

**OPTIMASI KONSENTRASI NATRIUM ALGINAT TERHADAP
AKTIVITAS BIOELEKTROGENIK *Bacillus licheniformis* strain KGE16
AMOBILISASI PADA SISTEM *MICROBIAL FUEL CELL* (MFC)**



**FAZDKIA OKTRIANI PUTRI
NIM. 22032068/2022**

**DEPARTEMEN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2026**

**OPTIMASI KONSENTRASI NATRIUM ALGINAT TERHADAP
AKTIVITAS BIOELEKTROGENIK *Bacillus licheniformis* strain KGE16
AMOBILISASI PADA SISTEM *MICROBIAL FUEL CELL* (MFC)**

SKRIPSI

*Diajukan sebagai salah satu persyaratan guna memperoleh gelar
Sarjana Sains*



**Oleh:
FAZDKIA OKTRIANI PUTRI
NIM. 22032068/2022**

**PROGRAM STUDI BIOLOGI
DEPARTEMEN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2026**

PERSETUJUAN SKRIPSI

OPTIMASI KONSENTRASI NATRIUM ALGINAT TERHADAP AKTIVITAS BIOELEKTROGENIK *Bacillus licheniformis* strain KGE16 AMOBILISASI PADA SISTEM *MICROBIAL FUEL CELL* (MFC)

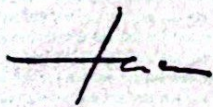
Nama : Fazdkia Oktriani Putri
NIM/TM : 22032068/2022
Program Studi : Biologi
Jurusan : Biologi
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Padang, 8 Mei 2026

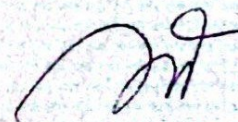
Disetujui Oleh:

Mengetahui,
Kepala Departemen Biologi

Pembimbing



Dr. Dwi Hilda Putri, S.Si., M.Biomed
NIP. 197508152006042001



Dr. Irdawati, M.Si
NIP. 19710430200122001

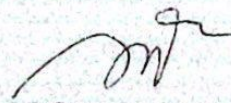
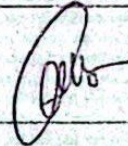
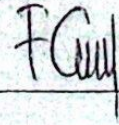
PENGESAHAN LULUS UJIAN SKRIPSI

Nama : Fazdkia Oktriani Putri
NIM/TM : 22032068/2022
Program Studi : Biologi
Departemen : Biologi
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

OPTIMASI KONSENTRASI NATRIUM ALGINAT TERHADAP AKTIVITAS BIOELEKTROGENIK *Bacillus licheniformis* strain KGE16 AMOBILISASI PADA SISTEM *MICROBIAL FUEL CELL* (MFC)

Dinyatakan lulus setelah dipertahankan di depan Tim Penguji Skripsi
Program Studi Biologi, Departemen Biologi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Padang

Padang, 8 Mei 2026

Tim Penguji	Nama	Tanda Tangan
Ketua	: Dr. Irdawati, M.Si.	
Anggota	: Siska Alicia Farma, S.Pd, M. Biomed	
Anggota	: Fadilaturahmah, M.Si.	

SURAT PERNYATAAN TIDAK PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fazdkia Oktriani Putri
NIM/TM : 22032068/2022
Program Studi : Biologi
Departemen : Biologi
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dengan ini menyatakan bahwa, skripsi saya yang berjudul “**Optimasi Konsentrasi Natrium Alginat terhadap Aktivitas Bioelektrogenik *Bacillus licheniformis* strain KGEB16 Amobilisasi pada Sistem Microbial Fuel Cell (MFC)**” adalah benar hasil karya sendiri, bukan hasil plagiat dari karya orang lain. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya yang dituliskan dan diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti aturan penulisan karya ilmiah yang benar.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan rasa tanggung jawab sebagai anggota masyarakat ilmiah.

Diketahui oleh,
Kepala Departemen Biologi



Dr. Dwi Hilda Putri, S.Si., M.Biomed.
NIP. 197508152006042001

Padang, 4 Mei 2026
Saya yang menyatakan,



Fazdkia Oktriani Putri
NIM. 22032068

**Optimasi Konsentrasi Natrium Alginat terhadap Aktivitas Bioelektrogenik
Bacillus licheniformis strain KGE16 Amobilisasi pada Sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC)**

Fazdkia Oktriani Putri

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan energi listrik di Indonesia menuntut pengembangan teknologi yang ramah lingkungan. *Microbial Fuel Cell* (MFC) merupakan sistem yang memanfaatkan aktivitas mikroba untuk menghasilkan listrik dari senyawa organik. Salah satu mikroba yang berpotensi sebagai bioelektrogenik dalam sistem MFC adalah *Bacillus licheniformis* strain KGE16. Amobilisasi menggunakan natrium alginat dapat meningkatkan efisiensi, kinerja, dan stabilitas bakteri. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi optimum Na-alginat terhadap aktivitas bioelektrogenik *B. licheniformis* strain KGE16 yang diamobilisasi pada sistem MFC.

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) dengan 5 perlakuan konsentrasi Na-alginat (2%, 3%, 4%, 5%, 6%) dan 5 ulangan. Penelitian dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi, Departemen Biologi, FMIPA, Universitas Negeri Padang. Isolat *B. licheniformis* strain KGE16 diamobilisasi dengan Na-alginat yang diaplikasikan pada sistem MFC. Pengukuran tegangan listrik dilakukan setiap 2 jam selama 24 jam. Data tegangan listrik dianalisis dengan uji ANOVA dan uji lanjut DMRT dengan taraf 5%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi Na-alginat berpengaruh nyata terhadap aktivitas bioelektrogenik *B. licheniformis* strain KGE16. Konsentrasi optimum diperoleh pada Na-alginat 5% dengan tegangan listrik tertinggi sebesar 0,8924 V pada jam ke-20. Pola produksi listrik mengalami peningkatan hingga mencapai puncak pada jam ke-20. Kemudian menurun secara stabil hingga jam ke-24. Konsentrasi 5% menghasilkan karakteristik *beads* yang bulat, padat, dan stabil, sehingga mampu mempertahankan kepadatan sel serta mendukung difusi substrat dan transfer elektron secara optimal.

Kata kunci: Aktivitas bioelektrogenik, amobilisasi, *Bacillus licheniformis*, *Microbial Fuel Cell*, natrium alginat.

Optimization of Sodium Alginate Concentration on the Bioelectrogenic Activity of Immobilized *Bacillus licheniformis* strain KGEB16 in a Microbial Fuel Cell (MFC) System

Fazdkia Oktriani Putri

ABSTRACT

The increasing demand for electrical energy in Indonesia drives the development of environmentally friendly technologies. *Microbial Fuel Cell* (MFC) is a bioelectrochemical system that utilizes microbial activity to generate electricity from organic compounds. One of the microorganisms with potential bioelectrogenic capabilities in MFC systems is *Bacillus licheniformis* strain KGEB16. Immobilization using sodium alginate can improve the efficiency, performance, and stability of bacterial cells. This study aimed to determine the optimum concentration of sodium alginate on the bioelectrogenic activity of immobilized *B. licheniformis* strain KGEB16 in an MFC system.

This study was conducted using an experimental method with a Completely Randomized Design (CRD) consisting of five treatments of sodium alginate concentrations (2%, 3%, 4%, 5%, 6%) and five replications. The experiment was carried out at the Microbiology Laboratory, Department of Biology, FMIPA, Padang State University. The bacterial isolate was immobilized using sodium alginate and applied in the MFC system. Voltage measurements were performed every 2 hours for 24 hours. The data were analyzed using ANOVA test and DMRT further test with a level of 5%.

The results showed that sodium alginate concentration had a significant effect on the bioelectrogenic activity of *B. licheniformis* strain KGEB16. The optimum concentration was 5%, which produced the highest voltage of 0.8924 V at the 20th hour. The electricity production increased until reaching its peak at the 20th hour and then gradually declined until the 24th hour. This concentration 5% resulted in round, compact, and stable beads, supporting cell density, substrate diffusion, and electron transfer.

Keywords: Bioelectrogenic activity, immobilization, *Bacillus licheniformis*, Microbial Fuel Cell, sodium alginate.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta karunia-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan penelitian dan menyelesaikan skripsi ini yang berjudul **“Optimasi Konsentrasi Natrium Alginat Terhadap Aktivitas Bioelektrogenik *Bacillus licheniformis* strain KGE16 Amobilisasi Pada Sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC)”**. Shalawat beriring salam untuk Nabi Muhammad SAW sebagai junjungan umat seluruh alam.

Penulisan skripsi ini bertujuan untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Sarjana Sains di Departemen Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Padang. Dalam menyelesaikan skripsi ini tentunya tidak terlepas dari doa, bimbingan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, melalui kata pengantar ini, penulis sampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Dwi Hilda Putri, S.Si., M. Biomed selaku Ketua Departemen Biologi, yang telah memberikan nasihat dan motivasi selama penulis belajar dan beraktivitas di Departemen Biologi.
2. Ibu Dr. Irdawati, M.Si., selaku dosen pembimbing yang dengan penuh kesabaran dan perhatian meluangkan waktu untuk memberikan arahan serta nasihat kepada penulis selama penyelesaian skripsi.
3. Ibu Siska Alicia Farma, S.Pd., M. Biomed dan Ibu Fadilaturahmah, M.Si., selaku dosen penguji yang telah membantu dan memberikan saran serta kritikan untuk kesempurnaan penulisan skripsi ini.
4. Kedua orang tua tercinta, Bapak Ahmad Junial dan Ibu Deswana Suri, terima kasih atas setiap doa yang dipanjatkan, setiap nasihat yang diberikan, dan setiap

pengorbanan yang mengiringi langkah penulis hingga mampu menyelesaikan dan meraih gelar sarjana. Semoga Allah SWT membalas kebaikan dan ketulusan dengan keberkahan dan kesehatan sepanjang usia. Aamiin.

5. Saudara kandung penulis, Abang Fajar Aidilisyah dan Uda Fauzi Ahmad, beserta ipar Kakak Nindi Widya Putri dan teta Atika Sundari, yang selalu memberikan dukungan, bantuan, dan semangat selama proses penyusunan skripsi ini.
6. Keponakan tersayangnya buya, Gharvi, Hawa dan Adam, yang selalu membuat kelucuan-kelucuan sehingga penulis senang dan semangat untuk mengerjakan skripsi ini sampai selesai.
7. Tim Hebat MFC, Shella, Chetia, Dinda, Silvy dan Echy, yang telah memberikan bantuan, dukungan dan kerjasama selama penelitian hingga saat ini.
8. Teman seperjuangan, Muthmainnah, Desrinda dan Nabilla, yang senantiasa membantu serta memberikan semangat dan dukungan selama masa perkuliahan.
9. Semua pihak yang terlibat, berpartisipasi dan memberikan dukungan kepada penulis selama perkuliahan sampai penyelesaian skripsi.

Semoga bantuan yang Bapak/Ibu serta rekan-rekan berikan, bernilai ibadah dan mendapatkan pahala dari Allah SWT. Penulis berharap skripsi ini bisa memberikan manfaat bagi semua orang yang membacanya.

Padang, 17 April 2026

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Tujuan Penelitian	5
D. Hipotesis Penelitian	6
E. Manfaat Penelitian	6
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	7
A. <i>Microbial Fuel Cell</i> (MFC)	7
B. Bioelektrogenik	9
C. Bakteri <i>Bacillus licheniformis</i>	11
D. Amobilisasi Sel dengan Natrium Alginat	14
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	17
A. Jenis Penelitian	17
B. Waktu dan Tempat Penelitian	17
C. Alat dan Bahan	17
D. Rancangan Penelitian	18
E. Prosedur Penelitian	18
F. Analisis Data	21
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	23
A. Hasil	23
B. Pembahasan	26
BAB V. PENUTUP	35
A. Kesimpulan	35
B. Saran	35

DAFTAR PUSTAKA	36
LAMPIRAN.....	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. <i>Dual Chamber</i>	8
2. Prinsip Kerja MFC	9
3. Konstruksi MFC	20
4. Diagram Tegangan Listrik Jam Ke-20	23
5. Pola Produksi Tegangan Listrik <i>B. licheniformis strain KGEB16</i>	24

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Perhitungan Standar Deviasi	43
2. Hasil Pengukuran Tegangan Listrik <i>B. licheniformis strain</i> KGEB16	43
3. Hasil Uji ANOVA dan Uji DMRT	45
4. Dokumentasi Penelitian	46

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Energi listrik merupakan komponen penting dalam menunjang berbagai aktivitas manusia, mulai dari kebutuhan rumah tangga hingga sektor industri dan transportasi. Namun, seiring dengan terbatasnya sumber daya pembangkit listrik, diperlukan pemanfaatan energi yang efisien (Ardiansyah & Wahyono, 2022). Permintaan listrik di Indonesia terus meningkat, penggunaan listrik nasional diperkirakan naik sekitar 4,7-4,9% per tahun hingga 2030 (Setyawati & Setiawan, 2024). Skala kebutuhan energi yang besar ini menuntut pengembangan teknologi pembangkit yang ramah lingkungan. Salah satu inovasi yang potensial adalah *Microbial Fuel Cell* (MFC) teknologi energi terbarukan yang memanfaatkan aktivitas mikroba untuk menghasilkan energi listrik (Indriyani & Efendi, 2025).

Microbial Fuel Cell (MFC) adalah teknologi bioelektrogenik yang menggunakan aktivitas katalik mikroba untuk mengubah energi kimia yang tersimpan di dalam substrat menjadi energi listrik. Prinsip bioelektrogenik MFC melibatkan mikroba mengoksidasi substrat organik menghasilkan proton dan elektron. Elektron mengalir menuju elektroda melalui rangkaian eksternal dan menghasilkan arus, sementara anoda dan katoda adalah permukaan padat tempat reaksi redoks terjadi untuk menghasilkan listrik (Indriyani & Efendi, 2025). Sistem MFC pada dasarnya tidak dapat dipisahkan dari konsep bioelektrogenik, karena keberhasilan konversi energi dalam MFC sepenuhnya bergantung pada kemampuan mikroba dalam melakukan transfer elektron ekstraseluler (Logan *et al.*, 2006).

Bioelektrogenik merupakan kemampuan mikroba untuk menghasilkan elektron melalui proses metabolisme seluler yang selanjutnya ditransfer ke akseptor elektron eksternal sehingga menghasilkan listrik. Aktivitas bioelektrogenik mengacu pada tingkat kemampuan mikroba dalam melaksanakan transfer elektron ekstraseluler (*extracellular electron transfer*) (Logan *et al.*, 2006). Aktivitas ini berkaitan dengan laju metabolisme sel, efisiensi proses oksidasi substrat, serta kapasitas sel dalam menghantarkan elektron menuju elektroda. Aktivitas bioelektrogenik berperan penting dalam menentukan besarnya arus, tegangan, dan densitas daya yang dihasilkan, karena energi listrik yang terbentuk berasal dari aliran elektron yang dihasilkan melalui aktivitas metabolik mikroba pada anoda (Logan, 2009). Aktivitas bioelektrogenik tersebut merupakan faktor penentu dalam proses ini, sehingga pemilihan mikroba yang efisien menjadi sangat penting. Salah satu jenis mikroba yang dapat dimanfaatkan dalam MFC adalah bakteri termofilik.

Bakteri termofilik adalah bakteri yang menghasilkan aktivitas bioelektrogenik yang dapat bertahan hidup pada suhu tinggi 45°C hingga 88°C, karena memiliki protein yang tahan terhadap panas dan juga tidak mudah denaturasi (Firliani *et al.*, 2015). Bakteri ini berpotensi untuk diaplikasikan dalam sistem MFC karena memiliki kemampuan elektrogenik, yaitu mampu memanfaatkan bahan organik dalam substrat sehingga menghasilkan listrik (Fu *et al.*, 2015).

Salah satu spesies bioelektrogenik adalah *Bacillus licheniformis*, bakteri yang memiliki beberapa karakteristik yaitu bersifat Gram positif, berbentuk batang (basil), pembentuk spora, dan anaerob fakultatif. Kemampuannya dalam membentuk endospora menjadikan bakteri ini mampu bertahan pada kondisi lingkungan ekstrem, sehingga berpotensi besar dimanfaatkan sebagai

bioelektrogenik (Yuliana *et al.*, 2022). Penelitian Irdawati, (2016) berhasil mengisolasi bakteri *B. licheniformis strain* KGEB16 dari sumber air panas Mudiak Sapan. Selain itu, penelitian Uthami & Irdawati, (2024) memaparkan bahwa bakteri *B. licheniformis* mampu memproduksi bioelektrogenik dengan hasil tegangan 0,6960 V.

Bakteri ini secara alami mampu menghasilkan elektron, namun kestabilan aktivitas dan efisiensinya pada sistem terbuka sering kali berfluktuasi. Oleh karena itu, diperlukan teknik khusus yang mampu mempertahankan aktivitas sel dalam jangka waktu yang lebih lama. Salah satu strategi efisien untuk mencapai tujuan tersebut adalah melalui penerapan teknik amobilisasi sel mikroba (Logan *et al.*, 2006).

Amobilisasi adalah metode pengurungan sel mikroba secara fisik dalam suatu ruang tertentu sehingga sel-sel tersebut tetap aktif secara katalitik dan dapat digunakan berulang kali (Hassanzadeh *et al.*, 2017). Keuntungan amobilisasi sel diantaranya yaitu memudahkan menguraikan produk, meningkatkan produktivitas, mempermudah pengendalian stabilitas sel, dan memungkinkan penggunaan secara berulang (Riwayati *et al.*, 2012).

Penelitian Mesran *et al.* (2014) menyatakan bahwa amobilisasi mikroba dengan Na-alginat dan *Granular Activated Carbon* (GAC) terbukti dapat meningkatkan kemampuan pembangkitan listrik pada sistem MFC dengan tegangan listrik 0,403 V sedangkan sistem tanpa amobilisasi hanya sekitar 0,217 V. Penelitian Sofiah, (2018) menunjukkan bahwa penggunaan bakteri *Bacillus subtilis* diamobilisasi dengan keraginan yang dapat mempertahankan viabilitas sel mikroba mampu menghasilkan tegangan listrik sebesar 0,39 V. Hasil ini diperkuat oleh

penelitian Gandu *et al.* (2020) bahwa bakteri *Geobacter sulfurreducens* diamobilisasi dengan Na-alginat yang mampu meningkatkan efisiensi transfer elektron menghasilkan tegangan listrik lebih tinggi, yakni 0,5 V, dibandingkan dengan bakteri yang tidak diamobilisasi yang hanya mencapai 0,2 V. Penelitian terbaru yaitu Maulina, (2025) menunjukkan bahwa bakteri termofilik yang diamobilisasi Na-alginat memiliki potensi besar sebagai sistem MFC menghasilkan tegangan tertinggi mencapai 0,798 V.

Amobilisasi pada sistem MFC umumnya menggunakan Na-alginat sebagai matriks karena memiliki beberapa keunggulan, antara lain bersifat tidak beracun terhadap sel, memiliki kompatibilitas yang tinggi, biaya yang relatif murah, serta metode penggunaannya yang sederhana (Adinarayana *et al.*, 2005). Na-alginat merupakan polimer alami yang diperoleh dari alga coklat (*Phaeophyta*), dan tergolong kedalam jenis hidrokoloid, yaitu sistem koloid yang terbentuk oleh polimer organik di dalam air (Cahyono *et al.*, 2021).

Konsentrasi Na-alginat yang digunakan mempengaruhi efisiensi amobilisasi. Optimasi konsentrasi Na-alginat yang diamobilisasi perlu dilakukan karena berpengaruh langsung terhadap stabilitas sel, difusi substrat, serta efisiensi transfer elektron menuju anoda (Adinarayana *et al.*, 2005). Konsentrasi yang tepat dapat meningkatkan kestabilan matriks terhadap kebocoran dan menjaga kelangsungan hidup mikroba. Konsentrasi yang terlalu rendah dapat menyebabkan struktur *beads* kurang stabil dan mudah mengalami degradasi, sedangkan konsentrasi yang terlalu tinggi berpotensi membentuk matriks yang terlalu padat sehingga menghambat perpindahan substrat dan mediator elektron (Rabaey & Verstraete, 2005). Selain itu, perubahan konsentrasi berdampak pada pH, suhu, dan sifat fisik *beads*, seperti

diameter dan kekompakan struktur (Mubarokah, 2018).

Penelitian Hadiyanto *et al.* (2022) mengkaji sistem *Microalgae Microbial Fuel Cell* (MMFC) dengan amobilisasi *Saccharomyces cerevisiae* menggunakan matriks alginat menghasilkan tegangan 0,123 V. Mesran *et al.* (2014) menunjukkan bahwa sel mikroba yang diamobilisasi dalam matriks Na-alginat 4% mencapai tegangan listrik sebesar 0,403 V, jauh lebih tinggi dari sistem tanpa amobilisasi yang hanya 0,217 V. Penelitian Alkotaini *et al.* (2018) menunjukkan bahwa sel mikroba yang diamobilisasi dengan Na-alginat menghasilkan tegangan 0,6 V. Summaiati, (2024) mendukung temuan ini bahwa amobilisasi konsentrasi optimum Na-alginat adalah 5%, yang menghasilkan *beads* terbaik dan mampu bertahan hingga beberapa ulangan.

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka perlu dilakukan penelitian mengenai **“Optimasi Konsentrasi Natrium Alginat Terhadap Aktivitas Bioelektrogenik *Bacillus licheniformis* strain KGEB16 Amobilisasi Pada Sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC)”**.

B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi Na-alginat terhadap aktivitas bioelektrogenik *B. licheniformis* strain KGEB16 amobilisasi pada sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC)?
2. Bagaimana pola produksi tegangan listrik *B. licheniformis* strain KGEB16 amobilisasi selama 24 jam?
3. Bagaimana karakteristik *beads* pada Konsentrasi Na-alginat sebagai bahan amobilisasi *B. licheniformis* strain KGEB16?

C. Tujuan Penelitian

1. Menentukan konsentrasi optimum Na-alginat terhadap aktivitas bioelektrogenik *B. licheniformis strain* KGEB16 amobilisasi pada sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC).
2. Menganalisis pola produksi tegangan listrik *B. licheniformis strain* KGEB16 amobilisasi selama 24 jam
3. Mengetahui karakteristik *beads* pada Konsentrasi Na-alginat sebagai bahan amobilisasi *B. licheniformis strain* KGEB16

D. Hipotesis Penelitian

Konsentrasi Na-alginat berpengaruh terhadap aktivitas bioelektrogenik *Bacillus licheniformis strain* KGEB16 amobilisasi pada sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC).

E. Manfaat Penelitian

1. Menambah wawasan dan ilmu pengetahuan dalam bidang mikrobiologi.
2. Mendapatkan informasi mengenai konsentrasi optimum Na-alginat terhadap aktivitas bioelektrogenik *B. licheniformis strain* KGEB16 amobilisasi pada sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC).
3. Sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

1. Konsentrasi optimum Na-alginat berpengaruh nyata terhadap aktivitas bioelektrogenik *B.licheniformis strain* KGEB16 amobilisasi pada sistem MFC adalah Na-alginat 5% dengan tegangan listrik tertinggi mencapai 0,8924 V.
2. Pola produksi tegangan listrik *B. licheniformis strain* KGEB16 menunjukkan peningkatan secara bertahap hingga mencapai puncak pada jam ke-20, kemudian mengalami penurunan secara stabil hingga jam ke-24.
3. Karakteristik *beads* pada konsentrasi Na-alginat 5% menghasilkan bentuk bulat, tekstur padat, dan struktur yang stabil sehingga mampu mempertahankan kepadatan sel serta mendukung difusi substrat dan transfer elektron secara optimal dalam sistem *Microbial Fuel Cell*.

B. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji kestabilan produksi listrik dalam jangka panjang pada konsentrasi Na-alginat 5%, untuk mengetahui daya tahan *beads* terhadap aktivitas bioelektrogenik *B. licheniformis strain* KGEB16 amobilisasi pada sistem MFC.

DAFTAR PUSTAKA

- Adinarayana, K., Jyothi, B., & Ellaiah, P. (2005). Production of alkaline protease with immobilized cells of *Bacillus Subtilis* PE-11 in various matrices by entrapment technique. *AAPS PharmSciTech*, 6(3), 391-397.
- Alkotaini, B., Tinucci, S. L., Robertson, S. J., Hasan, K., Minter, S. D., & Grattieri, M. (2018). Alginate-encapsulated bacteria for the treatment of hypersaline solutions in microbial fuel cells. *ChemBioChem*, 19(11), 1162-1169.
- Andriani, P. (2025). Produksi bioenergi terbarukan dengan microbial fuel cell (MFC) menggunakan bakteri termofilik yang di amobilisasi. *Skripsi*. Padang: Universitas Negeri Padang, Indonesia.
- Ardiansyah, G., & Wahyono, E. B. (2022). Pemanfaatan daya listrik bagi pelanggan tegangan menengah. *Jurnal Sains & Teknologi Fakultas Teknik Universitas Darma Persada*, 12(1), 19-27.
- Bahri, S., Fudiantara, F., Dewi, Y., Tamami, F., Hanadayani, T., & Hermansyah, H. (2021). Eksplorasi Bakteri Termofilik dari Sumber Air Panas Aik Sebau Di Kawasan Taman Nasional Gunung Rinjani Kabupaten Lombok Timur. *Jurnal Pijar MIPA*, 17(5) 235-241.
- Bashan, Y., Hernandez, J. P., Leyva, L. A., & Bacilio, M. (2002). Alginate microbeads as inoculant carriers for plant growth-promoting bacteria. *Biology and fertility of soils*, 35(5), 359-368.
- Bilal, M., & Asgher, M. (2015). Dye decolorization and detoxification potential of Ca-alginate beads immobilized manganese peroxidase. *BMC biotechnology*, 15(1), 111.
- Box, G. E. P., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. (2005). *Statistics for experimenters: Design, innovation, and discovery*. John Wiley & Sons.
- Budiarto, A., Setiasih, S., Rahmat, W., Sumi, H., Asep, S., Tresye, U. 2006. Microbial fuel cell dengan mediator ter-immobilisasi menggunakan kultur *Eschericia coli* UICC B-15. *Skripsi*. Universitas Indonesia: Depok.
- Cahyono, K., Nurcahyani, E., Wahyuningsih, S., Irawan, B., & Sumardi (2021). Imobilisasi Bakteri Asam Laktat Dengan Menggunakan Alginat. *Jurnal Ilmiah Farmasi Farmasyifa*, 4(1), 33-40.
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology advances*, 25(5), 464-482.
- Ertan, F., Yagar, H., & Balkan, B. (2007). Optimization of α -amylase

immobilization in calcium alginate beads. *Preparative biochemistry & biotechnology*, 37(3), 195-204.

Firliani, W., Agustien, A., & Febria, F. A. (2015). Karakterisasi Bakteri Termofilik Penghasil Enzim Protease Netral. *Jurnal Biologi UNAND*, 4(1).

Fu, Q., Fukushima, N., Maeda, H., Sato, K., & Kobayashi, H. (2015). Bioelectrochemical analysis of a hyperthermophilic microbial fuel cell generating electricity at temperatures above 80°C *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 79(7), 1200–1206.

Gandu, V., Kalita, D., dan Sahoo, P. K. (2020). Electricity generation from *Geobacter sulfurreducens* in microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry*, 131, 107362.

Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research*. John Wiley & Sons.

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.

Haq, I. U., Ali, S., & Javed, M. M. (2003). Production of palatinose using immobilized cells of *Erwinia* sp. *Process Biochemistry*, 38(8), 1231–1236.

Hassanzadeh, M., Bakhshi, M., & Gharibi, D. (2017). Immobilization of microorganisms for biotechnological applications. *Journal of Applied Microbiology*, 123(5), 1278–1290.

Ibnu, N. A., Khairunnisa, S., Karimah, U., Salsabillah, S. S., & Hafizhoh, N. B. (2025). Mini Review: Potensi Bio-Nanokomposit Elektroda Ni/N Berbasis Limbah Ampas Tahu Untuk Microbial Fuel Cell (MFC). *Journal of Engineering Environtmental Energy and Science*, 4(2), 89-98.

Indriyani, Y. A., & Efendi, R. (2025). Microbial fuel cells (MFC): Sebuah teknologi untuk biokonversi energi kimia pada limbah organik menjadi biolistrik. *Sultra Journal of Mechanical Engineering (SJME)*, 4(1), 10-21.

Indriyani, Y. A., Rusmana, I., Anwar, S., Djajakirana, G., & Santosa, D. A. (2023). Harvesting bioelectricity from Microbial Fuel Cells (MFCs) powered by electroactive microbes. *Journal Lampung Agricultural Engineering*, 12(3), 583-596.

Irdawati, I., Putri, D. D., Syamsuardi, S., Agustien, A., & Rilda, Y. (2019, October). Characterization extrinsic factors of immobilized cells thermoxylanolytic bacteria in producing xylanase. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1317, No. 1, p. 012075). IOP Publishing.

- Irdawati, I., Putri, D. H., Advinda, L., & Yusrizal, Y. (2025). AKTIVITAS SPESIFIK XILANASE BAKTERI TERMOFILIK AMOBIL SSA2 DENGAN VARIASI SUMBER KARBON. *Jurnal Agrotek Tropika*, 13(1), 59-65.
- Irdawati, I., Putri, I. S., Syamsuardi, S., Agustien, A., & Rilda, Y. (2018). The Thermophilic Bacterial Growth Curve. *Bioscience*, 2(2), 58.
- Irdawati, I., Sofiyana, A., Advinda, L., Fiffendy, M., Salvia, S., Syamsuardi, S., & Yahya, Y. (2021, June). Optimization of agricultural waste substrate as an alternative medium for xylan in producing xylanase enzymes by thermophilic bacteria. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1940, No. 1, p. 012052). IOP Publishing.
- Irdawati, Syamsuardi, Anthoni, A., Yetria, R., & Heffi, A. (2016). Profil pertumbuhan bakteri termofilik penghasil xylanase alkali dari sumber air panas Mudiak Sapan, Solok Selatan. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan dan Sains Biologi 2*. STKIP PGRI Sumatera Barat.
- Istiqamah, M., (2015). Amobilisasi Sel Bakteri Termofilik Dengan Matrik Alginat Untuk Produksi Amilase. *Disertasi*, Universitas Andalas.
- Kampmann, M., & Stock, D. (2004). Reverse gyrase has heat-protective DNA chaperone activity independent of supercoiling. *Nucleic Acids Research*, 32(12), 3537-3545.
- Konsoula, Z., & Liakopoulou-Kyriakides, M. (2004). Hydrolysis of starches by the action of an α -amylase from *Bacillus subtilis*. *Process Biochemistry*, 39(11), 1745–1749.
- Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012). Alginate: Properties and biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 37(1), 106–126.
- Lehmann, M., Prohaska, C., Zeldes, B., Poehlein, A., Daniel, R., & Basen, M. (2023). Adaptive laboratory evolution of a thermophile toward a reduced growth temperature optimum. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1265216.
- Li, D. C., Yang, F., Lu, B., Chen, D. F., & Yang, W. J. (2012). Thermotolerance and molecular chaperone function of the small heat shock protein HSP20 from hyperthermophilic archaeon, *Sulfolobus solfataricus* P2. *Cell stress and chaperones*, 17(1), 103-108.
- Logan, B. E. (2009). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology*, 7(5), 375-381.
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguia, J., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). *Microbial fuel cells: methodology and technology*. *Environ Sci Technol*. 40:5181–5192.

- Logan, B. E., Rossi, R., Ragab, A. A., & Saikaly, P. E. (2019). Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. *Nature Reviews Microbiology*, 17(5), 307-319.
- Lovley, D. R. (2006). Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches. *Current opinion in biotechnology*, 17(3), 327-332.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Stahl, D. A., & Clark, D. P. 2012. A brief journey to the microbial world. Brock biology of microorganisms, 13th edition. Benjamin Cummings. 25-30.
- Mahajan, R., Gupta, V. K., & Sharma, J. (2010). Comparison and suitability of gel matrix for entrapping higher content of enzymes for commercial applications. *Indian journal of pharmaceutical sciences*, 72(2), 223.
- Martinsen, A., Skjåk-Bræk, G., & Smidsrød, O. (1989). Alginate as immobilization material. *Biotechnology and Bioengineering*, 33(1), 79–89.
- Martinsen, A., Skjåk-Bræk, G., & Smidsrød, O. (1992). Alginate as immobilization material: Correlation between chemical and physical properties. *Biotechnology and Bioengineering*, 39(2), 186–194.
- Maulina A. R. (2025). Amobilisasi Bakteri Termofilik Sebagai Microbial Fuel Cell Dalam Menghasilkan Biolistrik. *Skripsi*. Padang: Universitas Negeri Padang, Indonesia
- Mawati, S. D., Harpeni, E., & Fidyandini, H. P. (2021). Skrining Bakteri Termofilik Potensial Amilolitik dari Sumber Air Panas Way Belerang Kalianda Lampung Selatan. *Journal of Aquatropica Asia*, 6(1), 1-7.
- Mesran, M, H., Mamat, S., Pang, Y, R., Hong, T, Y., Muneera Z, Ghazali, N, F, Md., Ali, Md, A., & Mahmood, N, A, N., (2014). Preliminary Studies on Immobilized Cells-Based Microbial Fuel Cell System on Its Power Generation Performance. *Journal of Asian Scientific Research* 4(8), 428-435
- Miskiyah, M., Juniawati, J., & Widaningrum, W. (2020). Optimasi Pati-Alginat Sebagai Bahan Pengkapsul Bakteri Probiotik Terhadap Karakteristik Beads. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 9(1), 24-29.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Mubarokah, I. (2018). Pengaruh Konsentrasi Alginat Terhadap Karakteristik Sel *Pseudomonas Fluorescens* Terimobilisasi Untuk Produksi Biodiesel. *Disertasi*. Universitas Brawijaya.

- Mulyani, D. R., Dewi, E. N., & Kurniasih, R. A. (2017). Karakteristik es krim dengan penambahan alginat sebagai penstabil. *Jurnal Pengolahan dan Bioteknologi Hasil Perikanan*, 6(3), 36-42.
- Nafiah, N. 2021. Pengaruh Imobilisasi Bakteri Uncultured *Pseudomonas* Sp.Clone 034571 018 Dan *Bacterium* Strain Bs2049 Menggunakan Matriks Karagenan Pada Nilai Elektrisitas Dalam Sistem *Single Chamber Microbial Fuel Cell* Dengan Variasi Penambahan Fe (III). *Skripsi*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember: Surabaya.
- Novianti, A. K., Nugrahani, P., & Moeljani, I. R. (2021). Pengaruh Konsentrasi Alginat Terhadap Viabilitas Tss (True Shallot Seed) Enkapsulasi Secara In Vitro. In *Seminar Nasional Agroteknologi UPN" Veteran" Jawa Timur* (109-115).
- Nugroho, I., Amaliyah, R. I. U., & Kirom, M. R. (2020). Pengaruh lama pembusukan nasi basi dan rasio volume variasi substrat terhadap produksi energi listrik pada sistem MFC. *e-Proceeding of Engineering*, 7(1), 1230–1237.
- 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 Aplikas*. 20(2), 84-91
- Paisal, P., Triwahyu, E., & Nirwanto, H. (2023). Eksplorasi Bakteri *Bacillus* spp. Pada Perakaran Tanaman Kentang (*Solanum tuberosum* L.) Sebagai Agensia Pengendali Hayati Patogen *Fusarium* Sp. Asal Lahan Wonokitri Kabupaten Pasuruan Jawa Timur. *Jurnal Pertanian Agros*, 25(4), 4028-4041.
- Parkash, A. (2015). Design and Fabrication of a Double Chamber *Microbial Fuel Cells* for Voltage Generation from Biowaste. *Bioprocessing & Biotechniques*. 5(8), 1-4.
- Pramiadi, D., Yulianti, E., & Rakhmawati, A. (2014). Isolasi Dan Uji Aktivitas Enzim Lipase Termotabil Dari Bakteri Termofilik Pasca Erupsi Merapi. *Jurnal Sains Dasar*, 3(1).
- 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.
- Putri, Dilla Dwi. (2018). Karakterisasi Xilanase Bakteri Termofilik Amobil Dari Sumber Air Panas Sapan Sungai Aro Solok Selatan. *Skripsi*. Universitas Negeri Padang.
- Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: Novel biotechnology for

- energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23(6), 291–298.
- Radeef, A. Y. & Najim, A. A. (2024). Microbial Fuel Cell : The Renewable and Sustainable Magical System for Wastewater Treatment and Bioenergy Recovery. *Energy*, 360(1), 100001.
- Ramadhani, M. I., & Mursadin, A. (2020). Pengaruh variasi elektroda tembaga dan seng terhadap produktivitas listrik *Microbial Fuel Cell* (MFC) pada substrat limbah cair air rebusan mie instan. *Scientific Journal of Mechanical Engineering*, 5(1), 23–36.
- Ramakrishna, S. V., & Prakasham, R. S. (1999). Microbial fermentations with immobilized cells. *Current Science*, 77(1), 87-100.
- Riwayati, I., Hartati, I., & Kurniasari, L. (2012). Teknologi Imobilisasi Sel Mikroorganisme Pada Produksi Enzim Lipase. In *Prosiding Seminar Sains Nasional Dan Teknologi* 1(1).
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. *Journal of Power Sources*, 356, 223-571.
- Setyawati, D., & Setiawan, D. (2024). *Ekspansi energi bersih Indonesia dapat mendorong pertumbuhan dan kesetaraan*. Ember.
- Sinaga, D. H., Suyati, L., & Aminin, A. L. N. (2014). Studi pendahuluan pemanfaatan whey tahu sebagai substrat dan efek luas permukaan elektroda dalam sistem *Microbial Fuel Cell*. *Jurnal Sains dan Matematika*, 22(2), 30-35.
- Singh, R., Kumar, A., & Sharma, P. (2024). The Critical Role of Salt Bridge in Proton Transfer and Performance of Two-Chamber Microbial Fuel Cells. *Journal of Bioelectrochemistry and Biofuel*, 10(1), 1-10.
- Smidsrød, O., & Skjåk-Bræk, G. (1990). Alginate as immobilization matrix for cells. *Trends in Biotechnology*, 8(3), 71-78.
- Soeka, Y. S., Rahayu, S. H., Setianingrum, N., & Naiola, E. (2011). Kemampuan *bacillus licheniformis* dalam memproduksi enzim protease yang bersifat alkalin dan termofilik. *Artikel. Media Litbang Kesehatan*, 21(2), 1-7.
- Sofiah, F., Bustami, I., dan Desniar. (2018). Amobilisasi *Bacillus subtilis* dengan karaginan pada anoda Microbial Fuel Cell menggunakan limbah pemindangan ikan. *Skripsi*.
- Steel, R. G. D., & Torrie, J. H. (1995). *Principles and procedures of statistics: A biometrical approach* (3rd ed.). McGraw-Hill.

- Sulistiyawati, I., Rahayu, N. L., & Purwitaningrum, F. S. (2020). Produksi biolistrik menggunakan *Microbial Fuel Cell* (MFC) *Lactobacillus bulgaricus* dengan substrat limbah tempe dan tahu. *Majalah Ilmiah Biologi Biosfera: A Scientific Journal*, 37(2), 112–117.
- Summaiati, Titi. (2024). Amobilisasi Kultur Campuran Bakteri Termofilik Pada Variasi Konsentrasi Alginat Dalam Produksi Enzim Xilanase. *Skripsi*. Padang: Universitas Negeri Padang, Indonesia..
- 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.
- Uthami, Feranis Nadia. (2024). Pengaruh Konsorsium Bikultur Bakteri Termofilik dari Aumber Air Panas Mudia Sapan Sebagai Microbial Fuel Cell (MFC) Untuk Menghasilkan Energi Listrik. *Skripsi*. Universitas Negeri Padang.
- Venkatachalam, K., Charoenphun, N., Nitikornwarakul, C., & Lekjing, S. (2025). Effect of Sodium Alginate Concentration on the Physicochemical, Structural, Functional Attributes, and Consumer Acceptability of Gel Beads Encapsulating Tangerine Peel (*Citrus reticulata* Blanco ‘Cho Khun’) Extract. *Gels*, 11(10), 808.
- Yadav, M., Seharawat, N., Singh, M. V., Sharma, A. K., & Kumar, S. (2021). Thermophilic Microbes-based Fuel Cells: an Eco Friendly Approach For Sustainable Energy Production. *Bioremediation For Enviromental Sustainability*. 235-246.
- Yuliana, N., Sarkono, Hidayati, E., & Faturrahman. (2022). Isolasi, karakterisasi, dan identifikasi *Bacillus* spp. berasosiasi Abalon (*Haliotis asinina*). *Samota Journal of Biological Sciences* 1(1), 1-10.
- Zeldes, B. M., Keller, M. W., Loder, A. J., Straub, C. T., Adams, M. W., & Kelly, R. M. 2015. Extremely Thermophilic Microorganisms as Metabolic Engineering Platforms for Production of Fuels and Industrial Chemicals. *Frontiers in Microbiology*. 6, 1209.
- Zilda, D. S., Kusumarini, A., & Chasanah, E. (2008). Penapisan dan Karakterisasi Protease dari Bakteri Termo-Asidofilik P5-A dari Sumber Air Panas Tambarana. *Jurnal Pascapanen dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*, 3(2), 113-121.
- Zheng, Y., Wu, Y., Tang, S., Li, J., Fan, L., & He, W. (2025). Effects of *Bacillus licheniformis* on the water quality, growth performance and bacterial community in *Penaeus vannamei* aquaculture system. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1595680.