

**DESAIN DAN KARAKTERISASI ELEKTRIK *PLANT MICROBIAL
FUELL CELL* (PMFC) MENGGUNAKAN ECENG GONDOK VARIASI
JARAK ELEKTRODA DAN PENGARUH CAHAYA MATAHARI**

Skripsi

Oleh

Mei Suryani



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

DESAIN DAN KARAKTERISASI ELEKTRIK *PLANT MICROBIAL FUELL CELL* (PMFC) MENGGUNAKAN ECENG GONDOK VARIASI JARAK ELEKTRODA DAN PENGARUH CAHAYA MATAHARI

Oleh

MEI SURYANI

Telah dilakukan penelitian desain dan karakterisasi elektrik *Plant Microbial Fuell Cell* (PMFC) dengan menggunakan eceng gondok variasi jarak elektroda dan pengaruh cahaya matahari. Penelitian ni bertujuan untuk untuk mengetahui karakteristik elektrik yang dihasilkan oleh PMFC jika dipengaruhi oleh jarak elektroda dan pengaruh cahaya matahari. Elektroda yang digunakan pada penelitian adalah elektroda Cu-Zn. Jarak elektroda yang digunakan pada penelitian yaitu 3 cm, 6 cm, 9 cm, dan 12 cm. Penelitian dilakukan di luar dan di dalam ruangan masing-masing selama 14 hari atau 331 jam. Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh bahwa PMFC dengan jarak elektroda lebih dekat menghasilkan nilai daya listrik yang semakin tinggi dibanding jarak elektroda yang lebih jauh. Daya listrik tertinggi dihasilkan oleh reaktor PMFC dengan jarak 3 cm yaitu sebesar 0,6786 mW pada pengambilan data hari ke-2 jam ke-37 atau di siang hari pukul 13.00 WIB. PMFC yang diletakkan di luar ruangan menghasilkan daya listrik yang lebih besar dibanding dengan PMFC di dalam ruangan.

Kata Kunci : *Cahaya Matahari, Daya Listrik, Eceng Gondok, Jarak Elektroda, PMFC*

ABSTRACT

DESIGN AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF PLANT MICROBIAL FUELL CELL (PMFC) USING WATER hyacinth VARIATIONS OF ELECTRODE DISTANCE AND THE EFFECT OF SUN

By

MEI SURYANI

Research on the design and electrical characterization of Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) has been carried out using water hyacinth with variations in electrode distance and the effect of sun. This research aims to determine the electrical characteristics produced by PMFC if it is affected by the electrode distance and the influence of sun. The electrode used in this research is a Cu-Zn electrode. The electrode spacing used in this study is 3 cm, 6 cm, 9 cm, and 12 cm. The study was respectively conducted outdoors and indoors for 14 days or 331 hours. Based on the results of the research, it was found that PMFCs with closer electrode spacing produced higher electrical power values than those with longer electrode spacing. The highest electric power produced by the PMFC reactor with a distance of 3 cm is 0.6786 mW on the 2nd day of data collection at 37 hours or in the afternoon at 13.00 WIB. A PMFC placed outdoors produces more electrical power than an indoor PMFC.

Keywords : *Electric Power, Electrode Distance, PMFC, Sunlight, Water Hyacinth*

**DESAIN DAN KARAKTERISASI ELEKTRIK *PLANT MICROBIAL
FUELL CELL* (PMFC) MENGGUNAKAN ECENG GONDOK VARIASI
JARAK ELEKTRODA DAN PENGARUH CAHAYA MATAHARI**

Oleh

MEI SURYANI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

Judul Skripsi : **DESAIN DAN KARAKTERISASI ELEKTRIK
PLANT MICROBIAL FUELL CELL (PMFC)
MENGUNAKAN ECENG GONDOK
VARIASI JARAK ELEKTRODA DAN
PENGARUH CAHAYA MATAHARI**

Nama Mahasiswa : **Mei Suryani**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1817041014

KBK : Instrumentasi

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Pembimbing I

Pembimbing II

Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si.
NIP. 197108291997032001

Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 198010102005011002

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 198010102005011002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

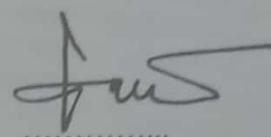
Ketua

: Sri Wahyu Suciyati, S.Si., M.Si.



Sekretaris

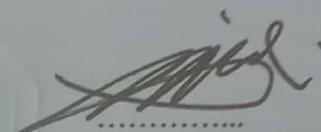
: Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.



Penguji

Bukan pembimbing

: Dr. Junaidi, M.Sc.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Supto Dwi Yuwono, S.Si., M.Si.

NIP. 197407052000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 11 Oktober 2022

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila ada pernyataan saya yang tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 12 Oktober 2022



Mei Suryani
NPM. 1817041014

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Mei Suryani dilahirkan pada tanggal 04 Mei 2000 di Lampung Utara, Provinsi Lampung. Penulis merupakan anak bungsu dari enam bersaudara dari pasangan Bapak Suparmo dan Ibu Suprihatin.

Penulis menyelesaikan Pendidikan di SDN 2 Indraloka II pada tahun 2012, SMPN 1 Way Kenanga tahun 2015, SMAN 1 Way Serdang tahun 2018. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN pada tahun 2018. Selama menempuh Pendidikan, penulis tergabung dalam Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) sebagai anggota sebagai anggota Kaderisasi periode 2020-2021.

Penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PDAM Way Rilau Kota Bandar Lampung pada tahun 2021 dan menyelesaikan laporan PKL dengan judul “Pengukuran Tingkat Akurasi Sensor *Turbidity* dan Sensor pH di Instalasi Pengolahan Air (IPA) II PDAM Way Rilau Kota Bandar Lampung”. Penulis pernah melakukan pengabdian masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung tahun 2021 di Desa Indraloka II Kec. Way Kenanga Kab. Tulang Bawang Barat. Penulis juga menyelesaikan penelitian skripsi di Jurusan Fisika dengan Judul “**Desain dan Karakterisasi Elektrik *Plant Microbial***

Fuell Cell (PMFC) Menggunakan Eceng Gondok Variasi Jarak Elektroda dan Pengaruh Cahaya Matahari”.

PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur kepada Allah SWT, skripsi ini ku persembahkan kepada

Bapak Suparmo dan Ibu Suprihatin

Kedua orang tuaku yang telah membesarkan, mendidik, mendukung, mendoakan, dan menjadi motivasiku selama ini

Kakak-kakakku serta keluarga

Selalu memberi semangat dan dorongan kepada Penulis

Bapak/Ibu Guru dan Bapak/Ibu Dosen

Terima kasih atas bekal ilmu pengetahuan dan budi pekerti yang telah membuka hati dan wawasanku

Para sahabat dan teman-teman seperjuangan Fisika FMIPA Unila 2018

Terima kasih atas kebaikan dan kebersamaan yang kita lalui

Serta almamater tercinta

“Universitas Lampung”

MOTTO

“Teruslah bergerak meski perlahan. Dengan begitu masa depan akan lebih mudah untuk di dapatkan”

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”

(Al-Insyirah: 5)

“Ingatkan dirimu bahwa tidak apa-apa menjadi tidak sempurna”

(Bangtan Soyeondan)

“Senyum hangat adalah bahasa universal kebaikan”

(BTS: J-Hope)

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Desain dan Karakterisasi Elektrik *Plant Microbial Fuell Cell* (PMFC) Menggunakan Eceng Gondok Variasi Jarak Elektroda dan Pengaruh Cahaya Matahari”**.

Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada bidang Instrumentasi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Penekanan dalam skripsi ini adalah pembuatan PMFC untuk mengetahui karakteristik elektrik yang dihasilkan jika dipengaruhi oleh jarak elektroda dan pengaruh cahaya matahari.

Penulis menyadari bahwa penyajian skripsi ini masih banyak kekurangan dalam penulisan maupun referensi data. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan dan penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan menjadi rujukan untuk penelitian berikutnya agar lebih sempurna.

Bandar Lampung, 12 Oktober 2022

Penulis

SANWACANA

Alhamdulillah puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan nikmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan judul **“Desain dan Karakterisasi Elektrik *Plant Microbial Fuell Cell* (PMFC) Menggunakan Eceng Gondok Variasi Jarak Elektroda dan Pengaruh Cahaya Matahari”**.

Penulis menyadari bahwa dalam melakukan penelitian tidak lepas dan dukungan, bimbingan, motivasi serta do'a dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Ibu Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing I yang senantiasa memberikan bimbingan, saran, motivasi serta ilmunya selama penulisan skripsi.
2. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku dosen pembimbing II yang senantiasa memberi saran, masukan, dan motivasi dalam penulisan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc. selaku dosen penguji yang telah memberi evaluasi dan masukan kepada penulis dalam penulisan skripsi.
4. Bapak Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, M.T. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
5. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si. selaku Dosen Pembimbing akademik atas bimbingannya kepada penulis selama masa kuliah.

6. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
7. Seluruh Dosen serta Staf Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
8. Kedua orang tuaku Bapak Suparmo dan Ibu Suprihatin, yang selalu memberikan kasih sayang, membesarkan, mendidik dan mendoakanku sampai saat ini. Kepada kakak-kakakku, Sugiarto S.Pd.SD., Susi Susanti S.Pd., Sundari S.Pd., Waluyo S.T., dan Iskandar yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan doa untuk penulis.
9. Rizky Esa Ramadhan sebagai sahabat terdekat yang selalu memberi semangat, dukungan dan motivasi, serta menjadi tempat diskusi yang baik bagi penulis.
10. Teman-teman dekat, Dwi Lestari, Intan Pubiyanti, Mella Ambarwati, Noni Susanti, Nurul Dilawati, Yessi Efridahniar, dan Wiwin Sulistiani yang selalu memberi motivasi kepada penulis untuk segera menyelesaikan skripsi ini.
11. Teman-teman seperjuangan Fisika 2018, kakak-kakak tingkat, serta adik-adik tingkat yang telah membantu dan memberikan semangat dalam proses menyelesaikan tugas akhir.
12. Semua pihak yang tidak penulis cantumkan, yang telah memberikan bantuan moril maupun materiil kepada penulis.

Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan dan senantiasa memberi rahmat serta hidayah-Nya kepada kita. Aamiin.

Bandar Lampung, 12 Oktober 2022

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN.....	ix
MOTTO	x
KATA PENGANTAR.....	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xx
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan penelitian	4

1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terkait.....	6
2.2 Energi.....	8
2.3 <i>Fuell Cell</i>	10
2.4 <i>Microbial Fuell Cell</i> (MFC)	13
2.5 <i>Plant Microbial Fuell Cell</i> (PMFC)	19
2.6 Tumbuhan PMFC	30
2.7 Elektroda.....	32
2.8 Korosi	34
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	36
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	36
3.3 Prosedur Penelitian.....	37
3.4 Rancangan Data Hasil Penelitian	43
3.5 Rancangan Analisis Data Penelitian.....	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Pembuatan PMFC dengan Variasi Jarak Elektroda dan Pengaruh Cahaya Matahari	48
4.2 Hasil Peneitian PMFC di Luar Ruangn	51
4.3 Hasil Penelitian PMFC di Dalam Ruangn	59
4.4 Laju Korosi Pada PMFC.....	65

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan 67

5.2 Saran 68

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Desain Reaktor PMFC.....	7
Gambar 2.2 Sketsa Desain Reaktor PMFC	7
Gambar 2.3 Prinsip Kerja MFC.....	16
Gambar 2.4 Basic Single Chamber MFC	17
Gambar 2.5 Sketsa SCMFC dengan katoda terbuka	17
Gambar 2.6 Sketsa Double Chambered MFC	18
Gambar 2.7 Double Chambered MFC.....	18
Gambar 2.8 Mekanisme konversi substrat dalam PMFC.....	24
Gambar 2.9 Proses transfer elektron pada PMFC	25
Gambar 2.10 Plant-MFC	26
Gambar 2.11 Macrophyte PMFC	27
Gambar 2.12 Constructed wetland MFC (CW-MFC).....	28
Gambar 2.13 Bryophyte MFC System	29
Gambar 2.14 Eceng Gondok	31
Gambar 2.15 Proses korosi secara galvanis	35
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	38
Gambar 3.2 Desain PMFC.....	40
Gambar 3.3 Desain pengambilan data.....	40

Gambar 3.4	Grafik tegangan terhadap waktu pada PMFC di luar ruangan	45
Gambar 3.5	Grafik tegangan terhadap waktu pada PMFC di dalam ruangan.....	46
Gambar 3.6	Grafik arus terhadap waktu pada PMFC di luar ruangan	46
Gambar 3.7	Grafik arus terhadap waktu pada PMFC di dalam ruangan.....	47
Gambar 3.8	Grafik pH air terhadap waktu pada PMFC di luar ruangan.....	47
Gambar 3.9	Grafik pH air terhadap waktu pada PMFC di dalam ruangan	47
Gambar 4.1	Elektroda Cu-Zn	49
Gambar 4.2	Penyusunan elektroda dalam reaktor PMFC	49
Gambar 4.3	PMFC di luar ruangan	50
Gambar 4.4	PMFC di dalam ruangan.....	50
Gambar 4.5	Tegangan listrik PMFC di luar ruangan, (a) pengaruh waktu [(a) jarak 3 cm, (b) jarak 6 cm, (c) jarak 9 cm, (d) jarak 12 cm)], (b) pengaruh jarak elektroda.....	51
Gambar 4.6	Daya listrik PMFC di luar ruangan, (a) pengaruh waktu [(a) jarak 3 cm, (b) jarak 6 cm, (c) jarak 9 cm, (d) jarak 12 cm)], (b) pengaruh jarak elektroda.....	55
Gambar 4.7	Pengukuran karakteristik pH versus daya listrik di luar ruangan....	56
Gambar 4.8	Pengukuran Dissolved Oxygen (DO) versus daya listrik.....	58
Gambar 4.9	Tegangan listrik PMFC di dalam ruangan, (a) pengaruh waktu [(a) jarak 3 cm, (b) jarak 6 cm, (c) jarak 9 cm, (d) jarak 12 cm)], (b) pengaruh jarak elektroda.....	60
Gambar 4.11	Daya listrik PMFC di dalam ruangan (a) pengaruh waktu [(a) jarak 3 cm, (b) jarak 6 cm, (c) jarak 9 cm, (d) jarak 12 cm)], (b) pengaruh jarak elektroda.....	62

Gambar 4.12 Pengukuran karakteristik pH dan daya listrik di dalam ruangan...	63
Gambar 4.13 Pengukuran Dissolved Oxygen (DO) versus daya listrik.....	64
Gambar 4.14 Elektroda setelah digunakan.....	65

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Jenis Abiotic Fuel Cell	12
Tabel 2.2 Nilai potensial elektroda.....	33
Tabel 3.1 Pengukuran karakteristik elektrik PMFC di luar ruangan variasi jarak 3, 6, 9, dan 12 cm.....	43
Tabel 3.2 Pengukuran karakteristik elektrik PMFC di dalam ruangan variasi jarak 3, 6, 9, dan 12 cm	44
Tabel 3.3 Pengukuran pH air di luar ruangan.....	44
Tabel 3.4 Pengukuran pH air di dalam ruangan	44
Tabel 3.5 Pengukuran Massa Elektoda	44
Tabel 4.1 Nilai tegangan maksimum dan minimum PMFC di luar ruangan.....	52
Tabel 4.2 Nilai arus maksimum dan minimum PMFC di luar ruangan	52
Tabel 4.3 Nilai daya listrik maksimum dan minimum PMFC di luar ruangan....	55
Tabel 4.4 Nilai tegangan maksimum dan minimum PMFC di dalam ruangan....	61
Tabel 4.5 Nilai arus maksimum dan minimum PMFC di dalam ruangan.....	61
Tabel 4.6 Nilai daya listrik maksimum dan minimum PMFC di dalam ruangan	63

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fuell cell merupakan perangkat berbasis konversi energi, yaitu mengubah energi dari bahan bakar (*fuell*) tertentu menjadi energi listrik arus searah (*Direct Current*) dengan menggunakan prinsip elektrokimia. Prinsip ini memanfaatkan kekuatan hidrogen sebagai bahan bakar yang memiliki potensi untuk memberi energi pada apa pun (Maheswari, 2018).

Fuel cell digolongkan menjadi dua, yaitu *Abiotic Fuel Cell* dan *Biological Fuel Cell*. Perbedaan dari kedua jenis ini dapat dilihat dari ada atau tidaknya keterlibatan makhluk hidup atau komponen biologi dalam *Fuell Cell* tersebut (Mahadevan et al., 2014). Pengembangan lebih lanjut dari *fuell cell* adalah *Microbial Fuell Cell* (MFC). Dalam penerapannya, MFC memanfaatkan mikroba untuk memecah komponen organik menjadi elektron dan proton. Elektron yang dihasilkan mengalir dari anoda menuju katoda menyebabkan adanya beda potensial sehingga terbentuk energi listrik (Slate et al., 2019).

Pengembangan MFC saat ini telah beragam, seperti menggunakan tanaman sebagai media, disebut dengan *Plant Microbial Fuell Cell* (PMFC). PMFC adalah teknologi yang dapat digunakan untuk konversi energi matahari menjadi listrik melalui proses fotosintesis dengan simbiosis dalam hal nutrisi antara tanaman dan bakteri. Prinsip

dari PMFC adalah dengan mengubah energi matahari menjadi energi listrik melalui oksidasi rhizodeposit (sejumlah senyawa organik yang dilepaskan oleh permukaan akar). Fotosintesis terjadi pada daun tanaman dibantu energi matahari, karbon dioksida dan air untuk menghasilkan oksigen dan senyawa organik. Senyawa organik tanaman ditransfer hingga 60% dari daun ke akarnya. Hasil fotosintesis yang dilakukan oleh bakteri atau mikroba secara anaerobik terhadap penguraian karbohidrat menghasilkan karbon dioksida (CO_2), proton (H^+), dan elektron (e^-) (Prasad & Tripathi, 2018).

Penelitian PMFC di Indonesia mulai dilakukan untuk mengetahui potensi listrik yang dapat dihasilkan dari teknologi PMFC. Komponen utama PMFC antara lain matriks pendukung (bakteri), tanaman hidup, dan elektoda. Komponen-komponen tersebut berpengaruh terhadap karakteristik elektrik PMFC misalnya penelitian PMFC yang dilakukan dengan melihat pengaruh jumlah tanaman yang digunakan (Novelendah et al., 2018), pengaruh jarak elektroda dalam sistem PMFC (Putranto, 2018), dan pengaruh penggunaan elektroda sebagai anoda-katoda pada PMFC (Kadhafi, 2020). Selain itu, tanaman yang digunakan dalam pembuatan PMFC juga beragam. Tanaman padi telah menghasilkan *power density* sebesar 153.66 mW/cm^2 (Putranto, 2018), tanaman hias kadaka menghasilkan daya listrik sebesar 0.9603 mW (Kadhafi, 2020), eceng gondok menghasilkan *power density* sebesar $100,2 \text{ mW/m}^2$ (Hendrawan, 2020) Selain itu, tumbuhan laut atau alga juga dapat dimanfaatkan dalam pembuatan PMFC, dan menghasilkan *power density* $1293,151 \mu\text{W/m}^2$ (Rosyadi, 2017). PMFC menggunakan eceng gondok dengan variasi jumlah eceng gondok menghasilkan *Power Density* sebesar $0,772 \text{ mW/m}^2$ dengan jumlah eceng penuh (Novelendah et al., 2018).

Eceng gondok adalah tanaman air yang dianggap sebagai gulma di perairan karena pertumbuhannya yang relatif cepat dan mengganggu ekosistem air. Namun, tumbuhan air (salah satunya eceng gondok) sering digunakan pada pembuatan PMFC karena mempunyai kemampuan elektrolit dengan hasil listrik yang lebih banyak. Penelitian (Novelendah et al., 2018), membuktikan bahwa PMFC dengan media tanaman eceng gondok berpotensi menghasilkan daya listrik dengan rata-rata sebesar $0,4806 \text{ mW/m}^2$ pada pengujian selama 7 hari.

Berdasarkan pemaparan diatas, penelitian ini akan melakukan pembuatan PMFC untuk mengetahui dan menganalisis karakteristik elektrik serta potensi listrik yang dihasilkan oleh PMFC. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah jarak elektroda dan intensitas cahaya terhadap karakteristik elektrik yang dihasilkan PMFC. Penelitian ini juga menganalisis pengaruh laju korosi terhadap elektroda dengan membandingkan massa elektroda sebelum digunakan dan setelah digunakan. Elektroda yang digunakan yaitu elektroda Cu-Zn. Sedangkan tanaman yang digunakan adalah eceng gondok yang cukup mudah ditemukan karena dianggap sebagai gulma. Karakteristik elektrik yang dilihat pada penelitian ini berupa nilai tegangan dan arus yang dihasilkan. Berdasarkan nilai tersebut, maka akan dihitung daya listrik yang dihasilkan dari desain PMFC yang dibuat.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, permasalahan yang ada dirumuskan dalam beberapa hal berikut.

- a. Bagaimana membuat PMFC dengan eceng gondok sebagai tanaman pendukung untuk menghasilkan daya listrik?
- b. Bagaimana pengaruh jarak elektroda terhadap daya listrik yang dihasilkan oleh PMFC?
- c. Bagaimana pengaruh intensitas cahaya terhadap daya listrik yang dihasilkan oleh PMFC?
- d. Bagaimana pengaruh pH terhadap PMFC?
- e. Bagaimana pengaruh kadar oksigen terhadap daya listrik PMFC?
- f. Seberapa besar laju korosi yang terjadi pada plat elektroda?

1.3 Tujuan penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

- a. Membuat PMFC yang dapat menghasilkan daya listrik dengan mengaplikasikan tanaman eceng gondok.
- b. Mengetahui dan menganalisis pengaruh jarak elektroda terhadap daya listrik PMFC.
- c. Mengetahui pengaruh intensitas cahaya terhadap daya listrik PMFC.
- d. Mengetahui dan menganalisis pengaruh pH terhadap PMFC.
- e. Mengetahui dan menganalisis pengaruh kadar oksigen terhadap daya listrik PMFC.
- f. Mengetahui dan menganalisis pengaruh laju korosi terhadap plat elektroda pada PMFC.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

- a. Diperolehnya referensi baru terhadap PMFC yang dapat digunakan pada penelitian selanjutnya untuk menghasilkan sumber energi listrik alternatif yang bersifat ramah lingkungan.
- b. Diperoleh informasi karakteristik tumbuhan eceng gondok sebagai sumber energi listrik pada *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC).
- g. Diperoleh informasi karakteristik elektrik yang dihasilkan *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC) menggunakan eceng gondok ketika dipengaruhi jarak elektroda dan intensitas cahaya matahari.

1.5 Batasan Masalah

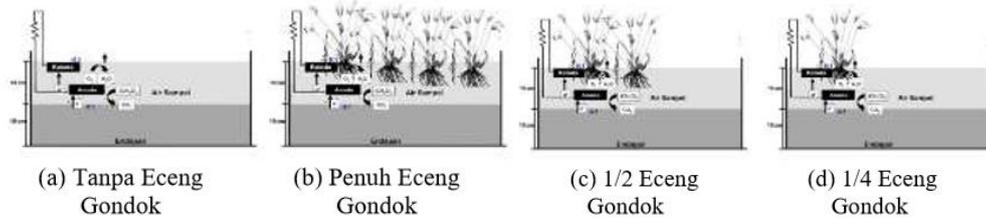
Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. Desain PMFC yang digunakan terbuat dari box bening berukuran 50 x 30 x 26 cm yang di dalamnya terdapat elektroda (anoda dan katoda) dan eceng gondok.
- b. Penelitian ini dilakukan menggunakan elektroda Cu-Zn.
- c. Jumlah eceng yang digunakan sebanyak 3 buah, yang masing-masing diletakkan di 4 box PMFC.
- d. Menggunakan empat jarak elektroda yaitu 3, 6, 9, dan 12 cm.
- e. Penelitian dilakukan di luar ruangan (terpapar matahari langsung) dan di dalam ruangan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

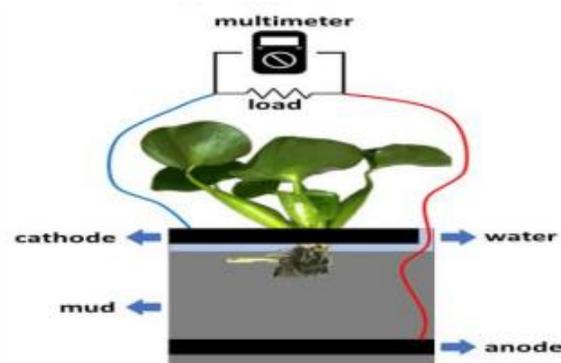
Beberapa penelitian terkait dengan pembuatan *Plant Microbial Fuel Cells* (PMFC) untuk melihat potensi listrik yang dihasilkan oleh PMFC dengan menggunakan tanaman eceng gondok pernah dilakukan oleh Novelendah et al., (2018) dan Hendrawan (2020). Pada penelitian oleh Novelendah et al., (2018) dilakukan pengujian PMFC dengan tujuan untuk melihat seberapa besar potensi listrik yang dihasilkan. Penelitian ini dilakukan menggunakan tumbuhan eceng gondok dan variasi jumlah eceng gondok. Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium selama 21 hari, dengan uji pendahuluan selama 14 hari yang dilanjutkan uji sesungguhnya selama 7 hari. Dalam penelitian, media yang digunakan adalah 4 buah reaktor kapasitas 50 Liter. Reaktor yang digunakan merupakan reaktor *single chamber* yang selanjutnya diisi beberapa komponen antara lain elektroda *graphene* (anoda dan katoda), endapan/sedimen sungai setinggi 10 cm dari dasar reaktor, air sungai setinggi 14 cm dari bagian atas permukaan sedimen, dan eceng gondok. Jumlah tanaman eceng gondok pada masing-masing reaktor yang digunakan yaitu eceng penuh (4 eceng), setengah penuh (2 eceng), seperempat (1 eceng), dan tanpa eceng gondok sebagai kontrol. Desain PMFC yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.1 Desain Reaktor PMFC (Novelendah et al., 2018)

Hasil penelitian menunjukkan *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC) dengan media tanaman eceng gondok berpotensi menghasilkan daya listrik sebesar $0,772 \text{ mW/m}^2$ untuk reaktor dengan jumlah eceng penuh. Sedangkan pada reaktor dengan jumlah eceng setengah, seperempat, dan kontrol masing-masing menghasilkan daya listrik sebesar $0,352 \text{ mW/m}^2$ pada hari pertama, $0,756 \text{ mW/m}^2$ pada hari ketujuh dan $0,575 \text{ mW/m}^2$. Daya listrik tertinggi dihasilkan oleh PMFC dengan jumlah eceng penuh.

Penelitian yang dilakukan oleh Hendrawan (2020) adalah penelitian tentang pengaruh jenis elektroda, jarak anoda-katoda, dan waktu pertumbuhan tanaman eceng gondok yang digunakan dalam pembuatan PMFC. Penelitian ini, dilakukan untuk mengetahui nilai maksimum *power density* dari suatu PMFC dengan melakukan variasi jenis anoda seperti *carbon felt*, besi, dan seng. Selain itu juga dilakukan variasi jarak anoda-katoda dari 10 cm dan 20 cm. Desain yang digunakan pada penelitiannya dapat dilihat dari gambar berikut.



Gambar 2.2 Sketsa Desain Reaktor PMFC (Hendrawan, 2020)

Penelitian ini menghasilkan nilai maksimum *power density* tertinggi sebesar 100,2 mW/m² dengan variasi jenis anoda bermaterial seng pada jarak 10 cm. Selanjutnya, dengan anoda bermaterial besi pada jarak 10 cm menghasilkan nilai maksimum *power density* sebesar 99,26 mW/m². PMFC dengan elektroda bermaterial *carbon felt* pada jarak 10 cm menghasilkan nilai maksimum *power density* terendah sebesar 3,29 mW/m². Sedangkan pada PMFC dengan jarak 20 cm menghasilkan *power density* sebesar 1,39 mW/m² untuk anoda *carbon felt*. Kemudian untuk anoda besi, *power density* yang dihasilkan yaitu sebesar 37,73 mW/m² dan PMFC dengan anoda seng (Zn) memiliki nilai maksimum *power density* sebesar 80,64 mW/m². Sehingga pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa PMFC dengan jarak anoda-katoda yang lebih dekat (10 cm) menghasilkan nilai maksimum *power density* yang lebih besar dibandingkan PMFC dengan jarak anoda katoda yang lebih jauh (20 cm), dan anoda yang paling baik digunakan adalah anoda dengan jenis seng (Zn).

2.2 Energi

Energi adalah kemampuan untuk melakukan usaha (kerja) atau melakukan suatu perpindahan. Satuan energi dalam Satuan internasional (SI) adalah joule. Dalam fisika, energi dapat digolongkan menjadi beberapa macam, antara lain: energi mekanik (gabungan dari energi kinetik dan energi potensial), energi panas, energi listrik, energi kimia, energi nuklir, energi cahaya, energi suara, dan sebagainya. Energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnakan, yang terjadi hanyalah perubahan bentuk energi ke bentuk energi yang lainnya (Salim & Taib, 2018).

Energi kinetik merupakan salah satu bentuk energi yang dapat dimiliki benda yang berhubungan dengan gerak. Jika pada sebuah benda bermassa m bekerja gaya

resultan F konstan, maka gaya yang bekerja pada benda tersebut akan menghasilkan percepatan. Energi kinetik sebuah benda dengan massa m dan laju v dapat dinyatakan dalam rumusan berikut.

$$E_K = \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.1)$$

dengan:

E_k = Energi kinetik benda (Joule)

m = massa benda (kg)

v = kecepatan benda (m/s^2) (Young & freedman, 2002).

Rumusan di atas dibuktikan dengan gaya konstan yang sebenarnya berlaku juga untuk gaya resultan yang berubah-ubah. Jika gaya resultan F besarnya berubah-ubah dan arahnya tetap dengan pergeseran arah gaya dalam sumbu X , maka usaha yang dilakukan oleh gaya resultan untuk memindahkan benda dari X_0 ke X adalah:

$$W = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_{x_0}^x \mathbf{F} \cdot d\mathbf{x} \quad (2.2)$$

Berdasarkan Hukum II Newton, maka persamaan di atas menjadi:

$$W = \int_{x_0}^x \mathbf{F} \cdot d\mathbf{x} = \int_{x_0}^x mv \frac{dv}{dx} dx = \int_{v_0}^v mv dv \quad (2.3)$$

$$W = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mv_0^2 \quad (2.4)$$

Benda juga kemungkinan memiliki energi potensial. Energi Potensial disebabkan adanya gaya gravitasi. Suatu benda memiliki energi potensial yang besar jika massanya semakin besar dan ketinggiannya semakin tinggi. Usaha yang dilakukan oleh gravitasi adalah :

$$W = \int_{y_1}^{y_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{y} \quad (2.5)$$

dengan y adalah ketinggian (h), maka :

$$W = mgh_2 - mgh_1 \quad (2.6)$$

Rumusan di atas menyatakan bahwa usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi adalah perubahan energi potensial atau energi potensial dinotasikan sebagai berikut.

$$E_p = mgh \quad (2.7)$$

dengan:

E_p = Energi potensial benda (Joule)

g = kecepatan gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)

h = ketinggian benda (m) (Young & Freedman, 2002).

Konsep energi tidak terlepas dari perubahan energi. Salah satu metode untuk menghasilkan energi listrik adalah dengan menggunakan metode elektrokimia. Elektrokimia merupakan ilmu kimia yang mempelajari tentang perpindahan elektron yang terjadi pada sebuah media pengantar listrik yang disebut elektroda. Konsep elektrokimia didasari oleh reaksi reduksi-oksidasi (redoks) dan larutan elektrolit. Pada reaksi reduksi terjadi peristiwa penangkapan elektron sedangkan reaksi oksidasi merupakan peristiwa pelepasan elektron yang terjadi pada media pengantar pada sel elektrokimia (Harahap, 2016).

2.3 Fuell Cell

Istilah *fuell cell* pertama kali di ungkapkan oleh Sir William Robert Grove pada tahun 1839, sehingga beliau disebut sebagai bapak *fuel cell*. *Fuell cell* merupakan suatu perangkat berbasis konversi energi, yaitu mengubah energi dari suatu bahan bakar (*fuell*) menjadi energi listrik arus searah dengan menggunakan prinsip

elektrokimia (Maheswari, 2018). Unit dasar dari *fuel cell* terdiri dari dua elektroda yaitu anoda dan katoda, bahan bakar, dan elektrolit. Anoda merupakan tempat terjadinya reaksi oksidasi, sedangkan untuk katoda merupakan tempat terjadinya reaksi reduksi (Sulistiyawati, 2020). Segmen utama dari *Fuell Cell* adalah elektrolit. Tipe dari elektrolit menceritakan tentang sifat-sifatnya. Oleh karena itu, dikatakan bahwa jenis elektrolit yang digunakan menjelaskan jenis *Fuell Cell* yang digunakan. Apapun bahan bakarnya jenis sel yang digunakan, prinsip kerjanya akan selalu menjadi sama (Maheswari, 2018).

2.3.1 Prinsip *Fuell Cell*

Fuel Cell tersusun dari sedikitnya 2 elektroda yaitu anoda dan katoda. Pada *Fuell Cell* berbahan bakar hidrogen pada bagian anoda terjadi proses oksidasi hidrogen menjadi elektron dan proton. Sedangkan pada bagian katoda terjadi reaksi reduksi atau yang biasa disebut *Oxygen Reduction Reaction (ORR)* (Hendrawan, 2020). Reaksi yang terjadi pada anoda dan katoda di *Fuell Cell* berlangsung sebagai berikut:



Fuel Cell berbahan bakar hidrogen terjadi ketika molekul hidrogen melakukan kontak dengan anoda, molekul tersebut akan terpisah menjadi ion hidrogen dan elektron, kemudian elektron akan mengalir melalui sirkuit luar menuju katoda sehingga timbul aliran listrik. Ion hidrogen melewati membran atau elektrolit menuju katoda, kemudian akan bergabung dengan elektron dan oksigen dari udara

kemudian akan membentuk molekul air. Prinsip kerja *Fuel Cell* berdasarkan kinerja komponen elektroda yaitu anoda dan katoda, serta elektrolit. Anoda berfungsi sebagai tempat terjadinya pemecahan hidrogen menjadi proton dan elektron. Katoda berfungsi sebagai tempat terjadinya reaksi penggabungan proton, elektron dan oksigen untuk membentuk air. Elektrolit merupakan media untuk mengalirkan proton. *Fuel Cell* bekerja berdasarkan prinsip pembakaran listrik-kimiawi. *Fuell Cell* ini akan memproduksi energi listrik arus searah, reaksi yang terjadi pada anoda menghasilkan elektron bebas, sedang pada katoda elektron bebas diikat, kemudian elektron-elektron bebas harus dialirkan keluar melalui penghantar menuju ke anoda, agar proses listrik-kimiawi dapat berlangsung (Hendrawan, 2020).

2.3.2 Jenis-jenis *Fuell Cell*

Ada berbagai sel bahan bakar yang sedang maju dan dikembangkan saat ini. Berbagai kategorisasi bahan *fuel cell* dibedakan seperti menurut jenis elektrolit, kombinasi dari jenis bahan bakar dan oksidan, suhu operasi, dan kondisi apakah bahan bakarnya diproses di luar (reformasi eksternal) atau di dalam. Namun, kategorisasi sel bahan bakar yang banyak digunakan terutama menurut jenis elektrolitnya (Ravichandran et al., 2021). *Fuell Cell* dapat secara luas dikategorikan ke dalam dua jenis, yaitu *Abiotic Fuell Cell* dan *Biological Fuell Cell*. Pada *Abiotic Fuell* komponen sel bahan bakarnya tidak terdiri dari bahan biologis apa pun. Sedangkan pada *Biotic* atau *Biological Fuell Cell* terdiri dari organisme hidup atau bahan biologis (seperti enzim atau turunannya) (Mahadevan et al., 2014). Jenis-jenis *Abiotic Fuell Cell* yang dikelompokkan menurut elektrolit yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut

Tabel 2.1 Jenis *Abiotic Fuell Cell*

Tipe	Fitur
<i>Alkaline fuel cells (AFC)</i>	Menggunakan KOH sebagai elektrolit dan katalis elektro seperti Ni, Ag dan oksida logam
<i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)</i>	Menggunakan membran polimer konduktif proton sebagai elektrolit dan Pt sebagai katalis
<i>Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)</i>	Menggunakan asam fosfat pekat sebagai elektrolit dan Pt sebagai katalis
<i>Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)</i>	Menggunakan oksida logam tidak berpori sebagai elektrolit
<i>Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)</i>	Menggunakan oksida logam tidak berpori sebagai elektrolit

Sementara itu, *Biological Fuell Cell* dapat dibedakan kembali menjadi dua jenis, yaitu *Microbial Fuel Cells (MFC)* dan *Enzymatic Fuel Cells (EFC)*. Dalam *Microbial Fuell Cell*, reaksi oksidasi dikatalisis oleh mikroba. Sedangkan jika katalis dari BFC adalah enzim, sel ini disebut sebagai *Enzymatic Fuell Cell*. Sementara mikroorganisme dan enzim mengkatalisis reaksi oksidatif yang terjadi di anoda, enzim terkadang digabungkan dengan katalis anorganik yang digunakan di katoda. BFC memanfaatkan substrat organik (seperti gula dan alkohol) dan beroperasi pada lingkungan bersuhu ringan sehingga aktivitas biologis menjadi optimal (Mahadevan et al., 2014).

2.4 *Microbial Fuell Cell (MFC)*

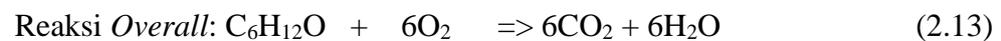
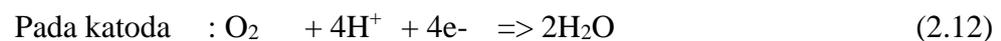
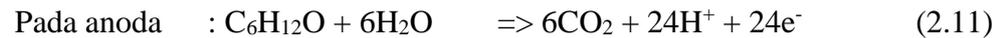
Dalam beberapa tahun terakhir, *Microbial Fuel Cell (MFC)* telah mendapatkan popularitas di antara komunitas penelitian. Ini menjadi berkelanjutan yang sangat menjanjikan. *Microbial Fuell Cell (MFC)* adalah sistem bioelektrokimia yang

menggunakan bakteri aktif elektrokimia atau biasa disebut juga *Electrochemically Active Bacteria* (EAB) untuk mengkatalisis reaksi pada satu atau kedua elektroda (anoda dan katoda) (Tapia et al., 2017). *Microbial Fuel Cell* merupakan salah satu teknologi konversi energi yang memanfaatkan kemampuan metabolisme bakteri. MFC dapat dikatakan sebagai reaktor bio-elektrokimia karena peranan bakteri dalam mengoksidasi senyawa organik maupun anorganik di ruang anoda dan menghasilkan proton dan elektron yang disalurkan menuju katoda (Dewi et al., 2020). Bakteri yang digunakan pada MFC adalah bakteri anaerob, dimana bakterinya bisa mengkonversi berbagai macam senyawa organik menjadi CO₂, air, dan energi. Melalui MFC sebagian energi yang dihasilkan bisa diambil dalam bentuk listrik (Syahri et al., 2019).

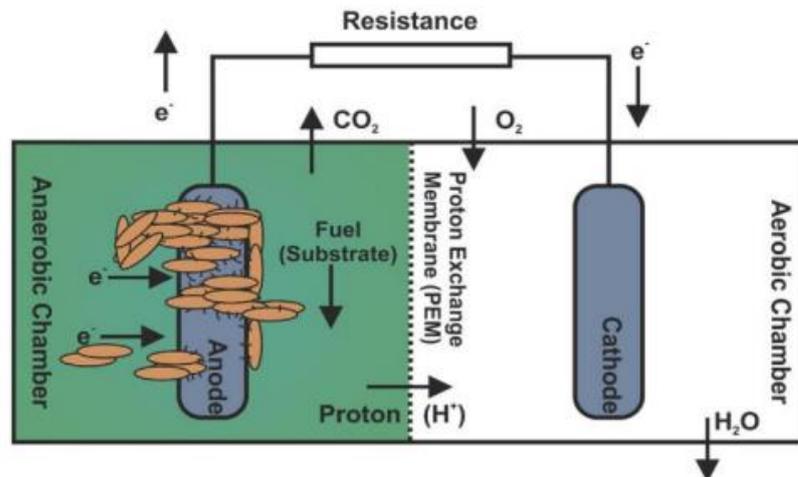
2.4.1 Prinsip Kerja *Microbial Fuel Cell* (MFC)

Kompartemen penyusun MFC umumnya terdiri dari anoda, katoda, membrane penukar proton (*proton exchange membrane*), sistem sirkuit listrik dan larutan elektrolit (Hendrawan, 2020). Mikroba akan melakukan metabolisme pada kompartemen anoda dalam keadaan anaerob mengurai substrat menjadi proton, elektron (e) dan karbondioksida CO₂ (Putra et al., 2014). Melalui MFC sebagian energi yang dihasilkan bisa diambil dalam bentuk listrik. MFC terdiri dari dua ruang yang terdiri dari ruang anoda dan katoda, bakteri hidup pada ruangan anoda dan mengubah substrat seperti glukosa, asetat juga limbah cair menjadi CO₂, proton, dan elektron. Pada ruangan anoda dalam sebuah MFC tidak terdapat oksigen, sehingga bakteri harus mengubah aseptor elektronnya menjadi sebuah aseptor *insoluble* seperti anoda MFC. MFC bisa digunakan untuk mengumpulkan elektron berasal dari metabolisme mikroba berdasarkan pada kemampuan bakteri

mentransfer elektron anoda. Elektron kemudian mengalir melalui sirkuit listrik dengan muatan pada katoda. Beda potensial antara anoda dan katoda bersama dengan aliran elektron menghasilkan daya (Syahri et al., 2019). Reaksi yang berlangsung pada MFC dengan substrat berupa glukosa dan oksigen sebagai aseptor adalah sebagai berikut.



Pada MFC mikroorganisme mengkonversi bahan bakar (*fuel*) yang digunakan, berupa substrat organik seperti glukosa, menjadi energi, CO₂, dan H₂O. Mikroorganisme hidup pada bagian anoda dari suatu MFC, dimana pada lokasi itu terjadi proses konversi suatu substrat organik menjadi CO₂, proton, dan elektron. Proses konversi terkatalisis melalui metabolisme mikroorganisme yang hidup. Metabolisme mikroorganisme dilakukan secara anaerob dikarenakan pada bagian anoda tidak terdapat oksigen. Elektron hasil metabolisme dari mikroorganisme dialirkan dari anoda melalui rangkaian listrik menuju katoda, sedangkan proton dialirkan melalui membran penukar proton menuju katoda. Jenis membran yang umum digunakan adalah *membran nafion*. Katoda terekspos secara langsung dengan oksigen sehingga terjadi reaksi pembentukan H₂O dari oksigen beserta proton dan electron (Slate et al., 2019). Secara umum, prinsip kerja MFC dapat dilihat dari gambar berikut.



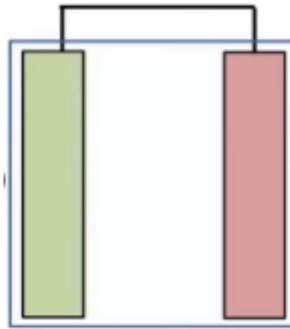
Gambar 2.3 Prinsip Kerja MFC (Slate et al., 2019)

2.4.2 Jenis-jenis MFC

Pembuatan MFC dapat dilakukan dengan berbagai desain atau tipe. Secara umum MFC digolongkan ke dalam 2 desain, yaitu *Single Chamber MFC* dan *Double Chamber MFC*.

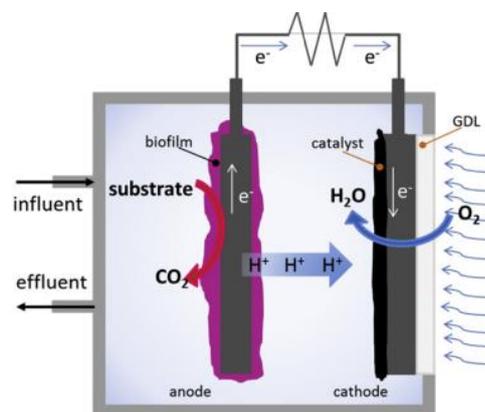
2.4.2.1 *Single Chambered MFC* (SCMFC)

Single Chambered MFC atau MFC bilik tunggal merupakan desain MFC yang paling sederhana dan mudah untuk dirakit. Pada desain ini anoda dan katoda terdapat pada bagian yang sama, namun terpisah oleh suatu lapisan pemisah. Oleh karena itu desain ini tidak perlu menggunakan membran penukar proton. Katoda diposisikan sedemikian mungkin untuk dapat tetap terekspos dengan udara agar dapat terjadi reaksi reduksi oksigen (Shaikh et al., 2016). *Single Chamber MFC* memiliki banyak desain yang tersedia dan cara yang berbeda untuk membuatnya. Prinsip dari desain *Single Chamber MFC* adalah bahwa anoda dan katoda akan diletakkan di kompartemen yang sama (Bohari et al., 2019) yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Basic Single Chamber MFC* (Bohari et al., 2019)

Desain dasar tidak memiliki membran penukar proton dan sangat sederhana kompartemen yang tidak memiliki ruang katoda yang tepat yang menggunakan oksigen dari udara dan membiarkan proton berdifusi (Bohari et al., 2019). Namun, ada beberapa penelitian untuk membuat *Single Chamber MFC* (SCMFC) yang lebih berkembang lagi, seperti pada gambar 2.5 berikut.

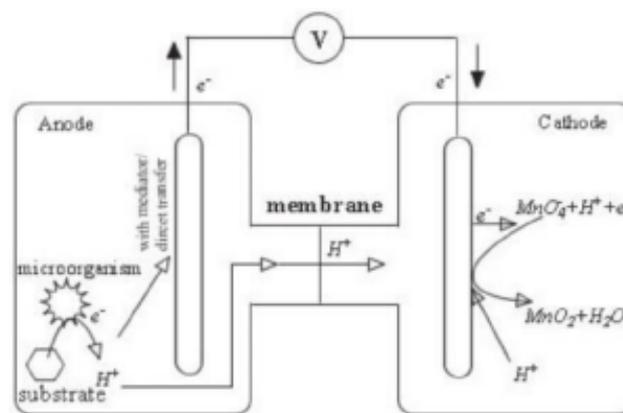


Gambar 2.5 Sketsa SCMFC dengan katoda terbuka (Massaglia et al., 2019)

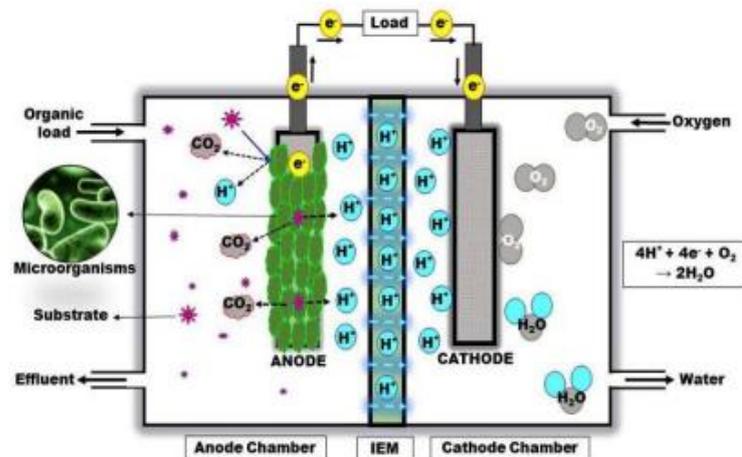
2.4.2.2 *Double Chamber MFC* (DCMFC)

Perkembangan desain MFC semakin lama semakin banyak. Contohnya adalah desain *Double Chamber MFC*. Beberapa desain DCMFC telah banyak dibuat, dan yang cukup terkenal adalah tipe-H yang terdiri dari dua kompartemen dengan anoda di satu kompartemen dan katoda di kompartemen yang lainnya. Antara dua kompartemen ini akan dihubungkan dengan jembatan garam dan katoda anoda akan

terhubung dengan kawat untuk menyelesaikan sirkuit. Ukuran kekuatan yang dibuat dalam kerangka kerja ini dipengaruhi oleh jangkauan permukaan katoda sehubungan dengan anoda dan permukaan membran (Shaikh et al., 2016). Desain ini DMFC dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.6 Sketsa *Double Chambered* MFC (Bohari et al., 2019)



Gambar 2.7 *Double Chambered* MFC (al Lawati et al., 2019)

Saat ini *Double Chambered MFC* (DCMFC) adalah konfigurasi MFC yang paling banyak dipelajari dan digunakan (Palanisamy et al., 2019). Namun, output daya yang dikembangkan oleh desain ini cukup rendah karena desain yang kompleks, resistansi internal yang tinggi dan kerugian berbasis elektroda (Bohari et al., 2019).

2.5 *Plant Microbial Fuel Cell (PMFC)*

Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) merupakan pengembangan dari penelitian mengenai MFC. Pada PMFC digunakan tanaman sebagai media kultivasi bakteri pada daerah sekitar akar dari suatu tanaman. Bakteri yang hidup di sekitar tanaman tersebut berperan sebagai biokatalis yang dapat mendegradasi material organik menjadi energi listrik (Hendrawan, 2020). PMFC merupakan jenis energi alternatif yang memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan jenis energi alternatif lainnya seperti tidak membutuhkan perombakan pada suatu lahan, proses yang rumit, dan kondisi geografis tertentu (Chiranjeevi et al., 2018). *Plant Microbial Fuel Cell (PMFC)* adalah turunan dari teknologi *Microbial Fuel Cell (MFC)*, yang menggunakan akar tanaman untuk bahan bakar langsung dari bakteri elektrokimia aktif atau *electrochemically active bacteria (EAB)* di anoda dengan mengeluarkan rhizodeposit untuk menghasilkan biolistrik (Kabutey et al., 2019). Akar tanaman menghasilkan bahan organik dari proses fotosintesis. Selanjutnya elektron dan proton akan dihasilkan oleh oksidasi reaksi organik pada reaksi anoda, sedangkan reduksi katoda akan menghasilkan air (Prasad & Tripathi, 2018). Reaksi biokimia PMFC dijelaskan oleh persamaan berikut.



2.5.1 Aspek Utama PMFC

Saat ini, aplikasi PMFC telah diperluas ke sistem yang direkayasa secara ekologis, lahan basah yang dibangun ditambah dengan sistem MFC (CW-MFC), *bryophyte* MFC system dan lain-lain untuk menghasilkan biolistrik dari sawah, lahan basah,

dan *green roofs* (atap hijau) (Kabutey et al., 2019). PMFC adalah sel biologis yang terdiri dari tanaman hidup, matriks pendukung, serta anoda konduktif yang dimasukkan ke dalam substrat dan katoda ditempatkan di udara atau air untuk mengubah energi kimia menjadi bioelektrik (Nitorisavut & Regmi, 2017). Ada dua desain dasar dari PMFC, yaitu *Single-Chambered* (bilik tunggal) dan *Double-Chambered* (bilik ganda). *Single-Chambered* PMFC memiliki ruang anoda tanpa membran dan tanpa ruang katoda. Sedangkan *Double-Chambered* PMFC memiliki dua ruang, yaitu ruang anodik dan katodik dipisahkan oleh PEM atau pemisah untuk memungkinkan proton untuk mentransfer di katoda sekaligus mencegah difusi katolit dan O_2 ke anoda (H. Deng et al., 2012). Selain itu, PMFC memiliki beberapa komponen dan karakteristik unik yang berbeda dari MFC umum seperti matriks pendukung, tanaman hidup, konversi substrat dan mekanisme transfer elektron, yang dianggap sebagai aspek terpenting untuk memahami PMFC (Kabutey et al., 2019).

2.5.1.1 Matriks pendukung dalam PMFC

Matriks pendukung yang digunakan dalam operasi PMFC meliputi tanah tergenang, padi, lahan basah atau tanah kebun, sedimen, vermikulit, butiran grafit di mana anoda dan tanaman hidup terkubur (Kabutey et al., 2019). Ketika matriks pendukung alami digunakan, substrat atau pengayaan tambahan tidak diperlukan karena EAB berkembang biak di alam untuk mengoksidasi bahan organik atau *organic matter* (OM) yang tersedia dan mentransfer elektron ke anoda (Kouzuma et al., 2014). Tanah adalah sumber umum dari inokulum yang digunakan dalam sistem pengolahan biologis karena adanya mikroba alami, karenanya digunakan sebagai substrat dalam operasi PMFC (Wolińska et al., 2014). Tanah yang

digunakan dalam operasi PMFC meliputi tanah alami, tanah pertanian dan hutan, tanah sawah/sawah, tanah tergenang, tanah merah, pasir, lanau, tanah liat, tanah gambut, tanah rawa asin, campuran tanah kompos, endapan/rhizodeposit, endapan lahan basah, tanah kebun, tanah kebun bercampur kotoran sapi, dan tanah pot (Kabutey et al., 2019).

2.5.1.2 Tanaman dan fungsinya dalam PMFC

Penggunaan tumbuhan hidup untuk degradasi in-situ dan penghilangan polutan dari ekosistem telah lama dilakukan. Tumbuhan telah diselidiki karena kemampuannya untuk berfungsi sebagai spesies indikator dan juga untuk menghilangkan logam berat dari ekosistem yang tercemar (Kabutey et al., 2019). Spesies tanaman dengan jalur fotosintesis C4 digunakan dalam PMFC karena mereka memiliki tingkat konversi energi matahari yang tinggi. Tumbuhan C4 (misalnya monokotil/rumput tanaman) menunjukkan efisiensi fotosintesis yang tinggi, yang mengarah pada peningkatan rhizodeposisi yang berfungsi sebagai substrat untuk oksidasi mikroba. Kriteria pemilihan tanaman antara lain tahan banting, laju pertumbuhan, komunitas mikroba di rizosfer, ekstensifitas sistem akar, toleransi dan kemampuan bioakumulasi, ketersediaan lokal, kemampuan beradaptasi dan rhizodeposisi. Untuk menghindari konflik dengan makanan produksi, tanaman pangan dan lahan subur cocok untuk tujuan pertanian tidak digunakan dalam aplikasi PMFC (Kabutey et al., 2019).

Tanaman yang dimasukkan ke dalam PMFC memainkan peran penting dalam mengubah energi surya menjadi energi bersih tanpa perlu panen tanaman. Tanaman berfotosintesis untuk menghasilkan OM yang berfungsi sebagai “sumber

karbon” di rizosfer untuk aktivitas EAB. Dalam konfigurasi PMFC tertentu, tanaman dimasukkan ke dalam ruang katodik untuk melepaskan O₂ selama fotosintesis untuk langsung digunakan sebagai biokatoda (Halan et al., 2019).

2.5.1.3 Mikroorganisme di rizosfer PMFC

Rizosfer adalah wilayah langsung di sekitar akar dan permukaan akar memanjang hingga sekitar 4 mm di mana elektroda dimasukkan selama operasi PMFC. Akar tanaman mengeluarkan banyak sekali senyawa ke dalam tanah di sekitarnya di daerah yang disebut rizosfer. Mikroba yang dibutuhkan pada proses PMFC lebih banyak berada di rizosfer. Eksudat akar memulai dan mengontrol interaksi antara akar dan mikroba tanah. Eksudasi akar merupakan bagian dari proses rhizodeposisi, penyebab utama pelepasan karbon organik tanah oleh akar tanaman (Sophia & Sreeja, 2017). Mikroorganisme berupa bakteri di sekitar akar tumbuhan mengubah substrat organik menjadi energi listrik yang kemudian disalurkan ke bagian anoda dari suatu PMFC. Tanaman dengan efisiensi fotosintesis yang tinggi dapat menghasilkan performa yang lebih baik pada PMFC. Hal ini dikarenakan jumlah substrat bagi bakteri akan semakin banyak (Chiranjeevi et al., 2018).

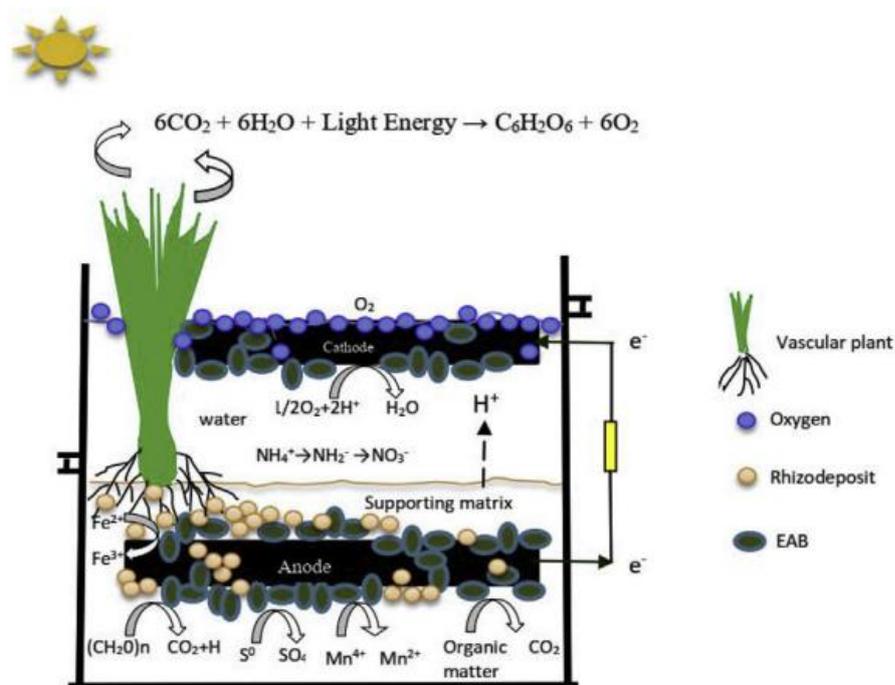
Komunitas mikroba dalam PMFC dengan tiga spesies tumbuhan yang berbeda (*Chasmanthe floribunda*, *Papyrus cyperus* dan *Chlorophytum comosum*) di tanah alami yang sama menunjukkan berbagai kolonisasi bakteri anoda. di mana *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas* sp.1, *Pseudomonas* spp.2, *Aeromonas hydrophila*, *Enterobacter cloacae*, *Bacillus tequilensis*, *Aspergillus. spp.*, *Penicilium. spp.*, terisolasi (Azri et al., 2018). Matriks pendukung mengandung mikroba yang berbeda spesies yang membentuk komunitas mikroba dalam biofilm

yang melekat pada elektroda. Matriks pendukung diklasifikasikan sebagai *electricigens*, *anodophiles* dan eksoelektrogen berdasarkan kemampuannya untuk mentransfer elektron ke elektroda tanpa mediator eksogen. Mikroba ini dikelompokkan menurut lokasinya (pada anoda atau katoda) atau peran yang mereka mainkan dalam transfer elektron. Pada anoda terdapat mikroba anaerob obligat (yaitu EAB, *exoelectrogen*, *electricigen*, dan bakteri *anode-respiring*). Sedangkan pada katoda terdapat aerob dan anaerob, dimana aerob menggunakan oksigen sebagai oksidan untuk membantu oksidasi katalis transisi seperti mangan (II) atau besi (II) untuk pengiriman elektron ke oksigen, dan penggunaan anaerob, senyawa seperti nitrat, sulfat, besi, mangan, karbon dioksida untuk berfungsi sebagai pengikat untuk reduksinya (Kabutey et al., 2019).

2.5.1.4 Mekanisme konversi dan pemanfaatan substrat dalam PMFC

Konversi substrat dalam PMFC membutuhkan beberapa komponen di dalamnya. OM dalam matriks pendukung berfungsi sebagai substrat dan sumber energi untuk EAB selama operasi PMFC. Substrat mempengaruhi komunitas EAB di anoda dan dengan demikian mempengaruhi kinerja sistem dalam hal pembangkit listrik. Tumbuhan menghasilkan makanannya sendiri, sebagian karbohidrat dan zat organik yang tidak digunakan atau disimpan diekskresikan pada akar sebagai rhizodeposit. Rhizodeposisi adalah hilangnya OM oleh akar tanaman ke zona akar. Rhizodeposits termasuk eksudat (gula, asam organik), sekresi (karbohidrat polimer dan enzim), lisat (bahan sel tumbuhan mati) serta gas etilen dan CO₂ yang dioksidasi oleh EAB dan mikroba lain yang tinggal di akar menjadi menghasilkan elektron (Kabutey et al., 2019).

Reaksi lain yang terlibat termasuk reaksi kimia oksidasi reduktor yang diproduksi secara mikroba (asam humat, besi (II) dan senyawa belerang), oksidasi mikroba belerang menjadi sulfat, oksidasi amonia menjadi nitrit/nitrat oleh pengoksidasi ammonia bakteri. Konversi karbonat menjadi karbon organik oleh bakteri mandiri, dan hidrolisis karbohidrat menjadi asetat. Semua reaksi ini juga menghasilkan elektron yang ditransfer ke anoda untuk generasi bioelektrik (Kabutey et al., 2019). Mekanisme konversi dan pemanfaatan substansi dalam PMFC dapat dilihat dari gambar 2.8 berikut.

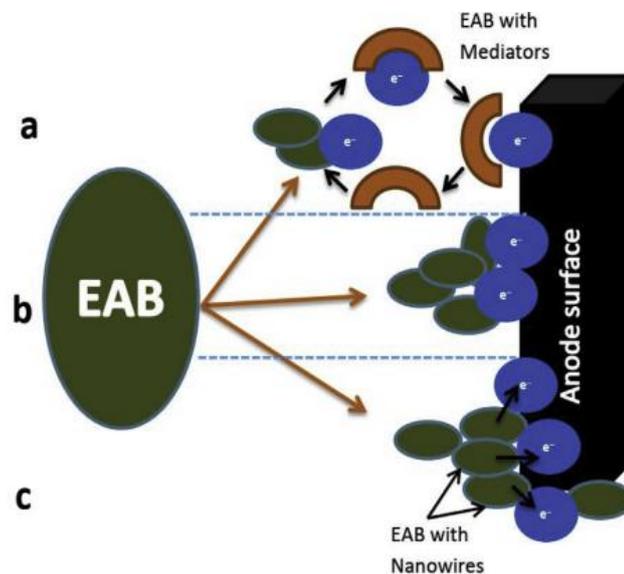


Gambar 2.8 Mekanisme konversi substrat dalam PMFC (Kabutey et al., 2019)

2.5.1.5 Transfer elektron dan pembangkitan biolistrik di PMFC

Pada dasarnya suatu tumbuhan akan menghasilkan material organik melalui proses fotosintesis. Sekitar 20-60% material organik berakhir di akar melalui proses rhizodeposisi. Di sekitar akar dari tumbuhan terdapat mikroorganisme yang dapat mengoksidasi substrat organik menjadi proton, elektron, dan karbon dioksida

(Hendrawan, 2020). Rhizodeposisi dipecah oleh EAB dan mikroba lain seperti prokariota (bakteri dan *archaea*) dan eukariota (jamur, protozoa, nematoda dan makrofauna) ditemukan di rizosfer. Dalam kondisi anaerobik, mikroba mengoksidasi rhizodeposit untuk pertumbuhan dan perkembangan dengan mengubah substrat menjadi karbon dioksida, proton (H^+) dan elektron (e^-) disumbangkan ke anoda. Elektron yang ditangkap oleh anoda akan ditransfer ke katoda di mana oksigen direduksi menjadi air (Kabutey et al., 2019). Transfer elektron pada PMFC dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 Proses transfer elektron pada PMFC (Kabutey et al., 2019)

Transfer elektron ekstraseluler oleh mikroorganisme ke anoda pada gambar 2.9 memiliki tiga jalur, yaitu (i) transfer elektron yang dimediasi (Gambar 2.9a) misalkan Spesies *Shewanella* dan *Pseudomonas* mengeluarkan mediator (flavin) untuk antar jemput elektron dari bakteri ke permukaan anoda; (ii) transfer elektron langsung oleh bakteri pembentuk biofilm (Gambar 2.9b), misalnya Spesies *Shewanella* dan *Geobacter* mentransfer elektron melalui sitokrom atau pili; dan (iii) transfer elektron melalui kawat nano (Gambar 2.9b), misalnya *Geobacter* dan

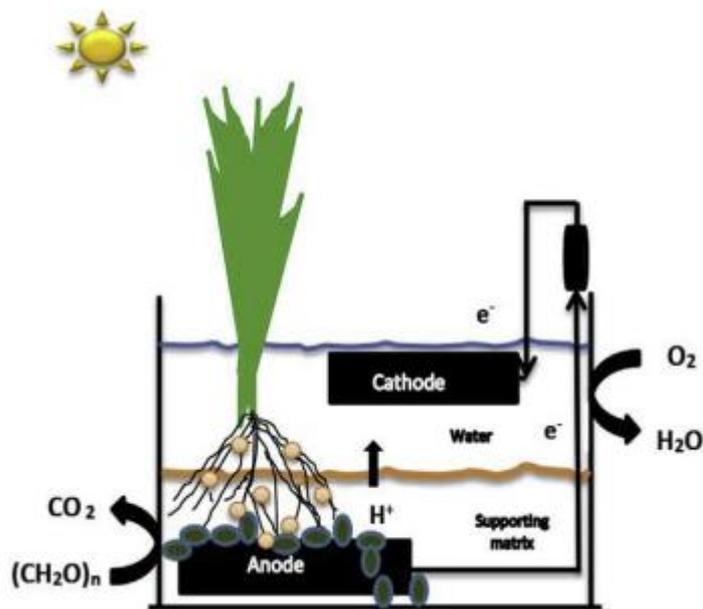
hewanella menggunakan pelengkap konduktif untuk electron transfer ke anoda (Kabutey et al., 2019).

2.5.2 Konfigurasi PMFC

Penggunaan tanaman di MFC untuk menangkap energi matahari untuk bioelektrik telah menyebabkan pengembangan konfigurasi yang berbeda dari PMFC. Meskipun ada desain dan konfigurasi sistem yang berbeda, prinsip dasar operasi PMFC adalah sama (Kabutey et al., 2019).

2.5.2.1 PMFC dengan tumbuhan (*Plant-MFC*)

PMFC dengan tumbuhan (*Plant-MFC*) dapat dilihat pada gambar 2.10 berikut.



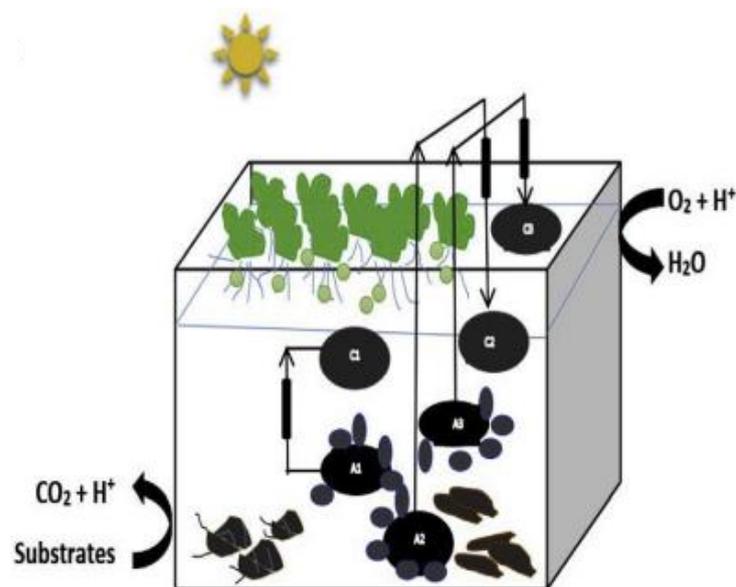
Gambar 2.10 *Plant-MFC* (Kabutey et al., 2019)

Tumbuhan hidup dan tumbuh di ruang anoda mengalami fotosintesis untuk mengubah CO_2 menjadi karbohidrat dan mengirimkan OM di rizosfer untuk bahan bakar anolit. Konversi energi matahari menjadi biolistrik in-situ dari rhizodeposisi tanaman alih-alih menggunakan katalis kimia dan membran penukar proton lainnya

membuat PMFC menarik sumber bioenergi (Nitorisavut & Regmi, 2017). Rizosfer tanaman mendukung luas berbagai mikroba dan menyediakan permukaan untuk perlekatan konsorsium mikroba tanah untuk mengoksidasi OM untuk menghasilkan elektron juga sebagai transfer ke anoda. Keunggulan PMFC dibandingkan SMFC konvensional adalah keberlanjutan pasokan OM oleh akar tanaman di anoda (Zhang et al., 2019).

5.2.2.2 *Macrophyte* PMFC

Makrofit MFC adalah sistem rekayasa ekologi di mana makrofita digunakan sebagai biota (Kabutey et al., 2019), dapat dilihat pada gambar 2.11.



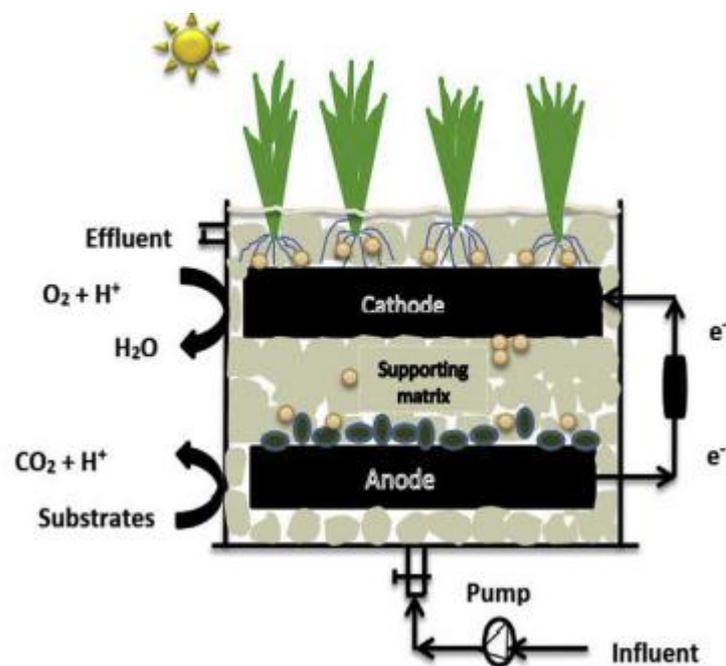
Gambar 2.11 *Macrophyte* PMFC (Kabutey et al., 2019)

Makrofit adalah tumbuhan air multiseluler yang dapat dilihat dengan mata telanjang, tumbuh tenggelam, mengambang atau muncul melalui permukaan air di laut, muara atau di ekosistem sungai. Mereka membentuk penting bagian dari habitat perairan karena mereka menyediakan tempat berlindung, makanan atau mempengaruhi hidrologi dan dinamika sedimen sistem perairan. Makrofit

memproduksi makanan mereka melalui fotosintesis, dan rhi zodeposit dan eksudat yang dihasilkan digunakan sebagai OM tambahan dalam CW-MFC untuk produksi listrik. Oksigen yang dikeluarkan dari makrofita selama fotosintesis digunakan dalam pembangunan biokatoda yang efisien untuk PMFC (Kabutey et al., 2019).

5.2.2.3 *Constructed wetland* MFC (CW-MFC)

Constructed wetland MFC (CW-MFC) adalah sistem pengendalian pencemaran air yang menggabungkan keunggulan MFC dan lahan basah buatan (Kabutey et al., 2019). CW-MFC dapat dilihat pada gambar 2.12 berikut.



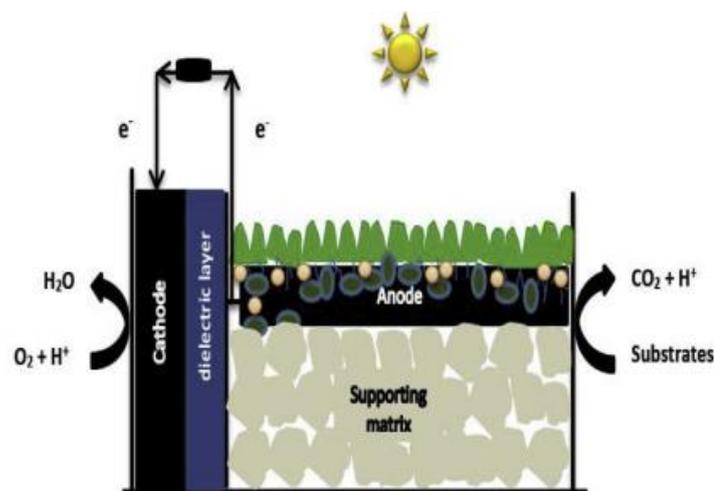
Gambar 2.12 *Constructed wetland* MFC (CW-MFC) (Kabutey et al., 2019)

CW-MFC menerima air limbah dan kemudian membuang efluen di hadapan tanaman yang bertindak sebagai aerasi (Xu et al., 2016). Kompatibilitas sistem hibrida ini adalah bahwa dua sistem biologis digunakan untuk mendegradasi OM. Selanjutnya, persyaratan PMFC untuk redoks gradien antara elektroda secara alami ada di CWs tergantung pada arah aliran influen dan kedalaman lahan basah. Namun,

perbedaannya adalah bahwa EAB dalam PMFC diberi makan oleh rhizodeposit dengan tujuan menghasilkan listrik hijau, sedangkan EAB di CWs diberi makan dengan rhizodeposit dan air limbah untuk tujuan tersebut pengolahan air limbah (Doherty et al., 2015). Manfaat dari sistem CW-MFC adalah mengambil keuntungan dari MFC dan CW untuk mencapai pengolahan air limbah dan pembangkitan bioenergi secara bersamaan. Tanaman di CW-MFC menjalani fotosintesis untuk menghasilkan rhizodeposit dan eksudat di akar yang digunakan sebagai sumber OM pada anoda untuk oksidasi mikroba untuk menghasilkan tenaga listrik. Penyisipan akar tanaman pada katoda mengeluarkan O_2 melalui rizosfer untuk meningkatkan kinerja dari CW-MFC (Fang et al., 2013).

2.5.2.4 Bryophyte MFC System

Bryophyta adalah tumbuhan tanpa jaringan vaskuler, yang lebih toleran terhadap dehidrasi dibandingkan tumbuhan lain. Fisiologi unik ini memungkinkan mereka untuk mengumpulkan air dan nutrisi untuk bertahan hidup di berbagai suhu dan habitat (Kabutey et al., 2019). Desain *Bryophyte MFC System* dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 *Bryophyte MFC System* (Kabutey et al., 2019)

Bryophyta tidak memiliki akar tetapi memiliki rizoid seperti rambut yang mengikat mereka ke permukaan tempat mereka tumbuh, mereka menstabilkan tanah dan mencegah hilangnya nutrisi oleh erosi. Biomassa lumut yang ditempatkan di ruang anoda berfungsi sebagai sumber OM untuk konsorsium mikroba dan memengaruhi siklus karbon/nitrogen antara atmosfer dan PMFC untuk menghasilkan tenaga (Bombelli et al., 2016).

2.6 Tumbuhan PMFC

Pemilihan tumbuhan pada PMFC dapat memaksimalkan energi listrik yang dihasilkan. Karena proses rhizodeposisi dan alur fotosintesis merupakan salah satu faktor yang paling mempengaruhi pada PMFC (Nitorisavut & Regmi, 2017). Tanaman dikelompokkan menjadi tiga bagian berdasarkan fiksasi karbondioksida menjadi C3, C4, dan CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*). Perbedaan dari tanaman C3 dan C4 adalah cara tanaman tersebut mengikat karbondioksida dan produk awal yang dihasilkan dari proses asimilasi. Tanaman C3 bersifat lebih adaptif dibandingkan tanaman C4 dan CAM terhadap kondisi dimana terdapat kandungan karbondioksida yang lebih tinggi di atmosfer. Tanaman C4 dan CAM cenderung lebih adaptif dengan kondisi lingkungan yang panas dan kering. Tanaman C4 memiliki suatu enzim yang dapat mengikat karbondioksida bernama PEP. Tanaman C4 tidak dapat mengikat oksigen sehingga hanya karbondioksida yang dapat terikat. Contoh tanaman C4 adalah jagung dan tebu (Hendrawan, 2020).

2.6.1 Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*)

Eceng gondok yang memiliki nama latin *Eichhornia crassipes* merupakan tumbuhan yang hidup di perairan. Eceng gondok dapat ditemukan di lebih dari 50

negara di 5 benua dengan berbagai kondisi iklim yang berbeda-beda (Novelendah et al., 2018).



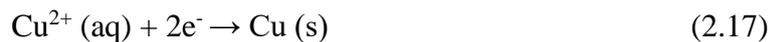
Gambar 2.14 Eceng Gondok

Tumbuhan eceng gondok dapat tumbuh di lingkungan dengan kondisi pH 4-10, namun akan lebih baik apabila kondisi lingkungan memiliki pH netral. Suhu pertumbuhan optimum dari tumbuhan eceng gondok adalah 28-30 °C untuk air dan 21-30 °C untuk kondisi udara di sekitar. Apabila kondisi lingkungan sesuai dengan kondisi optimum, eceng gondok dapat tumbuh dengan cepat hingga menjadi dua kali populasinya dalam jangka waktu dua minggu (Hendrawan, 2020). Tumbuhan eceng gondok memiliki klasifikasi sebagai berikut (Gay, 1960).

Domain : *Eukaryota*
Kingdom : *Plantae*
Phylum : *Spermatophyta*
Subphylum : *Angiospermae*
Class : *Monocotyledonae*
Order : *Pontederiales*
Family : *Pontederiaceae*
Genus : *Eichhornia*
Species : *Eichhornia crassipes*

2.7 Elektroda

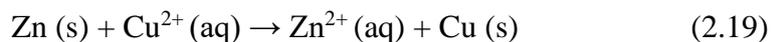
Elektroda merupakan konduktor yang dapat dilalui arus listrik dari suatu media ke media yang lain. Elektroda biasanya terbuat dari logam, seperti tembaga, perak, timah, atau zink, tetapi terdapat juga elektroda yang terbuat dari bahan konduktor listrik non-logam, seperti grafit. Elektroda dapat digunakan dalam baterai, obat-obatan, dan industri untuk proses yang melibatkan elektrolisis. Pasangan elektroda pada logam Zn dan Cu jika digunakan pada sel elektrokimia maka akan mengalami reaksi reduksi dan reaksi oksidasi. Reaksi reduksi adalah reaksi yang terjadi penurunan bilangan oksidasi melalui penangkapan elektron. Reaksi dari elektroda tersebut dapat dilihat seperti berikut:



Sedangkan reaksi oksidasi adalah reaksi yang terjadi peningkatan bilangan oksidasi melalui pelepasan elektron, contohnya:



Dalam reaksi redoks, reaksi reduksi dan oksidasi terjadi secara simultan, maka reaksi diatas menjadi:



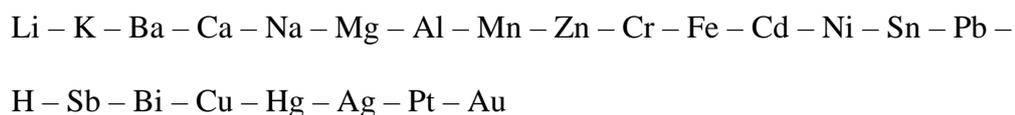
(Suyanta, 2013).

2.7.1 Sel Volta

Prinsip kerja sel galvani yaitu terdiri atas elektroda dan elektrolit yang dihubungkan dengan sebuah jembatan garam, pada anoda terjadi reaksi oksidasi dan pada katoda terjadi reaksi reduksi, arus elektron mengalir dari katoda ke anoda, arus listrik mengalir dari katoda ke anoda serta adanya jembatan garam untuk menyeimbangkan ion-ion (Andi, 2020). Potensial elektroda (E°) berdasarkan deret

volta jika diurutkan dari kiri ke kanan dimana semakin ke kanan, reduksi semakin besar sebagai oksidator kuat atau semakin mudah mengalami reduksi maka akan terbentuk sebuah deret yang dikenal dengan nama deret volta (Nasution, 2019).

Deret tersebut adalah:



Semakin ke kiri kedudukan suatu logam dalam deret volta menandakan logam semakin reaktif (semakin mudah melepas electron). Sebaliknya, semakin kanan kedudukan logam dalam deret volta menandakan logam semakin kurang reaktif (semakin sukar melepas elektron) (Nasution, 2019).

Potensial elektoda diukur dengan memperhatikan potensial elektoda standar, yang dilambangkan E° . Daftar harga potensial elektroda untuk logam-logam yang penting disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai potensial elektroda

Reaksi Reduksi	Logam	E° (volt)
$\text{Li}^+ + e^-$	Li	-2,96
$\text{K}^+ + e^-$	K	-2,92
$\text{Na}^+ (\text{aq}) + e^-$	Na	-2,71
$\text{Mg}^{2+} + 2e^-$	Mg	-2,37
$\text{Al}^{3+} (\text{aq}) + 3e^-$	Al	-1,66
$\text{Zn}^{2+} + 2e^-$	Zn	-0,76
$\text{Cr}^{3+} (\text{aq}) + 3e^-$	Cr	-0,74
$\text{Fe}^{2+} (\text{aq}) + 2e^-$	Fe	-0,41
$\text{Cd}^{2+} (\text{aq}) + 2e^-$	Cd	-0,40
$\text{Ni}^{2+} (\text{aq}) + 2e^-$	Ni	-0,23
$\text{Sn}^{2+} (\text{aq}) + 2e^-$	Sn	-0,14
$\text{Pb}^{2+} (\text{aq}) + 2e^-$	Pb	-0,13
$\text{Fe}^{3+} + 3e^-$	Fe	-0,04
$2\text{H}^+ + 2e^-$	H_2	0,00
$\text{Cu}^{2+} + 2e^-$	Cu	+0,34
$\text{Cu}^+ + e^-$	Cu	+0,52
$\text{Ag}^+ + e^-$	Ag	+0,80

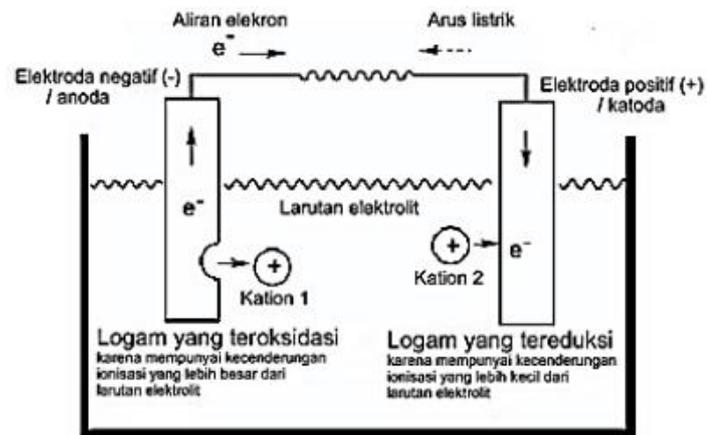
2.5.3 Karakteristik Logam Tembaga (Cu) dan Logam Seng (Zn)

Tembaga (tembaga) adalah unsur kimia dalam tabel periodik dengan lambang Cu dengan nomor atom 29 dan nomor massa 63,54. Tembaga adalah salah satu logam dalam kelompok logam non-ferrous dan banyak digunakan dalam industri karena konduktivitas listrik dan termal yang sangat baik dan mudah dibentuk. Selain itu, tembaga memiliki keuletan tinggi dan ketahanan korosi yang sangat baik. Tembaga memiliki ketahanan korosi yang sangat baik dan dapat digunakan untuk keperluan konstruksi dan sebagai bahan pipa air. Tembaga banyak digunakan dalam teknik kimia karena secara kimia tahan terhadap banyak asam (Supriadi et al, 2013). Sepasang elektroda tembaga yang umum digunakan untuk anoda adalah seng atau Zn. Seng, yang memiliki nama kimia disebut seng, termasuk dalam unsur logam berat, dan memiliki nomor atom 30 dan berat atom 65,39. Beberapa sifat kimia seng mirip dengan magnesium (Mg). Seng merupakan unsur paling melimpah ke-24 di kerak bumi dan memiliki lima isotop stabil. Bijih seng yang paling banyak ditambang adalah sfalerit (seng sulfida). Seng adalah logam rapuh. Pada suhu di bawah 100 °C dan di atas 150 °C (Widowati, 2008).

2.8 Korosi

Korosi adalah kerusakan yang disebabkan oleh reaksi kimia antara bahan logam dan elemen alami lainnya. Kondisi korosi adalah katoda, anoda, dan lingkungan. Korosi tidak akan terjadi tanpa kondisi ini. Korosi tidak dapat dihilangkan, tetapi pertumbuhannya dapat diminimalkan. Proses korosi yang terjadi pada logam harus dikendalikan karena dapat menyebabkan penurunan efisiensi, kebocoran produk, kontaminasi serta bencana lain yang dapat merugikan baik dari segi material maupun korban jiwa (Sidiq, 2013). Tingkat korosi sangat tergantung pada banyak

faktor, termasuk ada atau tidak adanya lapisan oksida, karena lapisan oksida dapat menghalangi perbedaan potensial antara elektroda lainnya. Dalam proses korosi, ada dua reaksi yang menyebabkan korosi: oksidasi dan reduksi. Dalam reaksi oksidasi, elektron dipancarkan dari bahan yang lebih anodik. Sedangkan reaksi reduksi adalah penggunaan elektron oleh bahan dengan sifat katodik yang lebih tinggi. Proses korosi dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Proses korosi secara galvanis (Mulyono, 2017)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Elektronika Dasar Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung pada bulan Februari sampai dengan bulan Juli 2022.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Multimeter, sebagai perangkat untuk mengukur besaran elektrik (tegangan dan arus);
2. Gunting untuk memotong elektroda;
3. pH meter, untuk mengukur pH air pada PMFC;
4. Timbangan digital, untuk mengukur berat elektroda;
5. Penggaris, sebagai alat ukur jarak antara anoda dan katoda pada elektroda;
6. Laptop, sebagai alat untuk mengolah data dan pembuatan laporan penelitian;

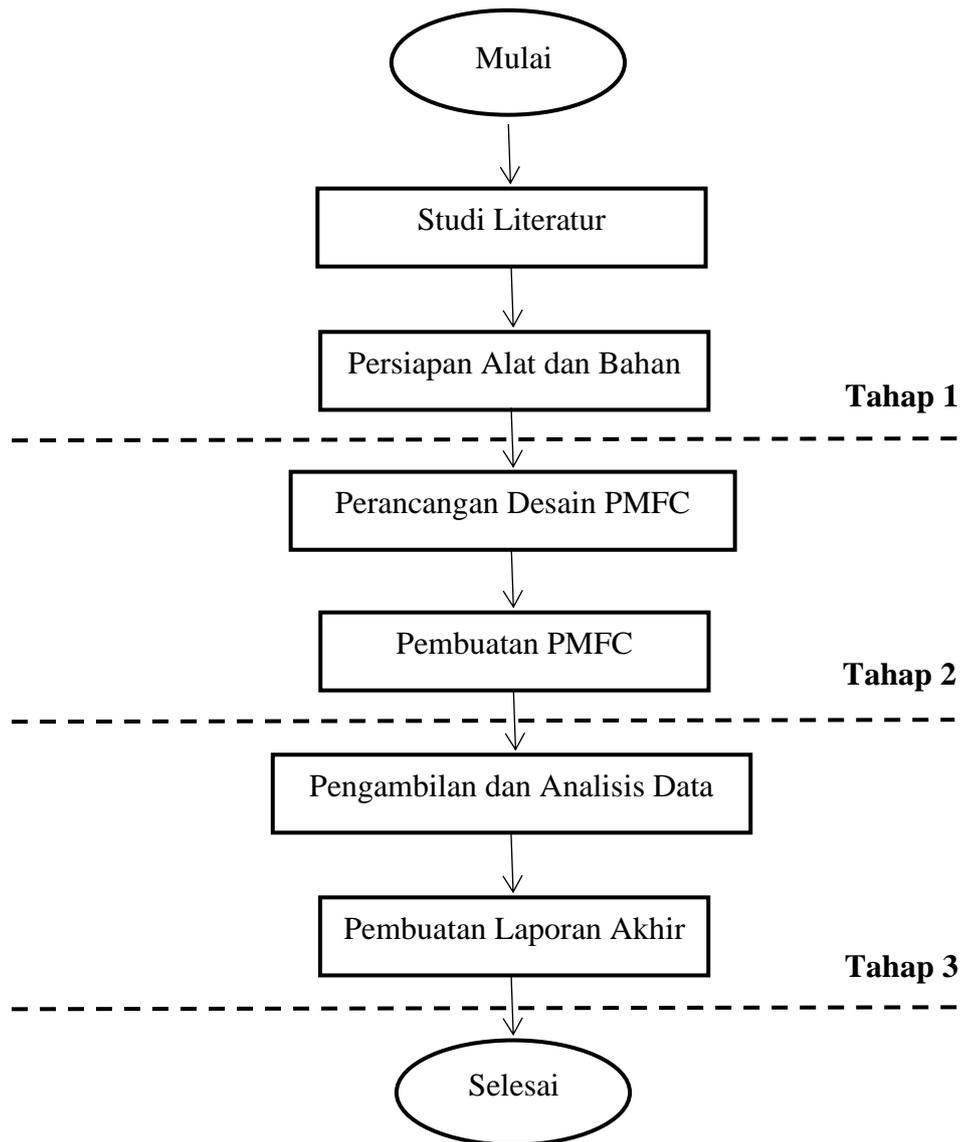
dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Box bening berukuran 30 x 50 cm dengan volume 50 Liter sebagai media pembuatan PMFC;
2. Plat seng (Zn) berukuran 30 x 20 cm sebagai anoda pada elektroda;
3. Plat tembaga (Cu) berukuran 30 x 20 cm sebagai katoda pada elektroda;

4. Penjepit buaya, sebagai penghubung antara elektroda dan multimeter;
5. Air tawar dengan pH 6,8 sebagai media untuk tumbuhan eceng gondok;
6. Resistor berukuran 100Ω yang digunakan sebagai hambatan beban.
7. Tumbuhan eceng gondok digunakan sebagai sampel bahan penelitian;
8. Sedimen/endapan untuk memberikan nutrisi pada akar tanaman eceng gondok;
9. Led untuk menguji PMFC yang telah dibuat.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik elektrik dari *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC) berupa nilai tegangan (V), arus (I), dan juga daya (P) yang dihasilkan dari desain PMFC yang dibuat. Penelitian ini juga mengukur nilai pH air pada PMFC untuk mengetahui apakah pH tersebut berpengaruh atau tidak selama penelitian berlangsung. Selain itu, akan diamati juga pengaruh laju korosi pada elektroda yang digunakan dengan membandingkan massa elektroda sebelum digunakan dan setelah digunakan. Ada dua variabel yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu variabel bebas dan variabel terikat, variabel bebas terdiri atas variasi jarak elektroda dan variasi intensitas cahaya matahari. Sedangkan variabel terikat pada penelitian ini yaitu tegangan (V), arus (I), Hambatan (R), dan daya (P). Jarak elektroda yang digunakan pada penelitian ini adalah 3 cm, 6 cm, 9 cm, dan 12 cm. Kemudian pengaruh cahaya matahari yang difokuskan kepada pengaruh fotosintesis tumbuhan dilihat dengan membandingkan PMFC di luar dan di dalam ruangan, Adapun prosedur pada penelitian ini terdiri dari beberapa langkah, yaitu persiapan penelitian, perancangan dan pembuatan desain PMFC, pengambilan data, serta pengujian desain PMFC. Prosedur penelitian ini dapat dilihat dari gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

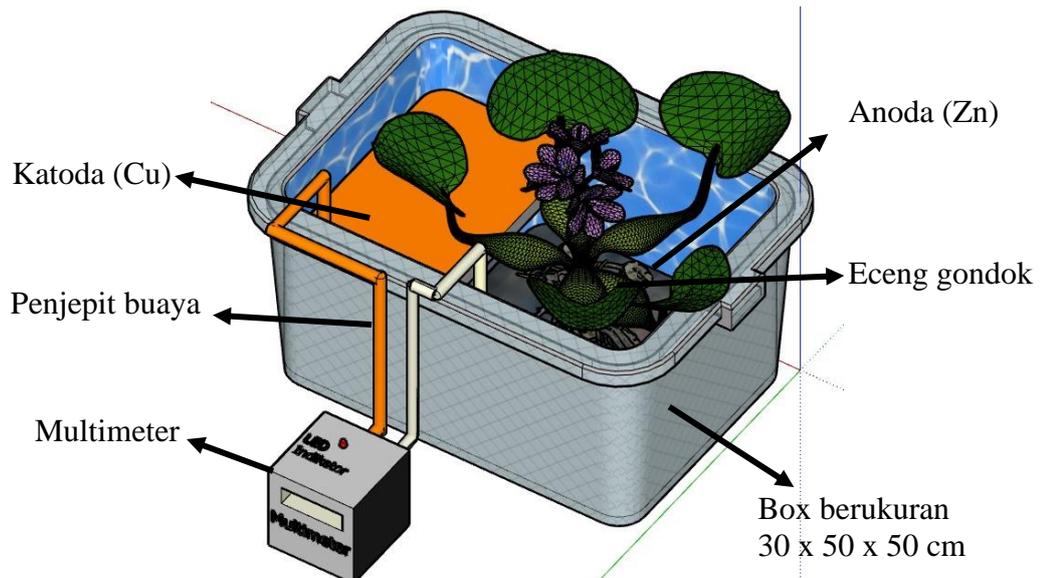
3.3.1 Tahap 1

Pada tahap ini dilakukan persiapan penelitian yang terdiri atas studi literatur, persiapan alat dan bahan, dan persiapan pembuatan desain PMFC. Studi literatur dilakukan dengan mencari informasi terkait dengan penelitian berupa jurnal ataupun informasi dari website. Pada studi literatur dipilih beberapa jurnal yang dijadikan sebagai acuan dalam melakukan penelitian. Selanjutnya dilakukan penyiapan alat dan bahan yang dibutuhkan untuk penelitian serta persiapan

pembuatan desain PMFC. Persiapan alat bahan dimulai dengan membeli empat buah box, kemudian membeli elektroda, multimeter, dan pH meter. Kemudian mengumpulkan alat dan bahan yang tidak perlu dibeli seperti timbangan digital, gunting, penggaris, dan eceng gondok. Eceng gondok dan sedimennya diambil di rawa Banjar Negeri, Natar, Lampung Selatan. Pengambilan eceng harus hati-hati agar tidak merusak akar tumbuhan yang menyebabkan pembusukan. Setelah itu, dapat dilakukan persiapan perancangan dan pembuatan desain PMFC.

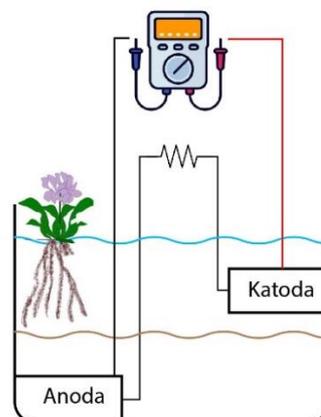
3.3.2 Tahap 2

Tahap ini terdiri atas perancangan desain PMFC dan pembuatan PMFC. Perancangan desain PMFC dilakukan dengan membuat sketchup rangkain pada perangkat komputer. Elektroda yang terdiri atas katoda dan anoda diletakkan di dalam box dengan ukuran volume 50 Liter yang nantinya digunakan sebagai media pembuatan PMFC. Sebelum membuat desain, terlebih dahulu harus mengukur massa elektroda yang akan digunakan pada penelitian. Pengukuran massa dilakukan dengan menimbang elektroda menggunakan timbangan digital. Plat tembaga (Cu) sebesar 30 x 20 cm yang bertindak sebagai katoda diletakkan diatas permukaan air yang nantinya di isikan di dalam box. Untuk penyangga katoda, diletakkan sebuah klem kabel yang ditempelkan ke sisi box sesuai dengan ukuran jarak elektroda yang akan digunakan, yaitu 3 cm, 6 cm, 9 cm, dan 12 cm. Kemudian plat seng (Zn) sebesar 30 x 20 cm yang berperan sebagai anoda diletakkan di dasar box. Selanjutnya anoda dan katoda dihubungkan dengan menggunakan kabel penghubung (penjepit buaya) dan terhubung juga dengan multimeter. Setelah itu, dipasang beban yang berupa resistor berukuran 100Ω pada desain PMFC yang telah dibuat. Desain PMFC pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Desain PMFC

Setelah memperoleh desain yang diinginkan, selanjutnya pembuatan PMFC dapat dilakukan. Pembuatan PMFC dilakukan dengan mengikuti desain yang telah dibuat menggunakan sketchup sebelumnya. Pada penelitian ini, dibuat PMFC sebanyak empat buah dengan masing-masing jarak elektroda 3 cm, 6 cm, 9 cm, dan 12 cm. Setelah desain PMFC berhasil dibuat, langkah berikutnya adalah memasukkan air, sedimen, dan juga eceng gondok ke dalam box yang telah siap digunakan. Selanjutnya PMFC dapat digunakan untuk pengambilan data penelitian dengan mengikuti desain seperti pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Desain pengambilan data

3.3.3 Tahap 3

Pada tahap 3 dilakukan pengambilan data dan pengujian PMFC serta pembuatan laporan akhir. Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan selama 14 hari yang dibagi menjadi 2 minggu. Minggu pertama dilakukan untuk mencari karakteristik elektrik berupa nilai tegangan dan arus dengan variasi jarak dari PMFC di luar ruangan. Kemudian, pada minggu kedua dilakukan pengambilan data untuk PMFC yang diletakkan di dalam ruangan. Selain karakteristik elektrik, diamati juga pengaruh pH air yang digunakan untuk melihat apakah pH juga berpengaruh terhadap karakteristik elektrik dari PMFC yang dibuat. Pengaruh laju korosi terhadap. Setelah pengambilan data selesai, maka dapat dilakukan pembuatan laporan akhir penelitian. Langkah-langkah pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Meletakkan desain PMFC yang telah dibuat di luar ruangan. PMFC yang dibuat sebanyak 4 box dengan jumlah eceng sebanyak 3 buah pada masing-masing box.
- b. Mengambil data untuk jarak elektroda 3 cm, 6 cm, 9 cm, dan 12 cm pada masing-masing box. Elektroda yang digunakan sudah diukur terlebih dahulu massanya.
- c. Memulai pengukuran tegangan dan arus menggunakan multimeter. Pengambilan data dalam satu hari dilakukan dengan selang waktu 6 jam, yaitu pada pukul 07.00, pukul 13.00, dan pukul 19.00 WIB.
- d. Mencatat nilai tegangan (V), arus (I), dan pH yang diperoleh dari hasil pengukuran.
- e. Melakukan pengukuran selama 7 hari berturut-turut dengan langkah yang sama.

- f. Melakukan perhitungan untuk mencari nilai arus (I) dan daya listrik (P) yang dihasilkan PMFC berdasarkan nilai tegangan dan hambatan yang telah diperoleh dengan menggunakan rumus:

$$P = V \times I \quad (3.1)$$

dengan:

V = tegangan (V);

I = arus (A);

P = daya listrik (Watt).

- g. Melakukan pengambilan data pada minggu kedua dengan meletakkan PMFC di dalam ruangan.
- h. Mengganti eceng gondok yang akan digunakan dengan eceng gondok yang baru.
- i. Melakukan pengambilan data dengan mengikuti langkah pada poin b – f.
- j. Menimbang elektroda plat tembaga (Cu) dan plat seng (Zn) yang digunakan pada masing-masing box PMFC setelah pengambilan data selesai. Pengukuran dilakukan untuk melihat pengaruh laju korosi pada elektroda yang digunakan dalam penelitian.
- k. Menghitung laju korosi pada elektroda dengan menggunakan rumus:

$$CR = \frac{K \times M}{A \times d \times t} \quad 3.2$$

dengan :

CR = Laju korosi (mm/tahun)

K = Konstanta satuan mm/tahun ($8,76 \times 10^4$)

M = Kehilangan massa (g)

A = Luas permukaan (cm^2)

t = Waktu (jam)

d = Densitas (g/cm³)

Kehilangan massa dapat dicari dengan menggunakan rumus berikut.

$$M = m_0 - m_a \quad 3.3$$

dengan:

M = Kehilangan massa (g)

m_0 = Massa awal (g)

m_a = Massa akhir (g) (Kamalia et al., 2018).

3.4 Rancangan Data Hasil Penelitian

Pada penelitian ini diperoleh data karakteristik elektrik berupa nilai tegangan, hambatan, dan arus yang diperoleh dari pengukuran menggunakan multimeter pada desain PMFC yang telah dibuat. Pengambilan data dilakukan untuk semua variasi jarak yang telah ditentukan dan juga untuk variasi pengaruh cahaya matahari, dimulai dari pukul 07.00 WIB, 13.00 WIB, dan pukul 19.00 WIB. Rancangan data yang diambil pada penelitian ini dapat dilihat dari tabel berikut.

Tabel 3.1 Pengukuran karakteristik elektrik PMFC di luar ruangan variasi jarak 3, 6, 9, dan 12 cm

No	Hari/tanggal	Pukul	Tegangan	Arus
1				
2				
..				
..				
21				

Tabel 3.2 Pengukuran karakteristik elektrik PMFC di dalam ruangan variasi jarak 3, 6, 9, dan 12 cm

No	Hari/tanggal	Pukul	Tegangan	Arus
1				
2				
..				
..				
21				

Tabel 3.3 Pengukuran pH air di luar ruangan

No	Hari/tanggal	Pukul	pH
1			
2			
..			
..			
21			

Tabel 3.4 Pengukuran pH air di dalam ruangan

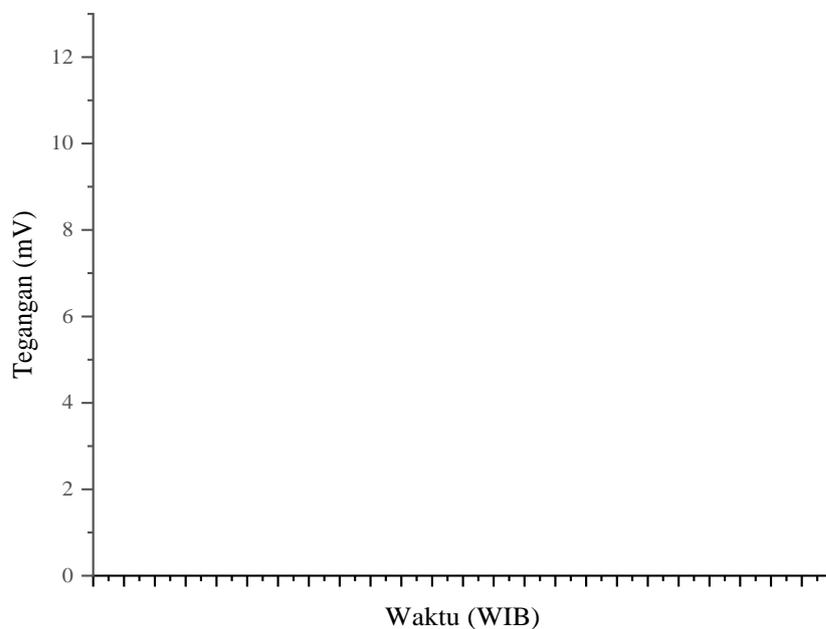
No	Hari/tanggal	Pukul	pH
1			
2			
..			
21			

Tabel 3.5 Pengukuran Massa Elektoda

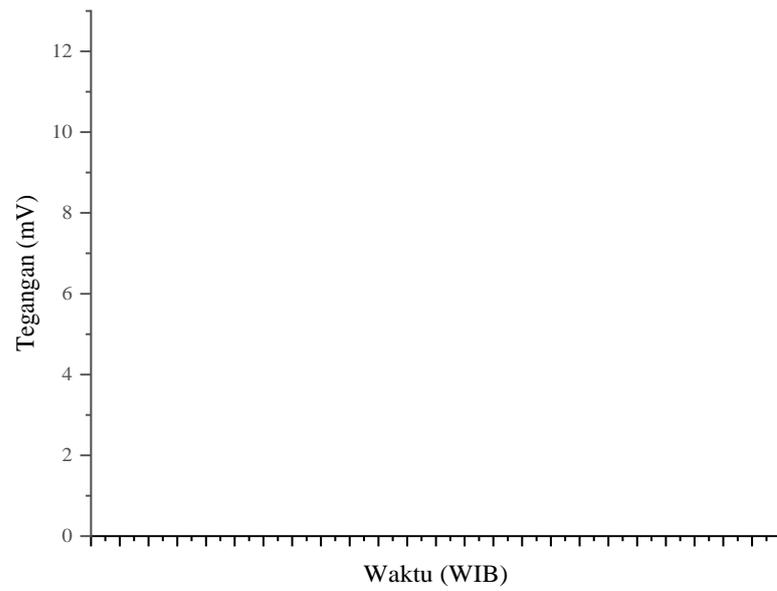
No	Sebelum Digunakan		Setelah Digunakan	
	Massa Cu	Massa Zn	Massa Cu	Massa Zn
1				
2				

3.5 Rancangan Analisis Data Penelitian

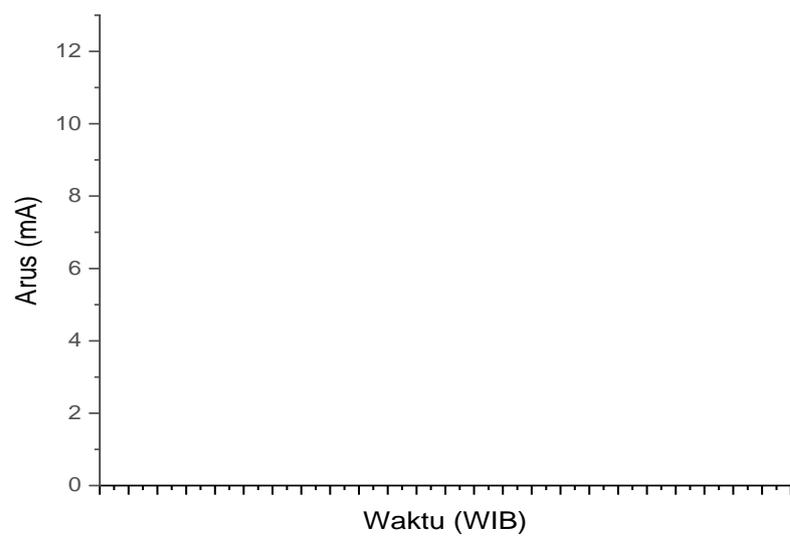
Berdasarkan data hasil penelitian yang telah diperoleh, maka dilakukan analisis data pengaruh jarak elektroda dan cahaya matahari terhadap karakteristik elektrik PMFC. Selain itu, dianalisis juga pengaruh pH terhadap nilai karakteristik elektrik dari PMFC yang telah dibuat sebelumnya. Kemudian pengaruh laju korosi terhadap elektroda yang digunakan pada penelitian juga dilihat dari perbandingan massa elektroda. Pengaruh jarak elektroda dilihat dengan melihat perbandingan nilai tegangan yang didapat dari pengukuran dengan masing-masing jarak yang telah ditentukan. Kemudian, pengaruh cahaya matahari dilihat dengan perbandingan pengukuran di dalam dan diluar ruangan berdasarkan waktu yang sebelumnya telah ditentukan juga. Selain itu dilihat juga nilai kadar oksigen masing-masing reaktor PMFC. Analisis data yang telah didapat selanjutnya diplot ke dalam grafik seperti pada gambar berikut.



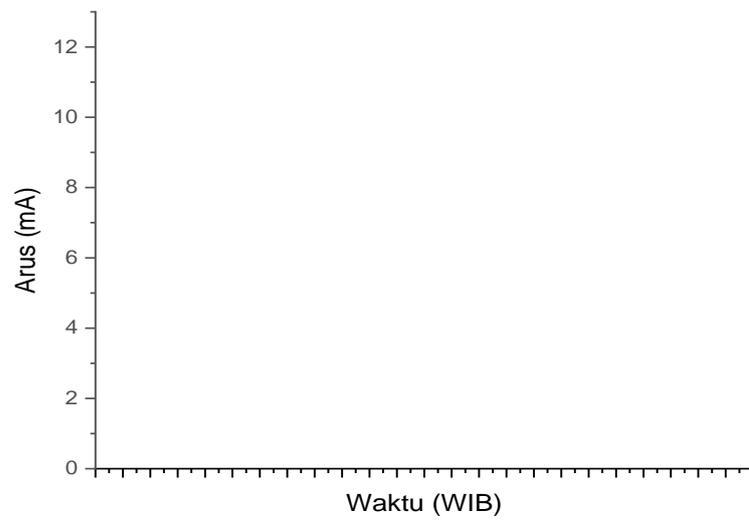
Gambar 3.4 Grafik karakteristik tegangan terhadap waktu pada PMFC di luar ruangan



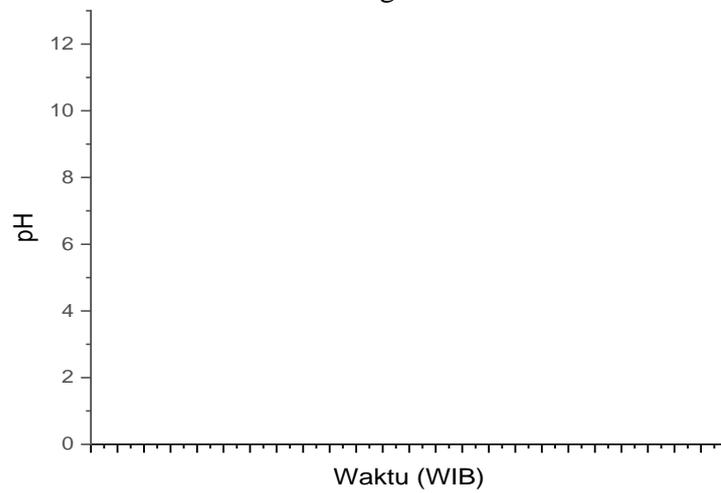
Gambar 3.5 Grafik karakteristik tegangan terhadap waktu pada PMFC di dalam ruangan



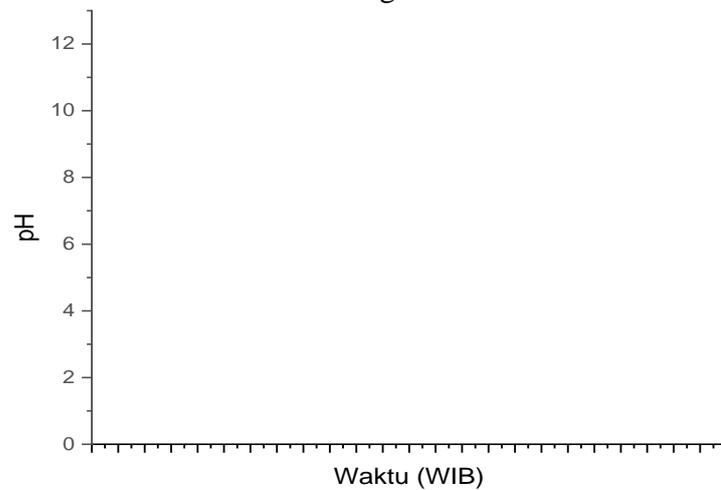
Gambar 3.6 Grafik karakteristik arus terhadap waktu pada PMFC di luar ruangan



Gambar 3.7 Grafik karakteristik arus terhadap waktu pada PMFC di dalam ruangan



Gambar 3.8 Grafik karakteristik pH air terhadap waktu pada PMFC di luar ruangan



Gambar 3.9 Grafik karakteristik pH air terhadap waktu pada PMFC di dalam ruangan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian desain dan karakterisasi elektrik *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC) menggunakan eceng gondok variasi jarak elektroda dan pengaruh cahaya matahari dapat disimpulkan bahwa:

1. PMFC yang dibuat menghasilkan energi listrik. Jarak elektroda yang semakin dekat menghasilkan tegangan, arus, dan daya listrik yang lebih besar dibanding dengan jarak elektroda yang semakin jauh. Nilai tegangan listrik tertinggi dihasilkan oleh PMFC jarak 3 cm sebesar 0,260 V, arus listrik tertinggi sebesar 2,60 mA, dan daya listrik tertinggi sebesar 0,6789 mW dengan PMFC di luar ruangan. Sedangkan tegangan terendah dihasilkan oleh PMFC jarak 12 cm sebesar 0,131 V, arus terendah sebesar 1,30 mA, dan daya terendah sebesar 0,1703 mW dengan PMFC di dalam ruangan.
2. PMFC yang diletakkan di luar ruangan menghasilkan tegangan, arus, dan daya listrik yang lebih tinggi dibandingkan dengan PMFC yang diletakkan di dalam ruangan.
3. pH dengan jarak makin dekat lebih tinggi dibanding pH dengan jarak elektroda yang lebih jauh. pH tertinggi dihasilkan oleh PMFC dengan jarak 3 cm yaitu sebesar 8,0.

4. Kadar oksigen terlarut dalam air pada penelitian mengalami penurunan, seiring dengan turunnya nilai tegangan, arus, dan daya listrik. Kadar oksigen tertinggi yang diperoleh yaitu sebesar 10,8 mg/L pada PMFC dengan jarak 3 cm di dalam ruangan, sedangkan kadar oksigen terendah sebesar 8,0 mg/L pada PMFC dengan jarak 12 cm di luar ruangan.
5. Laju korosi yang terjadi pada PMFC untuk elektroda Cu lebih besar dibandingkan dengan elektroda Zn. Laju korosi elektroda Cu sebesar 0,3637 mm/tahun dan elektroda Zn sebesar 0,3043 mm/tahun.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Penelitian dengan menggunakan tanaman yang lain untuk membandingkan besar daya listrik yang dihasilkan.
2. Peneliti melakukan pengamatan suhu saat pengambilan data kadar oksigen terlarut atau *Dissolved Oxygen* (DO) untuk melihat seberapa besar pengaruh suhu terhadap kadar oksigen pada PMFC.
3. Peneliti menghubungkan PMFC dengan LED untuk melihat apakah PMFC yang dibuat dapat digunakan untuk menghidupkan LED tersebut.
4. Peneliti menerapkan PMFC pada skala yang lebih besar seperti lahan pertanian untuk mendapatkan daya listrik yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Lawati, M. J., Jafary, T., Baawain, M. S., & Al-Mamun, A. (2019). A mini review on biofouling on air cathode of single chamber microbial fuel cell; prevention and mitigation strategies. *In Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. Vol. 22. Hal 1-28.
- Andi, J. (2020). *Realisasi Dan Monitoring Secara Real-Time Sistem Pengisian Daya Pada Power Bank Menggunakan Sel Volta Dengan Elektroda Cu (Ag)-Zn Berbahan Elektrolit Air Laut*. Skripsi. Universitas Lampung. Lampung.
- Azri, Y. M., Tou, I., Sadi, M., & Benhabyles, L. (2018). Bioelectricity generation from three ornamental plants: *Chlorophytum comosum*, *Chasmanthe floribunda* and *Papyrus diffusus*. *International Journal of Green Energy*. Vol 15. No. 4. Hal. 254–263.
- Bohari, Z. H., Aminudin, A. F., Rahman, A. A., Sulaima, M. F., M Isa, M. H., & Jali, M. H. (2019). A Review of Microbial Fuel Reactor Design and Configurations for Future Energy Generation. *Journal of Advanced Research in Biofuel and Bioenergy Journal Homepage*. Vol. 4. Hal. 1–6.
- Bombelli, P., Dennis, R. J., Felder, F., Cooper, M. B., Iyer, D. M. R., Royles, J., Harrison, S. T. L., Smith, A. G., Jill Harrison, C., & Howe, C. J. (2016). Electrical output of bryophyte microbial fuel cell systems is sufficient to power a radio or an environmental sensor. *Royal Society Open Science*. Vol. 3. No. 10. Hal 1-15.
- Chiranjeevi, P., Yeruva, D. K., Kumar, A. K., Mohan, S. V., & Varjani, S. (2018). Plant-microbial fuel cell technology. *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Microbial Electrochemical Technology: Sustainable Platform for Fuels, Chemicals and Remediation*. Hal. 549–564. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00022-4>
- Deng, H., Chen, Z., & Zhao, F. (2012). Energy from plants and microorganisms: Progress in plant-microbial fuel cells. *ChemSusChem*. Vol. 5. No. 6. Hal. 1006–1011. Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/cssc.201100257>

- Deng, Q., Li, X., Zuo, J., Ling, A., & Logan, B. E. (2010). Power generation using an activated carbon fiber felt cathode in an upflow microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*. Vol 195. No. 4. Hal. 1130–1135.
- Dewi, A. K., Djajakirana, G., & Santosa, D. A. (2020). Potensi Limbah Tahu untuk Menghasilkan Listrik pada Tiga Model Sistem Microbial Fuel Cell (MFC). *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*. Vol. 22 No. 1. Hal. 29–34. <https://doi.org/10.29244/jitl.22.1.29-34>
- Doherty, L., Zhao, Y., Zhao, X., Hu, Y., Hao, X., Xu, L., & Liu, R. (2015). A review of a recently emerged technology: Constructed wetland - Microbial fuel cells. *Water Research*. Vol. 85. Hal. 38–45. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.016>
- Estrada-Arriaga, E. B., Hernández-Romano, J., García-Sánchez, L., Guillén Garcés, R. A., Bahena-Bahena, E. O., Guadarrama-Pérez, O., & Moeller Chavez, G. E. (2018). Domestic wastewater treatment and power generation in continuous flow air-cathode stacked microbial fuel cell: Effect of series and parallel configuration. *Journal of Environmental Management*. Vol. 214. Hal. 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.007>
- Fang, Z., Song, H. L., Cang, N., & Li, X. N. (2013). Performance of microbial fuel cell coupled constructed wetland system for decolorization of azo dye and bioelectricity generation. *Bioresour Technol*. Vol. 144. Hal. 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.073>
- Halan, B., Tschörtner, J., & Schmid, A. (2019). Generating electric current by bioartificial photosynthesis. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. Vol. 167. Hal. 361–393. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/10_2017_44
- Harahap, M. R. (2016). Sel Elektrokimia: Karakteristik dan Aplikasi. *Circuit*. Vol. 2. No. 1. Hal.1-6.
- Hendrawan, M. A. (2020). *Pengaruh Jenis Elektroda, Jarak Anoda-Katoda, dan Waktu Pertumbuhan Tanaman Eceng Gondok (Eichhornia Crassipes) Pada Teknologi Plant Microbial Fuel Cell (P-MFC)*. Skripsi. Universitas Pertamina. Jakarta.
- Kabutey, F. T., Zhao, Q., Wei, L., Ding, J., Antwi, P., Quashie, F. K., & Wang, W. (2019). An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 110. Hal. 402–414. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.016>
- Kadhafi, M. (2020). *Studi Potensi Energi Listrik Dari Plant Microbial Fuel Cell (P-Mfc) Dengan Variasi Jenis Elektroda*. Skripsi. Universitas Alauddin Makassar. Makassar.

- Kamalia, L., Pauzi G. A., & Suciwati S. W., (2018). Analisis Laju Korosi Elektrode Bahan Cu-Zn dengan Metode *Sacrificial Anode* Pada Sistem Energi Listrik Alternatif Berbasis Air Laut. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*. Vol. 06. No. 02. Hal 249-255.
- Kouzuma, A., Kaku, N., & Watanabe, K. (2014). Microbial electricity generation in rice paddy fields: recent advances and perspectives in rhizosphere microbial fuel cells. *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol. 98. No. 23. Hal. 9521–9526. Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6138-0>
- Mahadevan, A., Gunawardena, D. A., & Fernando, S. (2014). Biochemical and Electrochemical Perspectives of the Anode of a Microbial Fuel Cell. *Technology and Application of Microbial Fuel Cells*. InTech. <https://doi.org/10.5772/58755>
- Maheswari, Karishma., S. Dr. Sarita., S. Dr. Ashok., V. Dr. Sanjay. (2018). Fuel Cell and Its Applications: A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. Vol. 7. No. 6. Hal 6–9.
- Massaglia, G., Margaria, V., Sacco, A., Castellino, M., Chiodoni, A., Pirri, F. C., & Quaglio, M. (2019). N-doped carbon nanofibers as catalyst layer at cathode in single chamber Microbial Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. Hal. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.008>
- Mulyono, P. (2017). *Perancangan Sistem Proteksi Katodik Anoda Tumbal Pada Pipa Baja API 5L Grade B Dengan Variasi Jumlah Coating Yang Dipasang Di Dalam Tanah*. Skripsi. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- Nasution, M. (2019). Kajian Tentang Hubungan Deret Volta dan Korosi Serta Penggunaannya Dalam Kehidupan Sehari-Hari. *SEMNASTEK UISU*. Hal. 251–254.
- Nitorisavut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 76. Hal. 81–89. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.064>
- Novelendah, L., Senoaji, H., Sinurat, F., Masykur, A., Musthofa, H., & Istirokhatun, T. (2018). *Potensi Listrik Dan Degradasi Fosfat Berteknologi Plant Microbial Fuel Cell Dengan Media Tanaman Eceng Gondok*. Vol. 17. Hal 1-6.
- Nuha, R. U. (2020). *Analisis Peluang Penghematan Energi Listrik Pada Unit Spinning 1 Di Pt. Delta Dunia Sandang Tekstil, Demak, Jawa Tengah*. Hal. 1–14.
- Palanisamy, G., Jung, H. Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M. D., Kim, S. C., & Roh, S. H. (2019). A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and

- membranes. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 221. Hal. 598–621. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.17>
- Park, J.-G., Lee, B., Shi, P., Kim, Y., & Jun, H.-B. (2017). Effects of electrode distance and mixing velocity on current density and methane production in an anaerobic digester equipped with a microbial methanogenesis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 42. No. 45. Hal. 27732–27740. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.025>
- Prasad, J., & Tripathi, R. K. (2018). Plant Microbial Fuel Cell Energy Harvesting Boost Converter with/without the Super Capacitor. *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*. Vol. 7. No. 4. Hal 7-13.
- Puspitaningrum, M., Izzati, M., & Haryanti, S., (2012). Produksi dan Konsumsi Oksigen Terlarut Oleh Beberapa Tumbuhan Air. *Buletin Anatomi dan Fisiologi*. No 1. Hal 47-55.
- Putra, A., Nuryanto, R., & Suyati, L. (2014). Lactose Bioelectricity on A Microbial Fuel Cell System Parallel Circuit using *Lactobacillus bulgaricus*. *Jurnal Sains dan Matematika*. Vol. 22. No. 4. Hal. 107–111.
- Putranto, A. Wahyu., Y. S. K. Novalia., W. Tiara., N. L. (2018). Pengaruh Pemberian Pupuk Urea Dan Jarak Elektroda Terhadap Tegangan Listrik Plant Microbial Fuel Cell Tanaman Padi (*Oryza Sativa*). *Jurnal Teknologi Pertanian*. Vol. 19. No. 1. Hal 43–50.
- Ravichandran, T., Jaafar, J., Ilbeygi, H., & Purwanto, M. (2021). Review on the development of fuel cells and its future prospects. *Jurnal Teknologi*. Vol 83. No. 3. Hal. 75–84. https://doi.org/10.11113/Jurnal_teknologi.V83.16438
- Rosyadi. F.A., Laily, E.N., Sitoresmi, S., & Yushardi. (2017). Pemanfaatan Alga Hijau Sebagai Biokatoda Pada PMFC (*Photosynthetic Microbial Fuel Cell*). *Jurnal Teknik Kimia*. Vo. 12. No. 1. Hal. 4-8.
- Salim, Astuti & Taib, Suryani. 2018. *Fisika Dasar*. Deepublish. Jakarta
- Santoso, A. D. & S. M. A. (2019). Penghematan Listrik Rumah Tangga dalam Menunjang Kestabilan Energi Nasional dan Kelestarian Lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. Vol. 20. No. 2. Hal. 263–270.
- Shaikh, J., Patil, N. P., Shinde, V., & Gaikwad, V. B. (2016). Simultaneous Decolorization of Methyl Red and Generation of Electricity in Microbial Fuel Cell by *Bacillus circulans* NPP1. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*. Vol. 8. No. 5. Hal.75-81. <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000320>
- Sidiq, M. F. (2013). Analisa Korosi Dan Pengendaliannya. *Jurnal Foundry*. Vol. 3. No. 1. Hal. 25–30.

- Slate, A. J., Whitehead, K. A., Brownson, D. A. C., & Banks, C. E. (2019). Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 101. Hal. 60–81. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.044>
- Sophia, A. C., & Sreeja, S. (2017). Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Vol. 21. Hal. 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.05.001>
- Sulistiyawati Indah, R. N. L. P. 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*. Vol. 37. No. 2. Hal. 112–117.
- Suyanta. (2013). *Buku Ajar Kimia Unsur*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Tang, J., Liu, T., Yuan, Y., & Zhuang, L. (2014). Effective Control of Bioelectricity Generation from a Microbial Fuel Cell by Logical Combinations of pH and Temperature. *The Scientific World Journal*. Hal. 1–7. <https://doi.org/10.1155/2014/186016>
- Tapia, N. F., Rojas, C., Bonilla, C. A., & Vargas, I. T. (2017). Evaluation of Sedum as driver for plant microbial fuel cells in a semi-arid green roof ecosystem. *Ecological Engineering*. Vol. 108. Hal. 203–210.
- Wiranti, Tiara. (2017). *Pengaruh Variasi Pemberian Pupuk Organik dan Jarak Elektroda Terhadap Output Listrik Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) Berbasis Tanaman Padi (Oryza Sativa)*. Skripsi. Universitas Brawijaya. Malang.
- Wolińska, A., Stepniowska, Z., Bielecka, A., & Ciepielski, J. (2014). Bioelectricity production from soil using microbial fuel cells. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. Vol. 173. No. 8. Hal. 2287–2296.
- Xu, L., Zhao, Y., Doherty, L., Hu, Y., & Hao, X. (2016). The integrated processes for wastewater treatment based on the principle of microbial fuel cells: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. Vol. 46. No. 1. Hal. 60–91. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1061884>
- Young, High D., & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas*. Erlangga. Jakarta
- Zhang, Y., Liu, M., Zhou, M., Yang, H., Liang, L., & Gu, T. (2019). Microbial fuel cell hybrid systems for wastewater treatment and bioenergy production: Synergistic effects, mechanisms and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 103. Hal. 13–29). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.027>