TELKA: Jurnal Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi, dan Kontrol
Vol. 12, No. 2, July 2026, pp. 126-137
ISSN (e): 2540-9123 ISSN (p): 2502-1982
DOI: https://doi.org/10.15575/telka.v12n2.126-137

Pengaruh Jenis dan Luas Elektroda terhadap Bioelektrisitas Microbial Fuell Cell Limbah Kulit Kakao

Fitriana[1*], Muhammad A'an Auliq[2], Farizal Candra Ardiyanto[3], Dua Rizky Dharma Putra[4]
[1,2,3,4]Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Jalan Karimata No. 49 Jember, Telp. (0331) 336728, Fax. 337957
fitriana@unmuhjember.ac.id[1*], aan.auliq@unmuhjember.ac.id[2], sandaltuap123@gmail.com[3], rizkydharma12@gmail.com[4]

Article Info

Article history:
Received: 14 Juli 2025
Revised: 05 Oktober 2025
Accepted: 15 April 2026
Published: Juli 2026

Kata Kunci:
Bioelektrisitas;
Bahan Elektroda;
Limbah Kulit Kakao;
Luas Elektroda;
Microbial Fuell Cell.

ABSTRAK

Microbial Fuel Cell (MFC) dengan subtrat dari limbah kulit kakao merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi sebagai sumber energi listrik. Namun, penelitian menunjukkan bahwa bioelektrisitas dari MFC limbah kulit kakao masih relatif kecil. Oleh karena itu, penelitian ini akan memvariasikan bahan dan luas elektroda anoda serta katoda untuk meningkatkan bioelektrisitas MFC limbah kulit kakao. Pengujian bioelektrisitas dilakukan dengan cara mengukur tegangan, arus, dan rapat daya yang dihasilkan MFC limbah kulit kakao. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi anoda dan katoda seng (Zn) menunjukkan performa terbaik, menghasilkan daya yang paling stabil dan tinggi selama periode pengujian. Selain itu, elektroda dengan luas yang lebih besar cenderung menghasilkan arus dan tegangan yang lebih tinggi, mengindikasikan peningkatan efisiensi konversi energi.

Corresponding Author:
Fitriana,
Universitas Muhammadiyah Jember
fitriana@unmuhjember.ac.id.

1. PENDAHULUAN

Jumlah penduduk yang terus meningkat menyebabkan kebutuhan energi listrik terus mengalami peningkatan. Hal ini menyebabkan semakin menipisnya cadangan sumber energi dari fosil yang menjadi sumber energi listrik utama di Indonesia saat ini sehingga dapat memicu terjadinya krisis energi [1]. Penggunaan sumber energi dari fosil ini juga memicu terjadinya pemanasan global [2], [3]. Oleh karena itu, untuk saat ini energi terbarukan telah menjadi fokus utama dalam menghadapi tantangan global terkait keberlanjutan dan kebutuhan akan sumber energi yang ramah lingkungan. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi sebagai sumber energi listrik yaitu *Microbial Fuel Cell* (MFC).

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan teknologi yang menjanjikan dan banyak dikembangkan dalam menghasilkan energi listrik melalui proses metabolisme dari bakteri atau mikroorganisme [4]. Salah satu jenis MFC yang pada umumnya sering digunakan yaitu *Double chamber* MFC. *Double chamber* MFC memiliki dua ruang yaitu ruang anoda dan ruang katoda yang dihubungkan oleh *proton exchange membrane* (PEM) atau jembatan garam [5], [6]. Ruang anoda berisi bakteri, subtrat, dan elektroda anoda. Pada ruang anoda ini mikroorganisme akan

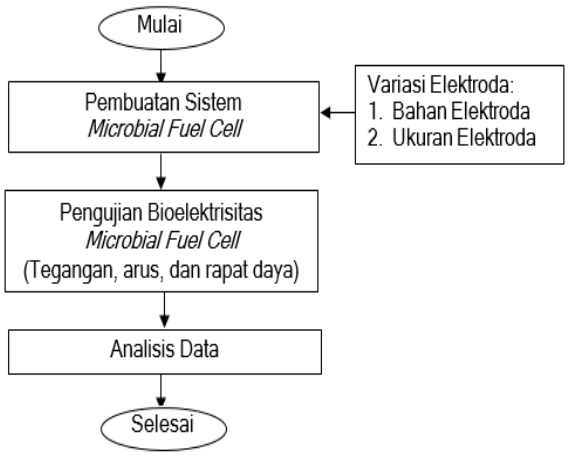
melakukan aktivitas metabolisme dengan memanfaatkan subtrat sebagai sumber energi mikroorganisme tersebut. Proses metabolisme ini menghasilkan elektron [7], [8]. Elektron yang dihasilkan selanjutnya akan mengalir dari elektroda anoda (kutub negatif) ke elektroda katoda (kutub positif) sehingga muncul arus listrik. Pada ruang katoda MFC terdapat elektroda katoda dan larutan elektrolit. Larutan elektrolit ini berfungsi sebagai mediator elektron [9]. Mikroorganisme pada *Microbial Fuel Cell* (MFC) dalam menghasilkan arus listrik memanfaatkan subtrat sebagai sumber energi untuk aktivitas metabolisme. Salah satu bahan organik yang berpotensi untuk dapat dimanfaatkan sebagai subtrat pada MFC adalah limbah kulit kakao. Hasil penelitian Fitriana, dkk menunjukkan bahwa dalam pengamatan yang dilakukan selama enam hari, tegangan, arus listrik, dan rapat daya optimum yang dihasilkan oleh MFC dari limbah kulit kakao masih sangat kecil yaitu secara berturut-turut adalah 36,0 mV, 0,19 mA, dan 456 mW/m^2 [10].

Salah satu bagian utama dari *Double chamber* MFC adalah Elektroda. Elektroda dalam *Microbial Fuel Cell* (MFC) memiliki peran kunci dalam memfasilitasi proses konversi energi kimia yang dihasilkan oleh aktivitas mikroorganisme menjadi energi listrik. Elektroda pada MFC umumnya berupa pelat yang berfungsi sebagai kutub masuk dan keluarnya aliran listrik pada MFC. Elektroda tersebut terdiri atas elektroda anoda yang merupakan kutub negatif dan elektroda katoda yang merupakan kutub positif [11]. Beberapa penelitian terdahulu telah mengeksplorasi pengaruh karakteristik elektroda terhadap bioelektrisitas MFC. Karakteristik tersebut meliputi jarak elektroda [12], [13], variasi waktu inkubasi [14], bahan elektroda [15], dan luas permukaan elektroda [16]. Hasil penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik elektroda tersebut perpengaruh dalam meningkatkan produksi bioelektrisitas MFC. Namun dari penelitian-penelitian tersebut belum terdapat penelitian yang melakukan pengamatan terhadap pengaruh bahan dan luas elektroda pada *Microbial Fuell Cell* yang subtratnya terbuat dari bahan limbah kulit kakao sehingga hal ini menjadi keterbaruan dari penelitian yang diajukan kali ini.

Pada saat ini, perhatian terhadap pengaruh jenis dan luas elektroda dalam MFC terhadap produksi bioelektrisitas masih belum tergali sepenuhnya. Padahal, elektroda memiliki peran penting dalam mengkatalisis reaksi redoks dan memfasilitasi transfer elektron dari mikroorganisme ke sirkuit eksternal. Berdasarkan hal tersebut maka pada penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap pengaruh bahan dan luas elektroda terhadap bioelektrisitas yang dihasilkan oleh *Microbial Fuell Cell* limbah kulit kakao yang meliputi tegangan, arus, dan rapat daya.

2. METODE

Penelitian yang dilakukan merupakan penelitian eksperimental dengan langkah-langkah seperti yang ditunjukkan diagram alir pada Gambar 1 berikut:



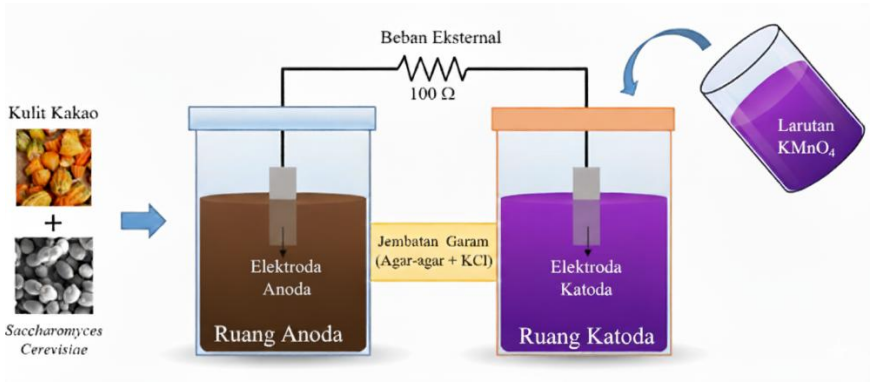
Gambar 1. Diagram alir penelitian

Penelitian diawali dengan tahap pembuatan sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC). Pada tahap ini, dilakukan perancangan dan perakitan MFC yang berfungsi untuk mengubah energi kimia dari bahan organik menjadi energi listrik melalui aktivitas mikroorganisme. Dalam proses ini, dilakukan variasi pada elektroda, baik dari segi bahan elektroda maupun ukuran elektroda, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja sistem MFC. Tahap berikutnya adalah pengujian bioelektrisitas sistem MFC Selanjutnya, dilakukan pengujian bioelektrisitas dengan mengukur tegangan, arus, dan rapat daya yang dihasilkan pada setiap variasi elektroda. Data hasil pengujian kemudian dikumpulkan untuk dianalisis.

2.1. Desain Sistem Microbial Fuell Cell (MFC)

Prototipe *Microbial Fuell Cell* dalam penelitian ini terdiri atas dua yaitu ruang anoda dan ruang katoda yang dihubungkan dengan jembatan jembatan garam. Jembatan garam ini terbuat dari campuran antara air, agar-agar, dan KCL yang kemudian dicetak pada pipa plastik. Pada ruang anoda terdapat elektroda anoda dan larutan yang berisi bakteri *Saccharomyces Cerevisiae*, limbah kulit kakao, pepton, amonium sulfat [$(NH_4)_2SO_4$], dan potassium dihidrogen fosfat [KH_2PO_4]. Sedangkan pada ruang katoda terdapat elektroda katoda dan larutan yang terbuat dari campuran air dengan kalium permanganat ($KMnO_4$).

Elektroda anoda dan katoda dihubungkan dengan hambatan eksternal sebesar 100Ω. Pada penelitian ini dilakukan variasi bahan dan luas elektroda anoda maupun katoda. Bahan elektroda yang akan digunakan yaitu tembaga (Cu), carbon (C), seng (Zn), besi (Fe), dan timbal (Pb). Sedangkan luas elektroda yang digunakan yaitu 12 cm^2, 20 cm^2, dan 28 cm^2. Desain prototipe MFC yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini:



Gambar 2. Desain prototipe *microbial fuell cell* limbah kulit kakao

2.2. Pengujian Microbial Fuell Cell (MFC)

Pengujian bioelektrisitas dilakukan dengan mengukur arus, tegangan, dan rapat daya yang dihasilkan oleh *microbial fuell cell* untuk masing-masing variasi bahan dan luas elektroda. Pada penelitian ini, pengukuran tegangan dilakukan menggunakan multimeter digital sedangkan pengukuran arus dilakukan menggunakan multimeter analog. Berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus tersebut kemudian dihitung rapat daya menggunakan persamaan:

$$P = \frac{V \cdot I}{A} \quad (1)$$

Keterangan:
P = rapat daya
V = tegangan
I = arus
A = luas elektroda

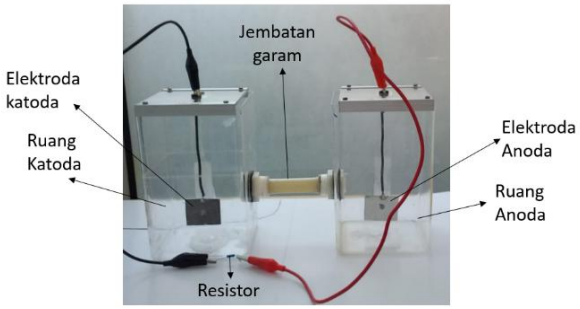
2.3. Analisis Data

Berdasarkan data hasil pengujian bioelektrisitas *microbial fuel cell* yang meliputi tegangan, arus, dan rapat daya untuk setiap variasi bahan dan luas elektroda selanjutnya dilakukan analisis untuk mengetahui bahan dan elektroda terbaik agar didapatkan nilai bioelektristas yang optimum. Data-data hasil pengujian tersebut disusun dalam bentuk tabel dan juga grafik untuk memudahkan dalam proses analisis.

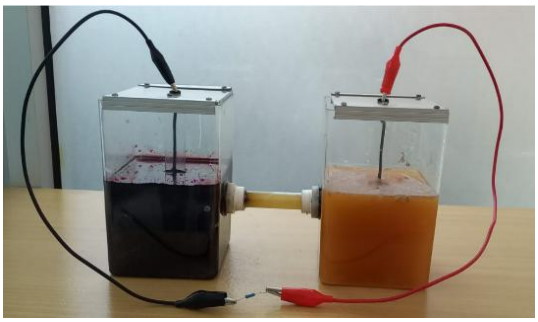
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perancangan Reaktor MFC

Gambar 3 dan Gambar 4 berikut menunjukkan hasil perancangan reaktor MFC yang dihasilkan pada penelitian ini. Reaktor MFC ini tergolong ke dalam *double chamber* MFC yang terdiri atas dua ruang yaitu ruang anoda dan ruang katoda. Kedua ruang tesebut di pisahkan oleh jembatan garam. Pada ruang anoda dan katoda masing-masing terdapat elektroda yang pada penelitian ini akan divariasikan bahan dan luasnya. Elektroda yang terdapat pada ruang anoda dan katoda dihubungkan dengan resisitor 100Ω.



Gambar 3. Hasil perancangan reaktro *microbial fuell cell* limbah kulit kakao



Gambar 4. Reaktor *microbial fuell cell* limbah kulit kakao yang telah terisi larutan

3.2 Hasil Pengujian Pengaruh Bahan Elektroda

Tujuan pengujian pengaruh bahan elektroda ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi bahan pada anoda dan katoda terhadap tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan oleh MFC dengan substrat limbah kulit kakao selama periode waktu tertentu. Pengujian dilakukan melalui pengukuran tegangan dan arus yang dihasilkan oleh MFC setiap satu hari sekali selama lima hari untuk setiap variasi anoda dan katoda dengan menggunakan multimeter. Hasil pengukuran tegangan dan arus tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung daya yang dihasilkan oleh MFC.

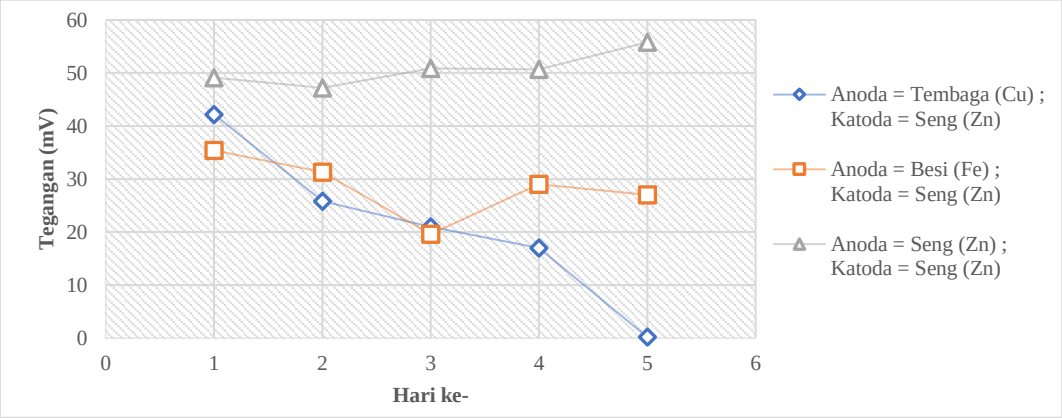
3.3 Pengujian Tegangan

Pengujian pertama yang dilakukan yaitu pengujian tegangan. Pengujian tegangan ini dilakukan dengan mengukur tegangan yang dihasilkan oleh MCF menggunakan multimeter.

Pengukuran dilakukan setiap satu hari sekali selama lima hari untuk setiap variasi anoda dan katoda. Hasil pengukuran tegangan yang dihasilkan oleh MFC dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 5 berikut:

Tabel 1. Hasil pengukuran tegangan untuk variasi bahan elektroda

Hari ke-	Tegangan (mV)		
	Anoda = Tembaga (Cu) ; Katoda = Seng (Zn)	Anoda = Besi (Fe) ; Katoda = Seng (Zn)	Anoda = Seng (Zn) ; Katoda = Seng (Zn)
1	42,2	35,4	49,1
2	25,8	31,3	47,2
3	21	19,6	50,9
4	17	29	50,7
5	0,2	27	55,8



Gambar 5. Perbandingan tegangan untuk setiap variasi bahan elektroda

Hasil pengujian pengaruh bahan elektroda selama lima hari menunjukkan variasi tegangan yang signifikan antara kombinasi anoda dan katoda yang berbeda. Pada hari pertama, kombinasi anoda tembaga (Cu) dan katoda seng (Zn) menghasilkan tegangan sebesar 42,2 mV, sementara kombinasi anoda besi (Fe) dan katoda seng menghasilkan 35,4 mV. Kombinasi anoda seng (Zn) dengan katoda seng menghasilkan tegangan tertinggi sebesar 49,1 mV. Seiring berjalannya waktu, kombinasi anoda tembaga dan katoda seng mengalami penurunan tegangan yang drastis, dari 42,2 mV pada hari pertama menjadi hanya 0,2 mV pada hari kelima. Ini menunjukkan bahwa pasangan elektroda ini tidak stabil dalam jangka waktu yang lama. Sementara itu, kombinasi anoda besi dan katoda seng menunjukkan fluktuasi tegangan yang lebih kecil, mulai dari 35,4 mV pada hari pertama dan turun sedikit menjadi 27 mV pada hari kelima, dengan peningkatan di beberapa hari tertentu. Sebaliknya, kombinasi anoda dan katoda yang keduanya dari seng menunjukkan kestabilan dan konsistensi yang lebih baik. Tegangan yang dihasilkan tetap tinggi sepanjang periode pengujian, mulai dari 49,1 mV pada hari pertama dan sedikit meningkat menjadi 55,8 mV pada hari kelima. Ini menunjukkan bahwa penggunaan seng sebagai anoda dan katoda menghasilkan performa yang paling stabil dan efektif dalam menghasilkan tegangan.

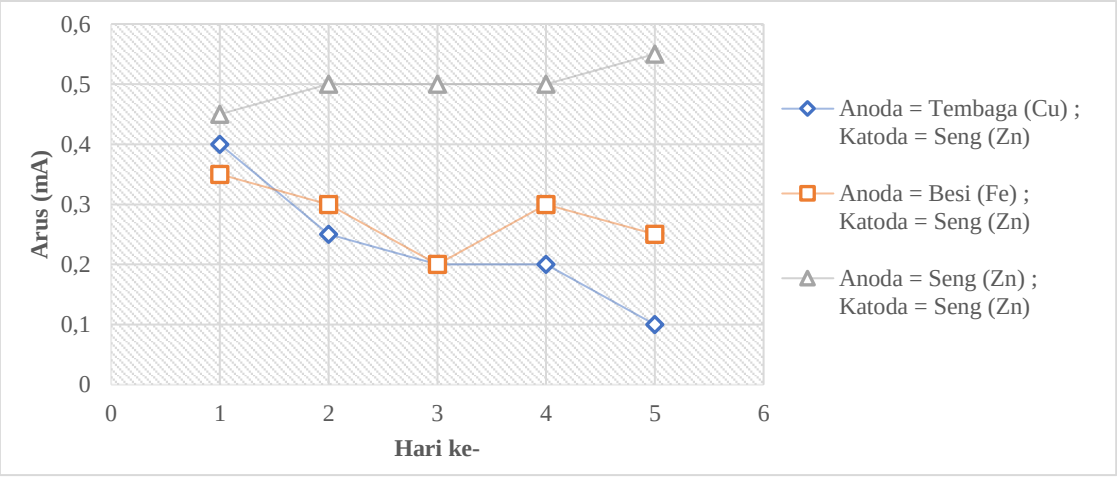
Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa kombinasi anoda dan katoda yang paling stabil dan menghasilkan tegangan tertinggi adalah kombinasi seng dengan seng. Kombinasi tembaga dengan seng mengalami penurunan yang signifikan hingga hampir tidak menghasilkan tegangan pada hari kelima. Kombinasi besi dengan seng menunjukkan fluktuasi tegangan yang lebih kecil dibandingkan tembaga dengan seng. Hal ini menunjukkan bahwa jenis material anoda dan katoda sangat mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan serta kestabilannya selama periode pengujian.

3.2.1 Pengujian Arus

Pengujian selanjutnya yang dilakukan yaitu pengujian arus. Pengujian arus ini dilakukan dengan mengukur arus yang dihasilkan oleh MCF menggunakan multimeter analog. Sama hanya dengan pengukuran tegangan, pengukuran arus juga dilakukan setiap satu hari sekali selama lima hari untuk setiap variasi anoda dan katoda. Hasil pengukuran arus yang dihasilkan oleh MFC dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 6.

Tabel 2. Hasil pengukuran arus untuk variasi bahan elektroda

Hari ke-	Arus (mA)		
	Anoda = Tembaga (Cu) ; Katoda = Seng (Zn)	Anoda = Besi (Fe) ; Katoda = Seng (Zn)	Anoda = Seng (Zn) ; Katoda = Seng (Zn)
1	0,4	0,35	0,45
2	0,25	0,3	0,5
3	0,2	0,2	0,5
4	0,2	0,3	0,5
5	0,1	0,25	0,55



Gambar 6. Perbandingan arus untuk setiap variasi bahan elektroda

Hasil pengujian pada Gambar 6 menunjukkan bahwa penggunaan material elektroda selama lima hari menghasilkan variasi nilai arus yang signifikan pada setiap kombinasi anoda dan katoda yang diuji. Pada hari pertama, kombinasi anoda tembaga (Cu) dan katoda seng (Zn) menghasilkan arus sebesar 0,4 mV, sementara kombinasi anoda besi (Fe) dan katoda seng menghasilkan arus sebesar 0,35 mV. Kombinasi anoda seng (Zn) dengan katoda seng menghasilkan arus tertinggi sebesar 0,45 mV. Seiring berjalannya waktu, kombinasi anoda tembaga dan katoda seng mengalami penurunan arus yang drastis, dari 0,4 mV pada hari pertama menjadi hanya 0,1 mV pada hari kelima. Hal ini menunjukkan bahwa pasangan elektroda ini tidak stabil dalam jangka waktu yang lama. Sementara itu, kombinasi anoda besi dan katoda seng menunjukkan fluktuasi arus yang lebih kecil, mulai dari 0,35 mV pada hari pertama dan sedikit menurun menjadi 0,25 mV pada hari kelima, dengan beberapa peningkatan di hari tertentu. Sebaliknya, kombinasi anoda dan katoda yang keduanya dari seng menunjukkan kestabilan dan konsistensi yang lebih baik. Arus yang dihasilkan tetap tinggi sepanjang periode pengujian, mulai dari 0,45 mV pada hari pertama dan meningkat menjadi 0,55 mV pada hari kelima.

Hasi pengujian ini menunjukkan bahwa penggunaan seng sebagai anoda dan katoda menghasilkan performa yang paling stabil dan efektif dalam menghasilkan arus. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa pemilihan bahan elektroda sangat

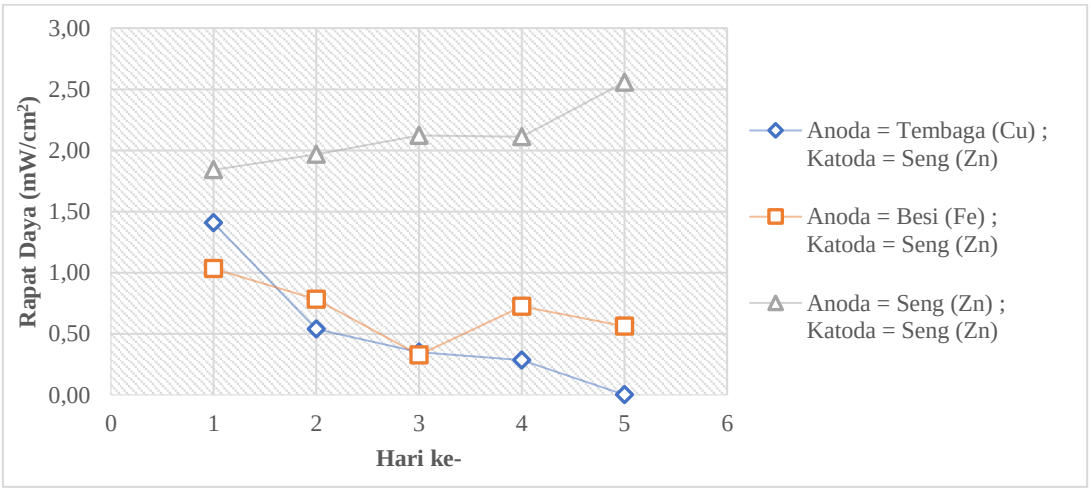
mempengaruhi arus yang dihasilkan oleh sel elektroda. Kombinasi seng dengan seng terbukti paling efektif dan stabil, sementara kombinasi tembaga dengan seng menunjukkan penurunan kinerja yang signifikan dalam waktu singkat. Kombinasi besi dengan seng menawarkan stabilitas dengan fluktuasi arus yang lebih kecil dibandingkan tembaga dengan seng.

3.2.2 Pengujian Rapat Daya

Pengujian rapat daya ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi bahan (material) pada anoda dan katoda terhadap rapat daya listrik yang dihasilkan oleh sel elektroda selama periode waktu tertentu. Nilai rapat daya yang dihasilkan oleh MFC ini diperoleh dari hasil perkalian tegangan dan arus yang diperoleh dari hasil pengukuran. Hasil pengujian rapat daya yang dihasilkan oleh MFC dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 7 berikut:

Tabel 3. Hasil pengujian daya untuk variasi bahan elektroda

Hari ke-	Rapat Daya (mW/cm^2)		
	Anoda = Tembaga (Cu) ; Katoda = Seng (Zn)	Anoda = Besi (Fe) ; Katoda = Seng (Zn)	Anoda = Seng (Zn) ; Katoda = Seng (Zn)
1	$1{,}41 \times 10^{-3}$	$1{,}03 \times 10^{-3}$	$1{,}84 \times 10^{-3}$
2	$0{,}54 \times 10^{-3}$	$0{,}78 \times 10^{-3}$	$1{,}97 \times 10^{-3}$
3	$0{,}35 \times 10^{-3}$	$0{,}33 \times 10^{-3}$	$2{,}12 \times 10^{-3}$
4	$0{,}28 \times 10^{-3}$	$0{,}73 \times 10^{-3}$	$2{,}11 \times 10^{-3}$
5	$0{,}0017 \times 10^{-3}$	$0{,}56 \times 10^{-3}$	$2{,}56 \times 10^{-3}$



Gambar 7. Perbandingan rapat daya untuk setiap variasi bahan elektroda

Pada hari pertama, kombinasi anoda tembaga (Cu) dan katoda seng (Zn) menghasilkan daya sebesar $1{,}41 \times 10^{-3}$ mW/m^2, sementara kombinasi anoda besi (Fe) dan katoda seng menghasilkan daya sebesar $1{,}03 \times 10^{-3}$ mW/m^2. Kombinasi anoda seng (Zn) dengan katoda seng menghasilkan daya tertinggi sebesar $1{,}84 \times 10^{-3}$ mW/m^2. Seiring berjalannya waktu, kombinasi anoda tembaga dan katoda seng mengalami penurunan daya yang signifikan, dari $1{,}41 \times 10^{-3}$ mW/m^2 pada hari pertama menjadi hanya $0{,}0017 \times 10^{-3}$ mW/m^2 pada hari kelima. Hal ini menunjukkan bahwa pasangan elektroda ini tidak stabil dalam jangka waktu yang lama. Kombinasi anoda besi dan katoda seng menunjukkan fluktuasi daya yang lebih kecil, mulai dari $1{,}03 \times 10^{-3}$ mW/m^2 pada hari pertama dan sedikit menurun menjadi 0,56 x 10-3 mW/m2 pada hari kelima, dengan beberapa peningkatan di hari tertentu. Sebaliknya, kombinasi anoda dan katoda yang keduanya dari seng menunjukkan kestabilan dan konsistensi yang lebih baik. Daya yang dihasilkan tetap tinggi sepanjang periode pengujian, mulai dari $1{,}84 \times 10^{-3}$ mW/m^2 pada hari pertama dan meningkat

menjadi 2,56 x 10^{-3} mW/m^2 pada hari kelima. Ini menunjukkan bahwa penggunaan seng sebagai anoda dan katoda menghasilkan performa yang paling stabil dan efektif dalam menghasilkan daya.

Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa pemilihan bahan elektroda sangat mempengaruhi daya yang dihasilkan oleh sel elektroda. Kombinasi seng dengan seng terbukti paling efektif dan stabil, sementara kombinasi tembaga dengan seng menunjukkan penurunan kinerja yang signifikan dalam waktu singkat. Kombinasi besi dengan seng menawarkan stabilitas dengan fluktuasi daya yang lebih kecil dibandingkan tembaga dengan seng.

3.1. Hasil Pengujian Pengaruh Luas Elektroda

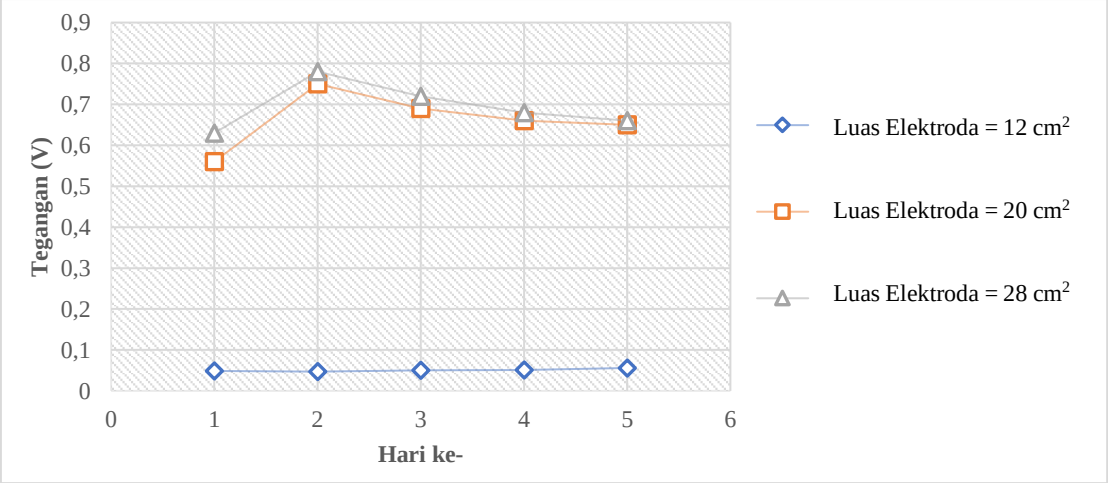
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh luas elektroda mempengaruhi output tegangan, arus, dan daya dari MFC. Berdasarkan hasil pengujian arus, tegangan, dan daya untuk berbagai variasi bahan elektroda, variasi bahan elektroda yang menghasilkan arus, tegangan, dan daya yang paling tinggi yaitu anoda dan katoda yang kedua-duanya terbuat dari bahan seng (Zn). Elektroda ini selanjutnya diuji kembali dengan luas elektroda yang berbeda-beda yaitu 12 cm^2, 20 cm^2, dan 28 cm^2.

3.3.1 Pengujian Tegangan

Pengujian tegangan ini dilakukan menggunakan multimeter digital dengan hasil yang diperlihatkan pada Tabel 4 dan Gambar 8 berikut:

Tabel 4. Hasil pengujian tegangan untuk variasi luas elektroda

Pengujian hari ke-	Tegangan (V)		
	Luas elektroda = 12 cm^2	Luas elektroda = 20 cm^2	Luas elektroda = 28 cm^2
1	0,049	0,56	0,63
2	0,047	0,75	0,78
3	0,050	0,69	0,72
4	0,051	0,66	0,68
5	0,056	0,65	0,66



Gambar 8. Perbandingan tegangan untuk setiap variasi luas elektroda

Hasil pengujian menunjukkan bahwa luas elektroda memiliki pengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan oleh Microbial Fuel Cell (MFC) menggunakan limbah kulit kakao sebagai substrat. Dari data yang diperoleh selama lima hari pengujian, terlihat bahwa elektroda dengan

luas yang lebih besar cenderung menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan elektroda yang lebih kecil. Peningkatan luas elektroda memungkinkan lebih banyak area permukaan untuk reaksi elektrokimia terjadi, yang dapat meningkatkan efisiensi transfer elektron dari mikroorganisme ke elektroda. Hal ini menjelaskan mengapa elektroda dengan luas yang lebih besar cenderung menghasilkan tegangan yang lebih tinggi. Pada hari kelima, elektroda dengan luas 12 cm² menghasilkan tegangan sebesar 0,056 V, sementara elektroda dengan luas 20 cm² dan 28 cm² masing-masing menghasilkan 0,65 V dan 0,66 V. Meskipun terdapat sedikit penurunan dalam tegangan untuk elektroda yang lebih besar pada hari-hari terakhir, tegangan yang dihasilkan masih lebih tinggi dibandingkan dengan elektroda yang lebih kecil.

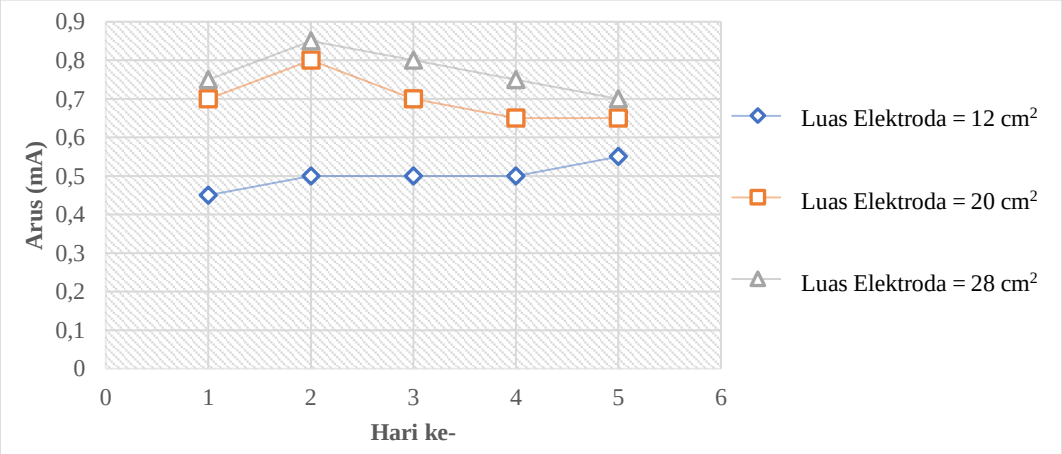
Namun, penting untuk dicatat bahwa peningkatan luas elektroda tidak selalu menghasilkan peningkatan tegangan yang proporsional. Pada hari ketiga dan keempat, perbedaan tegangan antara elektroda 20 cm² dan 28 cm² relatif kecil, menunjukkan bahwa ada batasan tertentu di mana peningkatan luas elektroda tidak lagi memberikan keuntungan yang signifikan. Oleh karena itu, selain luas elektroda, faktor lain seperti material elektroda, desain sel, dan kondisi operasional juga harus dipertimbangkan untuk mengoptimalkan kinerja MFC. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa peningkatan luas elektroda dapat meningkatkan produksi bioelektrisitas dalam MFC berbasis limbah kulit kakao. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami sepenuhnya mekanisme yang mendasari hubungan antara luas elektroda dan output tegangan serta untuk mengidentifikasi kondisi optimal yang dapat memaksimalkan kinerja MFC.

3.3.2 Pengujian Arus

Pengujian tegangan ini dilakukan menggunakan multimeter analog dengan hasil yang diperlihatkan pada Tabel 5 dan Gambar 9 berikut:

Tabel 5. Hasil pengujian arus untuk variasi luas elektroda

Pengujian hari ke-	Arus (mA)		
	Luas elektroda = 12 cm²	Luas elektroda = 20 cm²	Luas elektroda = 28 cm²
1	0,45	0,7	0,75
2	0,5	0,8	0,85
3	0,5	0,7	0,8
4	0,5	0,65	0,75
5	0,55	0,65	0,7



Gambar 9. Perbandingan arus untuk setiap variasi luas elektroda

Hasil pengujian arus yang dihasilkan oleh *Microbial Fuel Cell* (MFC) menggunakan limbah kulit kakao sebagai substrat menunjukkan bahwa luas elektroda memiliki pengaruh terhadap

kinerja MFC. Selama lima hari pengujian, elektroda dengan luas yang lebih besar secara konsisten menghasilkan arus yang lebih tinggi dibandingkan dengan elektroda yang lebih kecil. Namun, penting untuk dicatat bahwa peningkatan luas elektroda tidak selalu menghasilkan peningkatan arus yang proporsional. Penurunan arus pada hari keempat dan kelima untuk elektroda yang lebih besar mungkin menunjukkan adanya batasan tertentu di mana peningkatan luas elektroda tidak lagi memberikan keuntungan yang signifikan. Faktor lain seperti jenis material elektroda, ketebalan elektroda, dan kondisi operasional juga berperan dalam menentukan arus yang dihasilkan oleh MFC.

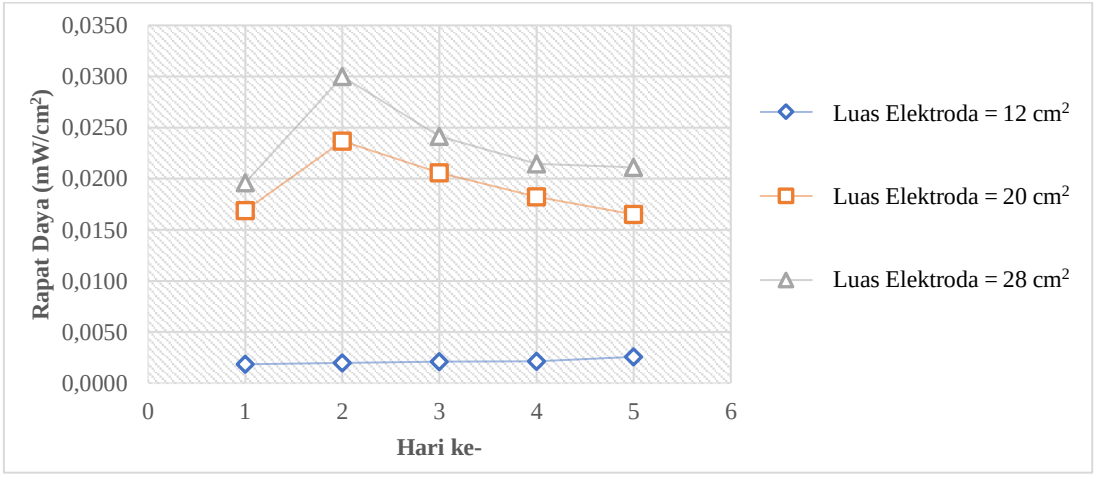
Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa peningkatan luas elektroda dapat meningkatkan arus yang dihasilkan dalam MFC berbasis limbah kulit kakao. Namun, untuk mengoptimalkan kinerja MFC, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memahami mekanisme yang mendasari hubungan antara luas elektroda dan output arus, serta untuk mengidentifikasi kondisi optimal yang dapat memaksimalkan kinerja MFC.

3.3.3 Pengujian Rapat Daya

Pengujian rapat daya ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi bahan (material) pada anoda dan katoda terhadap rapat daya listrik yang dihasilkan oleh sel elektroda selama periode waktu tertentu. Nilai rapat daya yang dihasilkan oleh MFC ini diperoleh dari hasil perkalian tegangan dan arus yang diperoleh dari hasil pengukuran. Hasil pengujian rapat daya yang dihasilkan oleh MFC dapat dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 10 berikut:

Tabel 6. Hasil Pengujian Daya untuk Variasi Bahan Elektroda

Hari ke-	Rapat Daya (mW/cm^2)		
	Luas elektroda = 12 cm^2	Luas elektroda = 20 cm^2	Luas elektroda = 28 cm^2
1	0,0018	0,0169	0,0196
2	0,0020	0,0237	0,0300
3	0,0021	0,0206	0,0242
4	0,0021	0,0182	0,0215
5	0,0026	0,0165	0,0211



Gambar 10. Perbandingan rapat daya untuk setiap variasi luas elektroda

Hasil pengujian rapat daya yang dihasilkan oleh Microbial Fuel Cell (MFC) menggunakan limbah kulit kakao sebagai substrat menunjukkan bahwa luas elektroda memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja MFC. Hasil pengujian menunjukkan bahwa luas elektroda memiliki pengaruh terhadap kinerja MFC. Hasil pengujian selama lima hari menunjukkan bahwa elektroda dengan luas yang lebih besar, seperti 28 cm², secara konsisten menghasilkan rapat daya yang lebih

tinggi dibandingkan dengan elektroda 12 cm² dan 20 cm². Elektroda 28 cm² mencapai rapat daya tertinggi sebesar 0,0300 mW/cm² pada hari kedua, menunjukkan bahwa peningkatan luas elektroda dapat meningkatkan efisiensi konversi energi dalam MFC.

Namun, penurunan rapat daya pada elektroda 20 cm² dan 28 cm² pada beberapa hari terakhir menunjukkan bahwa ada batasan tertentu di mana peningkatan luas elektroda tidak selalu memberikan keuntungan tambahan yang signifikan. Faktor-faktor seperti hambatan internal dan distribusi mikroba dapat mempengaruhi kinerja MFC, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami mekanisme yang mendasari hubungan antara luas elektroda dan rapat daya serta untuk mengoptimalkan desain dan kondisi operasional MFC. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa peningkatan luas elektroda dapat meningkatkan rapat daya dalam MFC berbasis limbah kulit kakao. Elektroda dengan luas 28 cm² memberikan keseimbangan optimal antara luas permukaan dan efisiensi konversi energi.

4. KESIMPULAN

Hasil pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa baik jenis maupun luas elektroda memiliki pengaruh terhadap produksi bioelektrisitas dalam sistem MFC. Kombinasi anoda dan katoda seng (Zn) menunjukkan performa terbaik, menghasilkan daya yang paling stabil dan tinggi selama periode pengujian. Sedangkan kombinasi anoda besi (Fe) dan katoda seng menunjukkan fluktuasi daya yang lebih kecil, tetapi tetap tidak seefektif kombinasi seng dengan seng. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa elektroda dengan luas yang lebih besar cenderung menghasilkan arus dan tegangan yang lebih tinggi, mengindikasikan peningkatan efisiensi konversi energi. Elektroda dengan luas 20 cm² terbukti memberikan rapat daya tertinggi, sementara elektroda dengan luas 12 cm² menghasilkan output yang lebih rendah. Selain itu, pemilihan jenis material elektroda juga mempengaruhi kinerja MFC, dengan beberapa jenis elektroda menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam mentransfer elektron dan berinteraksi dengan mikroorganisme. Pengembangan penelitian ini ke depan dapat diarahkan pada eksplorasi material elektroda alternatif seperti karbon aktif, grafit, atau elektroda berlapis nanomaterial untuk meningkatkan efisiensi transfer elektron dan interaksi dengan biofilm mikroorganisme. Selain itu, perlu juga dilakukan kajian terhadap pengaruh modifikasi permukaan elektroda, seperti aktivasi kimia atau pemanfaatan bahan komposit, guna meningkatkan biokompatibilitas dan kapasitas konduksi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya disampaikan kepada Majelis Diktilitbang Pimpinan Pusat Muhammadiyah atas dukungan dan pendanaan melalui hibah RISETMU untuk penelitian ini. Dukungan yang diberikan sangat berarti dan telah memungkinkan peneliti untuk melaksanakan penelitian ini dengan baik. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang energi terbarukan.

REFERENSI

[1] A. R. Noviyanti, Y. B. Yuliyati, D. R. Eddy, Solihudin, and R. Tjokronegoro, "Struktur Dan Morfologi Elektrolit Apatit Lantanum Silikat Berbahan Dasar Silika Sekam Padi," *J. Mater. dan Energi Indones.*, vol. 06, no. 02, pp. 1–6, 2016.

[2] E. Gultom, "Pelabuhan Indonesia Sebagai Penyumbang Devisa Negara Dalam Perspektif Hukum Bisnis," vol. 19, no. 3, pp. 419–444, 2017.

[3] G. Zola, S. D. Nuhraheni, A. A. Rosiana, D. A. Pambudy, and A. Nainta, "Inovasi kendaraan listrik sebagai upaya meningkatkan kelestarian lingkungan dan mendorong pertumbuhan ekonomi hijau di Indonesia," *Ekon. Sumberd. dan Lingkung.*, vol. 11, no. 3, pp. 159–170, 2023.

[4] A. Taslim, M. R. Kirom, and R. A. Salam, "Rancang Bangun Tubular Microbial Fuel Cell Dengan Jembatan Garam Berbahan Semen," in *e-Proceeding of Engineering*, 2021, vol. 8, no. 5, pp. 5921–5930.

[5] A. Hermayanti and I. Nugraha, "Potensi Perolehan Energi Listrik Dari Limbah Cair Industri Tahu Dengan Metode Salt Bridge Microbial Fuel Cell," *J. Sains Dasar*, vol. 3, no. 2, pp. 162–168, 2014.

[6] D. Sari, L. Suyati, and D. S. Widodo, "Pengaruh Buffer Kalium Fosfat dan Natrium Fosfat terhadap Produksi Listrik dalam Sistem Microbial Fuel Cell (MFC) dengan Lactobacillus bulgaricus pada Whey Tahu," *J. Kim. Sains dan Apl.*, vol. 19, no. 3, pp. 107–110, 2016.

[7] A. Putra, R. Nuryanto, and L. Suyati, "Lactose Bioelectricity on A Microbial Fuel Cell System Parallel Circuit using Lactobacillus bulgaricus," *J. Sains dan Mat.*, vol. 22, no. 4, pp. 107–111, 2014.

[8] R. Syamsuri, T. Pribadi, and K. Rosada, "Pemanfaatan Microbial Fuel Cell untuk Mengatasi Pencemaran Lingkungan dan Menghasilkan Mikroenergi," *Sainteknol*, vol. 19, no. 1, pp. 28–35, 2021.

[9] Basmanto, H. Sapitriani, N. Jusman, Sahara, and J. Agus, "Pemanfaatan Jerami Dan Buah Lontar Sebagai Substrat Menggunakan Teknologi Microbial Fuel Cell," *JFT J. Fis. dan Ter.*, vol. 8, no. 1, pp. 28–35, 2021.

[10] Fitriana, M. A. Auliq, F. Akbar, and Z. Mubarok, "Bioelectricity Of Cocoa Pod Waste As A Substrate In A Double Chamber Microbial Fuel Cell," *J. Media Elektro*, vol. XII, no. 2, pp. 93–99, 2023.

[11] E. S. Zulfikar, M. Tamjidillah, and M. N. Ramadhan, "Produktivitas Listrik Microbial Fuel Cell Pada Substrat Limbah Air Rebusan Mie Instan," *JTAM Rotary*, vol. 3, no. 1, pp. 69–80, 2021.

[12] M. I. Din, M. Iqbal, Z. Hussain, and R. Khalid, "Bioelectricity generation from waste potatoes using single chambered microbial fuel cell," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–11, 2020.

[13] B. Ibrahim, P. Suptijah, and B. S. Agung, "Pengaruh Jarak Elektroda Microbial Fuel Cell pada Limbah Cair Pemindangan Ikan terhadap Elektrisitas dan Beban Pencemaran," *J. Pengolah. Has. Perikan. Indones.*, vol. 20, no. 3, pp. 559–567, 2017.

[14] N. P. Sipayung, M. R. Kirom, and R. F. Iskandar, "Studi Pengaruh Waktu Inkubasi Substrat Tomat Busuk Pada Microbial Fuel Cell Terhadap Produksi Energi Listrik Pada Reaktor Dual Chamber," *e-Proceeding Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 5485–5492, 2019.

[15] P. Octavia, M. R. Kirom, and R. F. Iskandar, "Pengaruh Elektroda Pada Kinerja Microbial Fuel Cell Dengan Menggunakan Lumpur Bakau Sebagai Substrat the Impact of Electrodes on Microbial Fuel Cell Performance on the Resulted Electric Power Density Using Mangrove Mud As Substrate," in *e-Proceeding of Engineering*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 2350–2357.

[16] M. I. Ramadhani and A. M. Mursadin, "The Effect of Copper Electric and Zinc Variations on the Productivity of Microbial Fuel Cell (MFC) Electrical Waste Substrates in Liquid Water Waste Instant Noodles," *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 5, no. 1, pp. 23–36, 2020.