

Pengaruh Aerasi pada Elektroda Seng dengan Tanaman *Typha latifolia* dalam Sistem CW-MFC terhadap Penurunan Parameter Pencemar Air Lindi TPA

Ramiza Firyal Tuffahati, Aussie Amalia*

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

*Koresponden email: aussieamalia.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 21 Agustus 2025

Disetujui: 5 September 2025

Abstract

Leachate is a complex wastewater with high organic and nutrient content that poses a significant risk of environmental pollution if not properly treated. One of the promising approaches is the *Constructed Wetland–Microbial Fuel Cell* (CW-MFC) system, which integrates plant and microbial biological processes with electrode utilization to simultaneously treat pollutants and generate electricity. This study employed *Typha latifolia* with zinc (Zn) electrodes and aeration treatments to evaluate the effectiveness of the system in reducing pollutants and producing bioelectricity. The observed parameters included COD, Total Nitrogen (TN), as well as voltage, current, and power output. The results showed that zinc electrodes achieved COD removal efficiency up to 95% and TN removal up to 88% at the optimal retention time, although a decline was observed on day 16 due to microbial saturation and root exudate release. Statistical analysis revealed that the type of electrode had a significant effect on voltage generation (p -value = 0.006), while aeration and retention time did not show significant effects on electricity production. In conclusion, the CW-MFC system with zinc electrodes and *Typha latifolia* has great potential as an alternative technology for leachate treatment while simultaneously generating environmentally friendly electricity.

Keywords: *leachate, cw-mfc, typha latifolia, electrode, aeration, cod, tn*

Abstrak

Air lindi merupakan limbah kompleks dengan kandungan organik dan nutrisi tinggi yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak diolah dengan tepat. Salah satu pendekatan yang dikembangkan adalah sistem *Constructed Wetland–Microbial Fuel Cell* (CW-MFC), yang menggabungkan proses biologis tanaman dan mikroorganisme dengan pemanfaatan elektroda untuk menghasilkan energi listrik. Penelitian ini menggunakan tanaman *Typha latifolia* dengan variasi elektroda seng serta perlakuan aerasi untuk mengkaji efektivitas sistem dalam menurunkan polutan dan menghasilkan listrik. Parameter yang diamati meliputi COD, Total Nitrogen (TN), serta nilai tegangan, arus, dan daya listrik yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa elektroda seng mampu mencapai efisiensi penyisihan COD hingga 95% dan TN hingga 88% pada waktu tinggal optimal, meskipun terjadi penurunan pada hari ke-16 akibat kejenuhan mikroba dan pelepasan eksudat akar. Analisis statistik menunjukkan bahwa jenis elektroda berpengaruh signifikan terhadap tegangan (p -value = 0,006), sementara aerasi dan waktu kontak tidak berpengaruh nyata terhadap produksi listrik. Kesimpulannya, CW-MFC dengan elektroda seng dan tanaman *Typha latifolia* berpotensi menjadi teknologi alternatif dalam pengolahan air lindi sekaligus menghasilkan energi listrik ramah lingkungan.

Kata Kunci: *lindi, cw-mfc, typha latifolia, elektroda, cod, tn*

1. Pendahuluan

Lindi yang berasal dari TPA (Tempat Pemrosesan Akhir) atau tempat pembuangan sampah umumnya mengandung polutan organik, anorganik, serta sejumlah logam berat. Kandungan ini muncul akibat masuknya berbagai jenis sampah, termasuk yang mengandung logam, ke area pembuangan tersebut [1]. Secara umum, karakteristik air lindi dapat diidentifikasi melalui sejumlah parameter konvensional, meliputi *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Organic Carbon* (TOC), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), pH, padatan tersuspensi, amonia (NH_4^+ -N), serta kandungan logam berat. Rasio BOD₅ terhadap COD maupun rasio COD terhadap TOC sering digunakan sebagai indikator penting untuk menilai tingkat biodegradabilitas senyawa organik, sekaligus menunjukkan sejauh mana senyawa karbon dalam air limbah telah mengalami proses oksidasi [2]. Beragam teknologi telah diterapkan untuk mengolah limbah lindi di TPA salah satunya adalah *constructed wetland* atau lahan basah buatan. Penerapan *constructed wetland*

(CW) yang dipadukan dengan teknologi lain berpotensi meningkatkan efektivitas penghilangan polutan dari limbah lindi, misalnya melalui integrasi dengan *microbial fuel cell* (MFC).

CW dan MFC memiliki kesamaan dalam mekanisme pengolahan, yakni keduanya memanfaatkan proses biologis. Pada kedua sistem ini, umumnya terbentuk zona aerobik di lapisan permukaan air dan udara, serta zona anaerobik di bagian dalam atau bawah. Dengan penempatan elektroda pada masing-masing zona tersebut, terciptalah suatu teknologi terintegrasi yang dikenal sebagai *Constructed Wetland–Microbial Fuel Cell* (CW-MFC) [3]. Salah satu faktor yang memengaruhi kinerja sistem CW-MFC adalah ketersediaan oksigen di dalamnya. Pemberian aerasi berperan dalam meningkatkan efisiensi, terutama melalui perbaikan proses nitrifikasi dan penguraian bahan organik. Di antara berbagai metode yang tersedia, aerasi semprot dinilai cukup efektif dan ekonomis untuk pengolahan limbah domestik di lokasi, karena mampu menghasilkan kualitas pengolahan yang baik dengan biaya operasional yang relatif rendah [4].

CW-MFC berpotensi menghasilkan listrik melalui reaksi yang terjadi pada anoda dan katoda. Elektron yang dihasilkan berasal dari proses degradasi bahan organik oleh mikroorganisme, khususnya jenis yang memiliki aktivitas elektrokimia [5]. Menurut Timmers et al (2013) [6] dalam Wetser (2016) [7] akar tanaman yang berada di area anoda melepaskan *rhizodeposits* yaitu senyawa organik hasil eksudasi akar yang berfungsi sebagai substrat bagi bakteri elektrokimia. Melalui proses oksidasi, bakteri tersebut memanfaatkan senyawa ini untuk menghasilkan energi listrik. Keberadaan mikroorganisme elektroaktif, kondisi lingkungan yang mendukung, serta kapasitas elektroda berperan dalam menentukan besar tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sistem CW-MFC. Pemilihan jenis tanaman menjadi bagian penting dalam menunjang kinerja sistem CW-MFC. Salah satu tanaman yang sering digunakan adalah *Typha latifolia*, yang memiliki sistem perakaran luas serta mampu melepaskan eksudat akar dalam jumlah cukup banyak. Eksudat ini mengandung senyawa organik seperti gula, asam amino, dan nitrogen organik yang dapat dimanfaatkan oleh bakteri elektrogenik sebagai sumber energi [8]. Selain itu, *Typha latifolia* juga berperan dalam meningkatkan suplai oksigen di zona rhizosfer, sehingga tidak hanya membantu mempercepat degradasi polutan, tetapi juga mendukung terbentuknya energi listrik di dalam sistem CW-MFC.

Selain faktor biologis, pemilihan jenis elektroda juga menjadi aspek penting yang memengaruhi efisiensi sistem CW-MFC. Material elektroda berperan dalam menunjang kinerja keseluruhan, karena pemilihan material yang tepat dapat meningkatkan konduktivitas listrik, menjaga kestabilan kimia, serta mengoptimalkan transfer elektron selama proses pengolahan air limbah dan konversi energi. Salah satu elektroda yang dapat digunakan adalah seng (Zn). Menurut Narayan et al. (2025) [9], seng mampu bertindak sebagai sumber elektron melalui reaksi oksidasi, yang kemudian dialirkan ke elektroda katoda melalui rangkaian eksternal. Mekanisme ini berkontribusi pada produksi energi bersih sekaligus meningkatkan efisiensi transfer elektron dalam sistem. Selain itu, penggunaan elektroda seng dilaporkan dapat memperbaiki efisiensi penurunan parameter pencemar seperti COD dan lignin, serta mendukung proses biodegradasi dalam pengolahan air limbah.

Meskipun CW-MFC memiliki potensi dalam mengolah air lindi sekaligus menghasilkan listrik, penelitian sebelumnya masih terbatas pada kajian umum mengenai jenis tanaman dan material elektroda. Kajian yang secara khusus menyoroti perlakuan aerasi pada sistem CW-MFC dengan tanaman *Typha latifolia* masih jarang dilakukan. Hal serupa juga berlaku pada penggunaan elektroda seng dalam pengolahan air lindi, yang belum banyak dieksplorasi secara mendalam. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh perlakuan aerasi serta penggunaan elektroda seng terhadap efektivitas CW-MFC dalam mengolah air lindi sekaligus menghasilkan energi listrik.

2. Metode Penelitian

Aklimatisasi Typha latifolia

Sebelum penelitian, tanaman Bulrush (*Typha latifolia*) diaklimatisasi dengan menempatkannya bersama media tanam (tanah dan kerikil) dalam kontainer berisi air PDAM selama 7 hari. Tahap ini bertujuan menyesuaikan tanaman dengan kondisi baru. Selanjutnya dilakukan *Range Finding Test* (RFT) selama 7 hari menggunakan air lindi dengan konsentrasi 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100% untuk menentukan batas aman bagi tanaman. Aklimatisasi dianggap berhasil jika tanaman menunjukkan pertumbuhan stabil, bebas gejala stres berat, dan sistem perakaran mulai berkembang pada media tanam.

Seeding Anoda

Proses *seeding* anoda dilakukan sebelum digunakan dalam reaktor untuk menumbuhkan biofilm mikroba pada permukaan elektroda. Anoda direndam dalam campuran air cucian beras, sebagaimana disebutkan Setiawan et al., (2020) sebagai sumber substrat alternatif, serta lumpur sawah yang berpotensi

menyediakan mikroorganisme dari oksidasi senyawa organik [11]. EM4 ditambahkan sebagai *starter* yang mengandung bakteri anaerob dan fakultatif sesuai dengan kondisi pada anoda [12]. Setelah aktivasi, elektroda dikeringkan, dihubungkan dengan kabel tembaga, dan dikoneksikan ke digital multimeter untuk memantau perubahan bioelektrisitas secara langsung.

Proses Pengujian Sistem

Tahap pengujian inti CW-MFC dilakukan menggunakan sistem *horizontal sub-surface flow* (HSSF CW-MFC) dengan metode *batch flow* pada reaktor berdimensi 38 cm × 24,5 cm × 22 cm. Reaktor terdiri atas dua bak, yaitu bak katoda yang dilengkapi tanaman Bulrush hasil aklimatisasi dan *Range Finding Test* (RFT) beserta media tanam dengan elektroda di bagian bawah, serta bak anoda yang berisi elektroda dalam wadah bervolume 4 L berisi larutan elektrolit NaCl terlarut dalam akuades. Kedua bak dihubungkan melalui jembatan garam KCl berbentuk pipa U berdiameter 16 mm yang terpasang di tepi reaktor. Jembatan garam ini berfungsi memfasilitasi perpindahan elektron dari anoda ke katoda untuk menghasilkan listrik sekaligus mendukung proses pengolahan air lindi. Di dalam anoda, mikroorganisme elektrogenik menguraikan polutan, sedangkan tanaman Bulrush pada katoda menyediakan senyawa organik bagi mikroorganisme dan oksigen untuk proses reduksi. Pengujian dilakukan dengan variasi waktu tinggal 4, 8, 12, dan 16 hari, kemudian sampel diambil melalui keran outlet untuk analisis COD dan Total Nitrogen. Arus dan tegangan diukur menggunakan multimeter, lalu dihitung daya (P)-nya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Air Lindi TPA

Karakteristik air lindi sangat dipengaruhi oleh jenis dan umur timbunan sampah, serta kondisi lingkungan di sekitar lokasi pembuangan. **Tabel 1** menyajikan hasil uji awal karakteristik air lindi dari TPA.

Tabel 1. Hasil Uji Awal Air Lindi

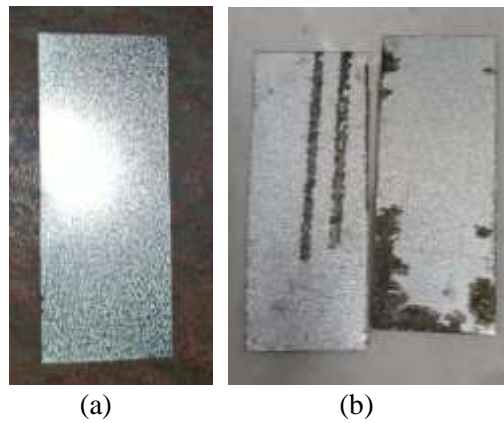
Parameter	Hasil Uji Awal	Baku Mutu (PermenLHK No. 59 Tahun 2016)
pH	7,5	6-9
COD	4648 mg/L	300 mg/L
Total Nitrogen (TN)	350 mg/L	60 mg/L

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Pengujian awal terhadap air lindi dilakukan untuk mengetahui kondisi sebelum diberi perlakuan menggunakan sistem CW-MFC. Parameter yang dianalisis meliputi *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Total Nitrogen* (TN). Hasil pengujian awal ini digunakan sebagai acuan pembandingan untuk menilai kemampuan sistem dalam menurunkan parameter pencemar selama proses pengolahan. Berdasarkan hasil uji, nilai COD awal tercatat sebesar 4648 mg/L, yang jauh melebihi baku mutu menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 59 Tahun 2016, yakni 300 mg/L. Tingginya kandungan COD menunjukkan bahwa air lindi mengandung beban organik terlarut yang signifikan. Sementara itu, nilai TN awal adalah 350 mg/L, juga melampaui batas maksimum baku mutu air lindi sebesar 60 mg/L. Secara keseluruhan, hasil uji awal memperlihatkan bahwa air lindi yang akan diolah memiliki beban pencemar yang tinggi, baik dari segi kandungan organik maupun nutrisi. Temuan ini menegaskan perlunya dilakukan pengolahan lanjutan menggunakan sistem CW-MFC untuk mengurangi parameter pencemar sebelum air dibuang ke lingkungan.

3.2 Seeding Anoda

Elektroda yang digunakan, yaitu plat seng, melalui tahap *seeding* sebelum diterapkan pada sistem CW-MFC dalam pengolahan air lindi. Tahap ini bertujuan membentuk biofilm dan mempercepat aktivitas mikroba elektroaktif. Proses *seeding* dilakukan dengan merendam elektroda selama lima hari dalam campuran air cucian beras, EM4, dan lumpur persawahan, yang berperan sebagai sumber mikroorganisme alami sekaligus nutrisi bagi pertumbuhan awal biofilm pada permukaan elektroda. Selama perendaman, terbentuk lapisan biofilm dan aktivitas mikroba mulai berkembang. Pada elektroda berbahan logam, terutama plat seng, terlihat tanda korosi ringan seperti karat, yang mengindikasikan adanya reaksi kimia awal antara elektroda dan lingkungan mikroba. Setelah tahap *seeding*, energi listrik yang dihasilkan diukur menggunakan multimeter.



Gambar 1. Elektroda Sebelum (a) dan Sesudah (b) Proses *Seeding*
 Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025

3.3 Aklimatisasi dan *Range Finding Test (RFT) Typha latifolia*

Sebelum digunakan dalam sistem pengolahan air limbah, tanaman *Typha latifolia* terlebih dahulu diaklimatisasi selama 7 hari menggunakan air PDAM. Pemilihan tanaman didasarkan pada keseragaman ukuran dan kondisi fisik yang sehat. Tanaman ditempatkan dalam kontainer berkapasitas 15 liter berisi media tanah dan air PDAM, kemudian diletakkan di area terbuka dengan pencahayaan alami namun terlindung dari hujan langsung. Selama proses aklimatisasi, *Typha latifolia* menunjukkan respons positif terhadap kondisi lingkungan reaktor. Daun tetap berwarna hijau segar tanpa gejala stres seperti menguning atau mengering. Beberapa hari setelah penanaman, mulai muncul tunas baru yang menandakan adaptasi aktif, disertai pertumbuhan daun yang semakin panjang dan tegak, menunjukkan aktivitas fotosintesis yang optimal.

Selain aklimatisasi, dilakukan *Range Finding Test (RFT)* untuk menentukan batas toleransi tanaman terhadap air lindi yang digunakan. Pengujian ini bertujuan mengidentifikasi konsentrasi air lindi yang masih dapat diterima tanpa menimbulkan stres signifikan. Tanaman dipaparkan pada lima variasi konsentrasi, yaitu 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%, selama lima hari. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada konsentrasi 20%, 40%, dan 60%, tanaman tetap bertahan dengan daun hijau dan struktur tegak. Namun, pada konsentrasi 80% dan 100% (**Gambar 2**), mulai terlihat gejala stres seperti daun menguning dan layu ringan, yang mengindikasikan adanya tekanan fisiologis akibat tingginya beban pencemar.



Gambar 2. Kondisi *Typha latifolia* pada Proses RFT
 Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025

3.4 Penyisihan COD pada Air Lindi TPA

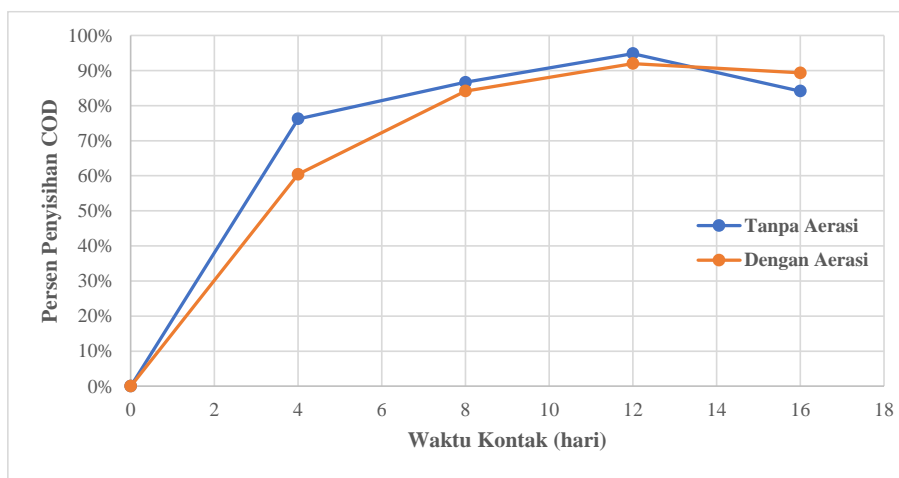
Berdasarkan **Gambar 3**, penyisihan COD belum terjadi pada hari ke-0 karena reaksi belum berjalan. Pada hari ke-4, sistem dengan aerasi menunjukkan efisiensi lebih tinggi (84%) dibandingkan tanpa aerasi (71%). Efisiensi tertinggi dicapai pada hari ke-8 dengan aerasi sebesar 90%, yang menunjukkan peran aerasi dalam mempercepat oksidasi senyawa organik pada tahap awal. Namun, setelah hari ke-12 efisiensi kedua sistem mulai menurun, hingga pada hari ke-16 turun menjadi 79% (dengan aerasi) dan 74% (tanpa aerasi). Penurunan ini disebabkan oleh kejenuhan mikroorganisme elektroaktif akibat penumpukan biofilm

pada elektroda, yang menghambat difusi senyawa organik dan menurunkan aktivitas degradasi [9]. Selain itu, keberadaan tanaman dalam sistem CW-MFC juga dapat memengaruhi konsentrasi COD.

Tabel 2. Efisiensi Penyisihan COD pada Sistem CW-MFC dengan Plat Seng dan Variasi Perlakuan Aerasi

Perlakuan Aerasi	Waktu Kontak (hari)	Konsentrasi COD (mg/L)
Tanpa Aerasi	0	4648
	4	1104
	8	620
	12	240
	16	736
Dengan Aerasi	0	4648
	4	1840
	8	736
	12	372
	16	496

Sumber: Hasil Analisis, 2025



Gambar 3. Grafik Penyisihan COD pada Sistem CW-MFC dengan Plat Seng dan Variasi Perlakuan Aerasi

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Akar tanaman melepaskan eksudat berupa senyawa organik mudah terdegradasi seperti asam organik, asam amino, dan gula. Jika pelepasan eksudat lebih cepat daripada laju degradasi oleh mikroba, konsentrasi COD justru dapat meningkat [8]. Hasil uji statistik menunjukkan bahwa jenis elektroda (p -value = 0,564) dan perlakuan aerasi (p -value = 0,788) tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap penyisihan COD ($p > 0,05$). Sebaliknya, faktor waktu kontak memiliki pengaruh yang sangat signifikan (p -value = 0,000), yang menegaskan bahwa lamanya interaksi limbah dengan sistem CW-MFC berperan besar dalam menurunkan konsentrasi COD.

Tanaman *Typha latifolia* turut berperan penting dalam meningkatkan efisiensi penyisihan COD. Kontribusi ini terjadi melalui pelepasan senyawa karbon dari akar (rizodeposit) yang menjadi sumber nutrisi bagi mikroorganisme pengurai. Selain itu, keberadaan sistem perakaran memberikan area tambahan di zona rizosfer yang mendukung proses kolonisasi mikroba. Dengan kondisi tersebut, degradasi senyawa organik dapat berlangsung lebih optimal sekaligus menunjang pembentukan bioelektrik dalam sistem [13].

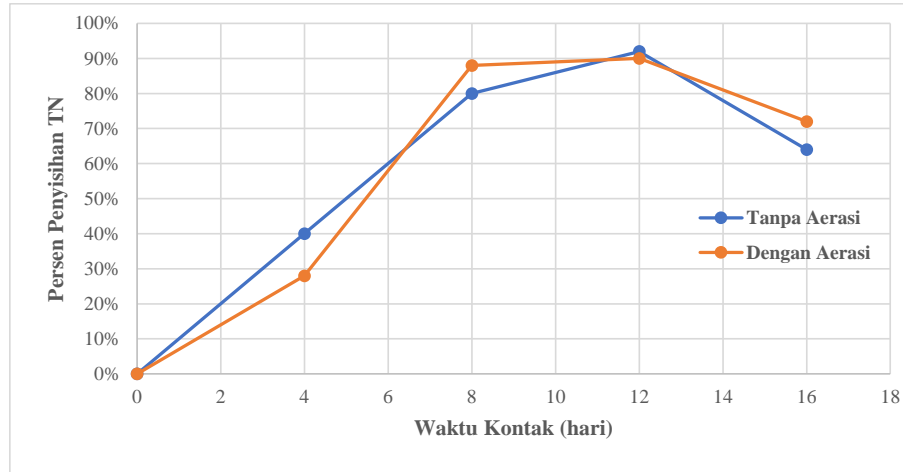
3.5 Penyisihan TN pada Air Lindi TPA

Tabel 3. Efisiensi Penyisihan TN pada Sistem CW-MFC dengan Plat Seng dan Variasi Perlakuan Aerasi

Perlakuan Aerasi	Waktu Kontak (hari)	Konsentrasi TN (mg/L)
Tanpa Aerasi	0	350
	4	210
	8	70
	12	28
	16	126
Dengan Aerasi	0	350

Perlakuan Aerasi	Waktu Kontak (hari)	Konsentrasi TN (mg/L)
	4	252
	8	42
	12	35
	16	98

Sumber: Hasil Analisis, 2025



Gambar 4. Grafik Penyisihan TN pada Sistem CW-MFC dengan Plat Seng dan Variasi Perlakuan Aerasi
 Sumber: Hasil Analisis, 2025

Berdasarkan **Gambar 4**, pada hari ke-0 belum terjadi penyisihan TN pada kedua kondisi, baik dengan aerasi maupun tanpa aerasi. Pada hari ke-4, sistem tanpa aerasi menunjukkan efisiensi lebih tinggi sebesar 40% dibandingkan dengan sistem aerasi sebesar 28%. Selanjutnya, pada hari ke-8 efisiensi pada sistem aerasi meningkat tajam hingga 88%, sedikit lebih tinggi dibandingkan tanpa aerasi sebesar 80%. Pada hari ke-12, kedua kondisi mencapai efisiensi maksimum, yang menandakan titik optimal penyisihan TN dengan elektroda plat seng. Namun, pada hari ke-16 efisiensi mengalami penurunan pada kedua kondisi. Fluktuasi ini menunjukkan adanya reaksi oksidasi pada elektroda, sementara penurunan kinerja berkaitan dengan kejenuhan mikroorganisme elektroaktif yang membentuk senyawa nitrogen dalam bentuk lain. Selain itu, keberadaan tanaman dalam sistem CW-MFC juga dapat memengaruhi konsentrasi TN melalui pelepasan eksudat akar yang kaya senyawa nitrogen organik.

Beberapa penelitian melaporkan bahwa molekul nitrogen organik dapat menyumbang 20–30% dari total massa eksudat akar. Eksudat tersebut juga mengandung karbon organik dan asam amino bebas, yang jumlahnya dapat meningkat saat tanaman mengalami kondisi stres, seperti kekeringan. Senyawa-senyawa ini menambah kandungan nitrogen organik terlarut di zona akar, sehingga turut tercatat dalam perhitungan total nitrogen sistem [14]. Hasil analisis menunjukkan bahwa jenis elektroda berpengaruh signifikan terhadap penyisihan TN (p -value $0,015 < 0,05$). Sebaliknya, perlakuan aerasi tidak menunjukkan pengaruh nyata (p -value $0,263 > 0,05$). Faktor yang paling menentukan adalah waktu kontak (p -value $0,000$), di mana semakin lama waktu tinggal, efisiensi penyisihan TN semakin meningkat.

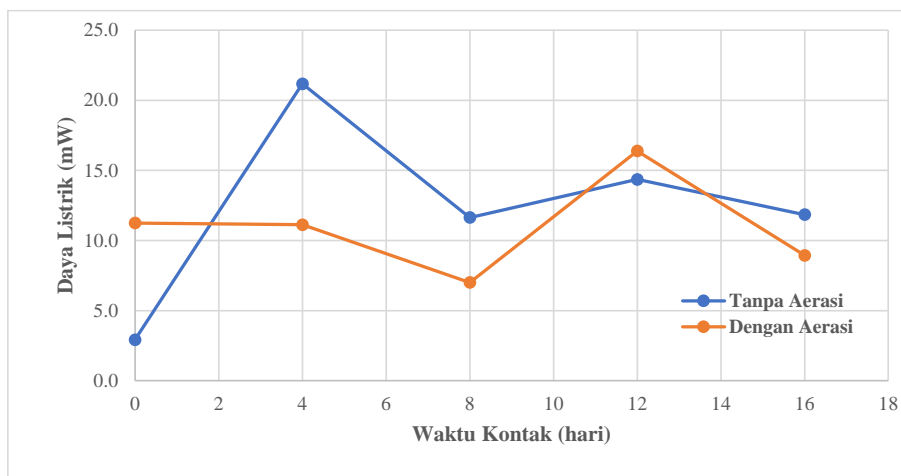
Penyisihan amonium (NH_4^+) pada sistem CW-MFC sangat dipengaruhi oleh keberadaan tanaman. Melalui fotosintesis, tanaman melepaskan oksigen ke zona perakaran yang mendukung aktivitas bakteri nitrifikasi. Struktur akar juga menciptakan kondisi mikroaerobik yang sesuai bagi pertumbuhan mikroorganisme, sehingga meningkatkan efisiensi proses nitrifikasi [13]. Secara khusus, tanaman *Typha latifolia* berperan penting dalam menurunkan konsentrasi nitrogen. Oksigen yang dilepaskan ke rhizosfer memperkuat aktivitas mikroba aerob, mendukung dekomposisi bahan organik, dan mempercepat proses nitrifikasi. Selain itu, akar tanaman dapat menyerap amonium secara langsung, sekaligus menyediakan lingkungan yang mendukung konversi nitrat dan nitrit menjadi nitrogen gas (N_2) melalui denitrifikasi. Perpaduan antara oksigenasi, penyerapan langsung oleh tanaman, serta penyediaan habitat bagi mikroorganisme ini menjadikan *Typha latifolia* efektif dalam mengurangi kandungan nitrogen pada air limbah [15].

3.6 Nilai Listrik dengan Sistem CW-MFC

Tabel 4. Produksi Listrik pada Sistem CW-MFC dengan Plat Seng dan Varasi Perlakuan Aerasi

Perlakuan Aerasi	Waktu Kontak (hari)	Tegangan (mV)	Arus (mA)	Daya (mW)
Tanpa Aerasi	0	22.5	0.13	2.925
	4	38.5	0.55	21.175
	8	77.6	0.15	11.640
	12	43.5	0.33	14.355
	16	38.2	0.31	11.842
Dengan Aerasi	0	37.5	0.3	11.25
	4	54	0.206	11.124
	8	68	0.103	7.004
	12	105.7	0.155	16.384
	16	88.5	0.101	8.939

Sumber: Hasil Analisis, 2025



Gambar 5. Nilai Daya Listrik (mW) pada Sistem CW-MFC dengan Plat Seng dan Variasi Perlakuan Aerasi
Sumber: Hasil Analisis, 2025

Pada **Tabel 4**, menyajikan hasil produksi listrik pada sistem CW-MFC dengan elektroda plat seng. Nilai tegangan dan arus diukur menggunakan multimeter, kemudian dihitung menjadi daya. Pada sistem tanpa aerasi, tegangan awal 22,5 mV meningkat hingga 77,6 mV pada hari ke-8 sebelum menurun menjadi 38,2 mV di hari ke-16. Arus tertinggi tercatat pada hari ke-4 sebesar 0,55 mA yang menghasilkan daya maksimum 21,175 mW pada hari yang sama. Sementara itu, pada sistem dengan aerasi, tegangan awal 37,5 mV terus meningkat hingga mencapai 105,7 mV pada hari ke-12, lalu sedikit turun menjadi 88,5 mV di hari ke-16. Arus tertinggi justru tercatat di awal (hari ke-0) sebesar 0,3 mA, sedangkan daya maksimum diperoleh pada hari ke-12 sebesar 16,384 mW. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa pemilihan jenis elektroda berpengaruh signifikan terhadap tegangan dengan nilai p-value 0,006 ($<0,05$). Namun, pada arus dan daya listrik, faktor jenis elektroda, aerasi, maupun waktu kontak tidak memberikan pengaruh signifikan, dengan nilai p-value masing-masing 0,127; 0,280; dan 0,707 untuk arus, serta 0,058; 0,143; dan 0,476 untuk daya. Meski demikian, jenis elektroda menunjukkan kecenderungan paling berpengaruh terhadap daya dibandingkan faktor lain. Sementara itu, perlakuan aerasi dan waktu kontak relatif tidak memberikan kontribusi berarti terhadap pembentukan arus maupun daya listrik, meskipun pada beberapa titik waktu (hari ke-8 dan 12) terlihat adanya peningkatan tegangan yang cukup jelas. Temuan ini memperlihatkan bahwa variasi jenis elektroda, khususnya seng, lebih menentukan dalam memengaruhi produksi listrik pada sistem CW-MFC dibandingkan aerasi dan waktu kontak.

Produksi listrik pada sistem CW-MFC berkaitan erat dengan aktivitas mikroorganisme elektroaktif yang mampu mentransfer elektron ke anoda. Mikroorganisme seperti *Geobacter* dan *Shewanella* memanfaatkan senyawa organik dalam air lindi sebagai donor elektron, yang kemudian dialirkan ke anoda melalui reaksi elektrokimia dan menghasilkan arus listrik. Mekanisme ini sejalan dengan peran mikroorganisme heterotrof dalam penyisihan COD, yang juga mengoksidasi senyawa organik, namun sebagian besar energi yang dihasilkan lebih banyak digunakan untuk pertumbuhan sel dan respirasi internal [16].

Keberadaan tanaman *Typha latifolia* berkontribusi penting dalam meningkatkan kinerja CW-MFC. Akar tanaman ini melepaskan senyawa organik yang lebih mudah terurai di sekitar anoda, sekaligus mendukung aktivitas bakteri elektrogenik dalam menghasilkan listrik. Selain itu, zona perakaran *Typha latifolia* juga menciptakan lingkungan yang kondusif bagi mikroorganisme, sehingga proses transfer elektron dari anoda ke katoda dapat berlangsung lebih optimal [13].

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem *Constructed Wetland–Microbial Fuel Cell* (CW-MFC) dengan elektroda plat seng dan tanaman *Typha latifolia* efektif dalam menurunkan beban pencemar air lindi sekaligus menghasilkan energi listrik. Hasil analisis statistik memperlihatkan bahwa waktu kontak memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap penurunan COD (p -value = 0,000) dan TN (p -value = 0,000), sedangkan jenis elektroda tidak berpengaruh nyata terhadap COD (p -value = 0,564) namun signifikan terhadap TN (p -value = 0,015). Sementara itu, perlakuan aerasi tidak menunjukkan pengaruh signifikan baik terhadap COD (p -value = 0,788) maupun TN (p -value = 0,263). Efisiensi penyisihan COD tertinggi mencapai 90% pada kondisi aerasi hari ke-8, sedangkan TN mencapai 88% pada kondisi aerasi hari ke-8. Penurunan efisiensi setelah hari ke-12 mengindikasikan adanya kejenuhan mikroorganisme elektroaktif dan pelepasan eksudat akar yang menambah beban organik dan nitrogen dalam sistem.

Selain menurunkan polutan, *Typha latifolia* juga berperan meningkatkan kinerja CW-MFC melalui pelepasan oksigen dan eksudat akar yang mendukung aktivitas mikroorganisme pengurai serta bakteri elektrogenik. Dari sisi bioenergi, produksi listrik maksimum pada sistem tanpa aerasi tercatat sebesar 21,175 mW (hari ke-4), sedangkan dengan aerasi mencapai 16,384 mW (hari ke-12). Secara keseluruhan, kombinasi *Typha latifolia* dan elektroda seng dalam sistem CW-MFC terbukti mampu meningkatkan efektivitas penyisihan COD dan TN sekaligus menghasilkan energi listrik, sehingga berpotensi sebagai solusi pengolahan air lindi yang berkelanjutan.

5. Referensi

- [1] I. K. Erabee and S. Ethaib, "Treatment of contaminated landfill leachate using aged refuse biofilter medium," *Oriental Journal of Chemistry*, vol. 34, no. 3, pp. 1441–1450, 2018, doi: 10.13005/ojc/340334.
- [2] C. Teng, K. Zhou, C. Peng, and W. Chen, "Characterization and treatment of landfill leachate: A review," *Water Res*, vol. 203, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.watres.2021.117525.
- [3] P. Srivastava, A. K. Yadav, V. Garaniya, and R. Abbassi, "Constructed wetland coupled microbial fuel cell technology: Development and potential applications," in *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Microbial Electrochemical Technology: Sustainable Platform for Fuels, Chemicals and Remediation*, Elsevier, 2018, pp. 1021–1036. doi: 10.1016/B978-0-444-64052-9.00042-X.
- [4] P. N. Karungamy, "Potential of *Canna indica* in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review," *Conservation*, vol. 2, no. 3, pp. 499–513, Aug. 2022, doi: 10.3390/conservation2030034.
- [5] D. Cahyani, A. Haryanto, D. S. Marpaung, and R. Fil'aini, "Sel Bahan Bakar Berbasis Mikroba-Tanaman (P-MFC) Sebagai Sumber Energi Listrik; Prinsip Kerja, Variasi Desain, Potensi dan Tantangan," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, vol. 9, no. 2, p. 112, Jun. 2020, doi: 10.23960/jtep-l.v9i2.112-121.
- [6] R. A. Timmers, D. P. B. T. B. Strik, H. V. M. Hamelers, and C. J. N. Buisman, "Electricity generation by a novel design tubular plant microbial fuel cell," *Biomass Bioenergy*, vol. 51, pp. 60–67, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.002>.
- [7] K. Wetsler, "Electricity from wetlands Technology assessment of the tubular Plant Microbial Fuel Cell with an integrated biocathode," Wageningen University, 2016.
- [8] M. O. Eze and C. F. Amuji, "Elucidating the significant roles of root exudates in organic pollutant biotransformation within the rhizosphere," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-53027-x.
- [9] M. Narayan *et al.*, "Optimizing COD removal, lignin degradation and electricity generation from pulp and paper industry wastewater by CW-MFC using box-behnken design," *Front Energy Res*, vol. 13, 2025, doi: 10.3389/fenrg.2025.1549247.
- [10] Setiawan, Didik, Mahardika Prasetya Aji, and Budi Astuti. "Pembuatan Elektroda Berbahan Air Cucian Beras." *Prosiding Seminar Nasional Pascasarjana*. Vol. 3. No. 1. 2020.
- [11] A. Rizky Maulina, S. Hendriany, and U. Dwi Putri, "Potensi Microbial Fuel Cell (MFC) pada Mikroba Tanah Sawah Lumpur Dataran Tinggi," in *Prosiding SEMNASBIO 2024*, 2024.

- [12] M. A. D. Tama, Y. S. Purnomo, and S. Q. Z. Nisa, "Pengaruh Jenis Anoda Microbial Fuel Cells Terhadap Power Density Dan Penyisihan Kandungan Organik Limbah Cair Industri Tahu," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. IX, no. 4, 2024.
- [13] Ç. Saz, C. Türe, O. C. Türker, and A. Yakar, "Effect of vegetation type on treatment performance and bioelectric production of constructed wetland modules combined with microbial fuel cell (CW-MFC) treating synthetic wastewater," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, no. 9, pp. 8777–8792, Mar. 2018, doi: 10.1007/s11356-018-1208-y.
- [14] H. R. Coker, H. A. Lin, C. E. B. Shackelford, M. M. Tfaily, A. P. Smith, and J. A. Howe, "Drought stimulates root exudation of organic nitrogen in cotton (*Gossypium hirsutum*)," *Front Plant Sci*, vol. 15, 2024, doi: 10.3389/fpls.2024.1431004.
- [15] X. Wang, Y. Tian, H. Liu, X. Zhao, and Q. Wu, "Effects of influent COD/TN ratio on nitrogen removal in integrated constructed wetland–microbial fuel cell systems," *Bioresour Technol*, vol. 271, pp. 492–495, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.039.
- [16] C. Santoro, C. Arbizzani, B. Erable, and I. Ieropoulos, "Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review," *J Power Sources*, vol. 356, pp. 225–244, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.109.