

Pengaruh Jarak Anoda Seng dengan Tanaman *Equisetum hyemale* dalam Sistem *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell* terhadap Penurunan Polutan Air Limbah IPLT

Bellatrix Putri Arylis*, Aussie Amalia

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: bellatrixarylis20@gmail.com

Diterima: 22 Agustus 2025

Disetujui: 30 Agustus 2025

Abstract

Fecal Sludge Treatment Plant (IPLT) effluent contains high concentrations of organic pollutants and nutrients, requiring further treatment before discharge into the environment. This study aimed to evaluate the performance of a combined Constructed Wetland–Microbial Fuel Cell (CW-MFC) system in reducing Chemical Oxygen Demand (COD) and Total Nitrogen (TN) levels, while simultaneously generating electricity from IPLT wastewater in Surabaya, Indonesia. A laboratory-scale CW-MFC reactor was designed with horizontal subsurface flow, using Malang sand as the substrate and *Equisetum hyemale* as the phytoremediation agent. Experimental variables included anode type (zinc and carbon), electrode spacing (20 cm and 30 cm), and contact time (0, 3, 9, 12, and 15 days). Parameter analyses followed Indonesian National Standard (SNI) methods, and data processing employed Two-Way ANOVA statistical analysis. Results indicated that the highest COD removal efficiency reached 95% and TN removal reached 98% on day 12 with an electrode spacing of 30 cm. The system also achieved a maximum power output of 495.6 mW, sufficient to operate small-scale electronic devices. Pollutant removal mechanisms involved the synergistic action of electrogenic microbes at the anode, oxygen release from plant roots facilitating oxidation, and reduction reactions at the cathode.

Keywords: *fecal sludge treatment plant, constructed wetland, microbial fuel cell, cod, total nitrogen, equisetum hyemale, bioelectricity*

Abstrak

Limbah cair Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) memiliki kandungan polutan organik dan nutrisi yang tinggi sehingga memerlukan pengolahan lanjut sebelum dibuang ke lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem kombinasi *Constructed Wetland–Microbial Fuel Cell* (CW-MFC) dalam menurunkan konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan Total Nitrogen (TN), serta menghasilkan energi listrik dari limbah cair IPLT, Surabaya. Reaktor CW-MFC skala laboratorium dirancang dengan aliran bawah permukaan horizontal menggunakan media pasir Malang dan tanaman *Equisetum hyemale* sebagai agen fitoremediasi. Variasi yang diuji meliputi jenis anoda (seng dan karbon), jarak elektroda (20 cm dan 30 cm), serta waktu kontak (0, 3, 9, 12, dan 15 hari). Analisis parameter dilakukan berdasarkan metode standar SNI, sedangkan pengolahan data menggunakan analisis statistik ANOVA Two Way. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan COD tertinggi mencapai 95% dan TN sebesar 98% pada hari ke-12 dengan jarak elektroda 30 cm. Sistem juga menghasilkan daya listrik maksimum 495,6 mW, cukup untuk mengoperasikan perangkat elektronik skala kecil. Mekanisme penyisihan polutan terjadi melalui kombinasi aktivitas mikroba elektrogenik pada anoda, suplai oksigen dari akar tanaman yang memicu proses oksidasi, serta reaksi reduksi pada katoda.

Kata Kunci: *iplt, constructed wetland, microbial fuel cell, cod, total nitrogen, equisetum hyemale, bioelektrik*

1. Pendahuluan

Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) berfungsi mengolah lumpur tinja dari tangki septik sebelum dibuang ke lingkungan. Namun, efluen cairnya masih sering mengandung polutan organik dan nutrisi tinggi seperti *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan Total Nitrogen (TN), yang berpotensi mencemari badan air dan memicu eutrofikasi [1]. Baku mutu COD dan TN untuk air limbah domestik masing-masing adalah 50 mg/L dan 10 mg/L [2].

Kombinasi *Constructed Wetland* (CW) dan *Microbial Fuel Cell* (MFC) telah dikembangkan sebagai teknologi ramah lingkungan untuk mengolah limbah sambil menghasilkan listrik. CW memanfaatkan

tanaman air dan media tanam untuk penyisihan polutan, sedangkan MFC memanfaatkan mikroorganisme elektrogenik untuk degradasi organik sekaligus produksi daya [3]. Penelitian sebelumnya melaporkan CW-MFC mampu menghilangkan COD >80% dan TN >70%, serta menghasilkan daya perangkat kecil [4].

Kinerja CW-MFC dipengaruhi oleh faktor desain seperti jenis tanaman, material anoda, jarak elektroda, media tanam, dan waktu kontak [5]. Penelitian ini mengevaluasi kinerja CW-MFC dengan variasi jenis anoda (seng dan karbon) dan jarak elektroda (20 cm dan 30 cm) dalam pengolahan limbah cair IPLT, menggunakan *Equisetum hyemale* sebagai tanaman fitoremediator dan pasir Malang sebagai media tanam.

2. Metode Penelitian

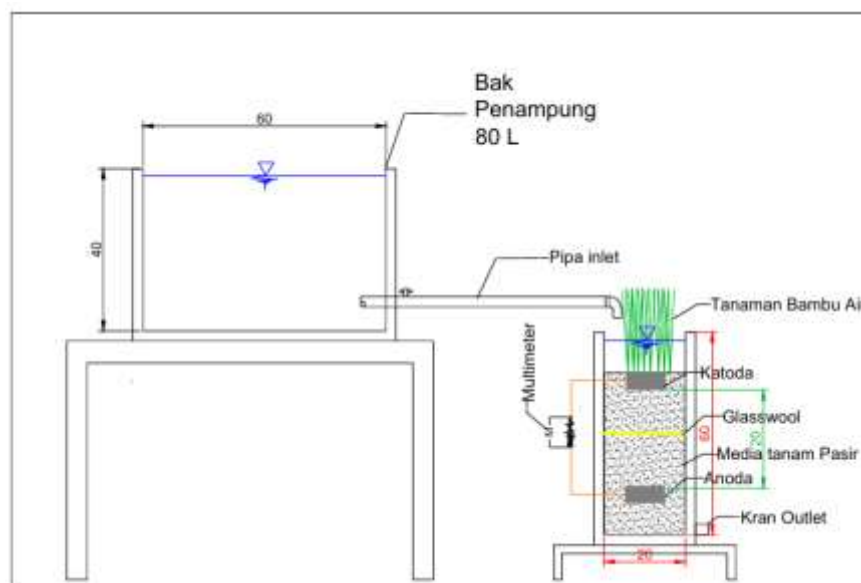
Pada penelitian ini menggunakan air limbah dari IPLT, Surabaya. Penelitian ini dilaksanakan 1 bulan di bulan Juni dari tahap persiapan dan awal penelitian hingga waktu sampling terakhir. Alat- alat yang dibutuhkan untuk penelitian antara lain bak akrilik berukuran 60x20x20 cm, bak awal penampung sebesar 80 Liter, bak akrilik dengan jumlah 4 bak, kran kecil untuk mengatur debit yang akan keluar untuk sampel uji. Media tanaman yang digunakan yaitu pasir malang pada ketinggian 40 cm. Tanaman yang digunakan adalah bambu air dengan sistem perakaran rimpang-nya yang kuat untuk proses *constructed wetland* [6]. Proses pra-penelitian adalah *range finding test* yang berguna mengetahui kemampuan tanaman untuk bertahan pada air limbah yang digunakan untuk penyisihan parameter nantinya. Sebelum dilakukan tahap itu tanaman harus di aklimatisasikan dahulu menggunakan air bersih selama 7 hari. Dalam proses Range Finding Test ini mengacu pada USEPA Guidelines part 850.4500 dimana konsentrasi yang ada 0% (kontrol), 20%, 40%, 60%, 80 %, dan 100 % (Raissa, 2017). Dalam penelitian ini menggunakan konsentrasi air lindi sebanyak 60%, dikarenakan pada konsentrasi tersebut tanaman tidak akan mati.

Tahap setelah proses RFT dan aklimatisasi, dilakukan proses *seeding* pada anoda menggunakan EM4, molase, lumpur sawah, dan air cucian beras. Setelah proses *seeding*, fisik elektroda mengalami perubahan seperti permukaan menjadi lebih kasar, lapisan oksida hilang, dan warna anoda berubah. Tujuannya adalah untuk meningkatkan luas permukaan aktif dan mempermudah transfer elektron, sehingga elektroda lebih efektif dalam proses elektrokimia. Pada penelitian ini menggunakan variasi waktu kontak sebanyak 5 kali sampling. Dalam penelitian ini menggunakan proses secara batch. Parameter suhu dan Ph akan di amati setiap hari selama proses penelitian yaitu selama 15 hari.

Tabel 1. Matriks Penelitian

Variasi Reaktor	Variasi Waktu tinggal (hari)				
Anoda Seng Jarak : 20 cm	0	3	9	12	15
Anoda Seng Jarak : 30 cm	0	3	9	12	15

Sumber: Data Penelitian



Gambar 1. Gambar Reaktor CW-MFC
 Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Air Limbah IPLT

Sebanyak 80 liter sampel air limbah IPLT diambil dari bak *balancing tank* sebelum unit *oxidation ditch*. Setiap bagian dialirkan ke dalam reaktor CW-MFC yang telah diisi dengan media tanam berupa pasir malang serta ditanami bambu air dan di dalamnya sudah terdapat elektroda yang disambungkan dengan kabel tembaga. Sebelum pengolahan dilakukan, karakteristik awal air IPLT seperti *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan Total Nitrogen dianalisis secara detail. Analisis awal ini bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai tingkat pencemaran air IPLT sebelum dilakukan proses pengolahan tampak dalam **Tabel 2**.

Tabel 2. Uji Awal Parameter Air IPLT

Parameter	Hasil Uji Awal	Baku Mutu (PermenLHK No.68 Tahun 2016)
pH	7,9	6-9
COD	1080 mg/L	50
Total Nitrogen (TN)	860 mg/L	10

Sumber: Data Penelitian

3.2 Seeding Anoda

Tahap seeding elektroda merupakan langkah awal yang esensial dalam menyiapkan reaktor CW-MFC agar mampu menghasilkan energi listrik sekaligus meningkatkan proses degradasi polutan. Dalam penelitian ini, anoda diinkubasi dalam larutan yang terdiri atas 500 mL EM4, satu sendok makan molase, satu genggam lumpur sawah, serta 1 L air cucian beras yang kemudian difermentasi selama 1–2 hari [7]. Proses ini dilakukan untuk mempercepat pembentukan dan pertumbuhan mikroorganisme elektroaktif pada permukaan elektroda. Setelah direndam empat hari secara fisik, anoda menunjukkan perubahan karakteristik, seperti permukaan yang menjadi lebih kasar, hilangnya lapisan oksida, serta perubahan warna pada logam. Perubahan ini bertujuan untuk memperluas area permukaan aktif dan mempermudah aliran elektron, sehingga kinerja elektroda dalam reaksi bioelektrokimia menjadi lebih optimal.



Gambar 2. Gambar Anoda Seng Setelah Proses *Seeding*

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025

3.3 Aklimatisasi dan Range Finding Test (RFT) *Equisetum hyemale*

Sebelum digunakan dalam sistem CW-MFC, tanaman bambu air (*Equisetum hyemale*) menjalani aklimatisasi selama 7 hari menggunakan air PDAM untuk menyesuaikan diri dengan lingkungan baru dan mengurangi stres fisiologis akibat paparan limbah. Tanaman dipilih berdasarkan keseragaman ukuran dan kondisi sehat, kemudian ditempatkan dalam wadah berisi ± 10 liter air PDAM di ruang terbuka dengan cahaya alami, namun terlindung dari hujan. Selanjutnya dilakukan *Range Finding Test* (RFT) selama 5 hari untuk menentukan batas toleransi tanaman terhadap konsentrasi limbah. Variasi konsentrasi yang diuji yaitu 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa tanaman tetap sehat tanpa tanda layu atau menguning hingga konsentrasi 60% (**Gambar 3**).



Gambar 3. Kondisi *Equisetum hyemale* pada Proses RFT
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025

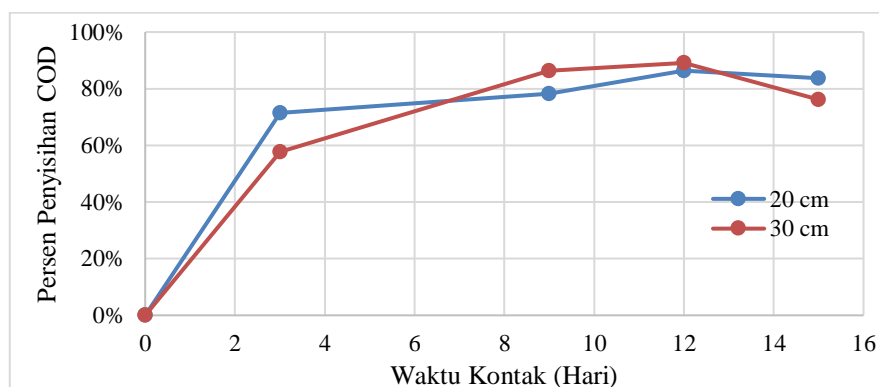
3.4 Penyisihan COD pada Air Limbah IPLT

Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa persentase penyisihan COD meningkat seiring dengan bertambahnya waktu kontak. Pada hari ke-3, penyisihan COD dengan jarak elektroda 20 cm mencapai $\pm 70\%$, lebih tinggi dibandingkan jarak 30 cm yang hanya sekitar $\pm 58\%$. Hal ini menunjukkan bahwa pada fase awal, jarak elektroda yang lebih pendek mampu mempercepat degradasi bahan organik karena resistansi internal lebih kecil sehingga transfer elektron antara anoda dan katoda berlangsung lebih efisien.

Tabel 3. Efisiensi Penyisihan COD pada Sistem CW-MFC dengan Anoda Seng dan Variasi Jarak Elektroda

Jarak Elektroda	Waktu Kontak (Hari)	Konsentrasi COD (mg/L)
20 cm	0	1080
	3	0,715
	9	0,782
	12	0,864
	15	0,836
30 cm	0	1080
	3	0,577
	9	0,864
	12	0,891
	15	0,761

Sumber: Hasil Analisis, 2025



Gambar 4. Grafik Penyisihan COD (%) dengan Anoda Seng Terhadap Variasi Jarak Elektroda
Sumber: Peneliti, 2025

Namun, pada fase berikutnya (hari ke-9), penyisihan COD dengan jarak elektroda 30 cm menunjukkan kinerja lebih tinggi ($\pm 86\%$) dibandingkan 20 cm ($\pm 78\%$). Kondisi ini dapat dijelaskan oleh adanya gradien potensial listrik yang lebih besar pada jarak elektroda yang lebih jauh, sehingga mendorong aktivitas mikroba elektrogenik dalam mentransfer elektron dari anoda ke katoda [8]. Dengan demikian, meskipun membutuhkan waktu adaptasi lebih lama, jarak 30 cm menghasilkan penyisihan COD yang lebih optimal pada fase pertengahan.

Peran anoda seng juga sangat penting dalam proses ini. Seng sebagai anoda mudah mengalami korosi sehingga dapat melepaskan ion Zn^{2+} dalam jumlah kecil yang berperan sebagai mikronutrien bagi mikroorganisme[9]. Permukaan seng mendukung kolonisasi biofilm mikroba elektrogenik yang bertanggung jawab dalam oksidasi senyawa organik, sehingga mempercepat penurunan COD di sistem CW-MFC.

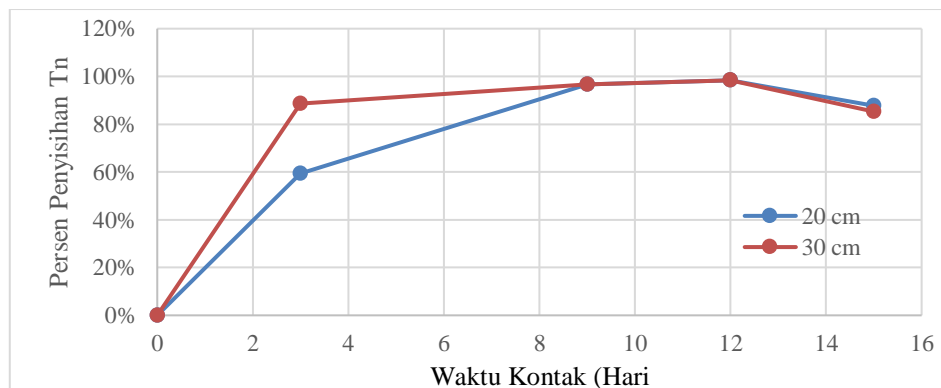
Selain itu, keberadaan tanaman bambu air (*Equisetum hyemale*) berkontribusi terhadap tingginya efisiensi penyisihan COD. Akar bambu air mampu melepaskan oksigen ke daerah rhizosfer, menciptakan kondisi mikroaerobik yang memperkuat proses degradasi senyawa organik oleh mikroba [10]. Sistem perakaran juga berfungsi sebagai media filtrasi serta meningkatkan luas permukaan tempat tumbuhnya biofilm, sehingga sinergi antara tanaman, mikroba, dan anoda seng mendukung pencapaian efisiensi penyisihan COD yang tinggi, yaitu mencapai 87–89% pada hari ke-12.

3.5 Penyisihan TN pada Air Limbah IPLT

Berdasarkan **Gambar 5** di atas, penyisihan TN menunjukkan tren peningkatan yang signifikan seiring dengan waktu kontak. Pada hari ke-3, penyisihan TN dengan jarak elektroda 30 cm mencapai $\pm 90\%$, jauh lebih tinggi dibandingkan jarak 20 cm yang hanya sekitar $\pm 60\%$. Hal ini mengindikasikan bahwa pada fase awal, jarak elektroda yang lebih panjang memberikan gradien potensial listrik lebih besar, sehingga mendorong aktivitas mikroba denitrifikasi maupun nitrifikasi yang berperan dalam reduksi senyawa nitrogen.

Tabel 4. Efisiensi Penyisihan TN pada Sistem CW-MFC dengan Anoda Seng dan Variasi Jarak Elektroda

Jarak Elektroda	Waktu Kontak (Hari)	Konsentrasi TN (mg/L)
20 cm	0	1080
	3	0,715
	9	0,782
	12	0,864
	15	0,836
30 cm	0	1080
	3	0,577
	9	0,864
	12	0,891
	15	0,761



Gambar 5. Grafik Penyisihan TN (%) dengan Anoda Seng Terhadap Variasi Jarak Elektroda
Sumber: Peneliti, 2025

Selanjutnya, pada hari ke-9 hingga hari ke-12, penyisihan TN dengan jarak elektroda 30 cm mendekati 100% dan tetap stabil, sedangkan pada jarak 20 cm penyisihan meningkat secara bertahap hingga $\pm 98\%$. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun resistansi internal lebih besar pada jarak elektroda 30 cm [11], sistem mampu mencapai efisiensi penyisihan nitrogen yang lebih cepat dan tinggi karena ketersediaan gradien potensial yang lebih optimal untuk transfer elektron dalam proses CW-MFC.

Peran anoda seng turut memperkuat mekanisme ini, karena permukaan seng mendukung kolonisasi biofilm mikroba elektrogenik yang dapat memfasilitasi proses oksidasi amonia serta reduksi nitrat menjadi gas nitrogen [12]. Selain itu, ion Zn^{2+} yang dilepaskan dalam jumlah kecil dapat menjadi sumber nutrisi mikroba, sehingga mempercepat laju pertumbuhan dan aktivitas metaboliknya [13].

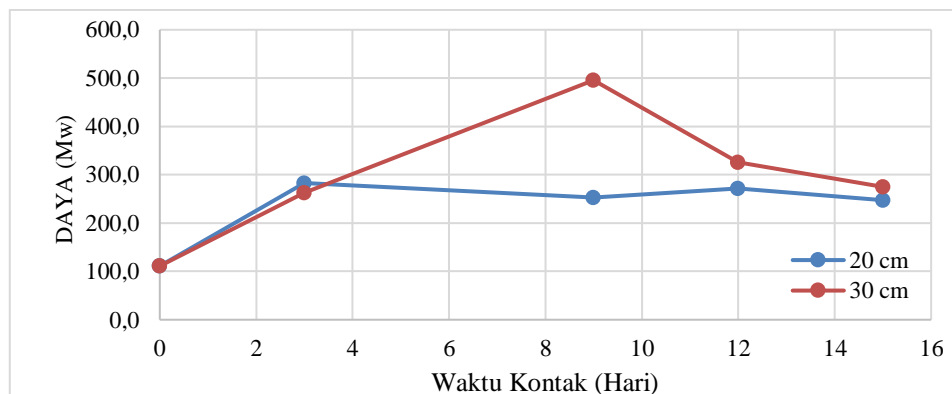
Kontribusi tanaman bambu air (*Equisetum hyemale*) juga sangat penting dalam penyisihan nitrogen. Sistem akar tanaman ini melepaskan oksigen ke zona *rhizosfer*, menciptakan kondisi yang mendukung terjadinya proses nitrifikasi. Pada saat yang sama, zona anaerob di bagian substrat yang lebih dalam mendukung denitrifikasi oleh bakteri heterotrof. Dengan demikian, kombinasi proses biologis oleh tanaman, aktivitas mikroba pada anoda seng, serta efek jarak elektroda berperan dalam pencapaian efisiensi penyisihan TN yang sangat tinggi, yaitu mendekati 100% pada hari ke-12.

3.6 Nilai Listrik dengan Sistem CW-MFC

Berdasarkan grafik **Gambar 6**, menunjukkan variasi daya listrik yang dihasilkan oleh sistem CW-MFC dengan jarak elektroda 20 cm dan 30 cm selama 15 hari pengamatan. Secara umum, daya meningkat pada fase awal hingga mencapai puncaknya, kemudian mengalami penurunan. Pada hari ke-3, daya listrik pada jarak 20 cm (± 280 mW) sedikit lebih tinggi dibandingkan jarak 30 cm (± 260 mW). Hal ini sesuai dengan teori bahwa jarak elektroda yang lebih pendek menurunkan resistansi internal, sehingga transfer elektron dari anoda ke katoda lebih efisien pada fase awal.

Tabel 5. Produksi Listrik Pada Anoda Seng Terhadap Variasi Jarak Elektroda

Jarak Elektroda	Waktu Kontak (hari)	Tegangan (mV)	Arus (mA)	Daya (mW)
20 cm	0	0,34	0,327	111,2
	3	1,28	0,221	282,9
	9	1,54	0,164	252,6
	12	1,28	0,212	271,4
	15	1,21	0,204	246,8
30 cm	0	0,34	0,327	111,2
	3	1,29	0,204	263,2
	9	1,42	0,349	495,6
	12	1,37	0,238	326,1
	15	1,22	0,225	274,5



Gambar 6. Grafik Produksi Listrik dengan Anoda Seng Terhadap Variasi Jarak Elektroda
Sumber: Peneliti, 2025

Namun, pada hari ke-9, daya listrik pada jarak elektroda 30 cm meningkat tajam hingga mencapai puncak (± 500 mW), jauh melampaui jarak 20 cm yang relatif stabil di kisaran ± 250 mW. Kondisi ini menunjukkan bahwa gradien potensial listrik yang lebih besar pada jarak elektroda 30 cm mampu meningkatkan perbedaan tegangan antar elektroda, sehingga menghasilkan daya yang lebih tinggi meskipun resistansi internal lebih besar.

Setelah mencapai puncak, daya pada jarak 30 cm mengalami penurunan bertahap pada hari ke-12 hingga hari ke-15, meskipun nilainya masih lebih tinggi dibandingkan jarak 20 cm. Penurunan ini dapat disebabkan oleh faktor kelelahan substrat organik, penurunan aktivitas mikroba elektrogenik, atau terbentuknya lapisan biofilm yang terlalu tebal pada anoda seng sehingga menghambat transfer elektron[14]. Peran anoda seng sangat krusial dalam proses ini. Seng mudah terkorosi dan mendukung pertumbuhan biofilm mikroba elektrogenik yang bertanggung jawab pada oksidasi bahan organik dan pelepasan elektron. Ion Zn^{2+} yang dihasilkan juga dapat berfungsi sebagai mikronutrien bagi mikroorganisme.

Selain itu, kontribusi tanaman bambu air (*Equisetum hyemale*) turut meningkatkan produksi listrik melalui mekanisme *rhizodeposisi* yang menyediakan senyawa organik sederhana sebagai substrat tambahan bagi mikroba, serta pelepasan oksigen akar yang menciptakan kondisi lebih stabil di zona katodik [15]. Dengan demikian, kombinasi antara anoda seng, jarak elektroda, serta tanaman bambu air mendukung pencapaian daya listrik maksimum hingga 500 mW pada jarak elektroda 30 cm.

4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa sistem *Constructed Wetland–Microbial Fuel Cell* (CW-MFC) dengan anoda seng dan tanaman bambu air (*Equisetum hyemale*) mampu menurunkan pencemar limbah cair IPLT sekaligus menghasilkan energi listrik. Waktu kontak berpengaruh sangat signifikan terhadap penyisihan COD dan TN, sedangkan jarak elektroda berpengaruh nyata terhadap TN namun tidak terhadap COD. Efisiensi penyisihan tertinggi dicapai pada hari ke-12 dengan nilai COD 95% dan TN 98% pada jarak elektroda 30 cm, sementara produksi listrik maksimum sebesar 495,6 mW terjadi pada hari ke-9. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi anoda seng, jarak elektroda 30 cm dan tanaman bambu air efektif meningkatkan kinerja CW-MFC, sehingga berpotensi sebagai teknologi ramah lingkungan untuk pengolahan limbah cair IPLT sekaligus menghasilkan energi terbarukan.

5. Referensi

- [1] N. L. Angrianto, J. Manusawai, and A. S. Sinery, "Analisis Kualitas Air Lindi dan Permukaan pada areal TPA Sowi Gunung dan Sekitarnya di Kabupaten Manokwari Papua Barat," *Cassowary*, vol. 4, no. 2, pp. 221–233, 2021, doi: 10.30862/cassowary.cs.v4.i2.79.
- [2] Republik Indonesia, "Permen LHK No. 68 Tahun 2016," *Tentang Baku Mutu Air Limbah Domest.*, pp. 1–13, 2016, [Online]. Available: <https://p3ekalimantan.menlhk.go.id/2016/09/30/permen-lhk-nomor-p-68-menlhk-setjen-kum-1-8-2016/>
- [3] T. Yamane, N. Yoshida, and M. Sugioka, "Estimation of total energy requirement for sewage treatment by a microbial fuel cell with a one-meter air-cathode assuming Michaelis-Menten COD degradation," *RSC Adv.*, vol. 11, no. 33, pp. 20036–20045, 2021, doi: 10.1039/d1ra03061b.
- [4] S. Das, S.-H. Lee, P. Kumar, K.-H. Kim, S. S. Lee, and S. S. Bhattacharya, "Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability," *J. Clean. Prod.*, vol. 228, pp. 658–678, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.323>.
- [5] S. Gadkari, J. M. Fontmorin, E. Yu, and J. Sadhukhan, "Influence of temperature and other system parameters on microbial fuel cell performance: Numerical and experimental investigation," *Chem. Eng. J.*, vol. 388, no. July 2019, p. 124176, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.124176.
- [6] Alviomora, Cici. *Ftoremediasi Tanaman Daun Kiambang Dan Kayu Apu Terhadap Penurunan Kadar COD Limbah Cair Batik Home Industri Batik*. Diss. Universitas Muhammadiyah Semarang, 2018.
- [7] Suharwati, Sri Ira, and Fadolul Ghafur. "Processing Leaf Waste Into Compost Using Rice Water And Em4 Fermentation Activators." *Entita: Jurnal Pendidikan Ilmu Pengetahuan Sosial dan Ilmu-Ilmu Sosial* (2025): 63-74.
- [8] A. Hermayanti and I. Nugraha, "Potensi perolehan energi listrik dari limbah cair industri tahu dengan metode salt bridge microbial fuel cell (The potency of obtaining electrical energy from tofu industry liquid waste using salt bridge microbial fuel cell method)," *J. Sains Dasar*, vol. 3, no. 2, pp. 162–168, 2014.
- [9] S. J. Zeiger and J. A. Hubbart, "Measuring and modeling event-based environmental flows: An assessment of HEC-RAS 2D rain-on-grid simulations," *J. Environ. Manage.*, vol. 285, no. January, p. 112125, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112125.
- [10] K. Fent, G. Chew, J. Li, and E. Gomez, "Benzotriazole UV-stabilizers and benzotriazole: Antiandrogenic activity in vitro and activation of aryl hydrocarbon receptor pathway in zebrafish eleuthero-embryos," *Sci. Total Environ.*, vol. 482–483, no. 1, pp. 125–136, 2014, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.109.
- [11] S. Kesarwani, D. Panwar, J. Mal, N. Pradhan, and R. Rani, "Constructed Wetland Coupled Microbial Fuel Cell: A Clean Technology for Sustainable Treatment of Wastewater and Bioelectricity Generation," *Fermentation*, vol. 9, no. 1, 2023, doi: 10.3390/fermentation9010006.
- [12] P. Ramesh *et al.*, "Recent Trends in the Use of Electrode Materials for Microbial Fuel Cells Accentuating the Potential of Photosynthetic Cyanobacteria and Microalgae: A Review," *Processes*, vol. 13, no. 5, 2025, doi: 10.3390/pr13051348.

- [13] Q. Wu, J. Liu, Q. Li, W. Mo, R. Wan, and S. Peng, "Effect of Electrode Distances on Remediation of Eutrophic Water and Sediment by Sediment Microbial Fuel Cell Coupled Floating Beds," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 16, 2022, doi: 10.3390/ijerph191610423.
- [14] D. D. Leicester, J. M. Amezaga, A. Moore, and E. S. Heidrich, "Optimising the hydraulic retention time in a pilot-scale microbial electrolysis cell to achieve high volumetric treatment rates using concentrated domestic wastewater," *Molecules*, vol. 25, no. 12, 2020, doi: 10.3390/molecules25122945.
- [15] M. Golzarian, M. Ghiasvand, S. Shokri, M. Bahreini, and F. Kazemi, "Performance evaluation of a dual-chamber plant microbial fuel cell developed for electricity generation and wastewater treatment," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 7, pp. 5947–5954, 2024, doi: 10.1007/s13762-023-05415-5.