

ANALISIS SIGNIFIKANSI PENGARUH KALIUM PERMANGANAT (KMnO_4) TERHADAP KINERJA KELISTRIKAN *MICROBIAL FUEL CELL* (MFC) BERBASIS AIR LINDI

Ranisa Oktaviyanti^{1*}, Endi Permata², Bagus Dwicahyono³

^{1,2,3}Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Elektro; Universitas Sultan Ageng Tirtayasa; Jl. Raya Jakarta Km. 4, Pakupatan, Panancangan, Kec. Cipocok Jaya, Kota Serang, Banten 42124.

Keywords:

Leachate; Potassium Permanganate; Microbial Fuel Cell, Electrical Performance; Statistical Significance.

Correspondent Email:

ranisa1234567@gmail.com

Abstrak. Air lindi mengandung bahan organik yang berpotensi dimanfaatkan sebagai substrat dalam sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC) untuk menghasilkan energi listrik. Salah satu faktor yang dapat memengaruhi kinerja MFC adalah proses elektrokimia pada katoda, termasuk penggunaan kalium permanganat (KMnO_4) sebagai akseptor elektron. Penelitian ini bertujuan menganalisis signifikansi pengaruh penambahan KMnO_4 terhadap kinerja kelistrikan MFC berbasis air lindi. Sistem MFC dua ruang dioperasikan selama tujuh hari dengan dua perlakuan, yaitu tanpa dan dengan penambahan KMnO_4 . Parameter yang dianalisis meliputi tegangan, arus, daya, dan *power density* menggunakan nilai rata-rata, standar deviasi, serta *p-value* pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Hasil menunjukkan bahwa penambahan KMnO_4 menghasilkan perbedaan signifikan pada tegangan, daya, dan *power density*. Nilai tegangan meningkat dari $176,057 \pm 26,468$ mV menjadi $487,468 \pm 92,948$ mV, daya dari $14,656 \pm 4,028$ mW menjadi $42,268 \pm 12,270$ mW, serta *power density* dari $4,441,208 \pm 1,220,535$ mW/m² menjadi $12,808,617 \pm 3,718,140$ mW/m² ($p < 0,001$). Sebaliknya, arus tidak menunjukkan perbedaan signifikan ($p = 0,1636$). Dengan demikian, KMnO_4 berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kinerja kelistrikan MFC, terutama pada tegangan, daya, dan *power density*.



Copyright © 2026 The Author(s),
Published by Jurnal Informatika dan
Teknik Elektro Terapan. This is an
open-access article distributed under
the terms of the Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0
International License (CC BY-NC
4.0).

Abstract. *Leachate contains organic matter that can potentially be utilized as a substrate in a Microbial Fuel Cell (MFC) system for electricity generation. One factor influencing MFC performance is the electrochemical reaction at the cathode, including the use of potassium permanganate (KMnO_4) as an electron acceptor. This study aimed to analyze the significance of KMnO_4 addition on the electrical performance of a leachate-based MFC. A dual-chamber MFC was operated for seven days under two conditions: without and with KMnO_4 addition. The evaluated parameters included voltage, current, power, and power density. Data were analyzed using mean values, standard deviations, and p-values at a significance level of $\alpha = 0.05$. The results showed that KMnO_4 addition produced significant differences in voltage, power, and power density. Voltage increased from 176.057 ± 26.468 mV to 487.468 ± 92.948 mV, power increased from 14.656 ± 4.028 mW to 42.268 ± 12.270 mW, and power density increased from $4,441.208 \pm 1,220.535$ mW/m² to $12,808.617 \pm 3,718.140$ mW/m² ($p < 0.001$). In contrast, current showed no significant difference ($p = 0.1636$). Therefore, KMnO_4 significantly improved MFC electrical performance, particularly voltage, power, and power density.*

1. PENDAHULUAN

Air limbah merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang memerlukan pengelolaan dan pemantauan secara tepat karena pembuangan yang tidak terkendali dapat menimbulkan pencemaran terhadap lingkungan. Pemanfaatan teknologi dalam pengelolaan air limbah menjadi salah satu pendekatan yang dapat mendukung upaya pengendalian dampak pencemaran secara lebih efektif [1].

Air lindi merupakan limbah cair kompleks yang terbentuk melalui interaksi fisik, kimia, dan biologis dalam timbunan sampah. Limbah ini dapat mengandung bahan organik terlarut, senyawa nitrogen, garam anorganik, serta berbagai kontaminan lain sehingga berpotensi menimbulkan risiko lingkungan apabila tidak dikelola secara memadai. Namun, keberadaan bahan organik di dalam air lindi juga membuka peluang pemanfaatannya sebagai sumber energi dalam sistem bioelektrokimia [2].

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan teknologi bioelektrokimia yang memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk mengonversi energi kimia dari bahan organik menjadi energi listrik [3]. Dalam sistem ini, senyawa organik pada anoda dioksidasi oleh mikroorganisme, menghasilkan elektron yang dialirkan melalui rangkaian eksternal menuju katoda dan menghasilkan keluaran listrik. Oleh karena itu, MFC memiliki potensi untuk menggabungkan proses pengolahan limbah dengan pemulihan energi secara simultan [4].

Pemanfaatan air lindi sebagai substrat MFC telah dilaporkan dalam berbagai penelitian. You et al. menunjukkan bahwa air lindi dapat digunakan sebagai sumber bahan organik untuk menghasilkan listrik dalam konfigurasi MFC satu maupun dua ruang. Selanjutnya, terdapat bukti bahwa MFC dapat mengolah air lindi dengan karakteristik beban nitrogen dan konduktivitas yang tinggi sambil tetap menghasilkan energi listrik [5]. Kajian yang lebih baru juga menunjukkan bahwa pengembangan MFC untuk pengolahan air lindi masih memiliki prospek besar, meskipun performanya dipengaruhi oleh konfigurasi reaktor, karakteristik substrat, kondisi operasional, serta komponen elektrokimia yang digunakan [6].

Salah satu komponen yang berperan penting dalam menentukan performa MFC adalah

proses reaksi pada katoda. Pemilihan akseptor elektron dapat memengaruhi potensial katoda, resistansi internal, tegangan, serta daya yang dihasilkan oleh sistem. Kalium permanganat (KMnO_4) merupakan salah satu akseptor elektron yang telah digunakan dalam MFC karena memiliki kemampuan oksidasi dan potensial reduksi yang tinggi. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan permanganat sebagai akseptor elektron katodik dapat menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan beberapa akseptor elektron lainnya [7].

Penelitian lain juga memperlihatkan bahwa penggunaan KMnO_4 pada katoda dapat meningkatkan beberapa parameter keluaran listrik MFC, termasuk tegangan, arus, daya, dan *power density*, meskipun besarnya peningkatan dapat berbeda bergantung pada jenis substrat, konfigurasi reaktor, konsentrasi elektrolit, dan kondisi operasional. Dengan demikian, respons setiap parameter kelistrikan terhadap penambahan KMnO_4 tidak selalu identik dan perlu dievaluasi berdasarkan karakteristik sistem yang digunakan [8].

Berdasarkan *state of the art* tersebut, penelitian mengenai MFC berbasis air lindi telah berkembang dari pembuktian kelayakan penggunaan air lindi sebagai substrat menuju upaya peningkatan performa melalui optimasi konfigurasi dan komponen elektrokimia. Studi sebelumnya telah menunjukkan potensi KMnO_4 sebagai akseptor elektron katodik serta kemampuan MFC dalam mengolah air lindi sambil menghasilkan listrik. Namun, sebagian besar penelitian lebih menekankan perbandingan nilai keluaran listrik atau nilai maksimum yang diperoleh, sedangkan evaluasi mengenai apakah perbedaan setiap parameter kelistrikan antarperlakuan benar-benar signifikan secara statistik masih perlu diperjelas, khususnya pada sistem MFC berbasis air lindi yang dioperasikan secara eksperimental.

Kesenjangan tersebut menjadi dasar pentingnya penelitian ini. Peningkatan nilai tegangan, arus, daya, atau *power density* secara numerik belum secara langsung menunjukkan bahwa perubahan tersebut berasal dari perlakuan yang diberikan. Analisis statistik diperlukan untuk menentukan apakah perbedaan yang diamati antara sistem tanpa penambahan KMnO_4 dan sistem dengan

penambahan KMnO_4 merupakan perbedaan yang bermakna secara statistik. Dengan pendekatan tersebut, evaluasi kinerja tidak hanya didasarkan pada besarnya perubahan nilai keluaran listrik, tetapi juga pada kekuatan bukti statistik dari perbedaan antarperlakuan.

Kebaruan penelitian ini terletak pada fokus analisisnya terhadap signifikansi statistik masing-masing parameter kelistrikan pada MFC berbasis air lindi setelah penambahan KMnO_4 . Berbeda dari studi yang terutama melaporkan peningkatan performa berdasarkan nilai tegangan atau daya yang dihasilkan, penelitian ini membandingkan secara statistik respons tegangan, arus, daya, dan *power density* antara MFC tanpa penambahan KMnO_4 dan MFC dengan penambahan KMnO_4 selama periode pengoperasian. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi parameter yang secara konsisten menunjukkan perbedaan signifikan dan parameter yang memiliki respons berbeda terhadap perlakuan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis signifikansi pengaruh penambahan kalium permanganat terhadap kinerja kelistrikan *Microbial Fuel Cell* berbasis air lindi. Pertanyaan penelitian yang diajukan adalah: (1) apakah penambahan KMnO_4 menghasilkan perbedaan yang signifikan terhadap tegangan, arus, daya, dan *power density* MFC berbasis air lindi; dan (2) parameter kelistrikan manakah yang menunjukkan respons paling konsisten terhadap penambahan KMnO_4 . Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan evaluasi yang lebih terukur mengenai pengaruh KMnO_4 terhadap performa MFC serta mendukung pengembangan pemanfaatan air lindi sebagai substrat untuk pemulihan energi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Microbial Fuel Cell* (MFC)

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan sistem bioelektrokimia yang memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk mengubah energi kimia dari senyawa organik menjadi energi listrik [9]. Pada ruang anoda, mikroorganisme mengoksidasi substrat organik dan menghasilkan elektron serta proton. Elektron ditransfer melalui rangkaian eksternal menuju katoda, sedangkan proton berpindah melalui media pemisah menuju ruang katoda untuk terlibat dalam reaksi reduksi [10].

Perbedaan potensial antara kedua elektroda menghasilkan keluaran listrik yang dapat diukur sebagai tegangan dan arus. Mekanisme tersebut menjadikan MFC relevan untuk penelitian ini karena perubahan kondisi elektrokimia pada katoda dapat memengaruhi parameter kelistrikan sistem [11].

2.2. Air Lindi

Air lindi mengandung bahan organik yang dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme sebagai sumber substrat dalam proses bioelektrokimia [12]. Pemanfaatan air lindi pada sistem MFC memungkinkan terjadinya dua proses secara bersamaan, yaitu pengolahan limbah dan pemulihan energi dalam bentuk listrik. Namun, kinerja MFC berbasis air lindi dapat dipengaruhi oleh karakteristik substrat, konsentrasi bahan organik, konduktivitas, serta kondisi operasional sistem [13]. Oleh karena itu, air lindi dapat berperan sebagai sumber bahan organik untuk mendukung aktivitas mikroorganisme pada anoda dan proses transfer elektron dalam sistem MFC.

2.3. Kalium Permanganat (KMnO_4)

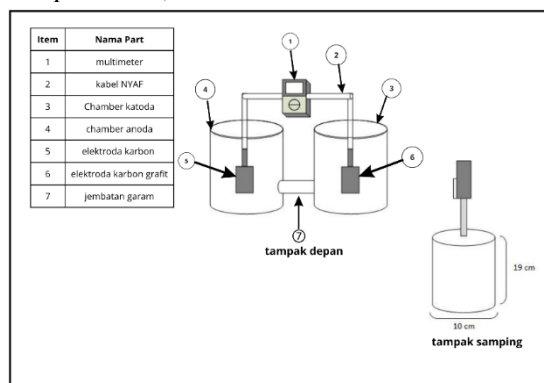
Reaksi reduksi pada katoda merupakan salah satu faktor yang menentukan kinerja elektrokimia MFC. Akseptor elektron yang memiliki kemampuan oksidasi tinggi dapat membantu menerima elektron dari rangkaian eksternal dan mendukung terbentuknya perbedaan potensial antara anoda dan katoda [14]. Kalium permanganat (KMnO_4) telah digunakan sebagai akseptor elektron pada katoda karena memiliki potensial oksidasi yang tinggi dan dapat meningkatkan proses reduksi di ruang katoda. Penggunaan KMnO_4 berpotensi meningkatkan tegangan dan daya yang dihasilkan MFC, meskipun respons setiap parameter kelistrikan dapat berbeda bergantung pada kondisi sistem dan karakteristik substrat yang digunakan [15].

3. METODE PENELITIAN

3.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan membandingkan kinerja kelistrikan dua sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC), yaitu MFC murni dan MFC dengan penambahan kalium permanganat (KMnO_4). Sistem yang digunakan berupa MFC dua kompartemen yang terdiri atas ruang anoda dan ruang katoda yang dipisahkan oleh jembatan garam sebagai media perpindahan ion. Pada

ruang anoda digunakan air lindi dari kolam penampungan TPAS Cilowong sebagai substrat organik, sedangkan KMnO_4 digunakan sebagai akseptor elektron pada ruang katoda pada perlakuan modifikasi, dapat dilihat pada gambar 1 untuk perancangan desain kompartemen;



Gambar 1. Perancangan Desain

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Pendidikan Vokasional Teknik Elektro Universitas Sultan Ageng Tirtayasa pada periode Desember 2025–Juni 2026.

3.2. Alat dan Bahan

Komponen utama sistem MFC terdiri atas wadah reaktor berbahan polypropylene transparan berukuran 19×10 cm, elektroda karbon grafit, jembatan garam, kabel konduktor, dan multimeter digital. Elektroda karbon grafit yang digunakan memiliki tinggi 10 cm, diameter 1 cm, dan luas permukaan $0,0033 \text{ m}^2$. Multimeter digital digunakan untuk mengukur tegangan dan arus listrik yang dihasilkan sistem.

Bahan yang digunakan meliputi air lindi dari kolam penampungan TPAS Cilowong sebagai substrat, akuades, NaCl , HCl , NaOH , agar-agar, dan KMnO_4 . KMnO_4 yang digunakan memiliki konsentrasi 95% dan berfungsi sebagai akseptor elektron pada ruang katoda. NaCl dan agar digunakan sebagai bahan jembatan garam, sedangkan HCl dan NaOH digunakan dalam proses aktivasi atau pembersihan elektroda.

3.3. Preparasi dan Perakitan Sistem MFC

Preparasi elektroda dilakukan melalui proses perendaman menggunakan larutan HCl selama 24 jam, kemudian elektroda dicuci menggunakan akuades dan direndam kembali dalam larutan NaOH selama 24 jam. Setelah proses tersebut selesai, elektroda direndam menggunakan akuades sebelum digunakan.

Jembatan garam dibuat dari campuran agar, akuades, dan NaCl yang dipanaskan hingga mengental kemudian dimasukkan ke dalam pipa jembatan garam. Selanjutnya, elektroda karbon grafit dipasang pada masing-masing kompartemen dan dihubungkan dengan kabel konduktor menuju multimeter. Berikut hasil perakitan kompartemen murni ada pada gambar 2 dan kompartemen modifikasi pada gambar 3;



Gambar 2. MFC Murni



Gambar 3. MFC Modifikasi

Ruang anoda kemudian diisi air lindi sebagai substrat dan sumber mikroorganisme anaerob, sedangkan ruang katoda diisi larutan elektrolit. Pada sistem perlakuan, KMnO_4 ditambahkan pada ruang katoda sebagai bahan tambahan. Sistem MFC selanjutnya digunakan untuk pengujian keluaran listrik.

3.4. Pengukuran Parameter Kelistrikan

Pengujian dilakukan pada dua perlakuan, yaitu MFC murni tanpa penambahan bahan tambahan dan MFC dengan penambahan KMnO_4 . Pengukuran kinerja kelistrikan dilakukan selama 7 hari, dengan pengamatan selama 10 jam pada setiap hari pengukuran. Parameter kelistrikan yang diamati meliputi tegangan dan arus. Selain itu, daya listrik (*power output*) dan *power density* dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus.

Daya listrik dihitung berdasarkan hubungan antara tegangan dan arus menggunakan persamaan:

$$P = V \times I$$

sedangkan power density dihitung berdasarkan daya listrik terhadap luas permukaan elektroda:

$$PD = \frac{V \times I}{A}$$

dengan (P) merupakan daya listrik, (V) merupakan tegangan, (I) merupakan arus, (PD) merupakan *power density*, dan (A) merupakan luas permukaan elektroda. Luas permukaan elektroda karbon grafit yang digunakan dalam penelitian adalah 0,0033 m².

3.5. Analisis Signifikansi Statistik

Analisis signifikansi statistik dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang bermakna antara kinerja MFC murni dan MFC dengan penambahan kalium permanganat (KMnO₄). Analisis dilakukan terhadap data hasil pengukuran selama 7 hari, dengan waktu pengukuran selama 10 jam pada setiap hari pengamatan. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan, arus, daya, dan *power density*.

Perhitungan statistik dilakukan menggunakan Python. Nilai *p-value* digunakan sebagai dasar untuk menentukan signifikansi perbedaan antara kedua perlakuan. Tingkat signifikansi yang digunakan dalam penelitian ini adalah $\alpha = 0,05$. Apabila nilai *p-value* < 0,05, maka perbedaan antara MFC murni dan MFC dengan penambahan KMnO₄ dinyatakan signifikan secara statistik. Sebaliknya, apabila nilai *p-value* ≥ 0,05, maka perbedaan yang diperoleh dinyatakan tidak signifikan.

Analisis *p-value* dilakukan pada masing-masing parameter kelistrikan untuk mengetahui respons sistem terhadap penambahan KMnO₄. Hasil analisis kemudian digunakan untuk menentukan parameter yang mengalami perubahan signifikan dan parameter yang tidak menunjukkan perbedaan signifikan antara kedua perlakuan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hari Pertama

Tabel 1. Hasil Analisis Statistik Hari ke-1

Parameter	MFC Murni	MFC + KMnO ₄	p-value	Significance
Tegangan	148.700 ± 40.417	329.000 ± 98.886	0.0023	Significant
Arus	0.070 ± 0.019	0.101 ± 0.036	0.0684	Non-significant

Parameter	MFC Murni	MFC + KMnO ₄	p-value	Significance
Suhu	28.000 ± 0.000	28.000 ± 0.000	-	Tidak diuji
Daya	10.613 ± 4.096	34.871 ± 20.648	0.0119	Significant
Power Density	3216.061 ± 1241.320	10567.000 ± 6256.856	0.0119	Significant

Pada hari pertama, sistem MFC dengan penambahan KMnO₄ menunjukkan nilai tegangan sebesar 329,000 ± 98,886 mV, lebih tinggi dibandingkan MFC murni sebesar 148,700 ± 40,417 mV. Hasil analisis menunjukkan *p-value* sebesar 0,0023, lebih kecil dari 0,05, sehingga perbedaan tegangan antara kedua perlakuan dinyatakan signifikan. Hal tersebut menunjukkan bahwa sejak awal pengoperasian, penambahan KMnO₄ telah memberikan perubahan yang bermakna terhadap tegangan yang dihasilkan sistem.

Pada parameter arus, MFC + KMnO₄ menghasilkan nilai rata-rata 0,101 ± 0,036 mA, sedangkan MFC murni sebesar 0,070 ± 0,019 mA. Meskipun secara rata-rata terjadi peningkatan, nilai *p-value* sebesar 0,0684 masih lebih besar dari 0,05. Dengan demikian, peningkatan arus pada hari pertama belum dapat dinyatakan signifikan secara statistik.

Daya menunjukkan perbedaan yang lebih jelas. Nilai daya MFC murni sebesar 10,613 ± 4,096 mW, sedangkan MFC + KMnO₄ mencapai 34,871 ± 20,648 mW dengan *p-value* 0,0119. Hasil tersebut menunjukkan adanya perbedaan signifikan. Pola yang sama terlihat pada *power density*, yaitu meningkat dari 3216,061 ± 1241,320 mW/m² menjadi 10567,000 ± 6256,856 mW/m², dengan *p-value* 0,0119.

4.2. Hari Kedua

Tabel 2. Hasil Analisis Statistik Hari ke-2

Parameter	MFC Murni	MFC + KMnO ₄	p-value	Significance
Tegangan	163.100 ± 16.374	552.487 ± 32.822	< 0.001	Significant
Arus	0.080 ± 0.005	0.073 ± 0.014	0.1297	Non-significant
Suhu	28.000 ± 0.000	28.000 ± 0.000	-	Tidak diuji
Daya	12.977 ± 1.253	40.881 ± 9.625	< 0.001	Significant
Power Density	3932.515 ± 379.806	12388.036 ± 2916.695	< 0.001	Significant

Pada hari kedua, perbedaan tegangan antara kedua perlakuan semakin besar. MFC murni menghasilkan tegangan rata-rata 163,100 ± 16,374 mV, sedangkan MFC + KMnO₄

mencapai $552,487 \pm 32,822$ mV. Nilai *p-value* $<0,001$ menunjukkan bahwa perbedaan tersebut signifikan secara statistik.

Berbeda dengan tegangan, arus justru menunjukkan nilai rata-rata yang sedikit lebih rendah pada MFC + KMnO_4 , yaitu $0,073 \pm 0,014$ mA, dibandingkan MFC murni sebesar $0,080 \pm 0,005$ mA. Nilai *p-value* sebesar 0,1297 menunjukkan bahwa perbedaan tersebut tidak signifikan.

Daya dan *power density* kembali menunjukkan perbedaan signifikan dengan *p-value* $<0,001$. Daya meningkat dari $12,977 \pm 1,253$ mW menjadi $40,881 \pm 9,625$ mW, sedangkan *power density* meningkat dari $3932,515 \pm 379,806$ mW/m² menjadi $12388,036 \pm 2916,695$ mW/m².

4.3. Hari Ketiga

Tabel 3. Hasil Analisis Statistik Hari ke-3

Parameter	MFC Murni	MFC + KMnO_4	p-value	Significance
Tegangan	$187,200 \pm 18,654$	$510,773 \pm 55,551$	$< 0,001$	Significant
Arus	$0,101 \pm 0,008$	$0,094 \pm 0,032$	0,4439	Non-significant
Suhu	$28,000 \pm 0,000$	$28,000 \pm 0,000$	-	Tidak diuji
Daya	$19,047 \pm 2,949$	$48,211 \pm 17,759$	$< 0,001$	Significant
Power Density	$5771,939 \pm 893,487$	$14609,506 \pm 5381,538$	$< 0,001$	Significant

Pada hari ketiga, tegangan MFC + KMnO_4 tetap lebih tinggi dibandingkan MFC murni, yaitu masing-masing $510,773 \pm 55,551$ mV dan $187,200 \pm 18,654$ mV. Perbedaan tersebut signifikan dengan *p-value* $<0,001$. Daya dan *power density* juga menunjukkan perbedaan signifikan dengan *p-value* $<0,001$.

Sementara itu, arus menunjukkan nilai $0,094 \pm 0,032$ mA pada MFC + KMnO_4 dan $0,101 \pm 0,008$ mA pada MFC murni. Nilai *p-value* 0,4439 menunjukkan bahwa perbedaan tersebut tidak signifikan. Hasil ini semakin memperlihatkan bahwa respons arus tidak mengikuti pola peningkatan tegangan, daya, dan *power density*.

4.4. Hari Keempat

Tabel 4. Hasil Analisis Statistik Hari ke-4

Parameter	MFC Murni	MFC + KMnO_4	p-value	Significance
Tegangan	$181,500 \pm 28,277$	$512,330 \pm 57,756$	$< 0,001$	Significant
Arus	$0,098 \pm 0,014$	$0,086 \pm 0,009$	0,0529	Non-significant
Suhu	$28,000 \pm 0,000$	$28,000 \pm 0,000$	-	Tidak diuji

Parameter	MFC Murni	MFC + KMnO_4	p-value	Significance
Daya	$17,867 \pm 4,043$	$43,980 \pm 6,280$	$< 0,001$	Significant
Power Density	$5414,242 \pm 1225,221$	$13327,308 \pm 1903,064$	$< 0,001$	Significant

Pada hari keempat, tegangan MFC + KMnO_4 sebesar $512,330 \pm 57,756$ mV, sedangkan MFC murni sebesar $181,500 \pm 28,277$ mV. Perbedaan tersebut signifikan dengan *p-value* $<0,001$. Daya dan *power density* juga tetap menunjukkan perbedaan signifikan.

Arus kembali tidak menunjukkan perbedaan signifikan dengan *p-value* 0,0529. Nilai ini memang mendekati batas signifikansi 0,05, tetapi masih berada di atas batas tersebut sehingga secara statistik tetap dikategorikan tidak signifikan.

4.5. Hari Kelima

Tabel 5. Hasil Analisis Statistik Hari ke-5

Parameter	MFC Murni	MFC + KMnO_4	p-value	Significance
Tegangan	$180,900 \pm 20,862$	$456,103 \pm 39,380$	$< 0,001$	Significant
Arus	$0,087 \pm 0,012$	$0,098 \pm 0,006$	0,0746	Non-significant
Suhu	$28,000 \pm 0,000$	$28,000 \pm 0,000$	-	Tidak diuji
Daya	$15,781 \pm 3,473$	$44,744 \pm 6,426$	$< 0,001$	Significant
Power Density	$4782,212 \pm 1052,464$	$13558,920 \pm 1947,363$	$< 0,001$	Significant

Pada hari kelima, tegangan MFC + KMnO_4 mencapai $456,103 \pm 39,380$ mV, sedangkan MFC murni sebesar $180,900 \pm 20,862$ mV. Perbedaan tersebut signifikan dengan *p-value* $<0,001$. Daya juga meningkat dari $15,781 \pm 3,473$ mW menjadi $44,744 \pm 6,426$ mW, sedangkan *power density* meningkat dari $4782,212 \pm 1052,464$ mW/m² menjadi $13558,920 \pm 1947,363$ mW/m². Kedua parameter tersebut menunjukkan *p-value* $<0,001$. Arus meningkat dari $0,087 \pm 0,012$ mA menjadi $0,098 \pm 0,006$ mA, tetapi nilai *p-value* 0,0746 menunjukkan bahwa perbedaan tersebut belum signifikan.

4.6. Hari Keenam

Tabel 6. Hasil Analisis Statistik Hari ke-6

Parameter	MFC Murni	MFC + KMnO_4	p-value	Significance
Tegangan	$195,300 \pm 14,885$	$493,657 \pm 51,033$	$< 0,001$	Significant
Arus	$0,076 \pm 0,010$	$0,080 \pm 0,004$	0,4109	Non-significant
Suhu	$28,000 \pm 0,000$	$28,000 \pm 0,000$	-	Tidak diuji

Parameter	MFC Murni	MFC + KMnO ₄	p-value	Significance
Daya	14.832 ± 1.340	39.287 ± 3.926	< 0.001	Significant
Power Density	4494.394 ± 406.082	11905.03 ± 5 ± 1189.585	< 0.001	Significant

Pada hari keenam, tegangan MFC + KMnO₄ tetap menunjukkan nilai yang jauh lebih tinggi dibandingkan MFC murni, yaitu 493,657 ± 51,033 mV dan 195,300 ± 14,885 mV. Perbedaan tegangan, daya, dan *power density* tetap signifikan dengan *p-value* <0,001. Arus menunjukkan nilai rata-rata 0,080 ± 0,004 mA pada MFC + KMnO₄ dan 0,076 ± 0,010 mA pada MFC murni. Namun, *p-value* 0,4109 menunjukkan bahwa perbedaan tersebut tidak signifikan.

4.7. Hari Ketujuh

Tabel 7. Hasil Analisis Statistik Hari ke-7

Parameter	MFC Murni	MFC + KMnO ₄	p-value	Significance
Tegangan	175.700 ± 6.183	557.929 ± 65.268	< 0.001	Significant
Arus	0.065 ± 0.004	0.078 ± 0.011	0.0114	Significant
Suhu	28.000 ± 0.000	28.000 ± 0.000	-	Tidak diuji
Daya	11.474 ± 0.510	43.905 ± 9.930	< 0.001	Significant
Power Density	3477.091 ± 154.423	13304.511 ± 3009.136	< 0.001	Significant

Pada hari ketujuh, seluruh parameter menunjukkan perbedaan signifikan antara kedua perlakuan. Tegangan MFC + KMnO₄ mencapai 557,929 ± 65,268 mV, sedangkan MFC murni sebesar 175,700 ± 6,183 mV, dengan *p-value* <0,001. Daya dan *power density* juga menunjukkan perbedaan signifikan dengan *p-value* <0,001.

Berbeda dengan hari-hari sebelumnya, arus pada hari ketujuh juga menunjukkan perbedaan signifikan. Nilai arus meningkat dari 0,065 ± 0,004 mA pada MFC murni menjadi 0,078 ± 0,011 mA pada MFC + KMnO₄, dengan *p-value* 0,0114. Hasil ini menunjukkan bahwa pada akhir periode pengamatan, pengaruh perlakuan mulai terlihat secara statistik pada seluruh parameter kelistrikan yang dianalisis.

4.8. Sintesis Hasil

Hasil pengujian selama tujuh hari menunjukkan adanya perbedaan kinerja kelistrikan antara *Microbial Fuel Cell* (MFC) tanpa perlakuan tambahan dan MFC dengan penambahan kalium permanganat (KMnO₄).

Pengukuran dilakukan selama 10 jam pada setiap hari pengamatan dengan 10 kali pengukuran pada masing-masing hari. Data yang diperoleh selanjutnya diolah menggunakan *Python* untuk menentukan nilai rata-rata, simpangan baku, dan *p-value*. Analisis *p-value* dilakukan dengan taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$) untuk mengetahui apakah perbedaan antara kedua perlakuan menunjukkan perbedaan yang signifikan secara statistik.

Pada parameter tegangan, sistem MFC dengan penambahan KMnO₄ menunjukkan nilai yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan MFC tanpa penambahan KMnO₄ selama periode pengamatan. Pada hari pertama, tegangan rata-rata MFC tanpa penambahan KMnO₄ sebesar 148,700 ± 40,417 mV, sedangkan perlakuan dengan KMnO₄ mencapai 329,000 ± 98,886 mV. Perbedaan tersebut menghasilkan *p-value* sebesar 0,0023 sehingga dinyatakan signifikan. Perbedaan yang lebih besar terlihat pada hari kedua, ketika tegangan MFC tanpa penambahan KMnO₄ sebesar 163,100 ± 16,374 mV, sementara MFC dengan KMnO₄ mencapai 552,487 ± 32,822 mV dengan *p-value* <0,001. Pola tersebut tetap berlangsung hingga hari ketujuh, dengan tegangan masing-masing sebesar 175,700 ± 6,183 mV dan 557,929 ± 65,268 mV serta *p-value* <0,001. Hasil ini menunjukkan bahwa keberadaan KMnO₄ berkaitan dengan perbedaan tegangan yang konsisten selama tujuh hari pengamatan.

Berbeda dengan tegangan, parameter arus menunjukkan pola yang lebih berfluktuasi. Pada hari pertama, nilai arus rata-rata MFC tanpa penambahan KMnO₄ sebesar 0,070 ± 0,019 mA, sedangkan perlakuan dengan KMnO₄ sebesar 0,101 ± 0,036 mA. Meskipun terdapat peningkatan nilai rata-rata, perbedaan tersebut belum signifikan karena menghasilkan *p-value* sebesar 0,0684. Kondisi serupa terjadi pada hari kedua hingga keenam dengan nilai *p-value* masing-masing sebesar 0,1297; 0,4439; 0,0529; 0,0746; dan 0,4109. Seluruh nilai tersebut lebih besar dari 0,05 sehingga belum terdapat bukti statistik yang cukup untuk menyatakan adanya perbedaan arus antara kedua perlakuan. Pada hari ketujuh, nilai arus MFC tanpa penambahan KMnO₄ sebesar 0,065 ± 0,004 mA, sedangkan MFC dengan KMnO₄ sebesar 0,078 ± 0,011 mA. Nilai *p-value*

sebesar 0,0114 menunjukkan bahwa perbedaan arus pada hari tersebut telah mencapai tingkat signifikansi statistik. Data pengukuran per jam juga memperlihatkan adanya fluktuasi arus selama periode pengujian, yang menunjukkan bahwa keluaran arus tidak bersifat konstan sepanjang waktu pengamatan.

Pada parameter daya, sistem dengan KMnO_4 juga menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan MFC tanpa penambahan KMnO_4 pada seluruh periode pengujian. Pada hari pertama, daya rata-rata meningkat dari $10,613 \pm 4,096$ mW menjadi $34,871 \pm 20,648$ mW dan menghasilkan p -value sebesar 0,0119. Pada hari kedua, nilai daya masing-masing sebesar $12,977 \pm 1,253$ mW dan $40,881 \pm 9,625$ mW dengan p -value $< 0,001$. Selanjutnya, pada hari ketiga nilai daya mencapai $19,047 \pm 2,949$ mW pada MFC tanpa penambahan dan $48,211 \pm 17,759$ mW pada MFC dengan KMnO_4 . Meskipun nilai daya mengalami perubahan pada hari-hari berikutnya, perbedaan kedua perlakuan tetap signifikan hingga hari ketujuh. Pada hari ketujuh, daya MFC tanpa penambahan KMnO_4 sebesar $11,474 \pm 0,510$ mW, sedangkan perlakuan dengan KMnO_4 sebesar $43,905 \pm 9,930$ mW dengan p -value $< 0,001$.

Kecenderungan yang sama ditemukan pada *power density*. Pada hari pertama, *power density* MFC tanpa penambahan KMnO_4 sebesar $3216,061 \pm 1241,320$ mW/m², sedangkan sistem dengan KMnO_4 mencapai $10567,000 \pm 6256,856$ mW/m². Perbedaan tersebut signifikan dengan p -value 0,0119. Nilai *power density* kemudian mencapai nilai tertinggi pada hari ketiga, yaitu $5771,939 \pm 893,487$ mW/m² pada MFC tanpa penambahan dan $14609,506 \pm 5381,538$ mW/m² pada MFC dengan KMnO_4 . Setelah hari ketiga, nilai *power density* pada kedua perlakuan mengalami perubahan, tetapi sistem dengan KMnO_4 tetap mempertahankan nilai yang lebih tinggi. Pada hari ketujuh, *power density* MFC tanpa penambahan KMnO_4 sebesar $3477,091 \pm 154,423$ mW/m², sedangkan sistem dengan KMnO_4 sebesar $13304,511 \pm 3009,136$ mW/m². Perbedaan tersebut tetap signifikan dengan p -value $< 0,001$.

Perubahan nilai daya dan *power density* selama periode pengamatan menunjukkan adanya dinamika kinerja sistem MFC. Nilai kedua parameter pada MFC tanpa penambahan

KMnO_4 cenderung mencapai nilai yang lebih tinggi pada hari ketiga, kemudian mengalami penurunan hingga hari ketujuh. Dalam penelitian ini, perubahan tersebut dapat dikaitkan dengan kondisi substrat dan aktivitas mikroorganisme selama pengoperasian MFC. Berkurangnya ketersediaan senyawa organik yang dapat dimanfaatkan mikroorganisme berpotensi memengaruhi proses pembentukan elektron sehingga keluaran listrik dapat mengalami penurunan selama waktu operasi. Namun demikian, interpretasi tersebut perlu dipandang sebagai kemungkinan mekanisme karena penelitian ini tidak secara langsung mengukur perubahan konsentrasi substrat atau aktivitas mikroba selama tujuh hari.

Secara keseluruhan, dari 28 perbandingan yang terdiri atas empat parameter pada tujuh hari pengamatan, sebanyak 21 perbandingan menunjukkan perbedaan signifikan, sedangkan tujuh perbandingan lainnya tidak signifikan. Seluruh hasil yang tidak signifikan berasal dari parameter arus pada hari pertama hingga keenam. Sebaliknya, tegangan, daya, dan *power density* menunjukkan perbedaan signifikan pada seluruh hari pengamatan. Pada hari ketujuh, seluruh parameter yang dianalisis telah menunjukkan perbedaan signifikan antara kedua perlakuan. Pola tersebut menunjukkan bahwa respons MFC terhadap penambahan KMnO_4 tidak berlangsung secara seragam pada seluruh parameter kelistrikan. Tegangan, daya, dan *power density* memberikan respons statistik yang lebih konsisten, sedangkan arus menunjukkan variasi yang lebih besar dan baru mencapai perbedaan signifikan pada akhir periode pengujian.

Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan KMnO_4 berkaitan dengan peningkatan keluaran listrik MFC yang tercermin dari nilai tegangan, daya, dan *power density* yang lebih tinggi serta perbedaan yang signifikan secara statistik. Secara elektrokimia, KMnO_4 dapat berperan sebagai akseptor elektron pada kompartemen katoda sehingga mendukung proses penerimaan elektron pada sisi katodik. Peran akseptor elektron merupakan salah satu faktor yang memengaruhi performa katoda dan keluaran listrik MFC. Namun, berdasarkan data penelitian ini, mekanisme elektrokimia tersebut tidak diukur secara langsung sehingga hasil penelitian lebih tepat digunakan untuk menunjukkan adanya

hubungan antara penggunaan KMnO_4 dan perubahan kinerja kelistrikan, bukan untuk memastikan satu mekanisme penyebab tertentu.

Dengan demikian, analisis statistik memberikan informasi yang lebih komprehensif dibandingkan hanya membandingkan nilai rata-rata. Nilai rata-rata menunjukkan kecenderungan peningkatan kinerja pada sistem dengan KMnO_4 , sedangkan *p-value* memberikan dasar untuk menentukan apakah perbedaan tersebut signifikan secara statistik. Konsistensi signifikansi pada tegangan, daya, dan *power density* selama tujuh hari menjadi temuan utama penelitian, sementara munculnya signifikansi arus pada hari ketujuh menunjukkan bahwa setiap parameter memiliki pola respons yang berbeda terhadap perlakuan KMnO_4 .

5. KESIMPULAN

- Air lindi TPAS Cilowong berpotensi digunakan sebagai substrat pada sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC) karena mampu menghasilkan energi listrik yang ditunjukkan melalui parameter tegangan, arus, daya, dan *power density*. Penambahan KMnO_4 pada kompartemen katoda meningkatkan kinerja listrik MFC, dengan rata-rata tegangan meningkat dari $176,057 \pm 26,468$ mV menjadi $487,468 \pm 92,948$ mV, daya dari $14,656 \pm 4,028$ mW menjadi $42,268 \pm 12,270$ mW, dan *power density* dari $4441,208 \pm 1220,535$ mW/m² menjadi $12808,617 \pm 3718,140$ mW/m². Ketiga parameter tersebut menunjukkan perbedaan signifikan dengan *p-value* < 0,001.
- Pengaruh KMnO_4 terhadap arus belum menunjukkan perbedaan yang signifikan secara keseluruhan. Rata-rata arus meningkat dari $0,083 \pm 0,017$ mA pada MFC tanpa KMnO_4 menjadi $0,087 \pm 0,021$ mA pada MFC dengan KMnO_4 , tetapi menghasilkan *p-value* 0,1636 (> 0,05). Dengan demikian, keunggulan penelitian ini terletak pada keberhasilan menunjukkan peningkatan dan perbedaan statistik pada tegangan, daya, dan *power density*, sedangkan keterbatasannya adalah belum dilakukan karakterisasi air lindi secara menyeluruh serta optimasi konsentrasi KMnO_4 , elektroda, membran atau jembatan garam, dan konfigurasi reaktor.

- Pengembangan penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada optimasi dan peningkatan kestabilan sistem MFC. Penelitian berikutnya dapat melakukan karakterisasi air lindi melalui parameter COD, BOD, TSS, pH, dan konduktivitas, serta menguji variasi konsentrasi KMnO_4 , jenis dan luas elektroda, membran atau jembatan garam, dan konfigurasi reaktor. Pengamatan dengan durasi yang lebih panjang dan penggunaan data logger juga diperlukan untuk memperoleh data yang lebih kontinu, sebelum sistem dikembangkan menuju energy harvesting dan penyimpanan energi menggunakan superkapasitor atau baterai isi ulang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Bapak Endi Permata, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing I dan Bapak Bagus Dwicahyono, S.ST., M.Pd., selaku dosen pembimbing II atas bimbingan, arahan, dan dukungan selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini. Terima kasih juga disampaikan kepada Jurusan Pendidikan Vokasional Teknik Elektro (PVTE) Universitas Sultan Ageng Tirtayasa atas dukungan akademik selama pelaksanaan penelitian. Penulis turut menyampaikan apresiasi kepada Yayasan Karya Salemba Empat (KSE) dan Keluarga Besar Paguyuban KSE Untirta atas dukungan beasiswa yang diberikan selama masa studi. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dikril dan Ikwan atas kebersamaan, dukungan, dan pengalaman berharga selama menjalani proses penelitian bersama.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. A. Sukarno, S. Hidayat, and A. M. Putri, "SISTEM MONITORING KUALITAS AIR LIMBAH RUMAH TANGGA BERBASIS IOT," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i1.5938.
- [2] P. Srivastava, U. Saxena, and P. Shukla, "Landfill Leachate: Chemical Composition and Treatment Strategies," *IOSR Journal of Biotechnology and Biochemistry (IOSR-JBB)*, vol. 11, pp. 17–23, 2025, doi: 10.9790/264X-1101011723.
- [3] R. Ojha, J. Dash, S. S. Satpathy, P. C. Ojha, and D. Pradhan, "A brief review on factors affecting the performance of microbial fuel

- cell and integration of artificial intelligence,” *Discover Sustainability*, vol. 6, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01619-6.
- [4] F. A. Saputro, M. R. Maulana, I. Risnawati, and Kurniawati Heny, “Teknologi Sediment Microbial Fuel Cell Sebagai Energi Alternatif Yang Berkelanjutan,” *Biology Education Sciene & Technology*, 2024.
- [5] D. Pant, G. Van Bogaert, L. Diels, and K. Vanbroekhoven, “A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 6, pp. 1533–1543, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.10.017.
- [6] 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, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.109.
- [7] A. Naha, R. Debroy, D. Sharma, M. P. Shah, and S. Nath, “Microbial fuel cell: A state-of-the-art and revolutionizing technology for efficient energy recovery,” *Cleaner and Circular Bioeconomy*, vol. 5, p. 100050, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.clcb.2023.100050.
- [8] J. E. Álvarez-Ley, R. I. Méndez-Novelo, G. Giacomán-Vallejos, L. A. Paniagua Solar, and L. San-Pedro, “Microbial fuel cells for power generation and wastewater treatment: a review of components, performance and sustainability,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 137, pp. 429–447, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.05.140.
- [9] R. Januarita, A. Azizah, A. Ulfa, H. Syahidah, and G. Samudro, “MFCS 2 IN 1 : Microbial Fuel Cells Pengolah Air Limbahdan Penghasil Listrik (Alternatif : Limbah Isi Rumen Sapi dengan Pengaruh Variasi COD dan PH),” *Artikel Ilmiah Universitas Diponegoro*.
- [10] E. Satria Zulfikar, M. Tamjidillah, M. Nizar Ramadhan, P. Studi Teknik Mesin, A. Yani Km, and K. Selatan, “PRODUKTIVITAS LISTRIK MICROBIAL FUEL CELL PADA SUBSTRAT LIMBAH AIR REBUSAN MIE INSTAN,” *ROTARY*, vol. 3, 2021, [Online]. Available: <https://ppjp.ulm.ac.id/journals/index.php/rot>
- [11] I. Arliyani, M. T. Noori, M. I. Ammarullah, B. V. Tangahu, S. Mangkoedihardjo, and B. Min, “Constructed wetlands combined with microbial fuel cells (CW-MFCs) as a sustainable technology for leachate treatment and power generation,” Oct. 11, 2024, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/d4ra04658g.
- [12] O. : Nusa, I. Said, D. Dinda, R. Krishumartani, H. Pusat, and T. Lingkungan, “PENGOLAHAN AIR LINDI DENGAN PROSES BIOFILTER ANAEROB-AEROB DAN DENITRIKASI,” 2015.
- [13] A. Dimas, T. Istirokhatun, and S. Praharyawan, “PEMANFAATAN AIR LINDI TPA JATIBARANG SEBAGAI MEDIA ALTERNATIF KULTIVASI MIKROALGA UNTUK PEROLEHAN LIPID,” *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 6, no. 1, 2017.
- [14] M. Hijir Al Gazali, A. Zaeni, P. Endang Susilowati, and R. Efendi, “Potensi Air Lindi dari TPA Puuwatu sebagai Sumber Energi Alternatif Berbasis Teknologi Microbial Fuel Cell,” *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 9, no. 2, 2023.
- [15] K. A. Dian, B. Zaman, and Purwono, “PEMANFAATAN SISTEM MICROBIAL FUEL CELL (MFC) SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK ALTERNATIF PADA PENGOLAHAN COD DALAM LINDI MENGGUNAKAN TUMBUHAN SENTE (*Alocasia macrorrhiza*),” *Jurnal Teknik Lingkungan*, 2017.