

Potensi SMFC dalam Pengolahan Air Limbah Domestik : Efisiensi Penghilangan Logam dan Produksi Listrik

Sri Magfirah HS^{1*}, St. Aisyah Humaerah¹, Nururrahmah¹

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Syekh Yusuf Al Makassar Gowa

Email korespondensi: magfirahsri@gmail.com

Abstrak

Peningkatan pencemaran lingkungan mendorong upaya intensif dalam pengelolaan air limbah, meskipun metode yang ada sering kali memerlukan investasi biaya yang substansial. Sebagai alternatif yang menjanjikan secara ekonomis dan efisien, *Sediment Microbial Fuel Cell* (SMFC) telah diteliti sebagai sistem bioelektrokimia yang dapat menghilangkan kontaminan dari air limbah domestik dan menghasilkan energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi SMFC dalam pengolahan air limbah domestik melalui analisis efisiensi penghilangan logam serta produksi energi listrik. Eksperimen dilakukan menggunakan sampel air limbah domestik dari permukiman di Jalan Bitoa Lama, Borong, Kecamatan Manggala, Makassar, serta sedimen dari Sungai Tallo, Makassar. SMFC dirancang menggunakan silinder PVC dengan elektroda karbon seluas 15,5744 cm², dengan anoda ditempatkan di zona sedimen dan katoda di zona air limbah domestik. Operasi SMFC dilakukan dalam mode tegangan rangkaian terbuka selama 240 jam pada suhu lingkungan (25°C - 30°C), dengan analisis kualitas air limbah mengacu pada parameter logam Fe dan Mn sesuai standar nasional Indonesia (SNI). Hasil penelitian menunjukkan efisiensi penghilangan logam sebesar 78,06% untuk Fe dan 61,73% untuk Mn, sementara kinerja energi listrik SMFC diamati melalui densitas daya tertinggi mencapai 0,0313 W/m² selama periode pengamatan. Temuan ini menegaskan bahwa SMFC memiliki potensi sebagai metode pengolahan air limbah domestik yang tidak hanya efisien dan ekonomis, tetapi juga dapat berkontribusi dalam penghasilan energi listrik tambahan sebagai nilai tambahnya.

Kata kunci: SMFC, Pengolahan Air Limbah Domestik, Bioelektrokimia, Efisiensi Penghilangan Logam, Produksi Energi Listrik

Abstract

Environmental pollution escalation drives intensive efforts in wastewater management, although existing methods often require substantial financial investment. As a promising, economically viable, and efficient alternative, the Sediment Microbial Fuel Cell (SMFC) has been researched as a bioelectrochemical system capable of contaminant removal from domestic wastewater and electricity generation. This study aims to evaluate the potential of SMFC in domestic wastewater treatment through analysis of metal removal efficiency and electricity production. Experiments were conducted using domestic wastewater samples from residential areas on Jalan Bitoa Lama, Borong, Manggala District, Makassar, and sediment from the Tallo River, Makassar. The SMFC was designed using a PVC cylinder with a carbon electrode surface area of 15.5744 cm², with the anode placed in the sediment zone and the cathode in the domestic wastewater zone. SMFC operation was conducted in open circuit voltage mode for 240 hours at ambient temperatures (25°C - 30°C), with wastewater quality analysis referencing Fe and Mn metal parameters according to Indonesian national standards (SNI). Research results indicated metal removal efficiencies of 78.06% for Fe and 61.73% for Mn, while SMFC electrical energy performance was observed with the highest power density reaching 0.0313 W/m² during the observation period. These findings affirm that SMFC holds potential as a domestic wastewater treatment method that is not only efficient and cost-effective but also capable of contributing to additional electricity generation as an added value.

Keyword: SMFC, Domestic Wastewater Treatment, Bioelectrochemistry, Metal Removal Efficiency, Electricity Production

PENDAHULUAN

Air limbah domestik dikenal sebagai air limbah perkotaan merupakan air limbah yang dibuang dari rumah tinggal, komersial, dan institusi di suatu kota atau kawasan perkotaan kecil, yang dikumpulkan melalui sistem saluran pembuangan. Seringkali, limbah cair dari industri kecil juga bisa masuk ke saluran pembuangan sanitasi bersama air limbah domestik. Komposisi air limbah domestik ini bervariasi tergantung pada asalnya dan dapat mengandung berbagai jenis mikroorganisme, terutama bakteri [1]. Secara fisik, komposisi air limbah domestik yaitu 99,9% berupa cairan, dan sisanya 0,1% dalam bentuk padatan. Dari padatan tersebut, sekitar 70% adalah bahan organik, yang meliputi protein, karbohidrat, dan lemak. Sementara,

30% sisanya adalah bahan anorganik, seperti butiran, logam, dan garam-garaman [2].

Air limbah domestik memiliki kontribusi signifikan terhadap total limbah cair yang dihasilkan dari aktivitas manusia. Hingga 90% dari konsumsi air bersih dibuang sebagai air limbah. Konsumsi air dasar untuk kebutuhan hidrasi dan kebersihan minimal adalah sekitar 20 liter per kapita per hari (l/k/d), sementara konsumsi optimal, termasuk kebersihan pribadi, persiapan makanan, pencucian, dan mandi, memerlukan setidaknya 100 l/k/d. Berbagai polutan yang dihasilkan dari air limbah domestik kemudian masuk ke badan-badan air, seperti sungai dan danau, dan jika terus menerus bertambah maka akan melampaui kapasitas

lingkungan, sehingga sulit untuk melakukan pemurnian secara alami atau yang dikenal sebagai *self purification*. Akibatnya, terjadi akumulasi polutan yang menyebabkan degradasi kualitas air, matinya biota perairan, serta pencemaran tanah di sekitar badan air tersebut. Dampak jangka panjang dari kondisi ini termasuk rusaknya ekosistem akuatik, terganggunya rantai makanan, dan penurunan kualitas lingkungan hidup bagi masyarakat yang bergantung pada sumber daya air tersebut [2], [3]. Pengolahan air limbah domestik perlu dilakukan sebab merupakan kebutuhan yang paling mendasar untuk melindungi lingkungan dan badan air yang berfungsi sebagai sumber air bersih di seluruh dunia. Namun, proses pengolahan air limbah tentunya memakan energi signifikan sebab sistem yang digunakan mayoritas merupakan sistem lumpur aktif yang membutuhkan bahan kimia dan energi yang intensif serta biaya modal dan operasional/maintenance yang tinggi. Di Amerika Serikat, pengolahan air limbah menggunakan energi sekitar 110 TWh per tahun, setara dengan kebutuhan listrik 9,6 juta rumah tangga, dengan biaya yang dihabiskan untuk pengolahan air limbah domestik yaitu sekitar \$25 miliar setiap tahun, dan diperlukan tambahan \$300 miliar untuk meningkatkan fasilitas pengolahan milik publik [4]. Daerah perkotaan di Indonesia, volume total air limbah (domestik, komersial, dan industri) dan aliran air hujan diperkirakan mencapai 14,3 km³ per tahun, sementara kapasitas pengolahan air limbah kota hanya 0,3 km³ per tahun. Air kotor (*black water*) sebagian besar diolah di tangki septik individu atau komunal, sementara air abu-abu (*greywater*) sebagian besar dibuang ke badan air tanpa pengolahan [5]. Keterbatasan kapasitas pengolahan air limbah ini menciptakan kebutuhan mendesak akan solusi alternatif yang lebih efisien dan berkelanjutan dalam menghadapi tantangan pengelolaan air limbah di daerah perkotaan. Sebuah alternatif pengolahan air limbah yang saat ini dikembangkan adalah Sel Bahan Bakar Mikroba Sedimen (SMFC). Tiga jenis proses fisik, kimia, dan biologis tercakup dalam sistem ini yaitu sedimentasi dan proses bioelektrokimia. Dalam proses bioelektrokimia, bahan organik yang terkandung dalam air limbah dan sedimen diubah oleh mikroba menjadi energi listrik. Mikroorganisme yang berperan dalam proses ini sebagian besar adalah bakteri reduktif seperti *Geobacter sulfurreducens*, *Aeromonas hydrophila*, *Geobacter metallireducens*, *Shewanella putrefaciens*, *Clostridium butyricum*, dan *Rhodospirillum rubrum*. Sistem ini telah berkembang pesat karena biaya efektif, dapat bekerja dalam berbagai kondisi lingkungan, termasuk suhu operasi rendah, tidak memerlukan pemeliharaan (misalnya, penggantian berkala), konstruksi sederhana, dapat ditempatkan dengan mudah di lokasi terpencil, dan tidak menghasilkan emisi komponen beracun [6], [7]. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi SMFC sebagai alternatif teknologi pengolahan air limbah domestik yang tidak hanya

efektif dalam menghilangkan kontaminan, tetapi juga mampu menghasilkan energi listrik tambahan. Dengan menggunakan sampel air limbah domestik dari permukiman dan sedimen dari sungai, penelitian ini berfokus pada analisis efisiensi penghilangan logam berat seperti Fe dan Mn, serta kinerja produksi energi listrik SMFC. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh wawasan lebih mendalam tentang penerapan SMFC dalam skala yang lebih luas, serta kontribusinya dalam upaya pelestarian lingkungan dan pemanfaatan sumber daya energi terbarukan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan teknologi pengolahan air limbah yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, sekaligus memberikan solusi praktis bagi pengelolaan air limbah domestik di daerah perkotaan di Indonesia dan di seluruh dunia.

METODE PENELITIAN

1. Alat dan Bahan

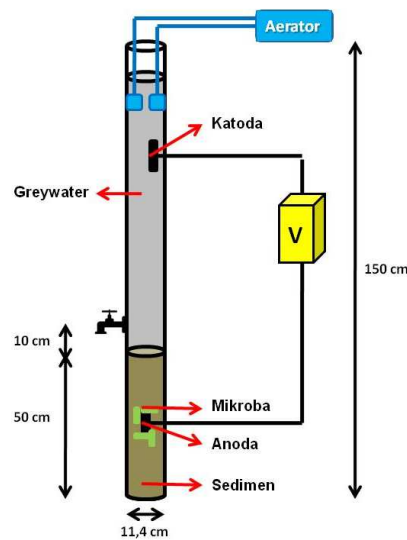
Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi air limbah domestik (*greywater*), sedimen, lem lilin, pipa pvc, kran plastik, elektroda karbon, kabel elektroda, aerator, multimeter, HCl 1 M, NaOH 1 M, larutan digesti, larutan reagen asam sulfat, dan *aquadest*.

2. Pengambilan Sampel

Sampel air limbah domestik (*greywater*) diambil dari area perumahan, khususnya di Jalan Bitoa Lama, Borong, Kecamatan Manggala, Makassar, yang memiliki saluran pengumpulan limbah, sehingga memudahkan pengambilan sampel. Sedangkan sampel sedimen diambil dari sedimen Sungai Tallo yang ditumbuhi mangrove, untuk mengurangi akumulasi kontaminan dalam sedimen, sehingga sedimen yang masuk ke dalam sistem SMFC tidak mempengaruhi kualitas air limbah domestik (*greywater*) di atasnya.

3. Perangkaian dan Pengoperasian Alat SMFC

Rangkaian SMFC dibuat menggunakan silinder *Polyvinyl chloride* (PVC) dengan tinggi 150 cm dan diameter dalam 11,4 cm. Elektroda yang digunakan adalah elektroda karbon dengan luas permukaan 15,5744 cm² sebagai katoda dan anoda yang telah disiapkan. Katoda diposisikan di zona air yang dipertahankan hingga 90 cm menggunakan air limbah domestik (*greywater*), sedangkan anoda diposisikan di zona sedimen dengan tinggi total 50 cm. Port pengambilan sampel (kran air) ditempatkan 10 cm di atas permukaan zona sedimen (Gambar 1). SMFC diberi tambahan aerasi menggunakan pompa aerator yang dialirkan ke sisi katode. Sistem ini dioperasikan dalam mode sirkuit terbuka (*Open Circuit Voltage*) dan dipantau selama 240 jam (10 hari) dalam kondisi suhu sekitar (25°C - 30°C).



Gambar 1. Rangkaian Alat Sediment Microbial Fuel Cell (SMFC)

4. Pengukuran dan Analisis

Kualitas air limbah domestik (*greywater*) dianalisis menggunakan parameter logam (logam Fe dan Mn) sesuai dengan metode standar nasional Indonesia (SNI). Sementara itu, kinerja SMFC dalam menghasilkan bioelektrik dapat dilihat dari kekuatan arus (I) dan tegangan (V) yang dihasilkan melalui pengukuran menggunakan multimeter digital. Berdasarkan data arus dan tegangan tersebut, nilai densitas daya ($W\ m^{-2}$) yang merupakan daya per satuan luas permukaan elektroda dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Densitas Daya } (W\ m^{-2}) = \frac{I\ (mA) \times V\ (mV)}{A\ (cm^2)} \times 0.1 \quad (1)$$

Di mana I adalah kuat arus (mA), V adalah tegangan (mV), dan A adalah luas permukaan elektroda (cm^2).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kualitas air limbah domestik dapat bervariasi sesuai dengan kondisi lokal di daerah tersebut, waktu aktivitas (jam, hari, musim), jenis distribusi, kebiasaan, budaya, dan gaya hidup masyarakat. Air limbah dengan kontaminan tinggi akan menyebabkan pencemaran dan mengurangi kualitas badan air. Kualitas air limbah domestik (*greywater*) yang dihasilkan oleh masyarakat di Jalan Bitoa Lama, Borong, Kecamatan Manggala, Makassar, dengan konsentrasi logam Fe dan Mn sebelum diproses dengan SMFC dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Konsentrasi Logam Fe dan Mn dalam Air Limbah Domestik Sebelum Pengolahan dengan SMFC

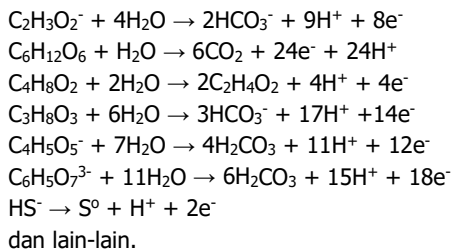
Parameter	Nilai	Satuan
Logam Fe	0,0547	mg/L
Logam Mn	0,0392	mg/L

Uji kualitas awal air limbah sangat penting untuk memahami karakteristik air limbah yang akan diolah. Pengolahan air limbah dapat dilakukan dalam tiga bentuk, yaitu pengolahan fisik seperti metode filtrasi dan sedimentasi, pengolahan kimia seperti penambahan bahan kimia atau penghancuran kontaminan, atau pengolahan biologis yang melibatkan aktivitas mikroorganisme. Dalam penelitian ini, metode pengolahan air limbah domestik (*greywater*) yang digunakan adalah metode SMFC (*Sediment Microbial Fuel Cell*). Tiga jenis pengolahan termasuk pengolahan fisik, kimia, dan biologis tercakup pada alat ini, di mana untuk pengolahan fisik yang dimaksud adalah proses

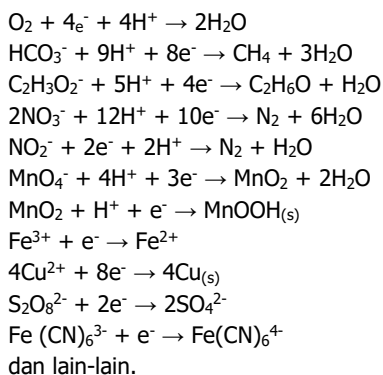
sedimentasi, dan untuk pengolahan kimia dan biologis adalah sistem bioelektrokimianya.

Sedimen dianggap sebagai tempat di mana polutan terakumulasi ke konsentrasi yang berkali-kali lipat dari lapisan air di atasnya. Hal ini menyebabkan bahan organik yang terkandung dalam sedimen meningkat (berkisar antara 0,4 hingga 2,2 wt%), sehingga dapat digunakan sebagai substrat oleh mikroorganisme untuk melakukan aktivitasnya [7], [8]. Mikroorganisme yang berperan dalam sedimen adalah bakteri fermentatif dan bakteri elektrogenik yang ditemukan hidup berdampingan. Genus yang paling dominan adalah genus *Pseudomonas* (10,06%) dan *Geobacter* (9,11%). Bakteri

fermentatif mengubah bahan organik dalam sedimen menjadi molekul kecil yang sederhana. Selanjutnya, hasil dari perubahan tersebut dapat dioksidasi sepenuhnya oleh bakteri elektrogenik [9]. Proses oksidasi ini berlangsung dalam kondisi anaerobik (tanpa oksigen) sehingga memerlukan akseptor elektron selain oksigen seperti sulfat dan nitrat. Namun, akseptor elektron ini terus berkurang dan mengakibatkan kemungkinan tidak ada degradasi sama sekali [10]. Untuk membuat proses degradasi terus berlanjut, elektroda karbon diberikan untuk mengalirkan elektron ke arah area yang memiliki akseptor elektron lebih tinggi seperti zona air limbah. Elektroda karbon yang melepaskan elektron adalah anoda (-), sedangkan elektroda yang menerima elektron adalah katode (+). Reaksi oksidasi pada anoda berlangsung secara spontan dan terus-menerus melepaskan elektron, sehingga cenderung menarik anion dan menjauhkan kation. Beberapa reaksi oksidasi yang umumnya terjadi secara alami dapat ditulis sebagai berikut :



Elektron yang dihasilkan dalam reaksi di atas adalah elektron yang akan dilepaskan oleh anoda ke katoda. Sementara itu, proton bergerak menjauh dari anoda dan menuju katoda melalui gradien oksigen secara alami. Jumlah akseptor elektron seperti oksigen terlarut di daerah katoda menyebabkan reaksi reduksi. Beberapa reaksi reduksi yang umumnya terjadi secara alami dapat ditulis sebagai berikut:



Setengah dari reaksi yang terjadi pada setiap elektroda menciptakan perbedaan potensial antara kedua elektroda, menyebabkan pembentukan listrik dan secara bersamaan mengurangi kontaminan

dalam air limbah.

1. Efisiensi Penghilangan Logam dalam Air Limbah Domestik

Bioremediasi adalah cara untuk memulihkan lingkungan yang terkontaminasi dengan memanfaatkan berbagai kemampuan metabolisme mikroorganisme untuk mengubah kontaminan menjadi produk yang tidak berbahaya. Sistem SMFC adalah salah satu teknik bioremediasi yang dapat dilakukan saat ini. Selain adanya konversi energi kimia menjadi energi listrik, peralatan yang digunakan sangat murah dan mudah dilakukan. Sistem SMFC dirancang berdasarkan penelitian dengan dua bahan utama yaitu sedimen dan air limbah yang meniru sistem lahan basah secara alami. Dua elektroda karbon diposisikan di setiap zona (anoda di zona sedimen dan katoda di zona air) dengan luas permukaan 15,5744 cm². Efisiensi penghilangan logam Fe dan Mn pada air limbah domestik (*greywater*) dengan pemanfaatan SMFC menunjukkan hasil yang cukup signifikan.

Efisiensi Penghilangan Logam Fe

Besi adalah salah satu mineral yang paling melimpah di kerak bumi. Besi yang terlarut dalam air tergantung pada jumlah oksigen yang terkandung di dalamnya dan keasaman air. Besi terlarut hadir dalam dua bentuk, yaitu sebagai Fe²⁺ dan Fe³⁺ [11]. Kelebihan besi dalam air mengubah warna air menjadi coklat kemerahan, yang dapat menyebabkan noda pada pakaian saat dicuci, serta menghasilkan bau yang mengganggu. Dalam penelitian ini, analisis logam besi dilakukan sebelum dan sesudah pengolahan, dengan nilai efisiensi penghilangan sebesar 78,06% (dari 0,0547 mg L⁻¹ menjadi 0,012 mg L⁻¹).

Efisiensi Penghilangan Logam Mn

Mangan (Mn) adalah elemen alami yang ditemukan dalam batu, tanah, dan air, yang terdiri sekitar 0,1% dari kerak bumi. Senyawa mangan yang mudah larut dalam air hadir dalam dua bentuk utama yaitu Mn(II) dan Mn(IV). Perubahan antara kedua bentuk ini terjadi melalui reaksi oksidasi dan reduksi yang dapat dimediasi secara abiotik atau mikrobiologis [12]. Air limbah domestik (*greywater*) yang tidak melalui pengolahan dapat meningkatkan konsentrasi mangan terlarut dalam badan air. Hal ini menyebabkan toksisitas pada biota air. Oleh karena itu, pengurangan konsentrasi logam ini perlu dilakukan. Dalam penelitian ini, analisis logam mangan dilakukan sebelum dan sesudah pengolahan dengan nilai efisiensi penghilangan sebesar 61,73% (dari 0,0392 mg L⁻¹ menjadi 0,015 mg L⁻¹). Hasil pengolahan *greywater* ini diharapkan dapat memenuhi standar baku mutu air limbah domestik sesuai dengan Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 68 Tahun 2016 [13].

Berdasarkan beberapa parameter yang telah diuji untuk parameter logam (logam Fe dan Mn)

menunjukkan nilai yang telah memenuhi standar kualitas sebagaimana disajikan dalam Tabel 2:

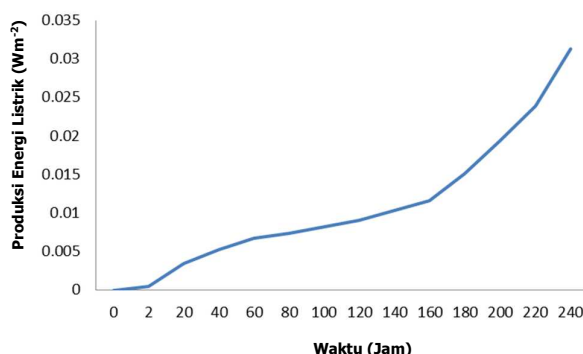
Tabel 2. Efisiensi Penghilangan Logam Fe dan Mn dalam Pengolahan Air Limbah Domestik

Parameter	Standar Kualitas Air Limbah Domestik (mg/L)	Konsentrasi Sebelum Pengolahan (mg/L)	Konsentrasi Setelah Pengolahan (mg/L)	Efisiensi Penghilangan Logam (%)
Logam Fe	1	0,0547	0,012	78,06
Logam Mn	0,5	0,0392	0,015	61,73

2. Produksi Energi Listrik SMFC

Produksi energi listrik oleh bakteri pertama kali dilakukan menggunakan mediator kimia eksogen (seperti *red natural*, *metil violet*, *potassium ferricyde*, *thonin*, *anthraquinone 2-6*, *disulfonate*, dll.) untuk transfer elektron dari bakteri ke elektroda, namun mediator kimia eksogen ini seringkali bersifat toksik dan tidak stabil. Terobosan pertama dengan menggunakan sel bahan bakar berbasis mikroba atau yang biasa disebut dengan Microbial Fuel Cell (MFC) ditemukan tanpa penambahan mediator eksogen, bakteri dapat mentransfer elektron secara langsung ke elektroda [8], [14]. MFC selanjutnya dikembangkan kembali menjadi SMFC (Sediment Microbial Fuel Cell), yang mengizinkan pertumbuhan

bakteri secara alami dalam lapisan sedimen dan menggunakan substrat organik dalam sedimen sebagai sumber energi. Kinerja SMFC dalam menghasilkan energi listrik diamati dari nilai kerapatan daya yang dihasilkan selama 240 jam, seperti yang terlihat pada Gambar 2. Berdasarkan data yang dihasilkan, pada awal pengoperasian, nilai kerapatan daya meningkat secara sangat tajam menjadi 0,0005; 0,0035; 0,0053; 0,0068; 0,0074; 0,0082; 0,0091; 0,0104; 0,0116; 0,0116; 0,0194; 0,0239; 0,0313 W m⁻² berturut-turut pada jam ke-2, ke-20, ke-40, ke-60, ke-80, ke-100, ke-120, ke-140, ke-160, ke-180, ke-200, ke-220, dan ke-240. Proses ini menunjukkan potensi besar dalam aplikasi teknologi berkelanjutan untuk menghasilkan energi dari limbah organik secara efisien dan ramah lingkungan.



Gambar 2. Produksi Energi Listrik SMFC

Sistem pengolahan aerobik lainnya memiliki kebutuhan energi yang tinggi karena melibatkan produksi massa aktif mikroorganisme yang dapat menstabilkan kondisi aerobik dari substrat organik limbah. Proses ini memerlukan aerasi yang cukup kuat untuk secara aktif mempertahankan mikroorganisme dalam sistem, sehingga biasanya memakan sekitar 45% - 75% dari total konsumsi energinya [15]. Hal ini memberikan keunggulan besar bagi sistem Sediment Microbial Fuel Cell (SMFC) dibandingkan dengan sistem pengolahan aerobik lainnya, karena tambahan hasil yang dihasilkan oleh SMFC adalah energi listrik, sehingga energi yang digunakan untuk mengolah air limbah domestik dapat diminimalkan. SMFC memiliki potensi besar sebagai sumber energi dan teknologi pengolahan limbah di masa depan, meskipun nilai

daya yang diperoleh dalam penelitian ini masih relatif kecil.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa *Sediment Microbial Fuel Cell* (SMFC) memiliki potensi besar sebagai solusi yang efisien dan ekonomis untuk pengolahan air limbah domestik, sekaligus sebagai sumber energi alternatif. Melalui eksperimen yang dilakukan menggunakan air limbah domestik dari permukiman di Jalan Bitoa Lama, Borong, Kecamatan Manggala, Makassar, serta sedimen dari Sungai Tallo, Makassar, terbukti bahwa SMFC mampu mencapai efisiensi penghilangan logam Fe dan Mn masing-masing sebesar 78,06% dan 61,73%. Selain itu, kinerja SMFC dalam

menghasilkan energi listrik juga menunjukkan hasil yang menjanjikan, dengan densitas daya tertinggi yang tercatat mencapai 0,0313 W/m² selama periode pengamatan 240 jam. Penelitian ini menggarisbawahi potensi SMFC sebagai teknologi pengolahan air limbah yang tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga berkontribusi dalam produksi energi listrik, menawarkan manfaat ganda dalam konteks pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan. Temuan ini dapat menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut dan penerapan SMFC dalam skala yang lebih luas untuk mengatasi tantangan pencemaran air limbah domestik dan kebutuhan energi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami sangat berterima kasih kepada masyarakat di Jalan Bitoa Lama, Borong, Kecamatan Manggala, Makassar, yang telah bersedia menyediakan ruang bagi para peneliti untuk dengan mudah mengambil sampel air limbah domestik (greywater). Pekerjaan ini didukung oleh Universitas Hasanuddin atas fasilitas laboratorium yang disediakan, khususnya Laboratorium Analitik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Makassar, Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. L. Karia, R. A. Christian, dan N. D. Jariwala, *Wastewater Treatment: Concepts and Design Approach, Third Edition*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2023.
- [2] M. A. Kholif, *Pengelolaan Air Limbah Domestik*. Scopindo Media Pustaka, 2020.
- [3] Widyarani, D. R. Wulan, U. Hamidah, A. Komarulzaman, R. T. Rosmalina, dan N. Sintawardani, "Domestic wastewater in Indonesia: generation, characteristics and treatment," *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 29, no. 22, hlm. 32397–32414, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19057-6.
- [4] V. G. Gude, "Wastewater treatment in microbial fuel cells – an overview," *J. Clean. Prod.*, vol. 122, hlm. 287–307, Mei 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.022.
- [5] M. R. Djuwita, D. M. Hartono, S. S. Mursidik, dan T. E. B. Soesilo, "Pollution Load Allocation on Water Pollution Control in the Citarum River," *J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 53, no. 1, Art. no. 1, Jan 2021, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.1.12.
- [6] S. M. HS, N. La Nafie, Baharuddin, Budimawan, P. Taba, dan E. B. Demmallino, "Reduction of turbidity and metal pollution from domestic wastewater (greywater) using sediment microbial fuel cell (SMFC)," *Adv. Environ. Biol.*, vol. 14, no. 1, hlm. 19–24, 2020, doi: 10.22587/aeb.2020.14.1.3.
- [7] A. Zabihallahpoor, M. Rahimnejad, dan F. Talebnia, "Sediment microbial fuel cells as a new source of renewable and sustainable energy: present status and future prospects," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 114, hlm. 94171–94183, 2015, doi: 10.1039/C5RA15279H.
- [8] S. Z. Abbas, Mohdrafatullah, N. Ismail, dan M. Izzuddinsyahir, "Outlook of Sediment Microbial Fuel Cell For Power Generation and Bioremediation of Contaminants," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 3, hlm. 45–47, 2017.
- [9] M. S. Wu, X. Xu, Q. Zhao, dan Z. Y. Wang, "Simultaneous removal of heavy metals and biodegradation of organic matter with sediment microbial fuel cells," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 84, hlm. 53433–53438, 2017, doi: 10.1039/C7RA11103G.
- [10] B. Xu, Z. Ge, dan Z. He, "Sediment Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment: Challenges and Opportunities. Environmental Science: Water Research and Technology," vol. 1, no. 3, hlm. 279–284, 2015, doi: 10.1039/C5EW00020C.
- [11] M. B. Pescod, *Wastewater Treatment and Use in Agriculture*. Roma: FAO, 1992.
- [12] P. D. Howe, H. M. Malcolm, dan S. Dobson, *Manganese and Its Compounds: Environmental Aspects*. Swiss: WHO, 2005.
- [13] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik*, BAKU MUTU AIR LIMBAH 68, 2 September 2016. [Daring]. Tersedia pada: <https://ppkl.menlhk.go.id/website/filebox/5/170314114854P.68%20BAKU%20MUTU%20LIMBAH%20DOMESTIK.pdf>
- [14] C. A. Nwadinigwe, G. J. Udo, dan A. O. Nwadinigwe, "Seasonal variations of heavy metals concentrations in sediment samples around mayor tributaries in ibeno coastal area, Niger Delta, Nigeria," *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 3, no. 11, hlm. 254–265, 2014.
- [15] H. J. Khan, H. S. Park, M. S. Hyun, I. S. Chang, M. Kim, dan B. H. A. Kim, "Mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*," *J. Enzyme Microbiol Technol*, vol. 30, hlm. 145–152, 2002.