dilakukan dengan mencakup beberapa kegiatan, yakni pengambilan sampel air lindi, pembuatan rangkaian utuh MFC (mencakup air lindi sebagai substrat dan zat oksidator), pengamatan energi listrik yang dihasilkan serta pengamatan kandungan bakteri air lindi. Pengamatan energi listrik dilakukan dengan mengukur tegangan (potensial) dan kuat arus listrik yang dihasilkan MFC dengan menggunakan multimeter [14].

2.3.2 Desain dan Pengukuran Energi Listrik Microbial Fuel Cell Sel Tunggal MFC

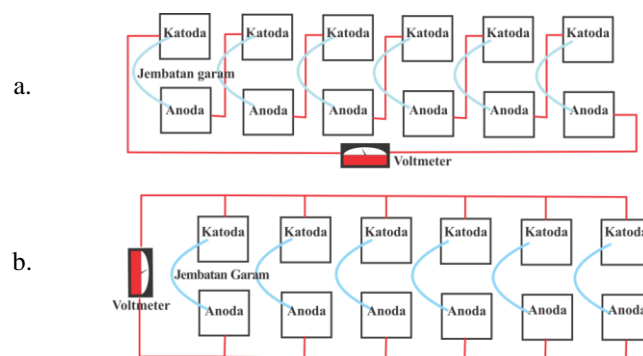
Pembuatan rangkaian MFC mengacu pada penelitian Holmes, et al. [14]. Tipe MFC yang dibuat adalah sistem 1 sel 2 kamar (*dual chamber*). Rangkaian MFC 1 sel dapat dilihat pada Gambar 1. Energi listrik sistem MFC yang diukur dalam penelitian adalah berupa beda potensial listrik (tegangan) dan arus listrik. Tahap awal dilakukan pengukuran selama 72 jam yang dicatat tiap 6 jam. Masing-masing sel tunggal diukur tegangan dan arus listriknya. Tegangan rata-rata dari keenam unit MFC tunggal dicatat sebagai tegangan MFC tunggal.



Gambar 1. MFC substrat lindi (LMFC) sistem dua kamar

Sel Tunggal MFC

Sel-sel tunggal dihubungkan secara seri dan paralel lalu diukur tegangan dan arus listriknya. Berikut adalah rancangan MFC 6 sel dengan sistem seri (a) dan paralel (b) (Gambar 2).



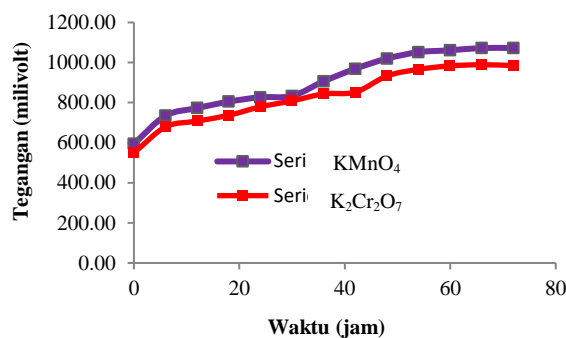
Gambar 2. Rangkaian MFC ganda 6 sel; a. susunan seri b. susunan paralel

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Energi Listrik MFC

3.1.1. MFC Tunggal

Pengamatan energi listrik MFC tunggal bertujuan untuk melihat seberapa besar kemampuan air limbah menghasilkan energi listrik karena MFC tunggal merupakan unit terkecil sistem MFC. Pada MFC tunggal dilakukan pengamatan *Open Circuit Voltage* (OCV) atau tegangan *open circuit*. OCV merupakan tegangan yang dihasilkan oleh MFC hingga sistem mengalami kondisi *steady state* (kondisi tetap). Pengukuran tegangan *open circuit* dilakukan agar diketahui waktu yang diperlukan setiap sistem MFC untuk mencapai keadaan stabil [11]. Sebelumnya telah dilaporkan bahwa MFC pada pengukuran awal menunjukkan laju kenaikan tegangan listrik yang relatif cepat, selanjutnya laju kenaikan tegangannya melambatsampai akhirnya relatif konstan [12, 15].



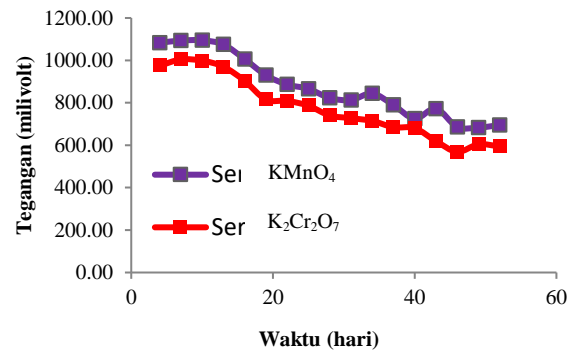
Gambar 3. Tegangan MFC Tunggal dalam 3 hari pertama

Berdasarkan Gambar 3 diketahui bahwa laju kenaikan tegangan mengalami perlambatan setelah 72 jam. Ditunjukkan kurva relatif konstan, yaitu pada jam ke-66 dan ke-72 (1072,5 mV dan 1072,33 mV) untuk MFC oksidator $KMnO_4$ sedangkan untuk MFC oksidator $K_2Cr_2O_7$ menunjukkan nilai relatif konstan pada jam ke-60, 66, dan 72 (983,5 mV; 989,16 mV; dan 985 mV). Laju kenaikan voltase MFC erat hubungannya dengan proses pembentukan biofilm.

Pembentukan biofilm pada anoda berlangsung dalam 5 (lima) tahapan yaitu perlekatan sel, multiplikasi sel, maturasi I, maturasi II dan dispersi [16]. Pada tahap awal pembentukan biofilm pertumbuhan bakteri berlangsung secara logaritmik dan memanfaatkan senyawa organik sebagai nutrisi untuk menghasilkan EPS. Proses metabolisme yang dilakukan bakteri akan melepaskan sejumlah elektron dan diterima oleh anoda, sehingga muncul beda potensial (tegangan) [17]. Oleh karena itu pada awal waktu pengoperasian MFC laju kenaikan tegangan berlangsung cepat. Pada tahap berikutnya laju kenaikan tegangan akan melambat seiring dengan semakin tebalnya lapisan biofilm. Melambatnya laju kenaikan tegangan disebabkan transfer elektron ke anoda yang semakin kurang efisien akibat kondisi biofilm yang semakin tebal. Semakin menebalnya biofilm juga menjadikan mikroba yang membentuk lapisan biofilm pada bagian paling bawah (paling dekat ke anoda) akan kekurangan nutrisi serta terjadi akumulasi material-material toksik sehingga pada tahap maturasi akhir akan terjadi proses yang disebut *quorum sensing*. *Quorum sensing* adalah proses mengeluarkan sinyal kimia yang dilakukan bakteri untuk meregulasi struktur biofilm agar lebih matang dan tersedia lebih banyak pori untuk suplai nutrisi [18].

Faktor lain yang sangat mempengaruhi nilai tegangan MFC adalah ketersediaan nutrisi. Apabila biofilm sudah matang (matur) maka nutrisi yang tersedia akan digunakan untuk menjaga kelangsungan hidup dan proliferasi (berkembang biak). Pada fase ini tegangan akan tetap meningkat dengan laju yang lambat. Ketika pertumbuhan bakteri telah mencapai maksimum atau lebih dikenal dengan istilah fase stasioner yaitu jumlah bakteri relatif konstan maka nilai tegangan juga akan relatif konstan selama beberapa waktu. Kemudian tegangan akan menurun seiring dengan berkurangnya nutrisi dalam sampel. Nutrisi yang semakin berkurang menyebabkan

semakin banyak mikroba yang tidak memperoleh nutrisi sehingga akan terjadi fase kematian, yaitu jumlah mikroba akan terus menurun. Berdasarkan percobaan setelah 72 jam laju kenaikan tegangan MFC semakin melambat dan energi listrik yang dihasilkan mulai mencapai maksimum (Gambar 4).



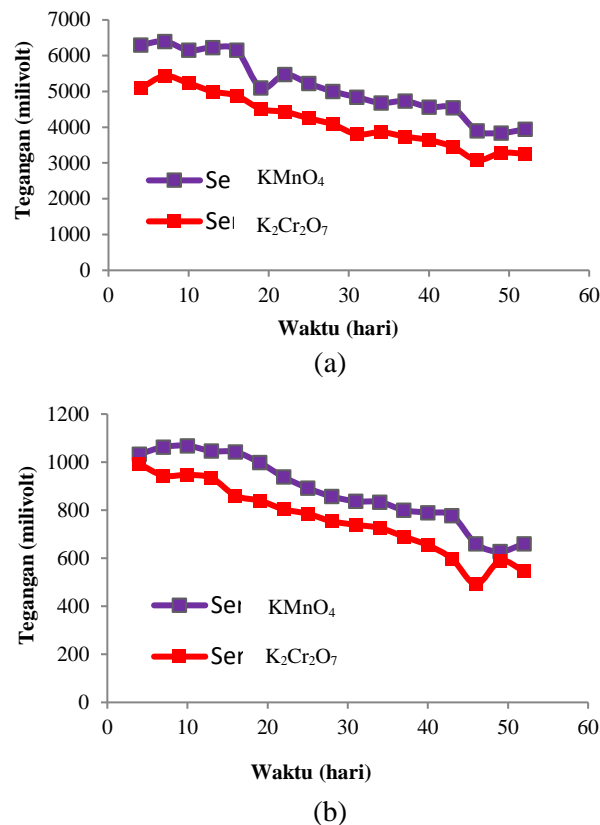
Gambar 4. Tegangan Sel MFC setelah 3 hari pertama

Berdasarkan Gambar 4, pada hari ke-6 hingga hari ke-9 kondisi *steady state* dan tegangan maksimum telah dicapai. Hasil pengamatan diperoleh nilai maksimum tegangan MFC tunggal untuk KMnO₄ sebesar 1102,33 mV pada hari ke-9 sedangkan MFC tunggal dengan oksidator K₂Cr₂O₇ nilai tegangan maksimal dicapai pada hari ke-6 sebesar 1005,67 mV. Hasil pengukuran tegangan MFC dengan oksidator KMnO₄ selama 53 hari menunjukkan bahwa pada saat nilai tegangan rata-rata sel tunggal hampir dan telah mencapai maksimum terlihat perubahan nilai tegangan yang tidak begitu signifikan.

Dari Gambar 3 dan 4 terlihat MFC oksidator KMnO₄ menghasilkan tegangan yang lebih besar daripada MFC oksidator K₂Cr₂O₇. Hasil ini sesuai dengan nilai potensial standar (E°) yang dituliskan Vanysek (2000) dalam *Electrochemical Series* bahwa potensial standar KMnO₄ sebesar 1,679 V sedangkan K₂Cr₂O₇ sebesar 1,232 V. Potensial standar KMnO₄ lebih besar dari K₂Cr₂O₇ sehingga menciptakan beda potensial lebih besar dalam MFC. Selain itu, nilai tegangan yang dihasilkan oleh MFC bersifat fluktuatif. Hal ini berhubungan erat dengan efisiensi transfer elektron dari membran bakteri ke anoda. Efisiensi transfer elektron dipengaruhi oleh adanya persaingan antar bakteri untuk memperoleh nutrisi dan juga faktor TEA (*Terminal Electron Acceptor*). TEA merupakan spesies-spesies yang dapat menangkap elektron seperti oksigen, nitrit, nitrat, sulfat dan sebagainya yang berdifusi melalui sel lalu elektron tersebut ditangkap oleh anoda [7].

3.1.2. MFC Ganda

Sebanyak 6 (enam) unit MFC tunggal substrat air lindi disusun membentuk sistem MFC ganda untuk meningkatkan performanya. MFC yang menggunakan oksidator KMnO₄ dengan susunan seri menghasilkan tegangan maksimum pada hari ke-6 sebesar 6460 mV (6,46 V) dengan kuat arus 0,528 mA. Pada hari yang sama dengan menggunakan susunan paralel tegangan yang dihasilkan sebesar 1053 mV (1,053 V) dengan kuat arus 2 mA. MFC yang menggunakan oksidator K₂Cr₂O₇ dengan susunan seri menghasilkan tegangan maksimum sebesar 5440 mV (5,44 V) juga pada hari ke-6 dengan kuat arus 0,351 mA. Pada hari yang sama dengan susunan paralel MFC oksidator K₂Cr₂O₇ menghasilkan tegangan sebesar 954 mV dan kuat arus 2,06 mA (Gambar 5).



Gambar 5. Pengukuran tegangan MFC ganda: a. rangkaian seri, b. rangkaian paralel

Berdasarkan data yang diperoleh baik pada MFC yang menggunakan oksidator KMnO_4 maupun $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ diketahui bahwa MFC ganda dengan susunan seri nilai tegangannya meningkat beberapa kali lipat sedangkan kuat arusnya menyerupai kuat arus sel tunggal (Gambar 5). Sebaliknya, susunan paralel menghasilkan kuat arus yang lebih besar dengan nilai tegangan yang menyerupai tegangan sel tunggal (Gambar 5).

3.2. Daya Hantar Listrik (DHL) Air Lindi

Nilai Daya Hantar Listrik (DHL) sampel air lindi dapat dikategorikan sebagai ukuran konduktivitas larutan. DHL adalah kemampuan air untuk menghantarkan arus listrik yang disebabkan adanya garam-garam terlarut yang dapat terionisasi serta nilainya dipengaruhi oleh jenis ion, valensi, dan konsentrasi. Nilai ini berhubungan dengan pergerakan suatu ion di dalam larutan ion yang mudah bergerak dan mempunyai daya hantar listrik yang besar [19]. Air lindi diindikasikan banyak mengandung senyawa asam, basa dan garam yang terlarut sehingga akan terpecah menjadi ion positif dan negatif dan kemudian dapat meningkatkan DHL [20]. Sebelum digunakan dalam MFC nilai DHL air lindi sebesar 36,9 mS dan setelah air lindi digunakan dalam MFC selama 53 hari nilai DHL turun menjadi 29,6 mS.

Sebagaimana yang telah dikemukakan bahwa DHL air limbah bergantung pada keberadaan garam-garam yang terionisasi, jenis dan konsentrasinya. Salah satu laporan menyebutkan bahwa jenis ion yang terdapat pada air lindi di antaranya NO_3^- (nitrit), NO_2^- (nitrat), PO_4^{3-} (fosfat), SO_4^{2-} (sulfat), dan lain-lain [21]. Penurunan DHL terjadi akibat terlepasnya kation dan anion yang mengendap dalam kondisi basa (pH air lindi setelah 53 hari adalah 8,37) [22]. Selain itu perubahan nilai DHL juga dapat disebabkan oleh aktivitas bakteri yang mempengaruhi konsentrasi ion tertentu dalam air lindi misalnya ion NH_4^+ (ammonium) yang mengalami proses nitrifikasi membentuk nitrit dan nitrat dengan adanya bakteri *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* [19].

3.3. Bakteri dalam Substrat MFC

Bakteri merupakan konstituen penting terkait kinerja MFC menghasilkan energi listrik. MFC dapat dioperasikan dengan menggunakan kultur bakteri tertentu maupun memanfaatkan secara langsung bakteri dalam limbah organik. Hasil uji pewarnaan gram bakteri substrat MFC menunjukkan terdapat 3 jenis bakteri pada sampel air lindi, yakni bakteri dengan bentuk kokus dan Gram negatif, kokus dan Gram positif, serta basil dan Gram positif. Selain itu analisis unit pembentukan koloni bakteri (CFU) menunjukkan nilai sebesar 3×10^8 CFU/mL. Berikut Tabel 1, hasil uji pewarnaan gram bakteri.

Tabel 1. Karakterisasi bakteri berdasarkan pewarnaan gram

Isolat	Bentuk	Gram
1	Kokus	Negatif
2	Basil	Positif
3	Kokus	Positif
4	Kokus	Negatif
5	Kokus	Positif

Secara umum bakteri yang berperan dalam menghasilkan energi listrik pada teknologi MFC dengan sampel limbah organik (bukan substrat artifisial) akan memiliki jenis yang beragam. Hal ini karena dalam limbah organik terdapat bermacam bakteri yang bekerja secara berkesinambungan dalam mendegradasi senyawa-senyawa organik. Pemanfaatan secara langsung kultur campuran bakteri yang terdapat pada limbah organik sebagai substrat MFC lebih praktis dan lebih ekonomis dibanding penggunaan kultur murni [23]. Selain itu, kultur campuran dalam limbah organik dapat mengandung jenis bakteri elektrogenik yang dapat mentransfer elektron hasil metabolisme ke anoda, di samping bakteri non-elektrogenik. Penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa beberapa jenis bakteri yang terdapat pada air lindi antara lain *Protobacteria*, *Firmicutes*, *Thermotoge*, *Spircheates*, dan *Bacteroidetes* [24]. Kultur *Firmicutes* dan *Proteobacteria* memiliki kemampuan berinteraksi dengan anoda untuk menghasilkan arus listrik.

Bakteri mengkatabolisis senyawa-senyawa organik seperti glukosa [25], asetat atau air limbah [26]. Elektron dihasilkan melalui proses metabolisme bahan-bahan organik dalam limbah oleh bakteri [27]. Tahapan transfer elektron berlangsung pada membran dalam mitokondria dengan melibatkan enzim NADH dehidrogenase seperti sitokrom. Mekanisme transfer elektron secara langsung dari bakteri ke elektroda (anoda) diperkirakan berlangsung melalui enzim respirasi misalnya sitokrom [28].

4. KESIMPULAN

MFC yang menggunakan oksidator KMnO_4 memiliki performa terbaik dengan tegangan rata-rata sel tunggal pada 72 jam (3 hari pertama) mencapai 1072,33 mV dan tegangan rata-rata sel tunggal maksimum sebesar 1102,33 mV. Kemudian, susunan seri sel-sel tunggal MFC menghasilkan tegangan maksimum dan kuat arus masing-masing 6460 mV dan 0,528 mA untuk MFC- KMnO_4 serta 5440 mV dan 0,351 mA untuk MFC- $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, sedangkan susunan paralel MFC menghasilkan tegangan dan kuat arus masing-masing 1053 mV dan 2 mA untuk MFC- KMnO_4 serta 954 mV dan 2,06 mA untuk MFC- $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Fakta adanya energi listrik yang dihasilkan oleh MFC dengan substrat air lindi sesuai dengan hasil uji pewarnaan gram bakteri bahwa air lindi memiliki kandungan bakteri yang beragam.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. H. Putranto, "Saatnya berfikir ketahanan energi nasional," *Journal of the Indonesian Oil and Gas Community*, 2011.
- [2] M. Suarsana and P. S. Wahyuni, "Global warming: Ancaman nyata sektor pertanian dan upaya mengatasi kadar CO₂ atmosfer," *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 11, no. 1, pp. 31-37, 2011.
- [3] B. Holland, J. Zhu, and L. Jamet, "Fuel cell technology and application," 2007. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=ebc68e515f7da9de5543b6d46fe2f1b200e96681>.
- [4] H. Liu and B. E. Logan, "Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane," *Environmental Science & Technology*, vol. 38, no. 14, pp. 4040-4046, 2004/07/01 2004, doi: 10.1021/es0499344.
- [5] Y. A. Indriyani, I. Rusmana, S. Anwar, G. Djajakirana, and D. A. Santosa, "Harvesting bioelectricity from microbial fuel cells (MFCs) powered by electroactive microbes," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, vol. 12, no. 3, pp. 583-596, 2023, doi: <http://dx.doi.org/10.23960/jtep-1.v12i3.583-596>.
- [6] B. Min and B. E. Logan, "Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell," *Environmental Science & Technology*, vol. 38, no. 21, pp. 5809-5814, 2004/11/01 2004, doi: 10.1021/es0491026.
- [7] B. E. Logan, C. Murano, K. Scott, N. D. Gray, and I. M. Head, "Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell," *Water Research*, vol. 39, no. 5, pp. 942-952, 2005/03/01/ 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.019>.
- [8] D. Pant, G. Van Bogaert, L. Diels, and K. Vanbroekhoven, "A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production," *Bioresour. Technology*, vol. 101, no. 6, pp. 1533-1543, 2010/03/01/ 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>.
- [9] P. Purwono, H. Hermawan, and H. Hadiyanto, "Penggunaan teknologi reaktor microbial fuel cells (Mfcs) dalam pengolahan limbah cair industri tahu untuk menghasilkan energi listrik," *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, vol. 12, no. 2, pp. 57-65, 2015.
- [10] B. Ibrahim, P. Suptijah, and S. Rosmalawati, "Kinerja rangkaian seri sistem microbial fuel cell sebagai penghasil biolistrik dari limbah cair perikanan," *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, vol. 17, no. 1, pp. 71-79, 2014, doi: <https://doi.org/10.17844/jphpi.v17i1.8139>.
- [11] R. M. Rachma, V. Reinaldo, A. Muhyinsyah, and T. Setiadi, "Electricity generation from tapioca wastewater using a microbial fuel cell (MFC)," *Southeast Asian Water Env.*, vol. 4, p. 115, 2010. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Tjandra-Setiadi/publication/343098954_Electricity_Generation_from_Tapioca_Wastewater_Using_a_Microbial_Fuel_Cell_MFC/links/5f16ae62a6fdcc9626a431ba/Electricity-Generation-from-Tapioca-Wastewater-Using-a-Microbial-Fuel-Cell-MFC.pdf.
- [12] A. Singh and A. Kaushik, "Sustained energy production from wastewater in microbial fuel cell: effect of inoculum sources, electrode spacing and working volume," *3 Biotech*, vol. 11, no. 7, p. 344, 2021/06/17 2021, doi: 10.1007/s13205-021-02886-6.
- [13] M. D. Vaverková and D. Adamcová, "Evaluation of landfill leachate pollution: findings from a monitoring study at municipal waste landfill," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 16, no. 2, 2015.
- [14] D. E. Holmes, D. R. Bond, R. A. O'Neil, C. E. Reimers, L. R. Tender, and D. R. Lovley, "Microbial communities associated with electrodes harvesting electricity from a variety

- of aquatic sediments," *Microbial Ecology*, vol. 48, no. 2, pp. 178-190, 2004/10/01 2004, doi: 10.1007/s00248-003-0004-4.
- [15] R. Sudarman, A. Zaeni, I. Usman, Alwahab, and I. Hidayatulloh, "Optimization of electricity generation from marine sediment of Kendari Bay using stacked sediment microbial fuel cell," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1450, no. 1, p. 012111, 2020/02/01 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1450/1/012111.
- [16] M. S. Aparna and S. Yadav, "Biofilms: microbes and disease," *Brazilian Journal of Infectious Diseases*, vol. 12, pp. 526-530, 2008, doi: <https://doi.org/10.1590/S1413-86702008000600016>.
- [17] A. Ghoreyshi, T. Jafary, G. Najafpour, and F. Haghparast, "Effect of type and concentration of substrate on power generation in a dual chambered microbial fuel cell," in *World Renewable Energy Congress-Sweden*, 2011, pp. 8-13. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Ghasem-Najafpour/publication/298787564_Fructose_as_Substarte_for_bioelectricity_Generatio_n_in_MFC/links/58012c7708ae310e0d98ad83/Fructose-as-Substarte-for-bioelectricity-Generation-in-MFC.pdf. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Ghasem-Najafpour/publication/298787564_Fructose_as_Substarte_for_bioelectricity_Generatio_n_in_MFC/links/58012c7708ae310e0d98ad83/Fructose-as-Substarte-for-bioelectricity-Generation-in-MFC.pdf
- [18] O. Monzon, Y. Yang, Q. Li, and P. J. J. Alvarez, "Quorum sensing autoinducers enhance biofilm formation and power production in a hypersaline microbial fuel cell," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 109, pp. 222-227, 2016/05/15/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.01.023>.
- [19] K. Singh, "Optimization and performance evaluation of microbial fuel cell by varying agar concentration using different salts in salt bridge medium," *Archives of Materials Science Engineering*, vol. 101, no. 2, pp. 79-84, 2020, doi: 10.5604/01.3001.0014.1193.
- [20] S. Sehad and W. T. Cahyanto, "Penguajian daya hantar listrik air tanah di sekitar tempat pembuangan akhir gunung tugel kabupaten banyumas menggunakan prinsip jembatan wheatstone," *Molekul*, vol. 4, no. 1, pp. 39-47, 2009.
- [21] A. Munawar, *Rembesan Air Lindi (Leachate) Dampak Pada Tanaman Pangan dan Kesehatan*. Surabaya: UPN Press, 2011.
- [22] K. Hermawan, Djaenudin, and M. Sururi, "Pengolahan air limbah industri tahu menggunakan sistem *double chamber microbial fuel cell*," *Jurusan Reka Lingkungan*, vol. 2, no. 1, pp. 1-9, 2014. [Online]. Available: <https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/lingkungan/article/view/435/670>.
- [23] S. Fatemi, A. A. Ghoreyshi, G. Najafpour, and M. Rahimnejad, "Bioelectricity generation in mediator-less microbial fuel cell: Application of pure and mixed culture," *Iranica Journal of Energy & Environment*, vol. 3, no. 2, pp. 104-108, 2012. [Online]. Available: https://www.ijee.net/article_64385_949adc97619634233a253c697d51597d.pdf.
- [24] W. Zhang, B. Yue, Q. Wang, Z. Huang, Q. Huang, and Z. Zhang, "Bacterial community composition and abundance in leachate of semi-aerobic and anaerobic landfills," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 23, no. 11, pp. 1770-1777, 2011, doi: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60613-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60613-4).
- [25] T. Chen *et al.*, "A miniature biofuel cell," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 123, no. 35, pp. 8630-8631, 2001/09/01 2001, doi: 10.1021/ja0163164.
- [26] W. Habermann and E. H. Pommer, "Biological fuel cells with sulphide storage capacity," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 35, no. 1, pp. 128-133, 1991/04/01 1991, doi: 10.1007/BF00180650.
- [27] A. E. Franks and K. P. Nevin, "Microbial fuel cells, a current review," *Energies*, vol. 3, no. 5, pp. 899-919, 2010. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/3/5/899>.