



**PEMANFAATAN BAKTERI LIMBAH RUMEN SAPI UNTUK
PRODUKSI ENERGI LISTRIK MENGGUNAKAN SISTEM
*MICROBIAL FUEL CELL (MFC)***

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
program studi Fisika*

SKRIPSI

Oleh

**Diah Meirendi Hutami
191810201075**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN
TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
JURUSAN FISIKA
JEMBER
2023**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Kedua orang tua tercinta, Alm. Jayadi dan Ibu Ratna Wadi Indah Mustika Reni yang selalu memberi semangat, motivasi, terimakasih atas do'a, kasih sayang, dan pengorbanan yang telah diberikan, semoga Allah SWT melimpahkan kasih sayang-Nya pada mereka selalu;
2. Kakak Diana Fitri Pebrianti, kakak Zusilianawati, Adik Raihan Altaf Julio Putra, dan Adik Rakha Azka Julio Putra, yang telah memberikan dukungan, semangat, dan keceriaan;
3. Guru-guru sejak taman kanak-kanak sampai dengan perguruan tinggi, terimakasih atas ilmu yang telah diberikan selama ini;
4. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

MOTTO

“Pengetahuan yang baik adalah yang memberikan manfaat, bukan hanya diingat”

-Imam Syafi'i

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Diah Meirendi Hutami

NIM : 191810201075

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul: *Pemanfaatan Bakteri Limbah Rumen Sapi Untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Sistem Microbial Fuel Cell (MFC)* adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan skripsi ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 21 Juli 2023

Yang menyatakan,

(Materai)

(Diah Meirendi Hutami)

NIM 191810201075

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul *Pemanfaatan Bakteri Limbah Rumen Sapi Untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Sistem Microbial Fuel Cell (MFC)* telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember pada:

Hari :
Tanggal :
Tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas
Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

Drs. Imam Rofi'i, M. Sc.
NIP. 19680508 199201 1 001

Tri Mulyono, S.Si., M.Si.
NIP. 19681002 199802 1 001

Anggota II,

Anggota III,

Agung T. Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D.
NIP. 19681219 199402 1 001

Drs. Yuda Cahyoargo Hariadi, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19620311 198702 1 001

ABSTRACT

As population growth likewise continues to develop, there is a growing need for fuel and energy. So efficient alternative energy is needed at a more affordable price so that it is easily utilized by the community the Microbial Fuel Cell (MFC) system. This study was conducted to determine the effect of variations in substrate concentration and incubation time of bacteria from cow rumen waste on the optimum power density of the Microbial Fuel Cell (MFC) system produced. This study used Dual Chamber Microbial Fuel Cell tool with PEM made of ceramic in as many as 21 chambers consisting of 7 samples with a repetition of 3 times. For variations in substrate concentration, a label was marked on the chamber, namely dilution 1 for 3640 ppm, dilution 2 for 1970 ppm, dilution 3 for 1250 ppm, dilution 4 for 923 ppm, dilution 5 for 693 ppm, dilution 6 for 582 ppm, and 0 ppm.. Each chamber was measured every day for 30 days by polarization method using two digital multimeters. research results were obtained in the form of primary data, namely the strong value of electric current (I) and electric voltage (V) displayed in tables and graphs using Microsoft Excel 2010. The results of this study indicate that the MFC system with the treatment of variations in substrate concentration of cow rumen waste and bacterial incubation time affects the power density produced. The greater the concentration of the substrate, the value of the power density produced increases. This is evidenced in the substrate concentration of 3640 ppm labeled as dilution 1 for 20 days of observation obtained an optimum power density of 864 mW/m² on day 7.

Keywords: Cow Rumen Waste, Ceramic MFC, Power Density, Bacterial Incubation Time

RINGKASAN

Konsumsi bahan bakar dan listrik terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk yang juga terus bertambah. Menyikapi permasalahan tersebut, pemerintah telah mengembangkan beragam jenis energi alternatif di berbagai bidang. Namun, energi alternatif tersebut tidak bisa dinikmati oleh semua kalangan masyarakat dikarenakan biaya pengeluaran yang relatif mahal. Oleh karena itu, diperlukan energi alternatif yang efisien dengan harga lebih terjangkau sehingga mudah dimanfaatkan oleh masyarakat ialah sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

Substrat sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* terbagi menjadi 3 jenis, yakni sedimen, media buatan, dan campuran dari kedua media tersebut. Pada penelitian ini menggunakan sedimen lumpur aktif yang terdapat di dasar sawah tanaman padi karena memiliki banyak mikroba pada pengendapan rhizo yang cocok sebagai tempat pertumbuhan dan perkembangan bakteri. Sedangkan media buatan yang dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan bakteri dalam menghasilkan energi listrik ialah bakteri limbah rumen sapi. Pemanfaatan bakteri limbah rumen sapi sebagai substrat media buatan sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* merupakan salah satu solusi pengelolaan bakteri limbah tersebut secara efektif, ekonomis, dan bisa digunakan sebagai energi alternatif dalam memproduksi listrik. Selain kandungan nutrisi yang tinggi, bakteri limbah rumen sapi juga mudah difermentasi oleh bakteri.

Pada penelitian ini menggunakan variasi konsentrasi substrat dan waktu inkubasi bakteri untuk menentukan sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* terbaik dari nilai *power density* optimum. Adapun beberapa prosedur pada penelitian ini. Prosedur pertama yakni persiapan alat *Dual Chamber Microbial Fuel Cell* dengan menggunakan PEM berbahan keramik. Kemudian, dilakukan persiapan substrat dan bakteri limbah rumen sapi dan sedimen dengan mempersiapkan 21 chamber yang terdiri atas 7 sampel dengan pengulangan sebanyak 3 kali. Untuk variasi konsentrasi substrat ditandai label pada chamber yakni pengenceran 1 untuk 3640 ppm, pengenceran 2 untuk 1970 ppm, pengenceran 3 untuk 1250 ppm,

pengenceran 4 untuk 923 ppm, pengenceran 5 untuk 693 ppm, pengenceran 6 untuk 582 ppm, dan 0 ppm. Tahap selanjutnya, yakni eksperimen *Dual Chamber Microbial Fuel Cell*. Pada tahap ini dilakukan beberapa pengukuran, yakni pengukuran pH, tegangan, dan kuat arus listrik. Setiap pengukuran tersebut dilakukan sekali setiap hari selama 30 hari dengan metode polarisasi menggunakan dua digital multimeter.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* dengan perlakuan variasi konsentrasi substrat bakteri limbah rumen sapi dan waktu inkubasi bakteri berpengaruh terhadap *power density* yang dihasilkan. Semakin besar konsentrasi pada substrat, maka nilai *power density* yang dihasilkan semakin meningkat. Hal tersebut dibuktikan pada konsentrasi substrat sebesar 3640 ppm dengan label pengenceran 1 selama 20 hari pengamatan diperoleh *power density* optimum sebesar 864 mW/m² pada hari ke-7.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pemanfaatan Bakteri Limbah Rumen Sapi Untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S-1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Drs. Imam Rofi'i, M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Tri Mulyono, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
2. Agung T. Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D., dan Drs. Yuda Cahyoargo Hariadi, M.Sc., Ph.D, selaku Dosen Penguji yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Segenap dosen dan karyawan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;
4. Teman-teman seperjuangan jurusan fisika PION 19 yang telah memberikan kesan luar biasa dan banyak pelajaran berharga;
5. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran membangun dari pembaca demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Jember, 21 Juli 2023

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2. TINJAUAN TEORI	5
2.1 <i>Microbial Fuel Cell (MFC)</i>	5
2.1.1 Pengertian <i>Microbial Fuel Cell (MFC)</i>	5
2.1.2 Prinsip Kerja <i>Microbial Fuel Cell (MFC)</i>	5
2.1.3 Jenis-Jenis <i>Microbial Fuel Cell (MFC)</i>	6
2.1.4 Faktor yang Memengaruhi Kinerja <i>Microbial Fuel Cell (MFC)</i>	8
2.2 Bakteri	9
2.3 Daya Listrik	10
2.4 Bakteri Limbah Rumen Sapi	11
2.4.1 Kandungan Bakteri Limbah Rumen Sapi	11
2.4.2 Konversi Bakteri Limbah Menjadi Energi Listrik	12
BAB 3. METODE PENELITIAN	13
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	13
3.2 Desain Penelitian	13
3.3 Jenis Dan Sumber Data Penelitian.....	13
3.4 Prosedur Penelitian	14
3.4.1 Persiapan Alat <i>Dual Chamber Microbial Fuel Cell</i>	14
3.4.2 Persiapan Substrat dari Bakteri Limbah Rumen Sapi dan Sedimen	14
3.4.3 Eksperimen <i>Dual Chamber Microbial Fuel Cell</i>	15

3.5 Alat/Instrumen Penelitian	16
3.6 Metode Analisis	16
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	17
4.1 Hasil Pengukuran Elektrisitas Pada Sistem <i>Microbial Fuel Cell (MFC)</i> Menggunakan PEM Keramik	19
4.1.1 Hubungan <i>Power Density</i> Optimum Terhadap Waktu Inkubasi Bakteri	19
4.1.2 Hubungan Tegangan, Arus, dan <i>Power Density</i> Terhadap Konsentrasi Substrat	21
4.2 <i>Power Density</i> Optimum Sistem <i>Microbial Fuel Cell (MFC)</i>	24
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	36
5.1 Kesimpulan	36
5.2 Saran	36
DAFTAR PUSTAKA	37
LAMPIRAN	40

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Dari Kandungan Bakteri Limbah Rumen Sapi	12
Tabel 3.1 Penamaan Label Variasi Konsentrasi Substrat	15
Tabel 4.1 Hasil Data <i>Power Density</i> Optimum Pada Variasi Konsentrasi Substrat Untuk 3 Hari Optimum.....	25

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Prinsip Kerja <i>Microbial Fuel Cell (MFC)</i>	6
Gambar 3.1 Desain Penelitian.....	13
Gambar 3.2 Desain <i>Dual Chamber Microbial Fuel Cell</i>	14
Gambar 3.3 Skema Pengukuran Tegangan dan Kuat Arus.....	15
Gambar 4.1 (a) Desain <i>Dual Chamber Microbial Fuel Cell (MFC)</i> Tampak Atas; (b) Desain <i>Chamber Keramik Microbial Fuel Cell (MFC)</i> Tampak Samping	18
Gambar 4.2 Grafik Hubungan <i>Power Density</i> Yang Dihasilkan Terhadap Waktu Inkubasi Bakteri Selama Pengukuran 20 Hari.....	20
Gambar 4.3 Grafik Hubungan <i>Power Density</i> Terhadap Tiap Variasi Konsentrasi Substrat Pada Hari Ke-6.	22
Gambar 4.4 Grafik Hubungan <i>Power Density</i> Terhadap Tiap Variasi Konsentrasi Substrat Pada Hari Ke-7.	23
Gambar 4.5 Grafik Hubungan <i>Power Density</i> Terhadap Tiap Variasi Konsentrasi Substrat Pada Hari Ke-8.	23
Gambar 4.6 Grafik Hubungan Antara Nilai Tegangan Terhadap Rapat Arus Yang Dihasilkan Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-6.....	27
Gambar 4.7 Grafik Hubungan Antara Nilai Tegangan Terhadap Rapat Arus Yang Dihasilkan Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-7.....	27
Gambar 4.8 Grafik Hubungan Antara Nilai Tegangan Terhadap Rapat Arus Yang Dihasilkan Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-8.....	28
Gambar 4.9 Grafik Hubungan Antara <i>Power Density</i> Terhadap Rapat Arus Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-6.	29
Gambar 4.10 Grafik Hubungan Antara <i>Power Density</i> Terhadap Rapat Arus Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-7.	29
Gambar 4.11 Grafik Hubungan Antara <i>Power Density</i> Terhadap Rapat Arus Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-8.	30
Gambar 4.12 Grafik Hubungan <i>Power Density</i> Terhadap Rapat Arus dan Grafik Tegangan Terhadap Rapat Arus Pada Konsentrasi Substrat 3640 ppm Dengan Label Pengenceran 1 di Hari Ke-6.....	31
Gambar 4.13 Grafik Hubungan <i>Power Density</i> Terhadap Rapat Arus dan Grafik Tegangan Terhadap Rapat Arus Pada Konsentrasi Substrat 3640 ppm Dengan Label Pengenceran 1 di Hari Ke-7.....	31
Gambar 4.14 Grafik Hubungan <i>Power Density</i> Terhadap Rapat Arus dan Grafik Tegangan Terhadap Rapat Arus Pada Konsentrasi Substrat 3640 ppm Dengan Label Pengenceran 1 di Hari Ke-8.....	32

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Pengukuran Penelitian	40
Lampiran 2. Cara Perolehan <i>Power Density</i> Optimum.....	40

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konsumsi bahan bakar dan listrik terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk yang juga terus bertambah. Pada tahun 2021, Negara Indonesia tercatat mengalami peningkatan konsumsi listrik sebesar 5,82% (Kementerian ESDM, 2021). Bahkan pemerintah memprediksikan bahwa konsumsi listrik per kapita dalam negeri akan terus meningkat pada tahun 2022 dengan perkiraan sebesar 12,9%. Mengetahui kondisi tersebut, sudah dipastikan akan ada banyak sekali dampak negatif yang diperoleh dalam jangka panjang. Beragam jenis energi listrik alternatif yang dikembangkan oleh pemerintah seperti pemanfaatan energi listrik dari sel surya dan energi angin. Namun, energi tersebut tidak bisa dinikmati oleh semua kalangan masyarakat dikarenakan mahal biaya. Oleh karena itu, diperlukan energi alternatif yang efisien dan mudah dimanfaatkan oleh semua kalangan masyarakat terutama para pengguna perangkat elektronik. Salah satunya yaitu sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan suatu proses degradasi bakteri bersifat anaerob obligat, anaerob fakultatif, dan aerob sebagai penghasil listrik di dalam media anoda melalui sirkuit eksternal menuju media katoda (Novitasari, 2011). Keunggulan dari energi terbarukan ini, yakni memiliki tingkat efisiensi yang tinggi, biaya relatif murah, sumber energinya dari bakteri buangan, dapat diterapkan pada berbagai tempat yang memiliki permasalahan kurangnya energi listrik, dan menjadi solusi alternatif bagi penanggulangan bakteri yang umumnya memberikan dampak negatif terutama bagi masyarakat sekitar (Logan *et al.*, 2006).

Faktor utama produktivitas listrik pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* adalah substrat (Zulfikar *et al.*, 2021). Substrat yang digunakan pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* harus memiliki struktur dan kapasitas tahan air yang baik, memiliki nutrisi yang cukup, dan memiliki pH yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan bakteri di dalamnya untuk mengoptimalkan

hasil produksi listrik. Substrat terbagi menjadi 3 jenis, yakni sedimen, media buatan, dan campuran dari kedua media tersebut. Sedimen merupakan substrat berupa tanah asli yang menjadi media pertumbuhan dan perkembangan bakteri dalam menghasilkan produksi energi listrik melalui sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Beberapa sedimen yang digunakan secara umum, yakni endapan air tawar, endapan air laut, tanah, lumpur aktif, dan sebagainya. Salah satu sedimen yang diidentifikasi memiliki banyak mikrob ditemukan pada sedimen lumpur aktif yang terdapat di dasar sawah tanaman padi. Sedimen tersebut memiliki pengendapan rhizo yang cocok sebagai tempat pertumbuhan dan perkembangan bakteri secara optimal (Ibrahim *et al.*, 2017).

Media buatan merupakan substrat dari bahan organik dengan kandungan nutrisi yang sesuai dengan kebutuhan bakteri sehingga meningkatkan jangka hidup bakteri dan kinerja *Microbial Fuel Cell (MFC)* dalam menghasilkan energi listrik. Secara umum, media buatan yang telah memenuhi kriteria substrat, yaitu sampah organik, limbah cair industri (Putra *et al.*, 2012), dan limbah cair perikanan (Ibrahim *et al.*, 2017). Kriteria substrat pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*, antara lain: mengandung nutrisi yang cukup, mudah difermentasi oleh bakteri, tidak mengandung zat yang bersifat merusak bakteri, dan memiliki tingkat keasaman (pH) yang sesuai dengan kebutuhan bakteri. Penggunaan substrat yang tepat sangat memengaruhi efisiensi dan stabilitas sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*, sehingga mengoptimalkan produksi energi listrik yang dihasilkan. Selain itu, juga mengurangi resiko polusi lingkungan akibat pengolahan limbah yang tidak tepat. Salah satu limbah di Indonesia yang sampai sekarang masih dipermasalahkan adalah bakteri limbah rumen sapi. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2021), pada tahun 2015-2021 terjadi peningkatan populasi sapi potong di Indonesia yang didominasi oleh Jawa Timur sebanyak 4,94 juta ekor. Apabila satu ekor sapi rata-rata setiap hari menghasilkan 7 kg kotoran kering maka diperkirakan Jawa Timur mencapai 34,58 juta kg/hari (Budiyanto, 2013). Fakta tersebut menjadi tugas pemerintah dan warga Indonesia untuk mengembangkan teknologi pengelolaan bakteri limbah rumen sapi agar tidak menjadi polusi lingkungan. Secara umum, bakteri limbah rumen sapi diolah

sebagai bahan pakan ternak (ayam, babi, bebek) dan sebagai sumber pupuk bagi tumbuhan (Mulyanti & pujiharti, 2017). Namun, hal tersebut diperlukan pengelolaan yang tepat dikarenakan dapat menumbuhkan bakteri yang menjadi penyakit pada hewan ternak. Salah satu pengelolaan bakteri limbah rumen sapi yang tepat yakni digunakan sebagai substrat media buatan sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* untuk menjadi energi alternatif dalam memproduksi listrik.

Pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* terdapat beberapa faktor yang memengaruhi tegangan dan kuat arus yang dihasilkan, yakni waktu inkubasi bakteri dan konsentrasi substrat. Penelitian yang dilakukan oleh (Pant *et al.*, 2010) telah membuktikan bahwa komposisi, konsentrasi, dan tipe substrat memengaruhi kinerja bakteri dan *power density*. Hal tersebut didukung oleh hasil penelitian (Elsa Nuramanah, 2021) dan (Mulyono *et al.*, 2022) bahwa lamanya waktu inkubasi bakteri, variasi rasio massa, dan besarnya tingkat konsentrasi substrat yang diberikan dari limbah cair tahu dapat meningkatkan senyawa organik sehingga memengaruhi hasil produksi nilai kuat arus listrik yang dihasilkan dan nilai *power density* yang dihasilkan juga semakin besar. Namun, beberapa penelitian tersebut hanya menggunakan substrat limbah cair tahu, sehingga diperlukan pengembangan jenis bakteri limbah sebagai substrat dalam sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* dan untuk meningkatkan efisiensi beserta skalabilitasnya. Maka dari itu, peneliti memanfaatkan bakteri limbah rumen sapi sebagai substrat sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* dikarenakan memiliki potensi menghasilkan listrik dengan harga yang terjangkau, mudah didapatkan, dapat digunakan oleh semua kalangan masyarakat, dan mengatasi permasalahan pengelolaan limbah tersebut.

Berdasarkan uraian yang telah dipaparkan, penulis akan melakukan penelitian yang berjudul “Pemanfaatan Bakteri Limbah Rumen Sapi Untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*”. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi substrat dan waktu inkubasi bakteri terhadap nilai *power density* optimum dari bakteri limbah rumen sapi sebagai substrat bakteri pada lumpur sawah aktif tanaman padi melalui *Dual Chamber Microbial Fuel Cell (MFC)*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi substrat dari bakteri limbah rumen sapi terhadap *power density* optimum sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* yang dihasilkan?
- b. Bagaimana pengaruh waktu inkubasi bakteri dari bakteri limbah rumen sapi terhadap *power density* optimum sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Mengetahui pengaruh variasi konsentrasi substrat dari bakteri limbah rumen sapi terhadap *power density* optimum sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* yang dihasilkan.
- b. Mengetahui pengaruh waktu inkubasi bakteri dari bakteri limbah rumen sapi terhadap *power density* optimum sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* yang dihasilkan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Bagi peneliti: memberikan pengetahuan mengenai pemanfaatan teknologi bahan bakar khususnya *Microbial Fuel Cell (MFC)*;
- b. Bagi jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember: sebagai bahan referensi secara ilmiah di bidang ilmu fisika mengenai teknologi *Microbial Fuel Cell (MFC)*;
- c. Bagi pemerintah: sebagai informasi tambahan mengenai *Microbial Fuel Cell (MFC)* sebagai teknologi sumber energi alternatif ramah lingkungan.

BAB 2. TINJAUAN TEORI

2.1 Microbial Fuel Cell (MFC)

2.1.1 Pengertian *Microbial Fuel Cell (MFC)*

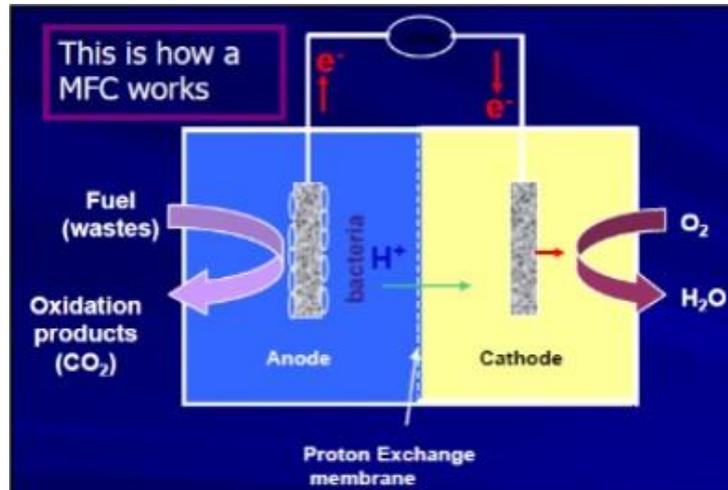
Dalam beberapa tahun terakhir telah terjadi krisis energi global khususnya konsumsi bahan bakar fosil. Sehingga diperlukan solusi untuk mengatasi permasalahan global tersebut berupa energi terbarukan, salah satunya adalah *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Logan *et al.*, (2006) menyatakan sebuah alat konversi energi kimia menjadi energi listrik yang bekerja dengan memanfaatkan bakteri sebagai katalis dalam proses oksidasi baik pada bahan organik dan non organik disebut dengan *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

Komponen penyusun dari *Microbial Fuel Cell (MFC)* adalah anoda, katoda, dan elektrolit. Bakteri limbah yang digunakan pada *Microbial Fuel Cell (MFC)* berfungsi sebagai katalis dan menghasilkan elektron akibat adaptasi yang baik dengan bahan organik lainnya dalam bakteri limbah lingkungan. Ketika proses *Microbial Fuel Cell (MFC)* berlangsung, ada beberapa faktor yang memengaruhi yakni aktivitas bakteri dan substrat yang digunakan, temperatur, kecepatan katoda ketika katalis akan reaksi oksigen, elektroda (katoda dan anoda) dan perlengkapan yang lain pada membran (Fitriani Idham, Sofia Halimi, 2009). Adapun faktor lainnya yakni kecepatan bakteri dalam melakukan degradasi substrat, kecepatan transfer proton melalui larutan, dan kecepatan transfer elektron dari bakteri menuju anoda.

2.1.2 Prinsip Kerja *Microbial Fuel Cell (MFC)*

Mekanisme proses *Microbial Fuel Cell (MFC)* pada umumnya yakni bakteri akan melakukan oksidasi terhadap substrat sehingga menghasilkan elektron dan proton pada anoda. Adanya reaksi elektron dan proton terhadap oksigen pada katoda menghasilkan air. Elektron tersebut kemudian ditransfer ke katoda melalui sirkuit eksternal, sedangkan proton didifusikan ke katoda melalui

separator membran. Pada Gambar 2.1 ditunjukkan skema prinsip kerja *Microbial Fuel Cell (MFC)*.



Gambar 2.1 Prinsip Kerja *Microbial Fuel Cell (MFC)* (Sumber: : Logan *et al.*, 2006)

2.1.3 Jenis-Jenis *Microbial Fuel Cell (MFC)*

Microbial Fuel Cell (MFC) memiliki berbagai jenis sesuai dengan perkembangannya. Secara umum, *Microbial Fuel Cell (MFC)* terbagi berdasarkan desain kompartemen, penggunaan membran penukar elektron, dan kultur bakteri yang akan diuji pada penelitian. Berikut adalah penjelasan secara singkat mengenai jenis-jenis *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

a. Desain Kompartemen

Pada jenis ini, *Microbial Fuel Cell (MFC)* dibedakan menjadi 3 jenis, yakni *single chamber Microbial Fuel Cell (MFC)*, *dual chamber Microbial Fuel Cell (MFC)*, dan *stack Microbial Fuel Cell (MFC)*. Ketiga jenis tersebut memiliki perbedaan yang utama yakni pada *single chamber Microbial Fuel Cell (MFC)* hanya terdapat 1 ruangan yang berisi campuran antara substrat dan larutan elektrolit. Pada jenis tersebut dapat divariasikan keberadaan PEM, bisa digunakan atau tanpa menggunakan PEM. Sedangkan *dual chamber Microbial Fuel Cell (MFC)* menggunakan 2 ruangan yang terpisahkan oleh membran penukar kation (PEM). Pada jenis tersebut, ruang anodanya terisi oleh substrat dan bakteri sedangkan ruang katodanya terisi larutan elektrolit. Untuk *stack Microbial Fuel Cell (MFC)* adalah rangkaian seri, paralel, bahkan seri paralel antara *single*

chamber Microbial Fuel Cell (MFC) dan *dual chamber Microbial Fuel Cell (MFC)*). Hal tersebut dilakukan untuk memperoleh kapasitas daya yang digunakan mencapai batas maksimal.

b. Penggunaan Membran Penukar Elektron (PEM)

Pada jenis *Microbial Fuel Cell (MFC)* yang *single chamber*, keberadaan membran berperan sebagai penghalang difusi oksigen. Membran yang digunakan harus mempunyai konduktivitas proton yang tinggi serta mampu stabil baik mekanis dan termal. Biasanya menggunakan Nafion dan Ultrex CMI-7000. Namun peneliti memerlukan membran dengan harga yang lebih terjangkau daripada Nation, salah satunya ialah tembikar (Behera *et al.*, 2010). Tembikar yaitu salah satu kerajinan tangan yang berbahan utama tanah liat dengan proses pembuatan dibakar pada temperatur tertentu. Hal tersebut telah dibuktikan oleh penelitian Yohanes Jones *et al.*, (2015) bahwa kinerja bakteri dan pertukaran ion pada *Microbial Fuel Cell (MFC)* menjadi optimal ketika menggunakan tembikar. Sedangkan pada *dual chamber Microbial Fuel Cell (MFC)* diperlukan PEM agar tidak mengalami difusi aseptor elektron yang beracun dan membantu proses terjadinya transfer proton ke katoda. Oleh karena itu, peneliti memilih menggunakan *dual chamber Microbial Fuel Cell (MFC)* menggunakan salah satu tembikar, yakni gerabah untuk meminimalisir kandungan racun pada bakteri yang diujikan dan harga bahan lebih terjangkau.

c. Kultur Bakteri Yang Akan Diuji Pada Penelitian

Pada penelitian sebelumnya yang menggunakan kultur sel tunggal dinyatakan bahwa memerlukan biaya yang cukup tinggi dan lebih rumit, juga menghasilkan energi listrik yang lebih rendah daripada *mix culture*. Pada *mix culture* juga sering digunakan karena lebih mudah diaplikasikan dengan material organik kompleks yang terdapat pada aliran bakteri dan sering ditemukan ragam bakteri yang berkembang (Logan *et al.*, 2006). Hal tersebut didukung dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh limbah cair industri (Putra *et al.*, 2012), dan limbah cair perikanan (Ibrahim *et al.*, 2017).

2.1.4 Faktor yang Memengaruhi Kinerja *Microbial Fuel Cell (MFC)*

Dalam kinerja *Microbial Fuel Cell (MFC)* pasti terdapat beberapa faktor yang memberikan pengaruh selama proses berlangsung. Berbagai variasi bahan organik yang berperan sebagai substrat pada *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Berikut merupakan penjelasan mengenai faktor yang memengaruhi kinerja *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

a. Substrat

Kunci efisiennya produksi listrik pada kinerja *Microbial Fuel Cell (MFC)* adalah substrat. Substrat terdiri atas material organik baik sederhana hingga kompleks. Pada substrat sederhana memperoleh keuntungan berupa produksi listrik cukup dengan waktu singkat dan dianggap lebih membantu pertumbuhan beragam mikrob aktif (Kristin, 2012). Berbagai penelitian terdahulu yang menerapkan prinsip *Microbial Fuel Cell (MFC)* dengan variasi substrat bakteri limbah mampu menghasilkan listrik, yakni yang dilakukan oleh (Putra *et al.*, 2012) memanfaatkan limbah sisa makanan dengan bantuan sumber inokulum, karbon, dan, nafion. Sedangkan penelitian (Ibrahim *et al.*, 2017) memanfaatkan substrat limbah cair perikanan.

b. Sifat kimia larutan

pH sangat memengaruhi banyak hal dalam kinerja *Microbial Fuel Cell (MFC)* baik pada proses metabolisme bakteri, pertumbuhan bakteri, transfer elektron dan proton, bahkan reaksi katoda (Kristin, 2012). Semakin pH mendekati netral, maka semakin optimal bakteri tumbuh dan menghasilkan listrik. Menurut Blakely & Bade (1991), rentang derajat keasaman (pH) pada rumen yakni 6 – 6,8. Bukan hanya pH saja, kekuatan ionik juga cukup berpengaruh akan konduktivitas larutan dalam media *Microbial Fuel Cell (MFC)* dengan otomatis memengaruhi resistor internalnya dan memberikan dampak terhadap kinerja *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

c. Temperatur

Temperatur yakni salah satu parameter terpenting dalam menghasilkan energi listrik. Tiap bakteri mempunyai rentang temperatur untuk bertahan hidup

yang berbeda-beda. Menurut (Bose *et al.*, 2018), temperatur yang baik dan sering digunakan pada penelitian sebelumnya yakni di rentang 27°C-45°C.

d. Material Elektroda

Dalam kinerja *Microbial Fuel Cell (MFC)* untuk transfer elektron agar memperoleh listrik yang maksimal sangat dipengaruhi oleh pemilihan material elektroda yang akan digunakan (Ashoka & Bhat, 2012). Material elektroda yang bagus yakni tidak ditemukan pori berukuran kecil dikarenakan dapat menyebabkan tersumbatnya substrat dan mudah terisi (Bose *et al.*, 2018). Salah satu material elektroda yang umum digunakan adalah karbon dan seng. Karbon ialah unsur non logam yang nilai titik leleh dan konduktivitas termalnya tergolong tinggi dari semua elemen sehingga dapat dijadikan konduktor energi listrik yang baik, memiliki harga yang terjangkau, dan mudah didapatkan (Akbar *et al.*, 2017). Sedangkan bahan seng ialah bahan *biocompatible* dengan bakteri dan anoda sebagai wadah melekatnya bakteri sehingga membantu kinerja sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

2.2 Bakteri

Bakteri dapat didefinisikan sebagai salah satu makhluk hidup yang ukurannya beragam. Secara umum, bakteri dapat ditemukan pada air, tanah, dan udara sesuai dengan jenisnya. Menurut Pelczar (2007) ada beberapa faktor penentu jenis dan banyaknya bakteri pada suatu lingkungan, yakni sumber bakteri, daya tahan jenis bakteri akan kondisi lingkungan sekitarnya, serta jumlah dan aktivitasnya. Riadi (2016) mengatakan sebagai salah satu makhluk hidup, bakteri mengalami 4 fase pertumbuhan yang dikenal secara umum, yaitu:

1. *Lag Phase* (Fase Adaptasi)

Fase ini adalah bakteri menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungan sekitarnya yang baru. Faktor yang memengaruhi kinerja pada fase adaptasi yaitu komposisi media, pH, temperatur, banyaknya jumlah sel pada inokulum awal, dan sifat fisiologis bakteri sebelumnya.

2. *Log or Exponential Growth Phase* (Fase Pertumbuhan Eksponensial)

Fase ini adalah bakteri telah memasuki fase pertumbuhan yang cepat dan konstan akibat dari proses membelahnya bakteri. Kecepatan dari pertumbuhan bakteri tersebut dipengaruhi akan media bertumbuhnya bakteri, pH, kandungan nutrisi, dan temperatur.

3. *Stationary Phase* (Fase Stationer)

Fase ini adalah populasi bakteri yang hidup berbanding lurus dengan bakteri yang mati. Hal tersebut disebabkan oleh berkurangnya kadar nutrisi pada fase stationer. Sehingga bakteri juga terus mengalami penurunan proses pembelahan sel.

4. *Death or Logarithmic Decline Phase* (Fase Kematian)

Fase ini memiliki kesamaan dari fase stationer. Perbedaannya ditemukan pada jumlah bakteri yang mati lebih banyak bahkan hampir keseluruhan. Hal tersebut diakibatkan dari habisnya jumlah nutrisi pada media dan energi cadangan pada sel.

2.3 Daya Listrik

Pada kinerja *Microbial Fuel Cell (MFC)* bukan hanya melibatkan reaksi biologis, namun juga reaksi redoks. Prinsip utama reaksi redoks pada *Microbial Fuel Cell (MFC)* yaitu penerapan sel gavanii (sel volta). Penerapan tersebut berdasarkan proses reaksi oksidasi pada anoda berupa reaksi terlepasnya elektron dan reaksi oksidasi pada katoda berupa reaksi bertambahnya elektron. Berdasarkan proses reaksi oksidasi tersebut, maka akan terdeteksi arus listrik dan tegangan.

Berdasarkan kinerja *Microbial Fuel Cell (MFC)* akan menghasilkan daya listrik. Daya listrik yang dimaksud ialah jumlah energi dari setiap satuan waktu selama proses terjadi. Maka diperoleh persamaan perhitungan daya listrik (P):

$$\text{Daya Listrik (P)} = \text{Tegangan (V)} \times \text{Kuat Arus (I)} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan satuan daya listrik (P) pada penelitian ini yaitu miliwatt (mW) dan satuan kuat arus (I) yaitu miliampere (mA).

Setelah diketahui daya listrik yang didapatkan, selanjutnya dapat diketahui juga nilai kerapatan dayanya. Kerapatan daya adalah daya dari setiap satuan luas permukaan elektroda, untuk persamaan perhitungannya menurut Momoh (2011) sebagai berikut:

$$Power\ Density\ (PD) = \frac{I\ (mA) \times V\ (V)}{A\ (m^2)} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan satuan *Power Density* (PD) yaitu mW/m².

2.4 Bakteri Limbah Rumen Sapi

2.4.1 Kandungan Bakteri Limbah Rumen Sapi

Rumen adalah salah satu bagian lambung terbesar pada hewan sapi yang didalamnya terdapat mikrob aktif berjumlah banyak dengan peran masing-masing dalam perombakan anaerobik sebagai sumber mikrob metagenetik baik di sedimen tanah, lahan dengan rendaman air, serta pada rumen hewan ternak ruminansia (Stams, 2003). Dalam rumen sapi terdapat berbagai mikroorganisme seperti bakteri, protozoa, dan jamur yang hidup. Berlandaskan fakta tersebut, bakteri limbah rumen sapi dapat dimanfaatkan secara efisien sebagai energi terbarukan produksi listrik dikarenakan kandungan unsur hara yang mencukupi. Berikut adalah penjelasan dari beberapa mikrob yang ada pada rumen sapi menurut Sembiring (2010):

a. Bakteri Rumen Sapi

Secara umum, bakteri pada limbah rumen sapi adalah bakteri selulolitik, bakteri pemakai asam, bakteri methanogenik, bakteri pemakai gula, bakteri hemiselulolitik, bakteri ureolitik, dan bakteri lipolitik. Hasil penelitian Bai (2012) menunjukkan bahwa komposisi mikrob pada kotoran sapi mencapai ± 60 spesies bakteri. Bakteri pada limbah rumen sapi digolongkan menjadi 3 kelompok, yakni kelompok pencerna selulosa, kelompok pencerna hemiselulosa, dan kelompok pencerna pati.

b. Protozoa Rumen Sapi

Selain mikrob bakteri yang umumnya ditemukan pada limbah rumen sapi, protozoa juga menjadi salah satunya. Populasi protozoa dalam rumen berkisar 40-

50% dari biomasa limbah rumen sesuai pemberian bahan pakan dari induk semang. Pada pakan sapi berbahan serat terdapat jumlah protozoa sekitar 25-33% dari biomasa rumen (Purbowati *et al.*, 2014).

c. Jamur Rumen Sapi

Jamur pada rumen sapi berperan dalam proses pencernaan sapi yang berserat kasar dan lignin walaupun beberapa masih terbawa di dalam pakan sapi dengan menggunakan enzim yang bervariasi. Untuk kadar jamur pada serat kasar isi rumen sapi terdeteksi sebanyak 6,13% (R. Murni, Suparjo, Akmal, 2008). Salah satu enzim yang dimaksud adalah *xylanase* dengan kemampuannya dalam degradasi secara sempurna pada selulosa dan hemiselulosa.

Pada tabel 2.2 menunjukkan karakteristik dari kandungan bakteri limbah rumen sapi.

Tabel 2.1 Karakteristik Dari Kandungan Bakteri Limbah Rumen Sapi

Parameter	Kandungan Sapi Jawa (<i>Jawa bull</i>)
Ph Cairan Limbah Rumen (<i>Ph Of Rumen Fluid</i>)	6,83
Jumlah protozoa per μl cairan limbah rumen (<i>number of protozoa/μl rumen fluid</i>)	64,12
Jumlah bakteri (cfu/g) (<i>number of bacteria (cfu/g)</i>)	$2,7 \times 10^7$
Jumlah jamur (cfu/g) (<i>number of fungi (cfu/g)</i>)	$9,3 \times 10^4$

Sumber : (Arora, 1998).

2.4.2 Konversi Bakteri Limbah Menjadi Energi Listrik

Konversi sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* sesuai dengan Gambar 2.2 (a) yang berisikan bakteri limbah rumen sapi dengan kandungan molekul bakteri seperti lumpur. Molekul bakteri yang ada pada limbah rumen sapi kemudian terjadi proses oksidasi antara molekul *biodegradabel* tersebut sehingga memperoleh elektron, proton, dan karbon dioksida. Elektron yang diperoleh akan menempel pada anoda dan mengalir pada sirkuit eksternal menuju katoda. Aliran tersebut yang menjadi hasil dari sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* berupa energi listrik. Sedangkan proton mengalir pada larutan elektrolit menuju katoda. Selain itu, juga dihasilkan H_2O pada elektron, proton, dan oksigen.

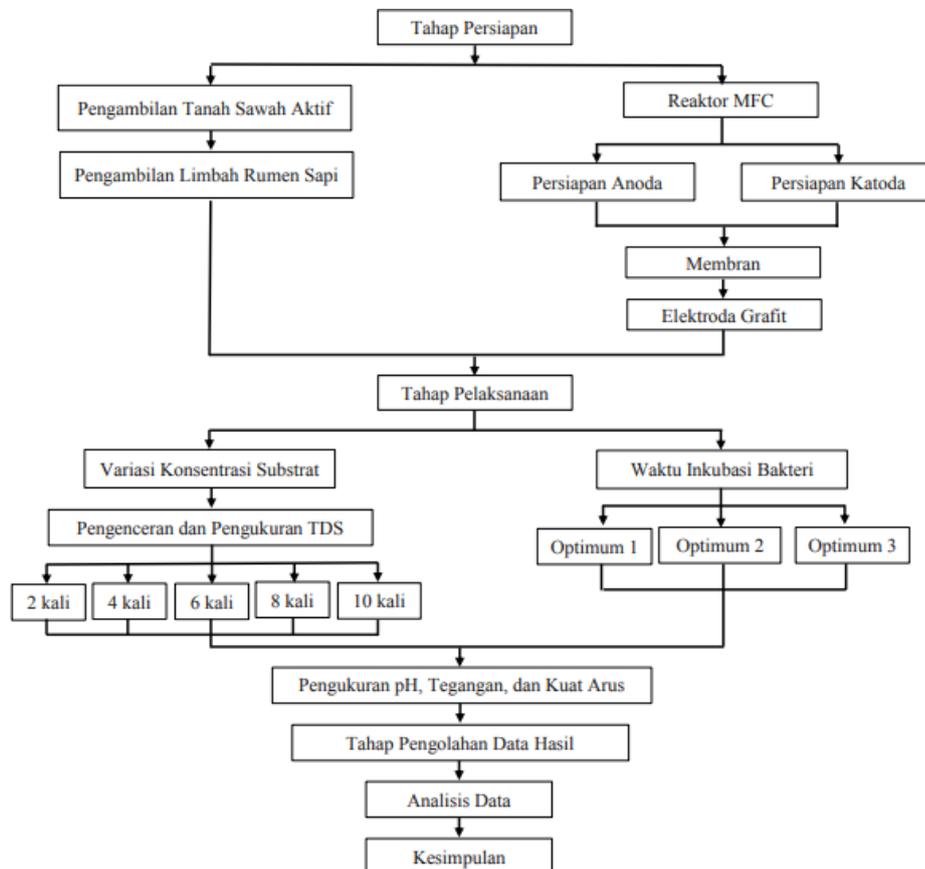
BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan mulai bulan Februari 2023 sampai dengan Mei 2023 di tempat tinggal pribadi peneliti tepatnya di wilayah Jember.

3.2 Desain Penelitian

Penelitian ini terdiri atas 3 tahap penelitian, yakni tahap persiapan, tahap pelaksanaan, dan tahap pengolahan data hasil sesuai pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Desain Penelitian

3.3 Jenis Dan Sumber Data Penelitian

Jenis penelitian yang dilakukan adalah kuantitatif di mana melakukan analisis data sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* meliputi nilai tegangan dan kuat

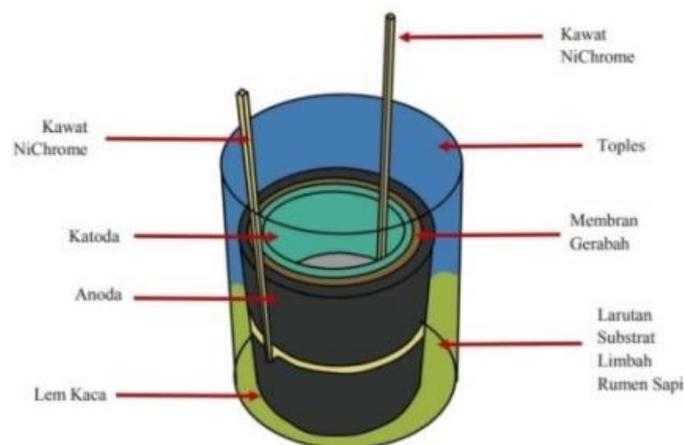
arus, *power density* optimum. Data hasil penelitian tersebut berupa data primer yakni nilai kuat arus listrik (I) dan tegangan listrik (V). Kemudian data tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh penambahan konsentrasi bakteri limbah rumen sapi dan waktu inkubasi bakteri terhadap sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC).

3.4 Prosedur Penelitian

Adapun beberapa persiapan eksperimen *Dual Chamber Microbial Fuel Cell* pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.4.1 Persiapan Alat *Dual Chamber Microbial Fuel Cell*

Desain alat *Dual Chamber Microbial Fuel Cell* yang digunakan terdiri atas ruang anoda dan katoda dipisahkan menggunakan membran gerabah sesuai pada Gambar 3.2. Sedangkan perlakuan *carbon veil* anoda dan katoda disesuaikan dengan penelitian sebelumnya dari Ata (2021). Untuk mengetahui tegangan dan kuat arus listrik, maka kawat NiChrome tersebut disambungkan ke digital multimeter menggunakan kabel dan penjepit buaya. Pin tanda (+) terhubung oleh kawat katoda dan (-) terhubung dengan kawat anoda. Pengukuran tersebut dilakukan setiap hari sekali yang tercatat dalam tabel pengamatan.



Gambar 3.2 Desain *Dual Chamber Microbial Fuel Cell*

3.4.2 Persiapan Substrat dari Bakteri Limbah Rumen Sapi dan Sedimen

Substrat dan sedimen merupakan bahan utama pada sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC). Substrat penelitian ini ialah bakteri limbah rumen sapi sedangkan

sedimennya ialah lumpur sawah milik pribadi peneliti di desa Sumber Ketempa, Kalisat. Sampel yang digunakan penelitian ini sesuai dengan Tabel 3.1 di mana setiap sampel bervolume 200 mL dan dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali. Kemudian, pengukuran *TDS* pada tiap sampel untuk mengetahui konsentrasi dari kandungan padatan dalam sampel disesuaikan dengan penelitian dari Ata (2021).

Tabel 3.1 Penamaan Label Variasi Konsentrasi Substrat

No	Perlakuan Larutan Substrat	Label
1	Media Kontrol (Tanpa Tambahan Larutan Substrat)	Kontrol
2	Tanpa Pengenceran	Pengenceran 1
3	Diencerkan sebanyak 2 kali	Pengenceran 2
4	Diencerkan sebanyak 4 kali	Pengenceran 3
5	Diencerkan sebanyak 6 kali	Pengenceran 4
6	Diencerkan sebanyak 8 kali	Pengenceran 5
7	Diencerkan sebanyak 10 kali	Pengenceran 6

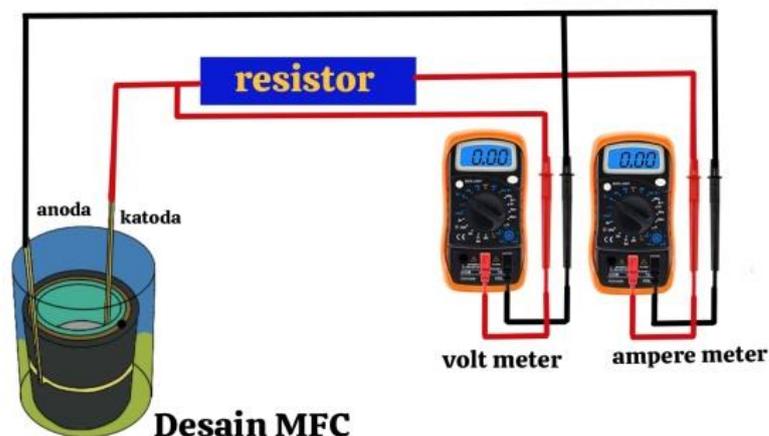
3.4.3 Eksperimen *Dual Chamber Microbial Fuel Cell*

a) Pengukuran pH

Pada pengukuran pH dilakukan setiap hari menggunakan alat *Digital pH Meter 4 in 1 Soil*. Alat tersebut dimasukkan ke sedimen lumpur sawah aktif tanaman padi setiap ruang anoda sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

b) Pengukuran Tegangan dan Kuat Arus

Pada skema pengukuran tegangan dan kuat arus penelitian ini merujuk pada penelitian Hermawan *et al.*, (2014) sesuai pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Skema Pengukuran Tegangan dan Kuat Arus

c) Pengukuran *Power Density* Optimum

Pengukuran ini diambil dari data tegangan dan kuat arus listrik dari 21 *chamber* tersebut dikonversi menjadi daya listrik. Setelah mendapatkan data tersebut, maka bisa ditentukan nilai *power density* (mW/m^2).

3.5 Alat/Instrumen Penelitian

Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian Pemanfaatan Bakteri Limbah Rumen Sapi Untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*, antara lain: multimeter digital, kabel dan penjepit buaya, elektroda anoda dan katoda (*Carbon Veil*), toples *Microbial Fuel Cell*, membran gerabah, *PTFE (Polytetrafluoroethylene)*, lem kaca, kuas, kawat NiChrome, setrika, resistor 47 Ω ; 100 Ω ; 220 Ω ; 470 Ω , 1 k Ω ; 2,2 k Ω ; 4,7 k Ω *Digital pH Meter 4 in 1 Soil*, dan *Total Dissolved Solids (TDS) Meter*. Kemudian bahan yang digunakan pada penelitian ini, yakni sampel lumpur sawah aktif pada tanaman padi sebagai tempat bakteri beraktivitas dan bakteri limbah rumen sapi sebagai media buatan (substrat) yang menyediakan nutrisi bagi bakteri.

3.6 Metode Analisis

Metode analisis berdasarkan hasil pengukuran yang didapatkan untuk menentukan nilai *power density* optimum. Berdasarkan perolehan nilai tegangan dan kuat arus listrik tersebut dikonversi menjadi daya listrik menggunakan perhitungan 2.1 pada tinjauan pustaka. Setelah itu, maka bisa didapatkan nilai *power density* (mW/m^2) menggunakan perhitungan 2.2 pada tinjauan pustaka.

Hasil data tersebut ditampilkan dalam tabel dan grafik menggunakan *Microsoft Excel 2010*. Hasil olahan data tersebut berupa grafik yang menunjukkan hubungan antara *power density* terhadap variasi konsentrasi substrat dan hubungan antara *power density* terhadap waktu inkubasi bakteri. Kemudian dilakukan analisis dengan membandingkan antara hasil penelitian ini dan hasil penelitian yang lainnya. Sehingga diperoleh kesimpulan berdasarkan hasil analisis tersebut.

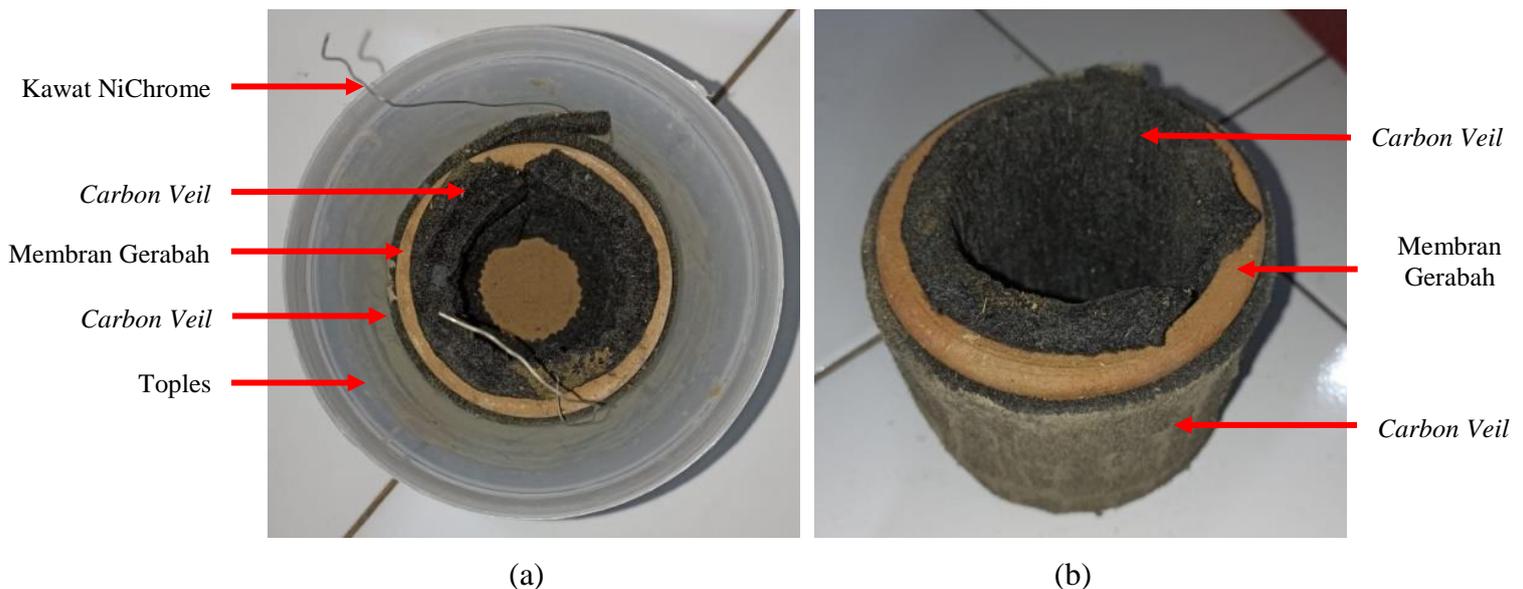
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan suatu proses degradasi bakteri bersifat anaerob obligat, anaerob fakultatif, dan aerob sebagai penghasil listrik di dalam media anoda melalui sirkuit eksternal menuju media katoda (Novitasari, 2011). Berdasarkan desain kompartemennya, sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* terbagi menjadi 3 jenis, yakni *Single Chamber Microbial Fuel Cell (MFC)*, *Dual Chamber Microbial Fuel Cell (MFC)*, dan *Stack Chamber Microbial Fuel Cell (MFC)*. Pada penelitian ini, peneliti menggunakan *Dual Chamber Microbial Fuel Cell (MFC)* di mana ruang anoda dan katoda terpisahkan oleh pemisah elektron membran (Min *et al.*, 2005). PEM yang digunakan pada penelitian ini ialah keramik dikarenakan harga lebih terjangkau dan mampu mengoptimalkan hasil produksi energi listrik dari kinerja bakteri pada media *Dual Chamber Microbial Fuel Cell (MFC)*. Ruang anoda pada *Dual Chamber Microbial Fuel Cell (MFC)* dijadikan sebagai reaktor bio-elektrokimia yang disebabkan oleh oksidasi senyawa organik ataupun anorganik, sehingga menghasilkan elektron (e^-) dan proton (H^+) yang ditransfer ke ruang katoda melalui sirkuit eksternal dan separator membran sehingga mengakibatkan beda potensial. Beda potensial tersebut menyebabkan oksigen terikat dengan hidrogen. Akibatnya terjadi perpindahan arus positif dari terminal positif ke terminal negatif di mana arah tersebut berlawanan dengan aliran elektron sehingga menghasilkan listrik. Pada penelitian ini, sirkuit eksternal berupa elektroda *carbon veil* dan kawat NiChrome yang kemudian dihubungkan ke digital multimeter.

Faktor utama produktivitas listrik pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* adalah substrat (Zulfikar *et al.*, 2021). Maka dari itu, diperlukan substrat dari bakteri limbah yang mengandung memiliki struktur dan kapasitas tahan air yang baik, memiliki nutrisi yang cukup, dan memiliki pH yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan bakteri di dalamnya sehingga dapat meningkatkan hasil produksi listrik. Substrat sendiri terbagi menjadi 3 jenis, yakni sedimen, media buatan, dan campuran dari kedua media tersebut. Pada penelitian ini, sedimen yang digunakan yakni lumpur aktif yang terdapat di dasar sawah

tanaman padi dikarenakan terdapat pengendapan rhizo yang cocok sebagai media pertumbuhan dan perkembangan bakteri (Ibrahim *et al.*, 2017). Sedangkan media buatan yang digunakan pada penelitian ini, yakni bakteri limbah rumen sapi dikarenakan mengandung nutrisi dan tingkat keasaman (pH) yang sesuai dengan kebutuhan bakteri serta mudah difermentasi oleh bakteri. Selain itu, bakteri limbah rumen sapi juga masih menjadi permasalahan dalam pengelolaannya yang memberikan dampak negatif bagi lingkungan dan kesehatan sehingga diperlukan solusi pengelolaan limbah tersebut secara efektif, ekonomis, dan bisa digunakan sebagai energi alternatif dalam memproduksi listrik.

Pada Gambar 4.1 ialah media sistem *Dual Chamber Microbial Fuel Cell (MFC)* yang tersusun dari ruang anoda dan ruang katoda dipisahkan oleh PEM keramik untuk mengetahui pengaruh dari variasi konsentrasi substrat dan waktu inkubasi bakteri terhadap *power density* optimum.



Gambar 4.1 (a) Desain *Dual Chamber Microbial Fuel Cell (MFC)* Tampak Atas; (b) Desain *Chamber Keramik Microbial Fuel Cell (MFC)* Tampak Samping

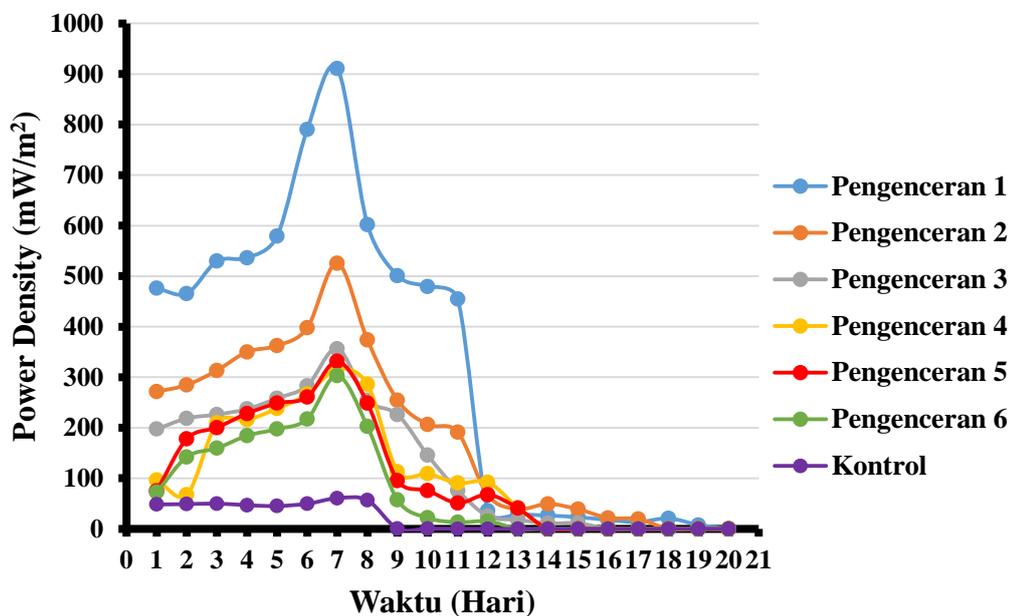
4.1 Hasil Pengukuran Elektrisitas Pada Sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* Menggunakan PEM Keramik

Pada pengukuran elektrisitas sesuai dengan perolehan tegangan dan kuat arus listrik yang dihasilkan oleh sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* menggunakan PEM keramik. Tujuan dilakukan pengukuran elektrisitas ini untuk mengetahui pengaruh dari variasi konsentrasi substrat dan waktu inkubasi bakteri terhadap *power density* optimum yang dihasilkan melalui sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Ruang anoda pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* berisi sedimen 100 gram dan sampel substrat bakteri limbah rumen sapi dengan volume 200 mL. Pengukuran ini dilakukan sekali setiap hari pukul 14.00 WIB pada 21 sampel menggunakan dua digital multimeter yang terhubung dengan kawat NiChrome. Untuk 21 sampel tersebut terdiri atas 1 media kontrol (0 ppm) dan 6 variasi konsentrasi substrat sesuai Tabel 3.1. yang dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali. Pada pengukuran tegangan dan kuat arus listrik tersebut menerapkan metode polarisasi yang diberi tambahan variasi resistor secara bergantian untuk setiap sampel. Tujuan diterapkan metode polarisasi tersebut untuk menentukan *power density* optimum yang dihasilkan melalui sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. *Power density* tersebut diperoleh dari hasil rata-rata tegangan dan kuat arus listrik ke-tujuh sampel dengan tiga kali pengulangan.

4.1.1 Hubungan *Power Density* Optimum Terhadap Waktu Inkubasi Bakteri

Untuk mengetahui pengaruh waktu inkubasi bakteri limbah rumen sapi terhadap nilai *power density* yang dihasilkan, maka diperlukan pengukuran tegangan dan kuat arus listrik pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Berdasarkan data yang diperoleh tersebut, dapat diketahui hubungan antara *power density* dengan waktu (hari) yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.

Grafik Hubungan Power Density Optimum Terhadap Waktu Inkubasi Bakteri



Gambar 4.2 Grafik Hubungan *Power Density* Yang Dihasilkan Terhadap Waktu Inkubasi Bakteri Selama Pengukuran 20 Hari

Gambar 4.2 merupakan grafik *power density* terhadap waktu (hari) yang diambil berdasarkan nilai rata-rata pengukuran dalam sehari. Nilai *power density* yang dihasilkan terus berubah seiring dengan pertambahan waktu (hari). Selain itu, perolehan data *power density* untuk tiap variasi konsentrasi substrat juga berbeda-beda. Sesuai dengan grafik pada Gambar 4.2, garis berwarna biru muda dengan label pengenceran 1 memiliki konsentrasi substrat sebesar 3640 ppm, untuk garis berwarna orange dengan label pengenceran 2 memiliki konsentrasi substrat sebesar 1970 ppm, untuk garis berwarna abu-abu dengan label pengenceran 3 menunjukkan konsentrasi substrat sebesar 1250 ppm, untuk garis berwarna kuning dengan label pengenceran 4 memiliki konsentrasi substrat sebesar 923 ppm, untuk garis berwarna merah dengan label pengenceran 5 memiliki konsentrasi substrat sebesar 693 ppm, untuk garis berwarna hijau muda dengan label pengenceran 6 menunjukkan nilai TDS sebesar 582 ppm, dan untuk garis berwarna ungu yaitu media kontrol dengan nilai TDS sebesar 0 ppm dikarenakan tanpa tambahan larutan substrat.

Pada Gambar 4.2 ditunjukkan bahwa nilai *power density* yang dihasilkan pada tiap konsentrasi substrat untuk trennya relatif sama. Pada penelitian ini, bakteri berada di *lag phase* (fase adaptasi) terjadi di hari ke-1 sampai hari ke-2 di mana bakteri menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungan sekitarnya yang baru. Kemudian, bakteri mengalami pertumbuhan dikarenakan pembelahan diri dalam waktu cepat dan konstan menyebabkan reaksi yang menghasilkan elektron dan proton sehingga meningkatkan nilai *power density* secara signifikan sesuai Gambar 4.2. Fase tersebut dikenal dengan *Log or Exponential Growth Phase* (Fase Pertumbuhan Eksponensial). Pada penelitian ini, fase tersebut terjadi di hari ke-3 sampai hari ke-7. Setelah fase pertumbuhan eksponensial, titik pada grafik di hari ke-8 hingga hari ke-12 menunjukkan penurunan nilai *power density* yang dihasilkan dikarenakan bakteri telah memasuki *Stationary Phase* (Fase Stationer). Pada fase tersebut, bakteri yang mati berbanding lurus dengan bakteri yang hidup dikarenakan berkurangnya kadar nutrisi sehingga elektrisitas menurun. Hal tersebut juga dipengaruhi oleh variasi konsentrasi substrat bakteri rumen sapi yang telah ditentukan. Kinerja bakteri pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* akan optimal apabila jumlah mikroorganisme sebanding dengan konsentrasi substrat (Moertinah, 2010). Kemudian, pada penelitian ini untuk jumlah bakteri yang mati lebih banyak dibandingkan dengan yang hidup ditunjukkan pada hari ke-13 hingga hari ke-20. Hal tersebut menunjukkan bahwa bakteri telah berada di *Death or Logarithmic Decline Phase* (Fase Kematian).

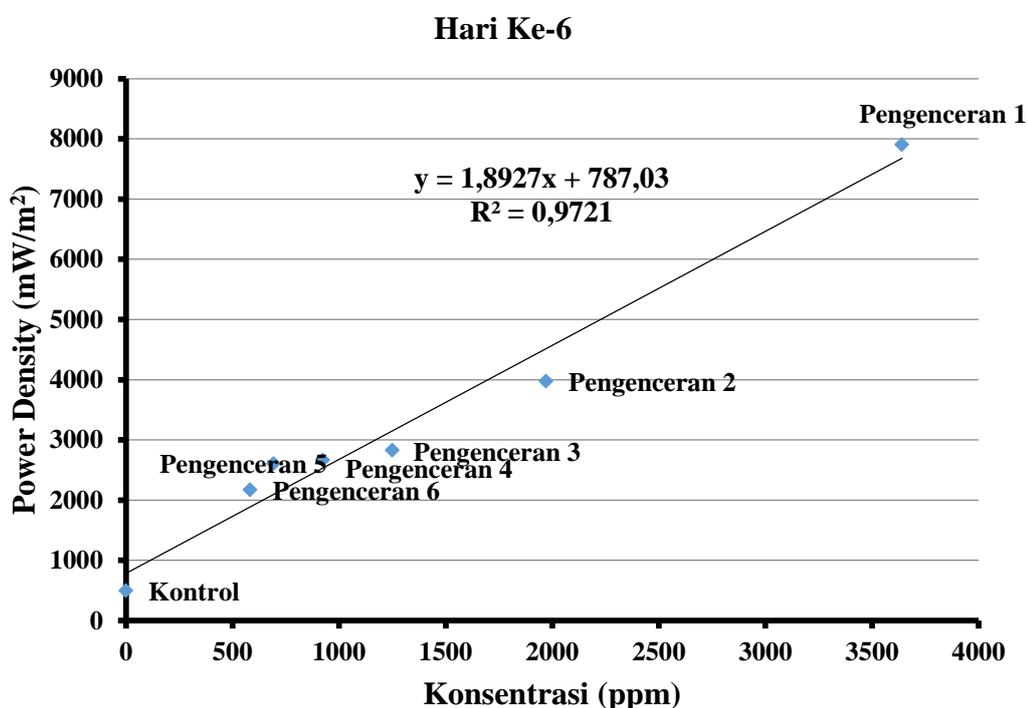
Berdasarkan Gambar 4.2 dapat ditentukan bakteri pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* mulai bekerja secara optimal menghasilkan tegangan dan kuat arus listrik atau disebut optimum 1 yakni pada hari ke-6. Kemudian menghasilkan tegangan dan kuat arus listrik tertinggi atau disebut optimum 2 yakni pada hari ke-7. Kemudian, berada pada keadaan optimum 3 di hari ke-8.

4.1.2 Hubungan Tegangan, Arus, dan *Power Density* Terhadap Konsentrasi Substrat

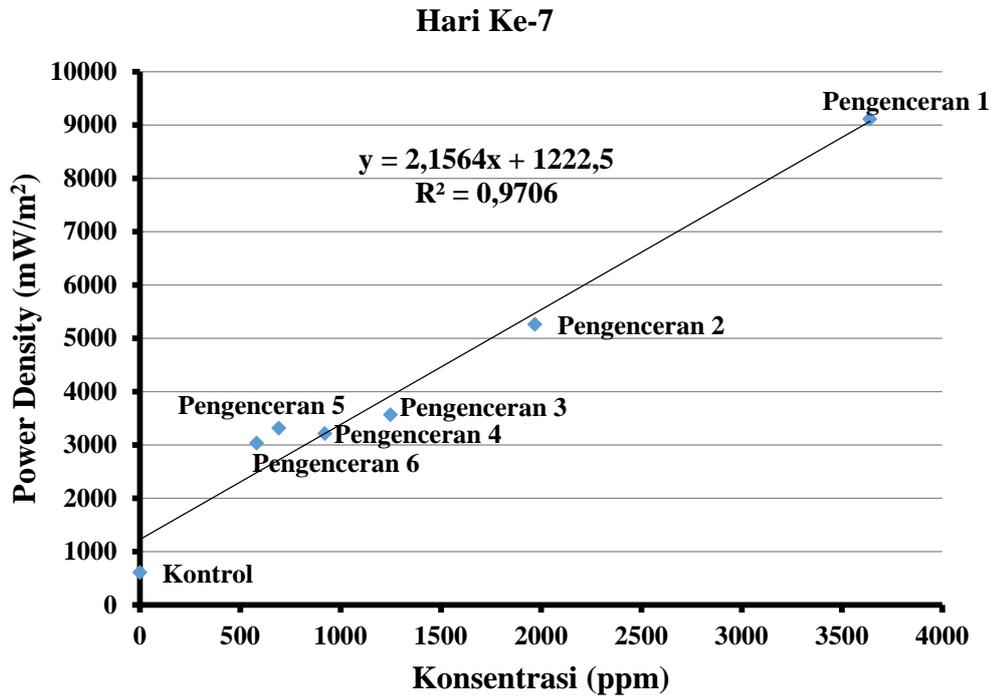
Pada Gambar 4.2 ditunjukkan nilai *power density* optimum pada hari ke-6, hari ke-7, dan hari ke-8 terdapat di variasi konsentrasi substrat bernilai TDS

sebesar 3640 ppm dengan label pengenceran 1. Variasi tersebut terdiri atas 100 gram sedimen yang ditambahkan dengan 200 mL larutan bakteri limbah rumen sapi. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai konsentrasi substrat atau semakin banyak padatan yang terlarut pada sampel, maka semakin tinggi nilai *power density* yang dihasilkan melalui sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

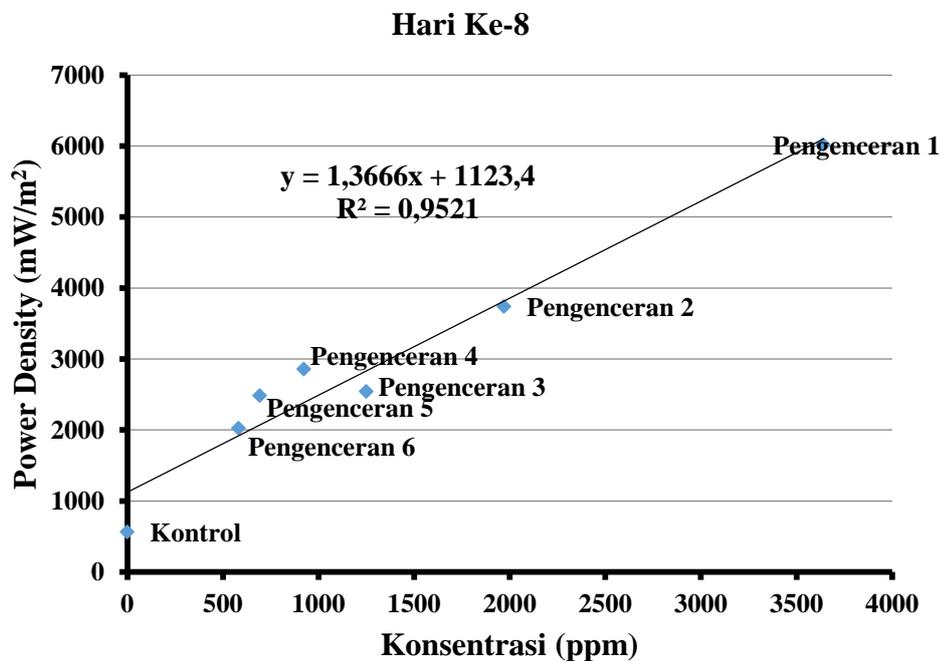
Berdasarkan Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5 juga menunjukkan bahwa nilai TDS sebesar 3640 ppm dengan label pengenceran 1 pada pengamatan hari ke-6, hari ke-7, dan hari ke-8, bakteri menghasilkan nilai tegangan dan kuat arus listrik lebih besar dibandingkan dengan variasi konsentrasi lainnya. Hal tersebut menunjukkan pada konsentrasi substrat tersebut, kebutuhan nutrisi bakteri sangat mencukupi untuk menghasilkan energi listrik. Pada hari ke-8 mengalami penurunan dari hari ke-7 dikarenakan bakteri sudah memasuki fase stationer di mana jumlah bakteri mulai berkurang dikarenakan nutrisi yang disediakan sudah habis.



Gambar 4.3 Grafik Hubungan *Power Density* Terhadap Tiap Variasi Konsentrasi Substrat Pada Hari Ke-6.



Gambar 4.4 Grafik Hubungan *Power Density* Terhadap Tiap Variasi Konsentrasi Substrat Pada Hari Ke-7.



Gambar 4.5 Grafik Hubungan *Power Density* Terhadap Tiap Variasi Konsentrasi Substrat Pada Hari Ke-8.

Dengan demikian, dapat diketahui bahwa nilai *power density* yang dihasilkan berbanding lurus dengan konsentrasi substrat yang digunakan. Hal tersebut ditunjukkan dengan peningkatan nilai *power density* disebabkan oleh penambahan nilai konsentrasi substrat. Nilai konsentrasi substrat yang tinggi, maka memiliki kandungan padatan yang terlarut bernilai tinggi juga. Hal itu dikarenakan bakteri akan melakukan metabolisme secara optimal apabila kebutuhan nutrisinya terpenuhi. Akibatnya, jumlah elektron dan proton yang dihasilkan pada ruang anoda disebabkan adanya peningkatan metabolisme bakteri. Elektron dan proton tersebut kemudian ditransfer ke katoda yang menimbulkan beda potensial sehingga menghasilkan listrik.

4.2 *Power Density Optimum Sistem Microbial Fuel Cell (MFC)*

Variasi konsentrasi substrat dan waktu inkubasi bakteri limbah memengaruhi nilai *power density* optimum yang dihasilkan di dalam sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Pada penelitian ini, dilakukan pengukuran menggunakan metode polarisasi dengan tambahan variasi resistor. Tujuan penggunaan metode tersebut yakni untuk menentukan *power density* optimum yang dihasilkan pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* dengan substrat bakteri limbah rumen sapi dan PEM berbahan keramik. Hasil dari pengukuran tersebut berupa kurva polarisasi yang digunakan untuk mengetahui besar kecilnya nilai *power density* yang dihasilkan pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* dengan PEM berbahan keramik.

Sesuai tujuan dari penelitian ini, telah diperoleh 3 hari optimum yang menghasilkan nilai *power density* optimum pada setiap konsentrasi substrat yakni pada hari ke-6, hari ke-7, dan hari ke-8. Hal tersebut menunjukkan bahwa masa puncak aktifnya bakteri dalam menghasilkan listrik melalui sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Pada tabel 4.1 merupakan data yang diperoleh pada penelitian ini untuk 3 hari optimum dengan masing-masing variasi konsentrasi substrat.

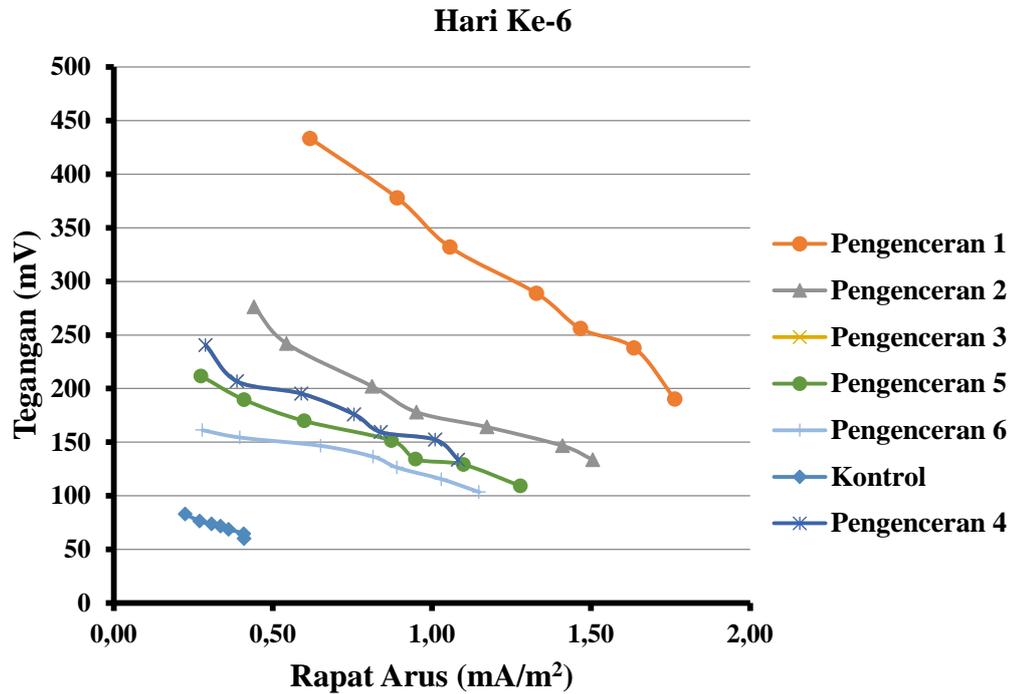
Tabel 4.1 Hasil Data *Power Density* Optimum Pada Variasi Konsentrasi Substrat Untuk 3 Hari Optimum

No	Label	Konsentrasi Substrat (ppm)	<i>Power Density</i> Optimum (mW/m ²)		
			Hari Ke-6	Hari Ke-7	Hari Ke-8
1	Pengenceran 1	3640	721	864	597
2	Pengenceran 2	1970	399	526	369
3	Pengenceran 3	1250	281	504	338
4	Pengenceran 4	923	275	456	462
5	Pengenceran 5	693	260	410	410
6	Pengenceran 6	582	218	361	282
7	Kontrol	0	48	60	83

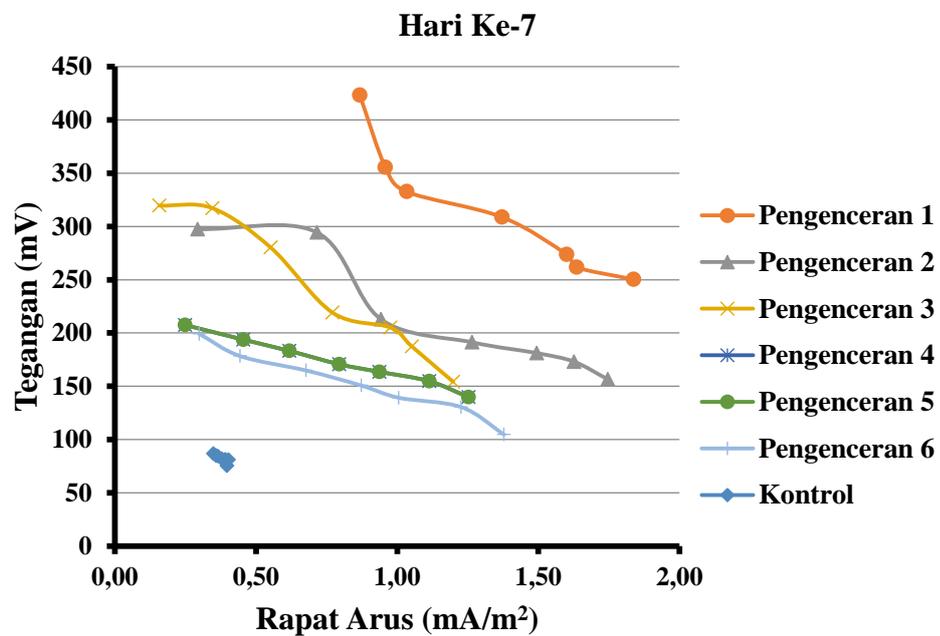
Pada tabel 4.1 menunjukkan nilai *power density* optimum dari hasil pengukuran sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* pada tiap konsentrasi substrat. Pada variasi konsentrasi substrat 3640 ppm dengan label pengenceran 1 diperoleh *power density* optimum sebesar 721 mW/m² untuk hari ke-6; 864 mW/m² untuk hari ke-7; dan 597 mW/m² untuk hari ke-8. Kemudian, pada variasi konsentrasi substrat 1970 ppm dengan label pengenceran 2 diperoleh *power density* optimum sebesar 399 mW/m² untuk hari ke-6; 526 mW/m² untuk hari ke-7; dan 369 mW/m² untuk hari ke-8. Pada variasi konsentrasi substrat 1250 ppm dengan label pengenceran 3 diperoleh *power density* optimum sebesar 281 mW/m² untuk hari ke-6; 504 mW/m² untuk hari ke-7; dan 338 mW/m² untuk hari ke-8. Sedangkan pada variasi konsentrasi substrat 923 ppm dengan label pengenceran 4 diperoleh *power density* optimum sebesar 275 mW/m² untuk hari ke-6; 456 mW/m² untuk hari ke-7; dan 462 mW/m² untuk hari ke-8. Untuk variasi konsentrasi substrat 693 ppm dengan label pengenceran 5 diperoleh *power density* optimum sebesar 260 mW/m² untuk hari ke-6; 410 mW/m² untuk hari ke-7; dan 410 mW/m² untuk hari ke-8. Kemudian pada variasi konsentrasi substrat 582 ppm dengan label pengenceran 6 diperoleh *power density* optimum sebesar 218 mW/m² untuk hari ke-6; 361 mW/m² untuk hari ke-7; dan 282 mW/m² untuk hari ke-8. Untuk variasi konsentrasi substrat 0 ppm dengan label kontrol diperoleh *power density* optimum sebesar 48 mW/m² untuk hari ke-6; 60 mW/m² untuk hari ke-7; dan 83 mW/m² untuk hari ke-8.

Power density optimum dapat ditentukan melalui kurva polarisasi dan kurva daya pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Kurva tersebut didapatkan dari hasil pengukuran tegangan dan arus listrik yang ditambahkan variasi resistor pada sirkuit eksternal. Sesuai pernyataan (Ali Elfarra & Kaya, 2021), *power density* optimum dapat diperoleh berdasarkan kurva daya. Hal tersebut sesuai dengan rumus yang berlaku secara umum untuk menghitung kerapatan arus ($J = V/A$). Sehingga dapat ditentukan *power density* optimumnya, yakni *Power Density* = $I.V/A$ di mana untuk A ialah proyeksi luas permukaan anoda sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Polarisasi yaitu perubahan beda potensial elektroda atau tegangan yang dihasilkan oleh sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* dari keadaan setimbangnya dikarenakan adanya aliran arus listrik. Hasil data tersebut dipresentasikan dalam kurva berupa plot beda potensial sebagai fungsi dari arus.

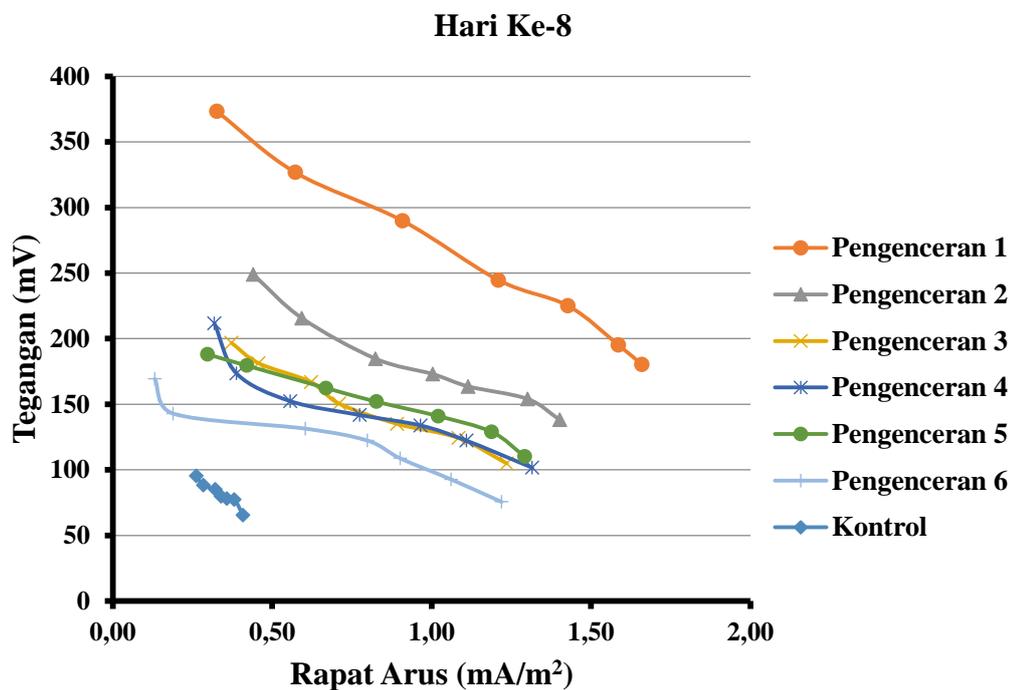
Tegangan dan kuat arus tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor biologis pada setiap konsentrasi substrat sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* sejalan dengan aktivitas bakteri. Pada penelitian ini digunakan tambahan resistor pada sirkuit eksternal guna memperoleh kurva polarisasi yang terdiri atas nilai tegangan dan kuat arus listrik pada rentang waktu yang sudah ditentukan (keadaan setimbang). Untuk memperoleh petunjuk adanya kesetimbangan memerlukan rangkaian terbuka pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* supaya mendapatkan sumber energi dari hasil metabolisme bakteri lebih optimal. Gambar 4.6, Gambar 4.7, dan Gambar 4.8 merupakan grafik hubungan antara tegangan terhadap rapat arus dari sampel pengenceran 1 (3640 ppm) pada hari ke-6, hari-7, dan hari ke-8. Sedangkan pada Gambar 4.9, Gambar 4.10, dan Gambar 4.11 merupakan grafik hubungan *power density* terhadap rapat arus dari sampel pengenceran 1 (3640 ppm) pada hari ke-6, hari-7, dan hari ke-8.



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Antara Nilai Tegangan Terhadap Rapat Arus Yang Dihasilkan Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-6.

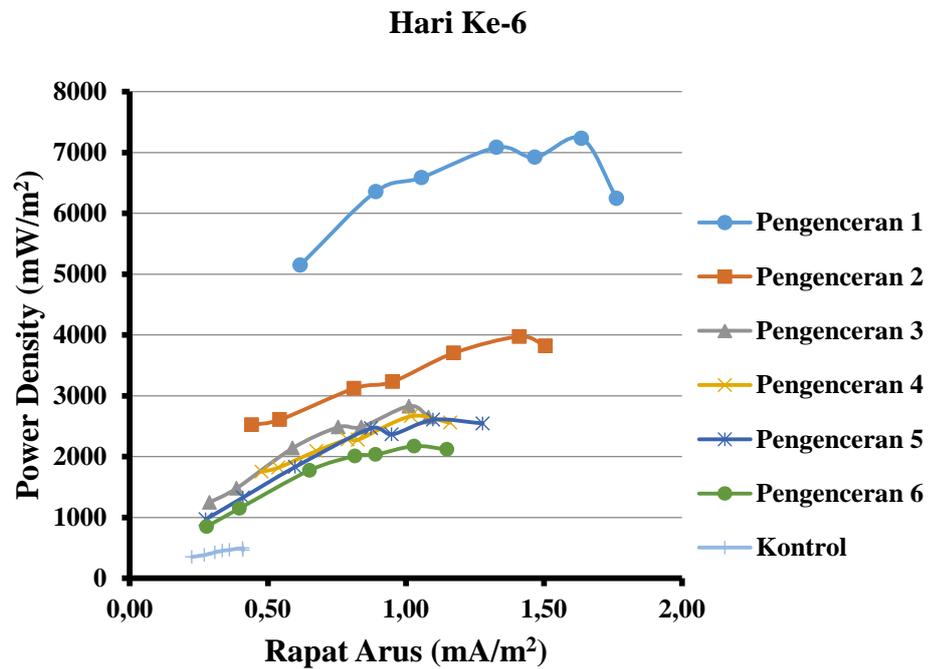


Gambar 4.7 Grafik Hubungan Antara Nilai Tegangan Terhadap Rapat Arus Yang Dihasilkan Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-7.

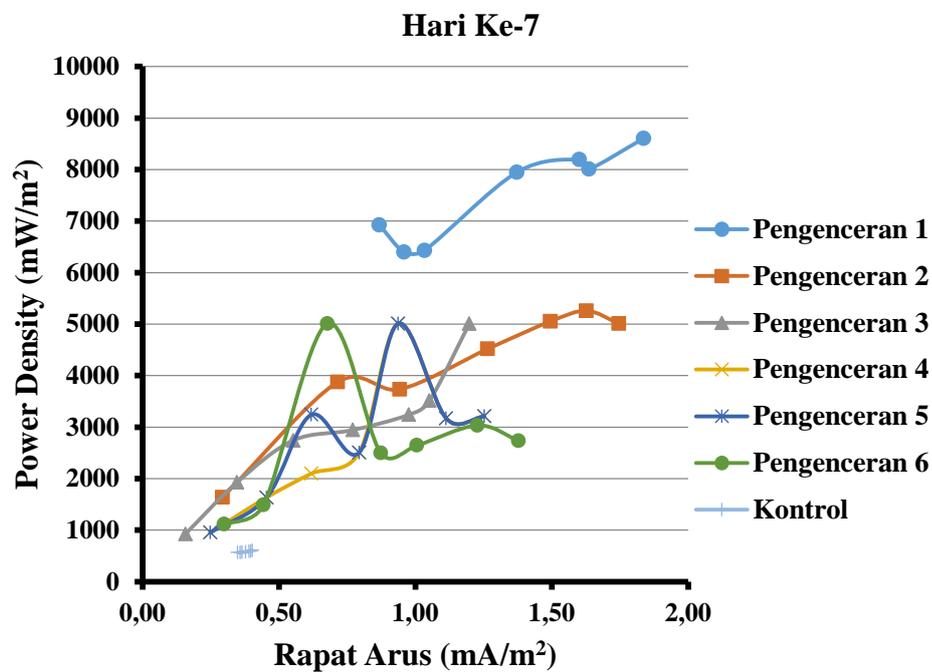


Gambar 4.8 Grafik Hubungan Antara Nilai Tegangan Terhadap Rapat Arus Yang Dihasilkan Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-8.

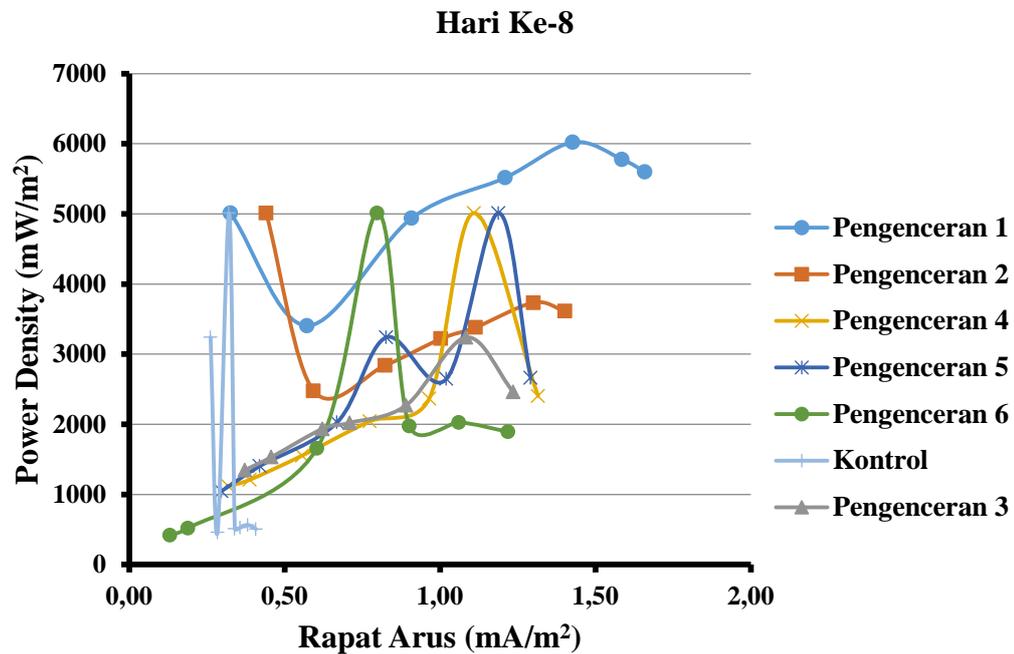
Gambar 4.6, Gambar 4.7, dan Gambar 4.8 dapat disebut dengan grafik hubungan antara nilai tegangan dan rapat arus optimum dari daya yang diperoleh. Berdasarkan grafik tersebut, nilai konsentrasi sebesar 3640 ppm dengan label pengenceran 1 mampu menghasilkan nilai tertinggi untuk tegangan terhadap rapat arus. Berdasarkan ketiga gambar grafik tersebut ditunjukkan rapat arus memiliki tren grafik yang sama, di mana semakin kecil tegangan yang dihasilkan, maka rapat arusnya semakin besar. Penurunan tegangan dari hari ke hari akan semakin cepat ketika rapat arus meningkat dikarenakan adanya resistansi ion pada substrat di anoda yang sedang mendegradasi materi organik oleh mikroba (Imoro *et al.*, 2021). Tren parabola pada kurva polarisasi menunjukkan bahwa nilai hasil *power density* optimum terdapat di puncak parabola.



Gambar 4.9 Grafik Hubungan Antara *Power Density* Terhadap Rapat Arus Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-6.

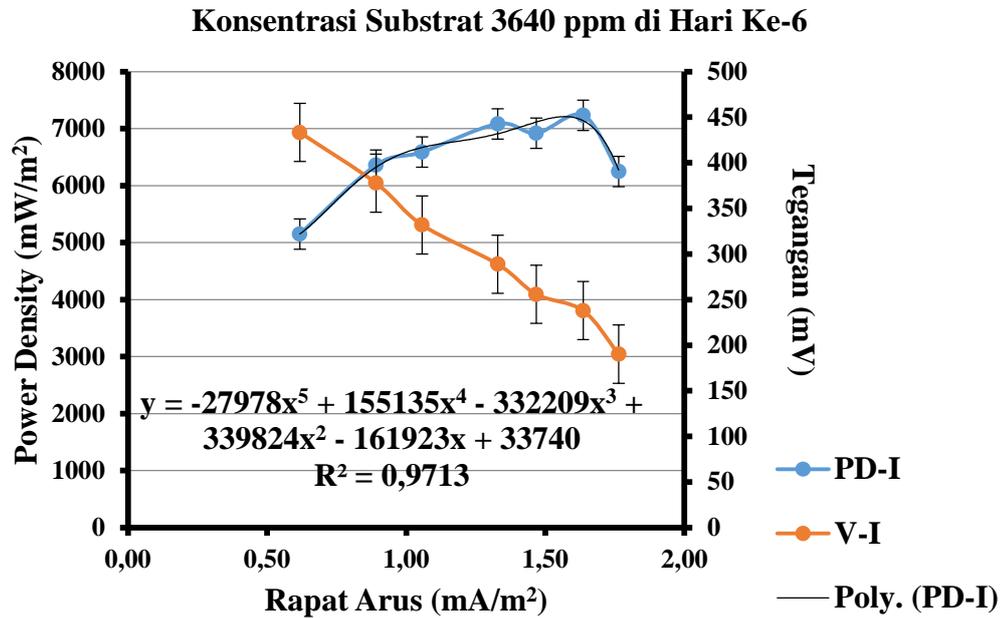


Gambar 4.10 Grafik Hubungan Antara *Power Density* Terhadap Rapat Arus Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-7.

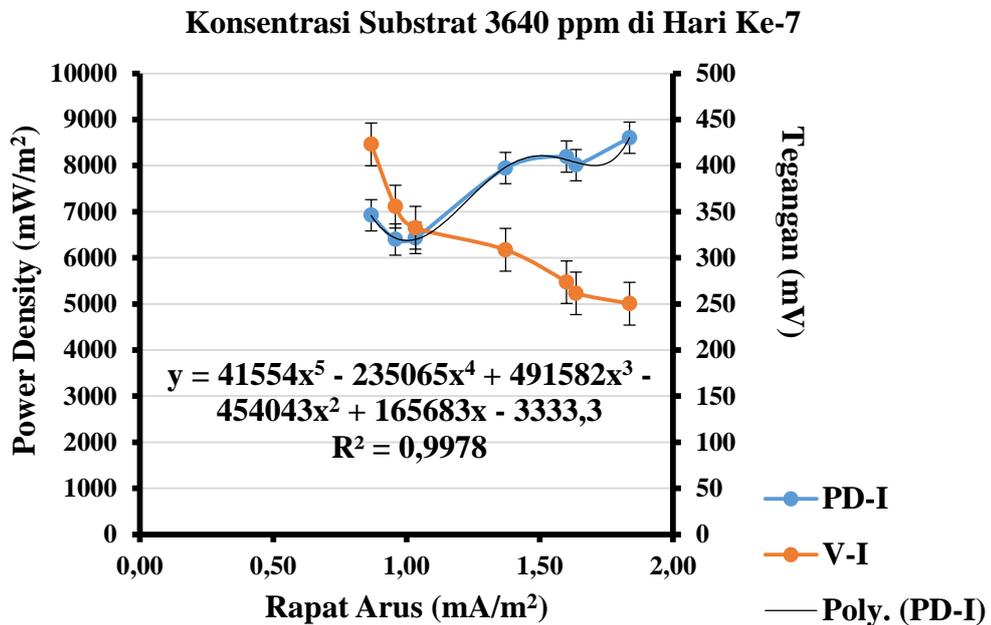


Gambar 4.11 Grafik Hubungan Antara *Power Density* Terhadap Rapat Arus Tiap Konsentrasi Pada Hari Ke-8.

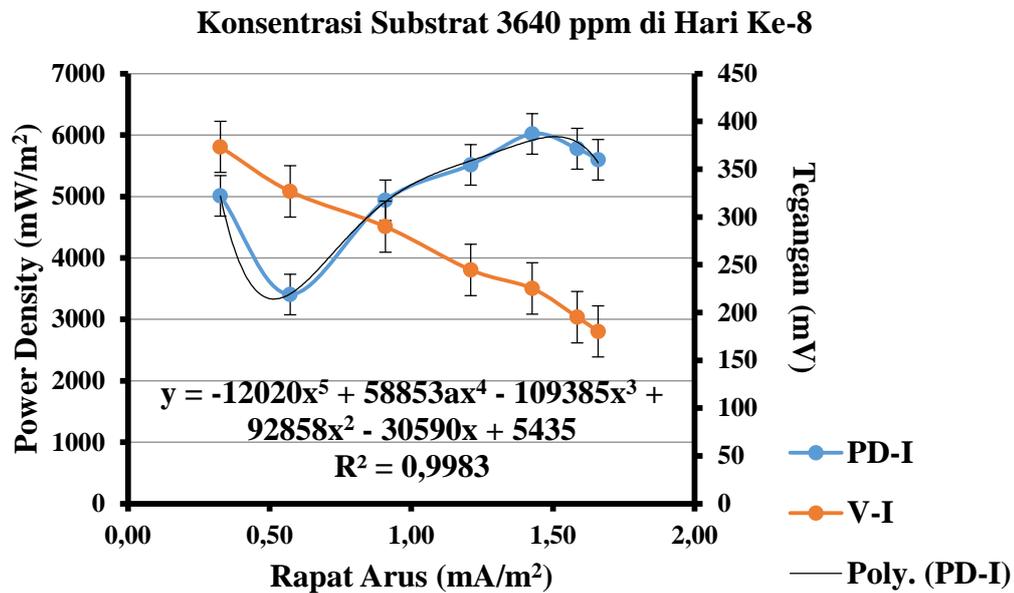
Dapat dilihat pada Gambar 4.9, Gambar 4.10, dan Gambar 4.11 ialah grafik hubungan antara *power density* tiap konsentrasi pada hari ke-6, hari ke-7, dan hari ke-8. Pada tiap konsentrasi substrat mempunyai tren grafik yang sama di mana semakin kecil nilai *power density*-nya, maka semakin kecil juga nilai konsentrasi substratnya. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai *power density* yang dihasilkan, maka semakin besar nilai rapat arus yang dihasilkan. Berdasarkan grafik tersebut, untuk konsentrasi substrat 3640 ppm dengan label pengenceran 1 memperoleh nilai *power density* terhadap rapat arus lebih besar daripada konsentrasi substrat lainnya.



Gambar 4.12 Grafik Hubungan *Power Density* Terhadap Rapat Arus dan Grafik Tegangan Terhadap Rapat Arus Pada Konsentrasi Substrat 3640 ppm Dengan Label Pengenceran 1 di Hari Ke-6.



Gambar 4.13 Grafik Hubungan *Power Density* Terhadap Rapat Arus dan Grafik Tegangan Terhadap Rapat Arus Pada Konsentrasi Substrat 3640 ppm Dengan Label Pengenceran 1 di Hari Ke-7.



Gambar 4.14 Grafik Hubungan *Power Density* Terhadap Rapat Arus dan Grafik Tegangan Terhadap Rapat Arus Pada Konsentrasi Substrat 3640 ppm Dengan Label Pengenceran 1 di Hari Ke-8.

Gambar 4.12, Gambar 4.13, dan Gambar 4.14 merupakan grafik hubungan *power density* terhadap rapat arus dan grafik tegangan terhadap rapat arus pada konsentrasi substrat 3640 ppm dengan label pengenceran 1 di hari ke-6, hari ke-7, dan hari ke-8. Garis berwarna biru pada grafik tersebut menunjukkan hubungan *power density* terhadap rapat arus, sedangkan garis berwarna orange pada grafik tersebut menunjukkan hubungan tegangan terhadap rapat arus pada konsentrasi substrat sebesar 3640 ppm dengan label pengenceran 1.

Sesuai Gambar 4.12, Gambar 4.13, dan Gambar 4.14 yang merupakan kurva polarisasi dapat disimpulkan bahwa ketika rapat arus semakin besar, maka terjadi penurunan nilai tegangan listrik sedangkan nilai arus listrik semakin tinggi. Pada nilai *power density* berbanding lurus dengan rapat arus di mana ketika rapat arus semakin besar, maka nilai *power density* yang dihasilkan juga semakin besar. Tingginya nilai arus listrik yang dihasilkan menunjukkan adanya transfer elektron berjumlah besar dari ruang anoda ke ruang katoda. Sedangkan, terjadinya penurunan nilai tegangan listrik dikarenakan melambatnya transfer elektron yang terjadi pada permukaan anoda. Cepat lambatnya reaksi tersebut dipengaruhi oleh

beberapa faktor, yakni bahan elektroda yang digunakan, metabolisme bakteri, kondisi operasional seperti temperatur, peningkatan resistensi internal dalam substrat yang menyebabkan terjadinya penurunan beda potensial antara elektroda dan larutan. Sesuai dengan Gambar 4.12, Gambar 4.13, dan Gambar 4.14, pada garis berwarna orange (tegangan terhadap rapat arus) terjadi penurunan tegangan listrik seiring peningkatan rapat arus. Hal tersebut dikarenakan resistansi internal dalam substrat meningkat pesat dengan terjadinya perbedaan konsentrasi ion pada anoda dan katoda akibat dari proses degradasi materi organik oleh mikroorganisme berupa pembentukan biofilm yang dapat merusak struktur serat dan mengurangi kekuatan material *carbon veil*. Akibatnya, nilai *power density* menurun seiring dengan bertambahnya jumlah sel bakteri limbah yang menyebabkan semakin banyak proton dan elektron yang dihasilkan dari proses metabolisme sehingga nilai kuat arus meningkat (Kim, 2009). Pada penelitian ini diperoleh nilai *power density* optimum sebesar 864 mW/m^2 dengan konsentrasi 3640 ppm berlabel pengenceran 1.

Produksi listrik yang dihasilkan oleh substrat bakteri limbah rumen sapi lebih besar dibandingkan dengan substrat batang sagu menggunakan bakteri *Lactobacillus plantarum* pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Pada jenis substrat bakteri limbah rumen sapi diperoleh nilai *power density* optimum sebesar 864 mW/m^2 dengan tegangan listrik sebesar 433 mV dan kuat arus listrik sebesar 1,83 mA. Sedangkan pada jenis substrat batang sagu menggunakan bakteri *Lactobacillus plantarum* sebesar $50,082 \text{ mW/m}^2$ (Rahmaniah *et al.*, 2020). Berdasarkan penelitian sebelumnya dari (Utami *et al.*, 2019) bakteri limbah kulit pisang mampu menghasilkan nilai *power density* optimum sebesar 31 mW/m^2 . Hal tersebut menunjukkan bahwa bakteri limbah rumen sapi lebih efektif dibandingkan dengan substrat bakteri limbah kulit pisang dan substrat batang sagu dikarenakan perbedaan jenis kandungan substrat yang diujikan pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Sehingga besar harapan bakteri limbah rumen sapi dapat dijadikan energi terbarukan produksi listrik.

Selain perbedaan jenis kandungan pada substrat yang diujikan, waktu inkubasi bakteri juga memengaruhi nilai *power density* optimum pada sistem

Microbial Fuel Cell (MFC). Pada penelitian ini, bakteri limbah rumen sapi dengan campuran lumpur sawah aktif menghasilkan nilai *power density* optimum pada waktu inkubasi hari ke-6, hari ke-7, dan hari ke-8 sebesar 721 mW/m², 864 mW/m², dan 597 mW/m². Hal tersebut didukung oleh penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sipayung *et al.*, (2019) bahwa hasil eksperimen formulasi substrat bakteri limbah tomat busuk dicampur dengan lumpur sawah menghasilkan kerapatan daya pada hari ke-3, ke-7, dan ke-11 sebesar 1013,98 mW/m²; 684,14 mW/m²; dan 427,08 mW/m². Pada waktu inkubasi bakteri ini, untuk substrat bakteri limbah tomat lebih cepat dibandingkan dengan bakteri rumen sapi, yakni pada hari ke-3. Namun, jeda untuk memperoleh nilai *power density* optimum kedua dan ketiga masih memerlukan waktu yang cukup lama dibandingkan dengan substrat bakteri limbah rumen sapi. Hal tersebut dikarenakan waktu pembusukan memengaruhi nilai arus dan tegangan yang dihasilkan dari substrat yang berbeda. Penurunan nilai kerapatan daya akibat variasi waktu pembusukan dapat terjadi dikarenakan adanya kestabilan mikrob yang mendegradasi senyawa organik sebagai substrat. Apabila waktu inkubasi bakteri terlalu lama, maka senyawa organik yang terdapat di ruang anoda akan terus terdegradasi sebab tidak ditemukan senyawa organik yang tersisa untuk dioksidasi. Serta kandungan nitrat di dalam substrat lumpur sawah dapat dijadikan sebagai akseptor elektron dalam kompartemen anoda sehingga nilai produksi listrik yang dihasilkan oleh sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)* masih rendah akibat dari proses denitrifikasi. Proses ini biasanya terjadi pada sawah yang tergenang, di mana bakteri menggunakan nitrat penerima elektron terakhir untuk memperoleh energi pada kondisi oksigen terbatas atau aerob (Putra *et al.*, 2012).

Selain waktu inkubasi bakteri, pemberian variasi konsentrasi substrat juga memengaruhi nilai produksi listrik yang dihasilkan. Pada penelitian ini menggunakan variasi konsentrasi sebanyak 3640 ppm, 1970 ppm, 1250 ppm, 923 ppm, 693 ppm, 582 ppm, dan 0 ppm. Dalam 3 hari optimum penelitian ini terjadi perbedaan nilai *power density* optimum yang dihasilkan melalui *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Pada tabel 4.1 telah ditunjukkan bahwa hasil nilai *power density* optimum yang didapat dari pengukuran adalah 721 mW/m² untuk hari ke-6; 864

mW/m² untuk hari ke-7; dan 597 mW/m² untuk hari ke-8 dengan konsentrasi 3640 ppm. Hal tersebut didukung oleh penelitian sebelumnya yang dilaksanakan oleh Mulyono *et al.*, (2022) memperoleh nilai *power density* maksimum sebesar 188,23 mW/m² pada variasi konsentrasi substrat jenis bakteri cair tahu dengan nilai konsentrasi 3640 ppm. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar tingkat konsentrasi substrat yang diberikan, maka nilai *power density* yang dihasilkan juga semakin besar.

Hasil perbandingan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya dapat disimpulkan bahwa bakteri limbah rumen sapi mampu menghasilkan listrik yang lebih besar dibandingkan dengan bakteri limbah tomat busuk, limbah cair tahu, substrat batang sagu, dan bakteri kulit pisang. Hal tersebut menunjukkan bahwa bakteri limbah rumen sapi berpeluang untuk dijadikan sebagai energi terbarukan produksi listrik melalui sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Perolehan *power density* optimum dapat ditingkatkan dengan memperhatikan beberapa faktor yang mendukung bakteri untuk bekerja secara optimal, baik dari pH, temperatur, jenis substrat yang digunakan, kandungan nutrisi, tambahan elektrolit, penggunaan elektroda yang tepat, dan sebagainya.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dari hasil penelitian yang telah dilaksanakan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Variasi konsentrasi substrat memengaruhi nilai *power density* yang dihasilkan. Semakin tinggi tingkat konsentrasi substrat, maka nilai *power density* yang dihasilkan semakin besar. Hasil nilai *power density* optimum yang diperoleh pada substrat jenis bakteri limbah rumen sapi ditunjukkan pada label pengenceran 1 dengan konsentrasi substrat sebesar 3640 ppm.
2. Waktu inkubasi bakteri memengaruhi perolehan nilai *power density*. Nilai *power density* yang dihasilkan terus berubah seiring dengan penambahan waktu (hari). Hal tersebut dikarenakan bakteri mengalami 4 fase pertumbuhan di waktu tertentu. Pada penelitian ini yang menggunakan jenis substrat lumpur sawah aktif dan bakteri limbah rumen sapi menghasilkan nilai *power density* optimum pada hari ke-7 sebesar 864 mW/m².

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan melalui penelitian ini ialah dilakukannya penelitian dan pengembangan berlanjut dengan mengkaji berbagai parameter lainnya yang memengaruhi kinerja sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Hal tersebut dikarenakan terbatasnya pengukuran *power density* optimum yang dihasilkan. Pengembangan dapat dilakukan dengan mengeksplor berbagai hal yang mendukung perolehan tegangan dan kuat arus listrik secara optimal baik dari substrat, elektroda yang digunakan pada penelitian, serta membran yang digunakan pada sistem *Microbial Fuel Cell (MFC)*. Selain itu, juga memberikan inovasi terkait energi alternatif yang ramah lingkungan dengan harga yang lebih terjangkau bagi masyarakat pengguna listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, T. N., Kirom, M. R., & Iskandar, R. F. (2017). Analisis Pengaruh Material Logam Sebagai Elektroda Microbial Fuel Cell Terhadap Produksi Energi Listrik Analysis of the Effect of Metals As an Electrode in Microbial Fuel Cell To the Electrical Energy Production. *E-Proceeding of Engineering*, 4(2), 2123–2138.
- Ali Elfarrar, M., & Kaya, M. (2021). Estimation of electricity cost of wind energy using Monte Carlo simulations based on nonparametric and parametric probability density functions. *Alexandria Engineering Journal*, 60(4), 3631–3640.
- Arora, S. (1998). *Pencernaan Mikrob Pada Ruminansia*. Gadjah Mada Press.
- Ashoka, H., & Bhat, P. (2012). Comparative Studies on Electrodes for the Construction of Microbial Fuel Cell. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 3(4), 2278–2599.
- Ata, M. M. A. (2021). *Pemanfaatan Limbah Cair Perikanan Untuk Menghasilkan Energi Listrik Dengan Teknologi Microbial Fuel Cell (MFC) Berbasis Keramik*. Universitas Jember.
- Bai, S & Kalaicchevlan. (2012). Cellulase Production by *Bacillus subtilis* Isolated from Cow Dung. *Archives of Applied Science Research*, 4.
- Behera, M., Jana, P. S., More, T. T., & Ghangrekar, M. M. (2010). Rice mill wastewater treatment in microbial fuel cells fabricated using proton exchange membrane and earthen pot at different pH. *Bioelectrochemistry (Amsterdam, Netherlands)*, 79(2), 228–233.
- Blakely, J., & Bade, D. H. (1991). *Ilmu Peternakan*. Gajah Mada Universitas Press (4th ed.).
- Bose, D., Dhawan, H., Kandpal, V., Vijay, P., & Gopinath, M. (2018). Sustainable power generation from sewage and energy recovery from wastewater with variable resistance using microbial fuel cell. *Enzyme and Microbial Technology*, 118, 92–101.
- Budiyanto, M. A. K. (2013). *Tipologi Pendayagunaan Kotoran Sapi Dalam Upaya Mendukung Pertanian Organik Di Desa Sumpersari Kecamatan Poncokusumo Kabupaten Malang*.
- Elsa Nuramanah. (2021). *Cair Tahu Dengan Campuran Lumpur Sawah Sebagai Sumber Energi Listrik Dengan Sistem Microbial Fuel Cell (Mfc) the Effect of Mass Ratio and Incubation Time on Tofu Liquid Waste With a Mixture of Rice Fields Sludge As a Source of Electrical Energy Through*. 8(1), 415–422.
- Fitriani Idham, Sofia Halimi, S. L. (2009). Alternatif Baru Sumber Pembangkit Listrik dengan Menggunakan Sedimen Laut Tropika Melalui Teknologi Microbial Fuel Cell. *In Skripsi*, Bogor: Institut Pertanian Bogor.

- Hermawan, K.V., Djaenudin dan M. Rangga Sururi. 2014. Pengolahan air limbah industri tahu menggunakan sistem double chamber microbial fuel cell. Bandung: Jurnal Online ITENAS. No.1, Vol. 2.
- Ibrahim, B., Suptijah, P., & Adjani, Z. N. (2017). Performance of Microbial Fuel Cell to Generate Bioelectricity Uses Different Kinds of Electrode in the Fish Processing Wastewater. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 20(2), 296.
- Imoro, A. Z., Mensah, M., & Buamah, R. (2021). Developments in the microbial desalination cell technology: A review. *Water-Energy Nexus*, 4, 76–87.
- Kementrian ESDM. (2021). Minyak dan Gas Bumi Semester I 2021 Oil and Gas Semester I 2021. *Direktorat Jenderal Minyak Dan Gas Bumi Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral*, 104.
- Kim, MH. (2009). An Analysis of Anaerobic Dual-Anode Chambered Microbial Fuel Cell (MFC) Performance. *Master's Thesis*. University of Tennessee.
- Kristin, E. (2012). *Produksi Energi Listrik Melalui Microbial Fuel Cell Menggunakan Limbah Industri Tempe*. 1–50.
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aeltermann, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>.
- Min, B., Cheng, S., & Logan, B. E. (2005). Electricity Generation Using Membrane And Salt Bridge Microbial Fuel Cell. *Water Research*, 39, 1675–1686.
- Momoh, O. L. Y. (2011). A novel electron acceptor for microbial fuel cells: Nature of circuit connection on internal resistance. *Journal of Biochemical Technology*, 2(4), 216–220.
- Mulyanti, N., & pujiharti, yulia. (2017). Prosiding Seminar Nasional Agroinovasi Spesifik Lokasi Untuk Ketahanan Pangan Pada Era Masyarakat Ekonomi Asean Mekanisme Dan Kinerja Alat Pengeringan Gabah Di Lahan Rawa. *Agroinovasi Spesifik Lokasi Untuk Ketahanan Pangan Pada Era Masyarakat Ekonomi ASEAN*, 2, 1194.
- Mulyono, T., Garnet, M. R., & Eko Cahyono, B. (2022). *e-Prosiding Kolokium Hasil Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Periode 1 Tahun 2022 Studi Pemanfaatan Limbah Cair Tahu Sebagai Substrat Dalam Sistem Microbial Fuel Cell (MFC) Berbasis Keramik (Utilization Of Tofu Liquid Waste With Ceramic-Based Mi*. 123–130.
- Novitasari, D. (2011). Optimasi Kinerja Microbial Fuel Cell (MFC) Untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Bakteri *Lactobacillus bulgaricus*. *Skripsi*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- 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. *Bioresourc Technology*, 101(6), 1533–1543.

- Pelczar, J. M., & Chan, E. C. S. (2007). *Dasar-Dasar Mikrobiologi Jilid I*. Universitas Press.
- Purbowati, E., Rianto, E., Dilaga, W. S., Lestari, C. M. S., & Adiwinarti, R. (2014). Characteristics of the rumen fluids, type and number of ruminal microbes in Java and Ongole Grade Bulls. *Buletin Peternakan*, 38(1), 21–26.
- Putra, H. E., Permana, D., Putra, A. S., & Haryadi, H. R. (2012). Pemanfaatan Sistem Microbial Fuel Cell Dalam Menghasilkan Listrik Pada Pengolahan Air Bakteri Industri Pangan. *Jurnal Kimia Terapan Indonesia*, 14(2), 1–9.
- R. Murni, Suparjo, Akmal, B. G. (2008). *Buku Ajar Teknologi Pemanfaatan Limbah Untuk Pakan. Laboratorium Makanan Ternak Fakultas Peternakan Universitas Jambi*. 1(1), 49.
- Rahmaniah, R., Ardi, S. B., & Fuadi, N. (2020). Aplikasi Teknologi Microbial Fuel Cell (Mfc) Untuk Menentukan Energi Listrik Substrat Batang Sagu (Metroxylon). *Teknosains: Media Informasi Sains Dan Teknologi*, 14(2), 172–175.
- Riadi, M. (2016). *Pertumbuhan Bakteri*. <https://www.kajianpustaka.com/2016/04/pertumbuhan-bakteri.html> (Diakses pada tanggal 22 Desember 2022).
- Sembiring, P. (2010). *Pengantar Ruminologi*. USU Press.
- Sipayung, N. P., Kirom, R., & Iskandar, R. F. (2019). Reaktor Dual Chamber Study of the Time Incubation Tomato Waste Substrate Effect in Microbial Fuel Cell To the Electrical Energy Production on Reactor Dual Chamber. *E-Proceeding of Engineering*, 6(2), 5485–5492.
- Stams, A. J. M., Oude Elferink, S. J. W. H., & Westermann, P. (2003). Metabolic interactions between methanogenic consortia and anaerobic respiring bacteria. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 81, 31–56.
- Statistik, B. P. (2021). *Populasi Sapi Potong Menurut Provinsi (Ekor) 2019-2021*. <http://s://www.bps.go.id/indicator/24/469/1/populasi-sapi-potongmenurut-provinsi.html> (Diakses pada tanggal 18 Desember 2022).
- Utami, L., Lazulva, L., & Fatisa, Y. (2019). Produksi Energi Listrik Dari Bakteri Limbah Kulit Pisang (*Musa Paradisiaca L.*) Menggunakan Teknologi Microbial Fuel Cells Dengan Permanganat Sebagai Katolit. *Al-Kimiya*, 5(2), 62–67.
- Yohanes Jones, L., Utamakno, Y., Galih, D., & Cahyono. (2015). Pemanfaatan Lempung Sebagai Bahan Baku Gerabah. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan Bahan Lempung*, 543–554.
- Zulfikar, E., Tamjidillah, M., & Ramadhan. (2021). Produktivitas Listrik Microbial Fuel Cell Pada Substrat Limbah Air Rebusan Mie Instan. *E-Proceeding of Engineering*, 3(1), 69–80.

LAMPIRAN

Lampiran 1. [Data Pengukuran Penelitian](#)

Lampiran 2. [Cara Perolehan *Power Density Optimum*](#)