

POLA PRODUKSI BIOENERGI SEL AMOBIL *Bacillus licheniformis* KGE16 SISTEM MFC PADA REUSABILITAS KETIGA

Shella Anggraeni, Irdawati*, Linda Advinda, Siska Alicia Farma

Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri
Padang, Sumatera Barat, Indonesia

Jl. Pro. Dr. Hamka Air Tawar Barat, Kecamatan Padang Utara, Kota Padang

e-mail: irdawati.amor40@gmail.com

Abstract

*The declining availability of fossil fuels has accelerated the development of renewable energy alternatives, one of which is Microbial Fuel Cell (MFC) technology. This study aimed to analyze the bioenergy production pattern of immobilized cells of *Bacillus licheniformis* strain KGE16 in an MFC system during the third reusability cycle. Bacterial cells were immobilized using a 5% (w/v) sodium alginate matrix via the entrapment method, and a dual-chamber MFC system was used as the bioreactor. Electrical voltage was measured every 2 hours over a 24-hour period with 4 replicates (n = 4) using a digital multimeter. Results showed that the highest voltage was recorded at hour 0 at 0.553 V, which consistently declined to 0.117 V at hour 24, with a total accumulated voltage of 3.277 V. The decline occurred in two phases: a steep decrease from hour 0 to hour 8 due to substrate depletion, followed by a gradual decrease until hour 24 attributed to limited substrate diffusion into the beads matrix. Nevertheless, the electrogenesis activity of *B. licheniformis* KGE16 was still detectable at the end of the observation period, indicating that immobilized cells in the alginate matrix retained their metabolic activity during the third reusability cycle.*

*Keywords: Microbial Fuel Cell; reusability; immobilization; *Bacillus licheniformis*; bioenergy*

Abstrak

Penggunaan bahan bakar fosil yang terus menurun mendorong pengembangan energi terbarukan, salah satunya melalui teknologi *Microbial Fuel Cell* (MFC). Penelitian ini bertujuan menganalisis pola produksi bioenergi sel amobil *Bacillus licheniformis* KGE16 dalam sistem MFC pada siklus reusabilitas ketiga. Sel bakteri diamobilisasi menggunakan matriks natrium alginat 5% (b/v) dengan metode penjebakan (*entrapment*), dan sistem MFC bertipe *dual chamber* digunakan sebagai bioreaktor. Tegangan listrik diukur setiap 2 jam selama 24 jam dengan 4 ulangan (n = 4) menggunakan multimeter digital. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tegangan tertinggi tercatat pada jam ke-0 sebesar 0,553 V dan menurun secara konsisten hingga 0,117 V pada jam ke-24, dengan total akumulasi tegangan sebesar 3,277 V. Pola penurunan berlangsung dalam dua fase: penurunan tajam pada jam ke-0 hingga jam ke-8 akibat deplesi substrat, dilanjutkan penurunan gradual hingga jam ke-24 karena keterbatasan difusi substrat ke dalam matriks *beads*. Meskipun demikian, aktivitas elektrogenesis *Bacillus licheniformis* KGE16 masih terdeteksi hingga akhir pengamatan, yang menunjukkan bahwa sel amobil dalam matriks alginat masih mampu mempertahankan aktivitas metaboliknya pada reusabilitas ketiga.

*Kata kunci: Microbial Fuel Cell; reusabilitas; amobilisasi; *Bacillus licheniformis*; bioenergi*

1. PENDAHULUAN

Ketergantungan global terhadap bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama telah menimbulkan berbagai permasalahan, baik dari sisi ketersediaan maupun dampak lingkungannya. Cadangan energi fosil yang tidak dapat diperbarui terus berkurang akibat tingginya konsumsi yang sejalan dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan industri. Selain itu, pembakaran bahan bakar fosil menjadi salah satu penyumbang utama emisi gas rumah kaca yang mempercepat perubahan iklim global (Syafitri & Putri, 2022). Kondisi ini mendorong para ilmuwan dan pembuat kebijakan untuk mengembangkan sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Salah satu teknologi yang berkembang dalam produksi bioenergi adalah *Microbial Fuel Cell* (MFC). MFC merupakan sistem bioelektrokimia yang memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik dan menghasilkan energi listrik melalui proses transfer elektron di luar sel (Purnama *et al.*, 2020). Dalam sistem ini, bakteri elektroaktif di ruang anoda berperan mengoksidasi substrat dan melepaskan elektron, yang kemudian mengalir melalui rangkaian eksternal menuju katoda sehingga menghasilkan beda potensial listrik. Keunggulan MFC dibandingkan teknologi bioenergi lainnya adalah kemampuannya menghasilkan listrik langsung dari bahan organik, termasuk limbah, sehingga sekaligus dapat membantu proses pengolahan limbah (Ibrahim *et al.*, 2019). Efisiensi sistem MFC sendiri dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis mikroorganisme, komposisi substrat, desain elektroda, serta konfigurasi reaktor yang digunakan. Oleh karena itu, pemilihan mikroorganisme yang memiliki kemampuan elektrogenik tinggi serta ketahanan fisiologis yang baik menjadi salah satu aspek penting dalam meningkatkan performa sistem MFC. Salah satu bakteri yang berpotensi untuk dikembangkan dalam sistem ini adalah *Bacillus licheniformis*.

Bacillus licheniformis merupakan bakteri Gram positif yang bersifat termofilik dan telah berhasil diisolasi dari sumber air panas serta diidentifikasi melalui analisis gen 16S rRNA (Irdawati, 2019). Bakteri ini memiliki ketahanan fisiologis dan aktivitas

enzim yang baik pada suhu tinggi, sehingga berpotensi digunakan sebagai biokatalis dalam sistem MFC (Nuritasari *et al.*, 2017). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *Bacillus* spp. mampu melakukan transfer elektron melalui bantuan senyawa flavin, seperti riboflavin, yang berfungsi sebagai perantara elektron menuju anoda tanpa harus bersentuhan langsung (Light *et al.*, 2018). ~~Strain~~ *B. Licheniformis* KGE16 sendiri dilaporkan mampu menghasilkan tegangan hingga 0,6960 V pada sistem MFC dengan sel bebas (Uthami & Irdawati, 2024). Namun, penggunaan sel bebas memiliki beberapa kendala, seperti kurang stabil, kinerja yang menurun seiring waktu, serta sulit dipisahkan dari medium. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa penggunaan bakteri termofilik dapat meningkatkan efisiensi reaksi elektrogenesis pada kondisi suhu yang lebih tinggi.

Mengatasi keterbatasan tersebut, dikembangkan teknik amobilisasi sel. Amobilisasi menggunakan natrium alginat, yaitu polisakarida alami yang bersifat biokompatibel, terbukti dapat menjaga kondisi lingkungan sel tetap stabil, mengurangi kehilangan biomassa, serta mempertahankan aktivitas metabolik dalam waktu yang lebih lama (Hamdani *et al.*, 2019). Matriks alginat membentuk gel berpori yang memungkinkan substrat dan produk metabolit masuk dan keluar secara bertahap, sehingga sel di dalamnya tetap dapat berfungsi dengan baik (Summaiati, 2024). Dari sisi aplikasi, teknik ini juga memberikan keuntungan seperti kemudahan pemisahan biomassa, efisiensi biaya operasional, serta memungkinkan penggunaan ulang dalam beberapa siklus (López-Gallego *et al.*, 2013).

Konsep reusabilitas menjadi hal penting dalam pengembangan sistem MFC berbasis sel amobil. Reusabilitas menunjukkan kemampuan *beads* untuk tetap menghasilkan energi listrik dalam beberapa siklus penggunaan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sel amobil masih dapat berfungsi dalam beberapa siklus, meskipun kinerjanya cenderung menurun seiring waktu akibat penumpukan produk metabolit dan kerusakan matriks secara bertahap (Neethu *et al.*, 2020). Oleh karena itu, penting untuk memahami pola produksi bioenergi pada setiap siklus agar dapat

mengetahui bagaimana kinerja sistem berubah dari waktu ke waktu (Gadkari *et al.*, 2021). Selain itu, jenis mikroorganisme juga berpengaruh terhadap kestabilan sistem, di mana *B. licheniformis* diketahui mampu mempertahankan aktivitasnya dengan cukup baik dalam kondisi teramobilisasi (Mahmoudnia, 2024).

Penelitian mengenai MFC berbasis sel amobil sudah cukup banyak dilakukan, informasi tentang pola produksi bioenergi beads sel amobil *Bacillus licheniformis* KGEB16 pada reusabilitas ketiga masih terbatas. Padahal, pemahaman mengenai profil tegangan, pola penurunan energi, dan kestabilan aktivitas pada siklus ini sangat penting untuk menilai potensi aplikasinya dalam skala yang lebih luas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola produksi bioenergi sel amobil *Bacillus licheniformis* KGEB16 dalam sistem MFC pada reusabilitas ketiga selama 24 jam, serta mengidentifikasi pola penurunan tegangan dan total energi yang dihasilkan selama proses tersebut.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan pada tahun 2026 di Laboratorium Mikrobiologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang. Bakteri yang digunakan adalah *Bacillus licheniformis* KGEB16 yang diisolasi dari sumber air panas Mudiak Sapan, Kabupaten Solok Selatan, dan diidentifikasi secara molekuler melalui sekuensing gen 16S rRNA (Irdawati, 2019).

Amobilisasi sel dilakukan dengan metode penjebakan (*entrapment*) menggunakan matriks natrium alginat 5% (b/v), mengacu pada Summaiati (2024) yang menunjukkan bahwa konsentrasi tersebut menghasilkan *beads* dengan struktur padat dan ketahanan mekanis yang baik untuk penggunaan berulang. Suspensi bakteri dicampurkan ke dalam larutan natrium alginat 5%, kemudian diteteskan ke dalam larutan CaCl₂ 0,2 M hingga terbentuk *beads* bulat. *Beads* dikeraskan selama 30 menit, lalu dibilas dengan NaCl fisiologis 0,9% sebelum diaplikasikan ke dalam sistem MFC. Sistem MFC yang digunakan bertipe *dual chamber*, terdiri atas kompartemen anoda (anaerobik) dan katoda (aerobik) yang dihubungkan oleh jembatan garam. Pada siklus

reusabilitas ketiga, *beads* yang telah digunakan pada dua siklus sebelumnya dibilas dengan NaCl fisiologis 0,9% untuk membuang sisa substrat dan produk metabolit, kemudian dimasukkan kembali ke kompartemen anoda yang telah diisi medium TMM baru.

Produksi bioenergi diukur berdasarkan tegangan listrik menggunakan multimeter digital (mV) yang dikonversi ke satuan Volt (V), dengan interval pengukuran setiap 2 jam selama 24 jam (jam ke-0 hingga jam ke-24), sehingga diperoleh 13 titik pengukuran per ulangan. Setiap perlakuan dilakukan sebanyak 4 kali pengulangan (n = 4). Data dianalisis secara statistik deskriptif dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk menggambarkan pola produksi bioenergi pada reusabilitas ketiga *beads* sel amobil *B. licheniformis* KGEB16.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

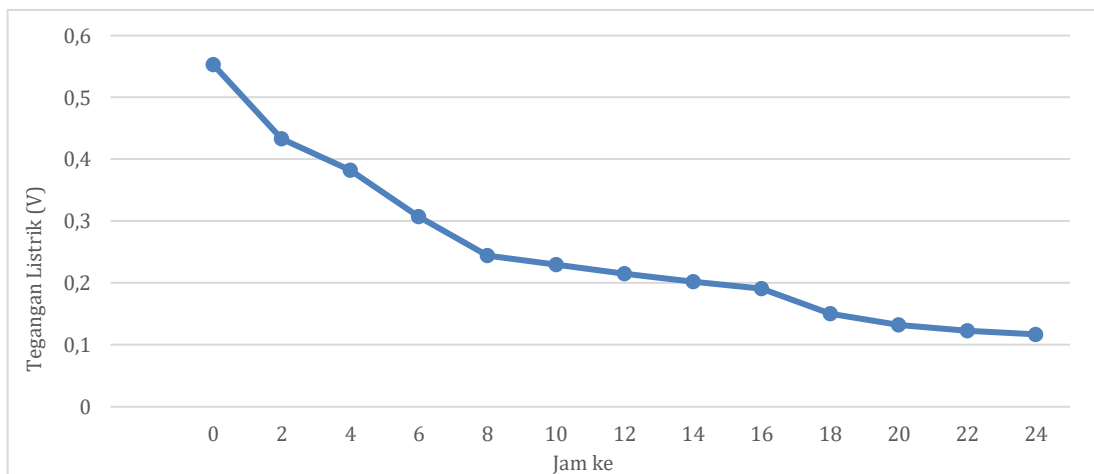
Pengamatan pola produksi bioenergi pada sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC) menggunakan *beads* sel amobil *Bacillus licheniformis* KGEB16 pada reusabilitas ketiga dilakukan selama 24 jam dengan interval pengukuran setiap 2 jam. Hasil pengukuran tegangan listrik dari empat ulangan beserta rata-ratanya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tegangan Listrik (V) Reusabilitas ke 3 Sel Amobil *Bacillus licheniformis* strain KGEB16 pada Sistem MFC

Waktu (Jam)	Ulangan				Rata-Rata (V)
	1	2	3	4	
0	0,468	0,508	0,835	0,400	0,553
2	0,243	0,460	0,638	0,389	0,433
4	0,274	0,375	0,612	0,268	0,382
6	0,250	0,279	0,502	0,196	0,307
8	0,252	0,200	0,343	0,180	0,244

Waktu (Jam)	Ulangan				Rata-Rata (V)
	1	2	3	4	
10	0,241	0,182	0,328	0,169	0,230
12	0,202	0,194	0,315	0,147	0,215
14	0,196	0,190	0,271	0,152	0,202
16	0,180	0,188	0,233	0,164	0,191
18	0,150	0,158	0,116	0,174	0,150
20	0,120	0,150	0,111	0,145	0,132
22	0,113	0,139	0,100	0,141	0,123
24	0,102	0,120	0,095	0,150	0,117
ΣRata-Rata					3,277

Berdasarkan Tabel 1, tegangan listrik yang dihasilkan pada reusabilitas ketiga menunjukkan pola penurunan yang konsisten seiring bertambahnya waktu pengoperasian. Nilai tegangan tertinggi tercatat pada jam ke-0 dengan rata-rata sebesar 0,553 V, kemudian menurun secara bertahap hingga mencapai 0,117 V pada jam ke-24. Total akumulasi rata-rata tegangan selama 24 jam pengoperasian tercatat sebesar 3,277 V.



Gambar 1. Grafik pola produksi bioenergi selama 24 jam pada reusabilitas ke 3 sel amobil *Bacillus licheniformis* strain KGEB16

Grafik pada Gambar 1 memperlihatkan bahwa produksi tegangan listrik pada reusabilitas ketiga menunjukkan pola penurunan yang berlangsung sejak awal pengamatan hingga akhir waktu inkubasi. Tegangan tertinggi tercatat pada jam ke-0 sebesar 0,553 V dan terus mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai 0,117 V pada jam ke-24. Pola ini berbeda dari karakteristik umum sistem MFC yang biasanya memperlihatkan fase adaptasi pada awal pengamatan sebelum tegangan mencapai puncaknya. Ketiadaan fase peningkatan ini mengindikasikan bahwa sel di dalam *beads* tidak lagi melewati fase adaptasi yang nyata dan langsung memasuki fase aktif metabolisme sejak substrat tersedia, namun dengan kapasitas yang sudah terbatas sejak awal siklus. Penurunan paling tajam terjadi pada rentang jam ke-0 hingga jam ke-8, yaitu dari 0,553 V menjadi 0,244 V. Pada fase ini, sel-sel yang masih aktif secara metabolik memanfaatkan substrat yang tersedia di sekitar matriks *beads* secara intensif sebagai donor elektron. Semakin banyak substrat yang teroksidasi, semakin berkurang pula ketersediaan donor elektron yang dapat ditransfer ke permukaan anoda, sehingga tegangan turun dengan cepat. Aktivitas oksidasi substrat oleh mikroba pada awal operasi MFC memang diketahui berlangsung paling tinggi ketika konsentrasi substrat masih melimpah, dan seiring deplesi substrat, laju reaksi pun melambat (Pant *et al.*, 2010).

Memasuki jam ke-8 hingga akhir pengamatan pada jam ke-24, laju penurunan tegangan terlihat jauh lebih lambat dibandingkan fase sebelumnya. Tegangan pada rentang ini bergerak dalam kisaran 0,117–0,244 V dengan penurunan yang lebih gradual dari satu titik pengukuran ke titik berikutnya. Kondisi ini dapat dipahami sebagai hasil dari berkurangnya gradien konsentrasi substrat di antara medium dan bagian dalam matriks *beads*. Ketika substrat di sekitar *beads* mulai habis, difusi substrat dari luar ke dalam matriks menjadi faktor pembatas utama yang menentukan laju reaksi elektrogenesis. Imobilisasi sel dalam matriks alginat memang diketahui memperlambat transfer massa substrat, namun di sisi lain hal ini juga membuat suplai substrat ke sel berlangsung lebih merata dan bertahap sehingga aktivitas elektrogenesis dapat bertahan

lebih lama meski pada level yang rendah (Hadiyanto *et al.*, 2022). Meskipun tegangan terus menurun, sistem MFC masih menghasilkan tegangan yang terukur hingga jam ke-24 sebesar 0,117 V. Hal ini menunjukkan bahwa sel *B. licheniformis* KGE16 di dalam *beads* masih memiliki aktivitas elektrogenesis yang berjalan sepanjang periode pengamatan. Sebagai bakteri Gram-positif, *B. licheniformis* diketahui mampu melakukan transfer elektron ekstraseluler melalui mediasi senyawa flavin seperti riboflavin yang disekresikan ke lingkungan sekitarnya dan berfungsi sebagai shuttle elektron menuju permukaan anoda (Light *et al.*, 2018). Mekanisme mediasi semacam ini memungkinkan sel tetap menghasilkan arus listrik meski dalam kondisi substrat yang mulai terbatas, karena elektron dapat diangkut secara tidak langsung tanpa memerlukan kontak fisik langsung antara sel dan elektroda.

Pola penurunan tegangan yang konsisten sepanjang 24 jam ini juga berkaitan dengan kondisi sel yang terperangkap di dalam matriks *beads*. Seiring berjalannya waktu dalam satu siklus pengoperasian, produk metabolit hasil aktivitas sel seperti asam organik dan gas CO₂ yang terakumulasi di dalam matriks dan dapat bersifat inhibitor terhadap aktivitas sel itu sendiri. Akumulasi produk ini memperlambat laju metabolisme sel dan pada akhirnya mengurangi jumlah elektron yang dihasilkan per satuan waktu. Kondisi serupa didapatkan oleh Neethu *et al.* (2020) dalam penelitiannya yang menyebutkan bahwa keterbatasan transfer massa substrat dan akumulasi produk di dalam *beads* amobil merupakan faktor utama yang membatasi performa elektrogenesis dalam sistem MFC berbasis sel amobil.

Variabilitas nilai tegangan yang teramati antar ulangan pada beberapa titik waktu, khususnya pada ulangan ke-3 yang menunjukkan nilai lebih tinggi pada jam ke-0 (0,835 V), merupakan karakteristik yang umum terjadi dalam sistem biologis dan bioelektrokimia. Variasi tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti distribusi sel bakteri yang tidak homogen di dalam matriks *beads*, perbedaan ketebalan serta kepadatan biofilm yang terbentuk pada permukaan anoda, dan adanya variasi kondisi anaerobik lokal pada masing-masing kompartemen reaktor MFC. Faktor-faktor

tersebut dapat memengaruhi efisiensi transfer elektron dari mikroorganisme menuju elektroda sehingga menghasilkan perbedaan nilai tegangan antar ulangan. Namun demikian, pola penurunan tegangan dari jam ke-0 hingga jam ke-24 menunjukkan kecenderungan yang konsisten pada seluruh ulangan, sehingga tren yang diperoleh tetap mencerminkan respons sistem dan dapat digunakan untuk mengevaluasi performa MFC secara keseluruhan (Garbini et al., 2023).

Total produksi bioenergi yang terakumulasi selama 24 jam pada reusabilitas ketiga ini tercatat sebesar Σ Rata-Rata 3,277 V. Nilai ini mencerminkan bahwa meskipun pola produksi tegangan bersifat menurun sejak awal dan tidak menunjukkan fase peningkatan, *beads* sel amobil *B. licheniformis* KGEB16 masih mampu menghasilkan bioenergi secara berkelanjutan sepanjang periode pengamatan. Stabilitas aktivitas biologis sel amobil semacam ini sangat bergantung pada kondisi matriks imobilisasi dan jenis mikroorganisme yang digunakan, sebagaimana ditunjukkan oleh Mahmoudnia (2024) pada penelitian aktivitas *B. licheniformis* yang diamobilisasi untuk produksi enzim.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Beads sel amobil *Bacillus licheniformis* KGEB16 dalam sistem MFC pada reusabilitas ketiga menunjukkan pola produksi bioenergi yang terus menurun dari awal hingga akhir pengamatan. Tegangan tertinggi diperoleh pada jam ke-0 sebesar 0,553 V, kemudian turun secara bertahap hingga mencapai 0,117 V pada jam ke-24, dengan total akumulasi tegangan sebesar 3,277 V selama 24 jam. Penurunan ini terjadi dalam dua tahap, yaitu penurunan yang cukup cepat pada jam ke-0 sampai jam ke-8 yang kemungkinan disebabkan oleh penggunaan substrat yang tinggi, kemudian diikuti penurunan yang lebih lambat pada jam ke-8 sampai jam ke-24 akibat terbatasnya difusi substrat ke dalam *beads*. Meskipun terjadi penurunan dibandingkan siklus sebelumnya, sel *B. licheniformis* KGEB16 yang terperangkap dalam matriks natrium alginat masih

mampu mempertahankan aktivitasnya dan tetap menghasilkan tegangan selama 24 jam pada reusabilitas ketiga.

4.2 Saran

Penelitian selanjutnya sebaiknya membandingkan pola produksi bioenergi dari semua siklus reusabilitas (pertama, kedua, dan ketiga) secara menyeluruh agar dapat terlihat dengan jelas bagaimana penurunan kinerja beads dari waktu ke waktu. Selain itu, perlu dilakukan optimasi pada konsentrasi natrium alginat serta kondisi operasional sistem MFC seperti pH, suhu, dan jenis substrat untuk meningkatkan ketahanan beads dan memperpanjang masa penggunaannya. Pengujian pada siklus reusabilitas keempat dan seterusnya juga penting dilakukan untuk mengetahui batas maksimal penggunaan beads sebelum mengalami kerusakan yang signifikan.

5. REFERENSI

- Gadkari, S., Shemfe, M., Sadhukhan, J., & Gu, S. (2021). Understanding the interdependence of operating parameters in microbial fuel cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(15), 8777–8787.
- Garbini, G. B., Caracciolo, A. B., & Grenni, P. (2023). Electroactive bacteria in natural ecosystems and their applications in microbial fuel cells for bioremediation: A review. *Microorganisms*, 11(5), 1255.
- Guerrero-Rangel, N., Hernández-Guerrero, C., Trejo-Ramírez, J., Alvarado-Lassman, A., & Juárez-Barojas, I. (2021). Thermophilic microbial fuel cells: A review of advances and challenges. *Energies*, 14(18), 5884.
- Hadiyanto, H., Christwardana, M., Pratiwi, W. Z., Purwanto, P., Sudarno, S., Haryani, K., & Hoang, A. T. (2022). Response surface optimization of microalgae microbial fuel cell (MMFC) enhanced by yeast immobilization for bioelectricity production. *Chemosphere*, 287, 132275.
- Hamdani, S., Oktadiana, L., & Astriany, D. (2019). Analisis Fragmen DNA dari Bakteri *Pseudomonas fluorescens* Sebelum dan Sesudah Amobilisasi dalam K-Karagenan. *Kartika: Jurnal Ilmiah Farmasi*, 6(2), 65-69.
- Ibrahim, B., Uju, & Mukti, A. C. (2019). Densitas Biofilm pada Elektroda Berpengaruh Positif terhadap Produksi Biolistrik Microbial Fuel Cells Limbah Cair Perikanan. *JPHPI*, 22(1), 71–79.
- Irdawati, I. (2019). Keanekaragaman Bakteri Termoxilanolitik Dari Habitat Air Panas Solok Selatan Dan Potensi Nnya Sebagai Aditif PULP. *Tesis doctoral*. Universitas Andalas.
- Light, S. H., Su, L., Rivera-Lugo, R., Cornejo, J. A., Louie, A., Lavarone, A. T., Ajo-Franklin,

- C, M., & Portnoy, D. A. (2018). A flavin-based extracellular electron transfer mechanism in diverse Gram-positive bacteria. *Nature*, 562, 140–144.
- López-Gallego, F., Guisán, J. M., & Betancor, L. (2013). *Glutaraldehyde-Mediated Protein Immobilization*. Dalam *Immobilization of Enzymes and Cells: Third Edition*. 33–41.
- Mahmoudnia, F. (2024). Comparison Of The Synthesis Of The Alpha-Amylase Enzyme By The Native strain *Bacillus licheniformis* In Immobilized And Immersed Cells. *Iranian Journal of Microbiology*, 16(6), 827–834.
- Neethu, B., Bhowmick, G. D., & Ghangrekar, M. M. (2020). Improving performance of microbial fuel cell by enhanced bacterial-anode interaction using sludge immobilized beads with activated carbon. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 285–292.
- Nuritasari, D., Sarjono, P. R., & Aminin, A. L. N. (2017). Isolasi Bakteri Termofilik Sumber Air Panas Gedongsongo Dengan Media Pengaya MB (Minimal Broth) dan TS (Taoge Sukrosa) serta Identifikasi Fenotip dan Genotip. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 20(2), 84–91.
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533–1543.
- Purnama, W. A., Kirom, M. R., & Qurthobi, A. (2020). Analisis Pengaruh Temperatur Dengan Substrat Lumpur Sawah Terhadap Produksi Arus Listrik Microbial Fuel Cell. *e-Proceeding of Engineering*, 7(1), 1172–1177.
- Summaiati, T. (2024). Amobilisasi Kultur Campuran Bakteri Termofilik Pada Variasi Konsentrasi Alginat Dalam Produksi Enzim Xilanase. *Skripsi*. Padang: Universitas Negeri Padang.
- Syafitri, R., & Putri, E. (2022). Masalah Global Warming dan Hubungannya Dengan Penggunaan Bahan Bakar Fosil. *Jurnal Bakti Sosial*, (1), 14-22.
- Uthami, F. N., & Irdawati. (2024). Analisis Karakteristik Pola Pertumbuhan Bakteri Termofilik Isolat MS-17 Dari Sumber Air Panas Mudiak Sapan. *Jurnal Tambusai*, 8(2), 17109–17114.