

Teknologi *Sediment Microbial Fuel Cell* Sebagai Energi Alternatif Yang Berkelanjutan

Fajar Agus Saputro (1), Muhamad Riyan Maulana (2), Imbuk Risnawati (3), Heny Kurniawati (4)

(1)(4)Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

(2)Program Studi Sistem Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

(3)Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

fajar_agus@outlook.com (1), mriyanmaulana620@gmail.com (2), ryshamoura@gmail.com (3),
henyk@ecampus.ut.ac.id (4)

ABSTRAK

Ketergantungan akan penggunaan energi konvensional/fosil semakin meningkat selama setengah abad terakhir sehingga menyebabkan krisis energi dan peningkatan emisi CO₂. Sebagai alternatif energi, salah satu yang paling prospektif adalah Microbial Fuel Cell (MFC). Lautan Indonesia menyimpan potensi besar akan kandungan bahan organik pada sedimen laut yang dapat dijadikan sebagai sumber Sediment Microbial Fuel Cell (SMFC). Teknologi SMFC dalam skala besar saat ini masih sulit diterapkan karena studi mengenai pengenalan SMFC, strategi optimasi, dan pembuatan prototype masih sedikit. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan wawasan mengenai prinsip kerja SMFC, faktor yang mempengaruhi keberhasilan penerapan SMFC, dan strategi optimasinya. SMFC melibatkan mikroorganisme yang terdapat pada sedimen laut untuk mendegradasi bahan organik sehingga menghasilkan listrik. Eksplorasi lokasi sedimen perlu dilakukan untuk mendapatkan kualitas sedimen yang kaya akan bahan organik dan mikroorganisme. Pemilihan material elektroda juga perlu dipertimbangkan karena dapat mempengaruhi penempelan mikroba dan kemampuan mentransfer elektron. Modifikasi elektroda biasanya dilakukan untuk meningkatkan performa pembangkitan listrik. Kondisi operasi seperti suhu, kadar oksigen, dan pH dapat mempengaruhi kehidupan mikroba sedimen sehingga kondisi optimal perlu ditentukan. Scale-up SMFC memang memiliki banyak tantangan karena teknologi ini cukup baru. Akan tetapi, bila prinsip SMFC bisa dikuasai dengan baik dan setiap parameter dioptimasi, maka peluang keberhasilan scale-up SMFC semakin meningkat. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi pedoman dalam penerapan SMFC dalam skala besar.

Kata Kunci : Microbial Fuel Cell, Sedimen, Bahan Bakar Fosil, Listrik, Energi

ABSTRACT

Dependence on the use of conventional/fossil energy has increased over the past half century, causing an energy crisis and an increase in CO₂ emissions. As an alternative to energy, one of the most prospective is the Microbial Fuel Cell (MFC). The Indonesian ocean holds great potential for organic matter content in marine sediments that can be used as a source of Sediment Microbial Fuel Cell (SMFC). SMFC technology on a large scale is currently still difficult to implement because studies on the introduction of SMFC, optimization strategies, and prototyping are still small. This study aims to provide insight into the working principles of SMFC, factors that influence the success of SMFC implementation, and optimization strategies. SMFCs involve microorganisms found in marine sediments to degrade organic matter to produce electricity. Exploration of sediment sites needs to be done to obtain sediment quality rich in organic matter and microorganisms. The choice of electrode material also needs to be considered because it can affect microbial attachment and electron transfer ability. Electrode modifications are usually done to improve electricity generation performance. Operating conditions such as temperature, oxygen levels, and pH can affect sedimentary microbial life so optimal conditions need to be determined. SMFC scale-up does have many challenges because this technology is quite new. However, if the SMFC principles can be mastered properly and every parameter is optimized, then the chances of SMFC scale-up success increase. This research is expected to be a guideline in the application of SMFC on a large scale.

Keywords : Microbial Fuel Cells, Sediment, Fossil Fuels, Electricity, Energy

I. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Energi merupakan kebutuhan pokok bagi kehidupan manusia dan merupakan faktor penting dalam pembangunan suatu negara. Dalam beberapa dekade terakhir, Indonesia mengalami peningkatan permintaan energi yang signifikan karena pertumbuhan populasi yang pesat serta perkembangan industri. Data dari Badan Pusat Statistik BPS (2020) menunjukkan bahwa konsumsi energi listrik di Indonesia selalu meningkat rata-rata sebesar 10% setiap tahunnya sejak tahun 2010. Data terakhir pada tahun 2019 penggunaan energi listrik di Indonesia sebesar 294,8 TWh. Jika dibandingkan dengan data konsumsi energi listrik pada tahun 2010 yaitu sebesar 155,2 TWh maka terlihat mengalami peningkatan yang signifikan. Diprediksikan permintaan listrik akan meningkat mencapai 11-12% pada tahun 2025 dan akan terus meningkat setiap tahunnya (OEI, 2019). Saat ini, mayoritas energi di Indonesia masih bergantung pada bahan bakar fosil terutama minyak bumi, gas alam, dan batu bara untuk memenuhi kebutuhan tenaga listriknya. Hingga tahun 2019, data dari BPS (2020) menunjukkan fakta bahwa 59,6% dari total produksi energi listrik dihasilkan dari pembakaran batu bara, 17,9% dari gas, dan 19,1% dari minyak. Sedangkan, berdasarkan data dari OEI (2019) bahwa Indonesia menggunakan sumber listrik berasal dari batu bara sebanyak 50%, gas bumi sebanyak 29%, bahan bakar minyak sebanyak 7%, dan energi terbarukan sebanyak 14%. Dari kedua data tersebut menunjukkan bahwa Indonesia masih sangat bergantung pada energi fosil terutama batu bara. Ketergantungan yang tinggi terhadap batu bara ini memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, seperti emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim dan polusi udara. Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Greenpeace dan lembaga riset independen lainnya menyoroti bahwa pembangkit listrik berbasis batu bara menghasilkan polusi udara yang tinggi dalam bentuk partikulat, sulfur dioksida (SO₂), nitrogen dioksida (NO₂), dan polutan lainnya yang dapat menyebabkan gangguan pernapasan dan mempengaruhi kualitas udara lokal (Bjureby dkk., 2008). Penggunaan batu bara yang terus menerus mengakibatkan terjadinya krisis energi. Permasalahan tersebut tidak sejalan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan atau SDGs terutama pada poin 11 tentang menjadikan kota dan pemukiman inklusif, aman, tangguh dan berkelanjutan. Selain itu, pemerintah juga telah membuat kebijakan dalam penggunaan bahan bakar fosil dan meningkatkan penggunaan energi terbarukan dalam misi untuk mencapai keberlanjutan energi yang tertuang pada Peraturan Presiden (Perpres) No. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Sebagai upaya penanggulangan masalah tersebut salah satu teknologi yang menarik perhatian adalah teknologi *Sediment Microbial Fuel Cell* (SMFC). SMFC adalah jenis sel bahan bakar mikroba yang menggunakan sedimen sebagai substrat yang mengandung mikroorganisme pada anoda untuk menghasilkan energi listrik melalui proses oksidasi mikroba. Dalam SMFC, mikroorganisme di dalam sedimen akan melakukan metabolisme menggunakan bahan organik kemudian menghasilkan elektron yang dapat ditangkap oleh elektroda anoda dalam sel bahan bakar sehingga menghasilkan arus listrik. Di Indonesia, sedimen sangat mudah didapatkan karena Indonesia memiliki perairan yang sangat luas bahkan lebih luas daripada daratannya. SMFC ini memiliki beberapa kelebihan di antaranya yaitu dapat membantu menghilangkan zat-zat berbahaya seperti nitrat dan fosfat dari sedimen, dapat menghasilkan energi secara berkelanjutan melalui oksidasi mikroba pada sedimen, serta dapat digunakan sebagai sumber energi di daerah terpencil atau tempat yang sulit dijangkau. Oleh sebab itu, SMFC memiliki potensi yang besar sebagai sumber energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menyajikan pemahaman mendalam mengenai prinsip kerja *Sediment Microbial Fuel Cell* (SMFC). Melalui eksplorasi konsep-konsep utama, tujuan pertama adalah memberikan wawasan

yang komprehensif tentang prinsip kerja SMFC. Selain itu, karya tulis ini juga bertujuan untuk menguraikan tantangan yang mungkin dihadapi dalam meng-*upscale* SMFC dan mengidentifikasi peluang-peluang yang dapat dioptimalkan. Dengan memberikan pandangan terperinci tentang strategi optimasi SMFC, karya tulis ini berupaya menjadi sumber rujukan yang berharga bagi praktisi dan peneliti yang tertarik dalam mengimplementasikan SMFC pada skala yang lebih besar. Manfaat dari karya tulis ini diharapkan akan termanifestasi dalam kontribusinya sebagai pedoman praktis, memfasilitasi adopsi SMFC secara luas, dan pada gilirannya, dapat membantu menggantikan sumber energi yang lebih bersahabat dengan lingkungan dan berkelanjutan..

2. Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu untuk menguji penelitian mengenai Teknologi *Sediment Microbial Fuel Cell* Sebagai Energi Alternatif Yang Berkelanjutan.

3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui hasil penelitian dari Teknologi *Sediment Microbial Fuel Cell* Sebagai Energi Alternatif Yang Berkelanjutan.

4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah aplikasi kepada masyarakat dan penelitian selanjutnya dari Teknologi *Sediment Microbial Fuel Cell* Sebagai Energi Alternatif Yang Berkelanjutan.

II. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah tinjauan literatur. Tinjauan literatur adalah metode penelitian yang melibatkan pengumpulan, pengolahan, dan analisis data dan informasi yang berasal dari sumber-sumber yang terpercaya. Penelitian ini bertujuan untuk memahami dan menyajikan perkembangan terkini serta tantangan dalam penerapan Teknologi *Sediment Microbial Fuel Cell* (SMFC) untuk mencapai kemandirian energi di Indonesia. *Pertama*, data dan informasi yang relevan dengan topik penelitian ini dikumpulkan dari berbagai sumber seperti jurnal ilmiah, buku referensi, dan laporan penelitian terkait MFC, sedimen, dan kemandirian energi di Indonesia. Pencarian literatur dilakukan melalui berbagai basis data elektronik. Pemilihan kata kunci yang sesuai untuk mencari data menjadi langkah awal dalam pengumpulan informasi yang relevan. *Selanjutnya*, data dan informasi yang telah dikumpulkan dianalisis dan disusun dalam kerangka kerja yang terstruktur. Data-data yang ditemukan dikelompokkan berdasarkan tema dan topik tertentu untuk memudahkan analisis dan menyajikan temuan secara sistematis. Dalam pengolahan data dan informasi, kesalahan pengumpulan data dan bias penelitian juga dievaluasi untuk memastikan keakuratan dan keandalan data yang digunakan. Setelah pengolahan data dan informasi selesai, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis yang kritis terhadap data yang telah terkumpul. Analisis ini melibatkan perbandingan antarstudi, identifikasi kekuatan dan kelemahan SMFC sebagai teknologi sedimen, peluang dan cara optimalisasi. Analisis ini juga mencakup pertimbangan faktor lingkungan di wilayah Indonesia. Selama analisis data dan informasi, pemikiran kritis digunakan dalam memahami, merangkum, dan menginterpretasikan temuan-temuan penting. Konsep-konsep yang relevan dan argumen-argumen yang didukung oleh bukti-bukti dari literatur digunakan untuk menjelaskan dan memaparkan potensi serta tantangan penerapan Teknologi SMFC di Indonesia. Penggunaan pendekatan analisis komparatif digunakan untuk membandingkan temuan dari studi-studi yang ada dan mengidentifikasi kesenjangan pengetahuan yang perlu diteliti lebih lanjut. Dalam metode penelitian ini,

kerangka berpikir yang logis dan koheren digunakan untuk menyusun keseluruhan karya ilmiah. Dalam kerangka berpikir ini, penulis memastikan bahwa pembahasan mengikuti struktur yang teratur dan mudah dipahami. Isi artikel ilmiah ini mencakup deskripsi tentang *SMFC* dan prinsip kerja, faktor keberhasilan *SMFC* serta cara optimasinya.

III. HASIL PENELITIAN

Prinsip kerja *SMFC* terdiri dari beberapa tahapan seperti yang terlihat pada gambar 1, yaitu proses fermentasi, transfer elektron, dan reaksi elektrokimia. Pada tahap fermentasi, mikroorganisme anaerob dalam sedimen mengoksidasi senyawa organik yang ada, seperti residu tumbuhan atau limbah organik lainnya. Selama proses ini, mikroorganisme menghasilkan elektron sebagai produk sampingan. Selanjutnya, elektron yang dihasilkan oleh mikroorganisme dalam tahap fermentasi akan ditransfer ke anoda melalui proses transfer elektron. Anoda memainkan peran penting dalam mengekstraksi elektron dari mikroorganisme. Setelah elektron mencapai anoda, elektron tersebut akan memasuki sirkuit eksternal melalui penghubung arus/kabel untuk menciptakan aliran listrik. Pada saat yang sama, di katoda, oksigen dari udara atau senyawa reduktor lainnya bereaksi dengan elektron yang berasal dari anoda melalui reaksi oksidasi-reduksi. Katalis seperti platina atau logam lain dapat digunakan di katoda untuk mempercepat reaksi reduksi oksigen atau senyawa reduktor. Reaksi oksidasi dan reduksi ini menghasilkan aliran muatan negatif dari katoda ke anoda melalui media elektrolit sebagai penghubung, sambil mempertahankan netralitas muatan. Dalam penerapan teknologi ini tentu saja terdapat beberapa faktor yang akan mempengaruhi keberhasilan. Beberapa faktor yang mempengaruhi keberhasilan pada teknologi *SMFC* yaitu suhu, pH, kekuatan ionik dan salinitas, kandungan nutrisi, jenis elektroda, jarak antara elektroda, keberadaan mediator kimia serta keberadaan senyawa penghambat tumbuhnya mikroba. Keberhasilan aplikasi *SMFC* dalam skala besar tidak dapat terlepas dari berbagai strategi optimasi yang dilakukan. Berikut beberapa strategi yang berhasil dihimpun :

a. Pemilihan sedimen

Jumlah energi yang diperoleh dari *SMFC* bergantung pada banyak faktor diantaranya jumlah bahan organik dan mikroorganisme eksoelektrogenik yang terdapat di dalam sedimen. Kualitas sedimen yang baik diharapkan dapat menghasilkan energi listrik yang tinggi. Studi yang dilakukan oleh Rivas *et al.* 2023 mengkaji kualitas sedimen dan pengaruh *hydrological season* terhadap produksi energi listrik *SMFC*. Sampel yang digunakan meliputi 2 sampel sedimen dari sungai dan laut yang dikoleksi saat musim hujan dan 2 sampel dari sungai dan laut yang dikoleksi saat musim kemarau. Hasil membuktikan bahwa bahan organik sedimen laut baik pada musim hujan maupun musim kemarau lebih tinggi dibanding sedimen sungai. Bila dibandingkan antar musim, bahan organik sedimen laut lebih rendah pada musim kemarau dibandingkan musim hujan dan begitupun sebaliknya. Hal ini terjadi karena pada musim hujan arus sungai meningkat sehingga menghanyutkan banyak bahan organik ke laut dan pada musim hujan bahan organik banyak yang tertinggal di badan sungai. Dari parameter konduktivitas listrik (EC) menunjukkan bahwa sedimen laut memiliki nilai EC yang lebih tinggi dibanding sedimen sungai baik pada musim hujan maupun kemarau. Pada musim kemarau nilai EC sedimen sungai lebih tinggi dibandingkan musim hujan. Pada musim hujan, listrik yang dihasilkan sedimen laut melonjak dengan rata-rata 407.83 mV dan voltase maksimal sebesar 639,32 mV. Sementara pada musim kering sedimen sungai meningkat produksi listriknya hingga 70% dengan rata-rata 700 mV dan maksimum voltase sebesar 800.9 mV. Hasil analisis komunitas mikroba menemukan 3 genus mikroba yang cenderung tinggi pada kedia sedimen, yaitu *Escherichia coli*, *Clostridium*, dan *Vibrio*. Ketiga bakteri tersebut juga ditemukan pada sedimen yang diteliti oleh (Goenka dkk., 2018; X. Li dkk., 2019).

Sehingga besar kemungkinan bakteri tersebut merupakan bakteri ektraelektrogen. Dari pemaparan tersebut, dapat disimpulkan bahwa eksplorasi sedimen dengan bahan organik yang tinggi perlu dilakukan untuk mendapatkan sedimen yang berkualitas.

b. Pemilihan anoda

Anoda yang digunakan harus konduktif, *biocompatible*, stabil pada bahan kimia. Bahan elektroda yang paling *adaptable* adalah karbon yang biasanya tersedia dalam bentuk *compact graphite plate, rods*, atau granul, bahan fiber (bulu halus, kertas, serat, busa) dan karbon kaca. Anoda paling sederhana adalah *graphite plate* atau rod karena murah dan mudah dikendalikan serta memiliki luas area namun ternyata area permukaan tidak tersedia untuk bakteri. Chaudhuri & Lovley (2003) mengemukakan bahwa densitas arus listrik tertinggi dimiliki oleh anoda *carbon felt* kemudian *carbon foam* dan *graphite*. Untuk meningkatkan performa anoda, beberapa bahan kimia dan cara fisik dilakukan. Park & Zeikus (2003) berhasil meningkatkan transfer elektron ke anoda menggunakan Mn (IV), Fe (III) yang diikat kovalen dengan *neutral red*. Produksi listrik juga meningkat dengan menambahkan material elektrokatalitik seperti polianilin/Pt *composite*, yang dapat mendukung oksidasi mikroba. Sudirjo dkk. (2019) dalam studinya membuktikan bahwa campuran 100% dan 67% karbon aktif ke dalam sedimen laut menghasilkan *potentiostatic* yang lebih lama dibanding Ag/AgCl. Hasil juga membuktikan bahwa energi elektrik diperoleh melalui transfer elektron *bi-directional*. Penemuan ini membuka kesempatan untuk menerapkan sistem *bioelectrichemical* (BES) sebagai eks situ biobaterai untuk penyimpanan dan penggunaan listrik. Dumas dkk. (2007) menyebutkan bahwa anoda dengan bahan stainless steel menghasilkan densitas daya yang lebih rendah. Qi dkk. (2022) menyatakan bahwa elektroda *carbon fiber brush* menghasilkan voltase dan densitas daya yang lebih tinggi dibandingkan *graphite felt electrode*. SMFC menggunakan katoda *carbon fiber cloth* relatif lebih rendah karena area permukaan licin sehingga mikroba sulit menempel.

c. Pemiliha Katoda

Material yang digunakan pada anoda juga dapat digunakan untuk katoda. Pemilihan material katoda bergantung pada performa dan dibedakan berdasarkan fungsinya. Pada sedimen *fuel cell*, elektroda *plain graphite disk* dicelupkan ke dalam air laut (Tender dkk., 2002). Karena kinetika reduksi oksigen rendah, penggunaan katoda membatasi penggunaan material non katalis pada sistem yang dapat mentoleransi performa yang rendah. Di dalam laut reduksi pada katoda karbon didukung oleh mikroba (Rhoads dkk., 2005). Reduksi yang dimediasi mikroba pada katoda *stainless steel* dapat menurunkan kadar oksigen yang membantu *biofilm* bakteri (Bergel *et al.* 2005). (Dumas dkk. (2007) membuktikan bahwa katoda *stainless steel* yang dibalut dengan *biofilm* dapat mensuplai densitas arus sebesar 140mA m⁻² pada +0.05 V dibanding Ag/AgCl. Sehingga peneliti menyarankan penggunaan katoda tersebut.

d. Jarak antar elektroda

Jarak antar elektroda memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi SMFC. Semakin meningkatnya jarak elektroda, maka total jarak perpindahan proton dari anoda dan katoda semakin meningkat. Hal ini berdampak pada tingginya hambatan. Sedangkan jarak yang terlalu rendah akan memicu oksigen di udara masuk ke anoda dan mengalami reaksi kimia dengan mikroba yang menyebabkan elektron terkonsumsi dan menghasilkan hambatan internal yang menurunkan arus output. Oleh karena itu, jarak elektroda yang optimal perlu dikaji. Sajana dkk. (2013) telah melakukan studi jarak elektroda yang optimal. Hasil menunjukkan bahwa densitas daya meningkat bila jarak antar elektroda diturunkan. Peningkatan tersebut sekitar 38.38% pada jarak pendek. Liu dkk. (2005) juga melaporkan bahwa peningkatan daya sebesar 60% ketika jarak elektroda diturunkan 4-2 cm, karena adanya penurunan hambatan.

e. Kadar Oksigen

Lingkungan anaerob pada area sekitar anoda merupakan kunci keberhasilan *SMFC*. Keberadaan oksigen yang berlebih baik pada anoda dapat menurunkan ion hidrogen disekitar anoda dan menurunkan laju distribusi ke bejana katoda serta menurunkan laju perpindahan elektron ke sel katoda. Mekanisme ini dapat meningkatkan hambatan. Pada area katoda, *dissolved oxygen* (DO) yang mencapai status *equilibrium*, oksigen akan penetrasi ke daerah anoda sehingga meningkatkan mikroba aerob dan menghambat mikro anaerob. Al-Dawery dkk. (2021) menyatakan bahwa introduksi oksigen yang berlebih pada bejana anoda dan katoda berdampak buruk dan dapat menurunkan daya sebesar 30% khususnya pada bejana anoda. Sistem paparan oksigen secara kontinu menyebabkan jumlah energi yang dihasilkan dari anoda menurun.

f. Suhu dan pH

Terdapat ada 2 suhu optimal untuk digesti secara anaerob. Mikroba mesofilik yang optimal pada suhu 32 - 42⁰C dan termofilik yang optimal pada suhu 48 – 55⁰C. Sementara metanogenik sensitif terhadap perubahan suhu yang cepat. L. H. Li dkk. (2013) melaporkan bahwa densitas daya maksimum dicapai pada suhu 37⁰C yaitu 7.89 W/m³. Penurunan suhu hingga 10⁰C berefek pada potensial anoda sementara peningkatan suhu hingga 43⁰C berefek pada performa katoda. Secara umum bakteri memerlukan pH yang mendekati netral untuk pertumbuhan optimal. Namun reduksi oksigen pada katoda menghasilkan pH basa. Puig dkk. (2010) melaporkan bahwa produksi daya menurun signifikan saat pH akhir turun ke 5.2 karena adanya produk asam dari fermentasi. Pada studinya, ia melaporkan bahwa produksi daya tertinggi (0.66 W.m⁻³) tercapai pada pH 9.5. Tentunya hal ini tidak bisa dijadikan dasar yang mutlak karena pH optimal bervariasi sehingga perlu dilakukan optimasi dari awal. Pengembangan teknologi ini telah dilakukan di beberapa negara salah satunya adalah Belanda. Penelitian yang dilakukan di Belanda, seperti di kota Nieuwveer, telah berhasil mengaplikasikan *SMFC* dalam sistem pengolahan air limbah dengan hasil yang positif dalam menghasilkan energi listrik dari sedimen limbah organik. Hal tersebut menunjukkan bahwa Belanda telah berhasil mengembangkan energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Selain Belanda terdapat juga Amerika Serikat, Kanada, Jepang, dan Selandia Baru yang sudah menggunakan teknologi serupa. Meskipun potensi *SMFC* dalam penyerapan energi dari partikel sedimen telah banyak dikaji, investigasi mengenai praktis penggunaannya baru mulai dilakukan. Potensi sistem *SMFC* sangat besar namun berbagai aspek dan rintangan perlu diatasi, khususnya pada saat *scale up*. Sampai saat ini, data mengenai energi yang dihasilkan dari *SMFC* masih sedikit, walaupun sudah banyak studi yang mengkaji densitas daya dari *SMFC*.

IV. KESIMPULAN

Secara keseluruhan, teknologi *Sediment Microbial Fuel Cell* (*SMFC*) menawarkan pendekatan inovatif dalam menghasilkan energi listrik melalui pemanfaatan sedimen sebagai sumber mikroorganisme dan bahan organik. Meskipun demikian, *scale up* *SMFC* menghadapi sejumlah tantangan yang melibatkan peningkatan efisiensi desain, daya yang lebih besar, stabilitas kerja jangka panjang dan perolehan sedimen berkualitas. Dalam mengoptimalkan kinerja *SMFC*, strategi dilakukan melalui penyesuaian suhu, pH, pemilihan sedimen yang kaya nutrisi dan mikroba, pengelolaan oksigen pada katoda, serta penyesuaian jarak antar elektroda. Semua langkah ini memainkan peran penting dalam mencapai hasil maksimal dalam penggunaan *SMFC* sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Dawery, S. K., Annamareddy, S. H. K., AL-Mashhadani, M. K. H., AL-Abri, H. A., & Al-Hatmi, F. H. (2021). Parametric study for optimization of sediment-type microbial fuel cell. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(5), 1097–1108.
- An, J., Kim, B., Nam, J., Ng, H. Y., & Chang, I. S. (2013). Comparison in performance of sediment microbial fuel cells according to depth of embedded anode. *Bioresource Technology*, 127, 138–142.
- BLOTT, S. J., & PYE, K. (2012). Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. *Sedimentology*, 59(7), 2071–2096.
- Karra, U., Muto, E., Umaz, R., Kölln, M., Santoro, C., Wang, L., & Li, B. (2014). Performance evaluation of activated carbon-based electrodes with novel power management system for long-term benthic microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(36), 21847–21856.
- Li, L. H., Sun, Y. M., Yuan, Z. H., Kong, X. Y., & Li, Y. (2013). Effect of temperature change on power generation of microbial fuel cell. *Environmental Technology*, 34(13–14), 1929–1934.
- Li, W.-W., Yu, H.-Q., & He, Z. (2013). Towards sustainable wastewater treatment by using microbial fuel cells-centered technologies. *Energy Environ. Sci.*, 7(3), 911–924.
- Li, X., Zheng, R., Zhang, X., Liu, Z., Zhu, R., Zhang, X., & Gao, D. (2019). A novel exoelectrogen from microbial fuel cell: Bioremediation of marine petroleum hydrocarbon pollutants. *Journal of Environmental Management*, 235, 70–76.
- Mokhtarian N, Ramli D, Rahimnejad M, & Najafpour GD. (2012). Bioelectricity generation in biological fuel cell with and without mediators. *World Appl Sci*, 18, 559–567.
- Puig, S., Serra, M., Coma, M., Cabré, M., Balaguer, M. D., & Colprim, J. (2010). Effect of pH on nutrient dynamics and electricity production using microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 101(24), 9594–9599.
- Ghangrekar, M. M., & Mitra, A. (2013). Effect of pH and distance between electrodes on the performance of a sediment microbial fuel cell. *Water Science and Technology*, 68(3), 537–543.
- Sajana, T. K., Pandit, S., Jadhav, D. A., Abdullah-Al-Mamun, M., & Fosso-Kankeu, E. (2019). *Nano and Bio-Based Technologies for Wastewater Treatment* (T. K. Sajana, Ed.). Scrivener Publishing.
- 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.

Accepted Date	Revised Date	Decided Date	Accepted to Publish
20 Mei 2024	20 Juni 2024	28 Juni 2024	Ya