

DESAIN DAN KARAKTERISASI ELEKTRIK *PLANT MICROBIAL FUEL CELL* (PMFC) MENGGUNAKAN TANAMAN ECENG GONDOK DENGAN VARIASI JUMLAH ECENG DAN PENGARUH CAHAYA MATAHARI

(Skripsi)

Oleh

Intan Pubiyanti



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

ABSTRAK

DESAIN DAN KARAKTERISASI ELEKTRIK *PLANT MICROBIAL FUEL CELL* (PMFC) MENGGUNAKAN TANAMAN ECENG GONDOK DENGAN VARIASI JUMLAH ECENG DAN PENGARUH CAHAYA MATAHARI

Oleh

Intan Pubiyanti

Penelitian mengenai *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC) telah direalisasikan menggunakan tanaman eceng gondok dengan memvariasikan jumlah eceng dan pengaruh cahaya matahari. Karakteristik elektrik PMFC bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi jumlah eceng gondok dan cahaya matahari terhadap daya yang dihasilkan. Terdapat 3 reaktor yang digunakan pada penelitian ini yaitu reaktor (a) berisi 1 rumpun eceng gondok, reaktor (b) berisi 2 rumpun eceng gondok, dan reaktor (c) berisi 3 rumpun eceng gondok. Selain menggunakan tanaman, PMFC juga menggunakan elektroda berupa plat Zn dan Cu. Penelitian dilakukan selama 28 hari (331 jam) dibagi 2 kondisi yaitu 14 hari di luar ruangan dan 14 hari di dalam ruangan. Berdasarkan hasil penelitian, PMFC pada reaktor c yang berisi 3 rumpun eceng gondok memperoleh daya listrik yang lebih besar dibandingkan reaktor a dan reaktor b. PMFC menghasilkan daya listrik maksimal dikondisi luar ruangan sebesar 6,31 mW dan kondisi dalam ruangan menghasilkan daya listrik sebesar 1,64 mW. PMFC dikondisi luar ruangan menghasilkan daya listrik yang lebih besar dibandingkan dikondisi dalam ruangan.

Kata Kunci: *cahaya matahari, daya listrik, eceng gondok, karakteristik elektrik, PMFC*

ABSTRACT

DESIGN AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF A MICROBIAL FUEL CELL (PMFC) PLANT USING WATER HYACINTH PLANTS WITH VARIATIONS OF THE AMOUNT OF WATER AND THE EFFECT OF SUNLIGHT

By

Intan Pubiyanti

Research on Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) has been realized using water hyacinth plants by varying the amount of water and the effect of sunlight. The electrical characteristics of PMFC aim to determine the impact of variations in the amount of water hyacinth and sunlight on the power generated. There are three reactors used in this study, namely reactor (a) containing one water hyacinth clump, reactor (b) containing two water hyacinth clumps, and reactor (c) containing three water hyacinth clumps. In addition to using plants, PMFC also uses electrodes from Zn and Cu plates. The study was conducted for 28 days (331 hours) divided into two conditions, namely 14 days outdoors and 14 days indoors. Based on the study's results, PMFC in reactor c containing three water hyacinth clumps obtained greater electrical power than in reactors a and b. PMFC produces a maximum electrical capacity of 6.31 mW in outdoor conditions and has 1.64 mW of electrical energy in indoor conditions. PMFC in outdoor conditions produces greater electrical power than in indoor conditions.

Keywords: *electric power, electrical characteristics, PMFC, plants, sunlight,*

DESAIN DAN KARAKTERISASI ELEKTRIK *PLANT MICROBIAL FUEL CELL* (PMFC) MENGGUNAKAN TANAMAN ECENG GONDOK DENGAN VARIASI JUMLAH ECENG DAN PENGARUH CAHAYA MATAHARI

Oleh

INTAN PUBIYANTI

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 Fuel Cell* (PMFC) Menggunakan Tanaman Eceng Gondok Dengan Variasi Jumlah Eceng Dan Pengaruh Cahaya Matahari**

Nama Mahasiswa : **Intan Pubiyanti**
Nomor Pokok Mahasiswa : **1817041001**
KBK : **Instrumentasi**
Program Studi : **Fisika**
Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



1. Komisi Pembimbing

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

Donni Kis Apriyanto, S.Si., M.Sc.
NIP. 198804032019031005

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si.



Sekretaris : Donni Kis Apriyanto, S.Si., M.Sc.

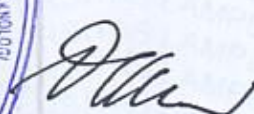


Penguji Bukan Pembimbing : Drs. Amir Supriyanto, M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, M.T.
NIP. 197407052000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **4 Juli 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 yang 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, 15 Juli 2022



Intan Pubiyanti
NPM. 1817041001

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Intan Pubiyanti, dilahirkan pada tanggal 06 Juli 2000 di Kecamatan Pangkalan Kerinci, Kabupaten Pelalawan, Riau. Penulis merupakan anak kedua dari lima bersaudara dari pasangan Bapak Muhammad Yusuf dan Ibu Reni.

Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN 007 Pkl. Kerinci Tahun 2012, SMPN 1 Natar tahun 2015, SMAN 1 Natar tahun 2018. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui SNMPTN tahun 2018. Selama menempuh pendidikan, penulis tergabung dalam Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) sebagai Sekretaris Bidang Kaderisasi periode 2020-2021 dan sebagai Sekretaris Dinas Pemberdayaan Wanita BEM FMIPA Unila Periode 2021-2022.

Penulis pernah melakukan pengabdian masyarakat dengan mengikuti program KKN (Kuliah Kerja Nyata) Universitas Lampung tahun 2021 di Desa Branti Raya, Kecamatan Natar, Kabupaten Lampung Selatan. Penulis juga telah menyelesaikan kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PDAM Way Rilau Kota Bandar Lampung pada tahun 2021. Penulis juga menyelesaikan penelitian skripsi di Jurusan Fisika dengan Judul **“Desain Dan Karakterisasi Elektrik**

***Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) Menggunakan Tanaman Eceng Gondok
Dengan Variasi Jumlah Eceng Dan Pengaruh Cahaya Matahari***

PERSEMBAHAN

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

Bapak Muhammad Yusuf dan Alm. Ibu Reni

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

Kakak dan Adikku serta keluarga

Selalu memberi semangat dan dorongan kepada penulis

Bapak/Ibu guru dan Bapak/Ibu dosen

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

Para sahabat dan teman-teman seperjuangan fisika FMIPA UNILA 2018

Terimakasih atas kebaikan kalian dan kebersamaan yang kita lalui

Serta almamater tercinta

“Universitas Lampung”

MOTTO

“Usaha, Yakin, dan Berdoa”

“Dan bahwasanya seorang manusia hanya memperoleh apa yang telah diusahakannya”

(QS. An-Najm: 39)

“Ridha Allah ada pada ridha orang tua dan kemurkaan Allah ada pada kemurkaan orang tua”

(HR. Tarmidzi)

“...Sesungguhnya Allah bersama orang-orang yang sabar”

(QS. An-Anfal: 46)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberi nikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Desain Dan Karakterisasi Elektrik *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC) Menggunakan Tanaman Eceng Gondok Dengan Variasi Jumlah Eceng Dan Pengaruh Cahaya Matahari”** yang merupakan syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada bidang Instrumentasi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Skripsi ini membahas tentang pengaruh variasi jumlah eceng gondok dan pengaruh cahaya matahari pada *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC).

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 laporan ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan menjadi rujukan untuk penelitian berikutnya agar lebih sempurna.

Bandar Lampung, 15 Juli 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 Fuel Cell* (PMFC) Menggunakan Tanaman Eceng Gondok Dengan Variasi Jumlah Eceng Dan Pengaruh Cahaya Matahari”**. Terwujudnya skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si. selaku Pembimbing Pertama yang telah banyak memberi bimbingan, motivasi, nasihat serta ilmunya.
2. Bapak Donni Kis Apriyanto, S.Si., M.Sc. selaku Pembimbing Kedua yang telah memberikan saran, masukan dan arahan dalam penulisan skripsi ini.
3. Bapak Drs Amir Supriyanto, M.Si. selaku Penguji yang telah memberikan koreksi dan masukan selama penulisan skripsi.
4. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T., selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung serta Dosen Pembimbing Akademik.
5. Bapak Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, M.T., selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
6. Seluruh Dosen serta Staf Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.

7. Kedua orang tuaku Bapak Muhammad Yusuf dan Alm. Ibu Reni. Kepada saudara kandungku Yomi Mariska, Indah Lestari, Habibul Muluk, dan Yulia Ramadhani yang selalu memberikan cinta kasih, dukungan, pengorbanan dan doa untuk penulis.
8. Sahabat-sahabatku Novan Dwi Ari Wijaya, Rini Vamulia, Wiwin Sulistiani, Mei Suryani, Yessi Efridahniar, Riftaul Kurniawati, dan Noni Susanti yang selalu ada disaat senang dan susah serta menjadi kawan diskusi yang baik.
9. Teman-teman seperjuangan Fisika 2018, kakak-kakak tingkat, serta adik-adik tingkat yang telah membantu dan memberikan semangat dalam proses menyelesaikan tugas akhir.
10. Serta semua pihak yang tidak penulis cantumkan, yang telah memberikan bantuan moril maupun materiil kepada penulis.

Semoga Allah SWT senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-Nya, serta memberkahi hidup kita. Aamiin.

Bandar Lampung, 15 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
MENGESAHKAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN	ix
MOTTO	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Batasan Masalah	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Penelitian Terkait.....	8
2.2 <i>Fuel Cell</i>	10
2.3 <i>Microbial Fuel Cell</i> (MFC)	12
2.4 <i>Plant Microbial Fuel Cell</i> (PMFC)	14

2.5	Elektroda.....	17
2.6	Korosi	19
2.7	Aspek Utama Pada PMFC.....	22
	2.7.1 Matriks Pendukung	22
	2.7.2 Tanaman Hidup	23
	2.7.3 Konversi Substrat	23
	2.7.4 Mekanisme Transfer Elektron.....	24
2.8	pH (<i>Power of Hydrogen</i>)	25
2.9	Eceng Gondok (<i>Eichhornia crassipes</i>).....	26
III. METODE PENELITIAN.....		28
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	28
3.3	Prosedur Penelitian	29
	3.3.1 Tahap 1	30
	3.3.2 Tahap 2.....	30
	3.3.3 Tahap 3.....	32
3.4	Rancangan Data Hasil Penelitian	34
3.5	Rancangan Analisis Data Penelitian.....	35
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....		39
4.1	PMFC Dengan Variasi Jumlah Eceng Gondok	39
4.2	<i>Ouput</i> PMFC	42
4.3	Perbandingan Karakteristik Elektrik PMFC.....	51
4.4	Pengaruh Laju Korosi Elektroda	52
V. SIMPULAN DAN SARAN.....		54
5.1	Simpulan.....	54
5.2	Saran	54
DAFTAR PUSTAKA.....		56
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Desain reaktor.....	8
Gambar 2.2 Ilustrasi Proses Dasar PMFC.....	16
Gambar 2.3 Proses transfer electron pada PMFC	24
Gambar 2.4 Eceng Gondok	27
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	29
Gambar 3.2 Ilustrasi skema PMFC.....	31
Gambar 3.3 Desain PMFC.....	31
Gambar 3.4 Metode Pengukuran PMFC	32
Gambar 3.5 Grafik karakteristik antara tegangan dan waktu pada PMFC di luar ruangan.....	36
Gambar 3.6 Grafik karakteristik antara arus terhadap waktu pada PMFC di luar ruangan.....	36
Gambar 3.7 Grafik karakteristik antara tegangan dan waktu pada PMFC di dalam ruangan	37
Gambar 3.8 Grafik karakteristik antara arus terhadap waktu pada PMFC di dalam ruangan	37
Gambar 3.9 Grafik karakteristik antara pH air terhadap waktu pada PMFC di luar ruangan.....	38

Gambar 3.10 Grafik karakteristik antara pH air terhadap waktu pada PMFC di dalam ruangan	38
Gambar 4.1 Eceng Gondok yang digunakan	39
Gambar 4.2 Elektroda Zn dan Cu	40
Gambar 4.3 Reaktor PMFC	41
Gambar 4.4 Kondisi LED pada malam hari di luar ruangan	42
Gambar 4.5 Grafik karakteristik tegangan dan arus listrik versus waktu kondisi di luar ruangan untuk reaktor: (a) eceng gondok 1, (b) eceng gondok 2, (c) eceng gondok 3	43
Gambar 4.6 Grafik karakteristik daya listrik dan pH terhadap waktu pada kondisi di luar ruangan untuk reaktor: (a) eceng gondok 1, (b) eceng gondok 2, (c) eceng gondok 3	45
Gambar 4.7 Kondisi LED pada malam hari di ruangan gelap.....	47
Gambar 4.8 Grafik karakteristik tegangan dan arus listrik versus waktu kondisi di dalam ruangan untuk reaktor: (a) eceng gondok 1, (b) eceng gondok 2, (c) eceng gondok 3	48
Gambar 4.9 Grafik karakteristik daya listrik dan pH terhadap waktu pada kondisi di dalam ruangan untuk reaktor: (a) eceng gondok 1, (b) eceng gondok 2, (c) eceng gondok 3	50
Gambar 4.10 Perkaratan elektroda dan kabel penghubung	53

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Nilai potensial elektroda standar	19
Tabel 2.2 Konstanta perhitungan laju korosi berdasarkan satuannya	21
Tabel 3.1 Pengukuran karakteristik elektrik PMFC di luar ruangan.....	34
Tabel 3.2 Pengukuran karakteristik elektrik PMFC di dalam ruangan	34
Tabel 3.3 Pengukuran nilai pH air di luar ruangan	35
Tabel 3.4 Pengukuran nilai pH air di dalam ruangan	35
Tabel 4.1 Nilai maksimum dan minimum tegangan dan arus listrik setiap reaktor luar ruangan	44
Tabel 4.2 Daya maksimum dan minimum setiap reaktor luar ruangan.....	46
Tabel 4.3 Nilai maksimum dan minimum tegangan dan arus listrik setiap reaktor dalam ruangan.....	49
Tabel 4.4 Daya maksimum dan minimum setiap reaktor dalam ruangan	50
Tabel 4.5 Pengukuran massa elektroda	52
Tabel 4.6 Laju korosi elektroda.....	52

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik menjadi salah satu kebutuhan masyarakat yang sangat esensial sebagai sumber daya ekonomis utama yang dibutuhkan dalam kegiatan. Kebutuhan energi akan meningkat di masa yang akan datang seiring dengan pertumbuhan dan perkembangan penduduk, begitu pula dengan investasi, kemajuan teknologi, dan kemajuan pendidikan di semua tingkatan. Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), rasio elektrifikasi di Indonesia mencapai 99,45% pada tahun 2021. Nilai tersebut meningkat 0,25% dari tahun sebelumnya yang sebesar 99,20%, rasio tersebut belum mencapai target yang ditetapkan oleh pemerintah sebesar 99,99% secara nasional. Hal ini disebabkan masih ada sembilan provinsi yang rasio elektrifikasinya di bawah rata-rata nasional. Sehingga target rasio elektrifikasi pada tahun ini dinaikkan menjadi 100%, dengan upaya yang dilakukan berupa pembangunan pembangkit listrik berbasis energi baru dan terbarukan (EBT), stasiun pengisian energi listrik (SPEL), dan alat penyalur daya listrik (APDAL).

Sumber energi dunia telah berevolusi beberapa kali, dimulai dengan biomassa seperti kayu bakar untuk memenuhi kebutuhan energi, kemudian beralih ke bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas, yang memicu revolusi industri pada

tahun 1900-an. Peningkatan penggunaan bahan bakar fosil mengakibatkan peningkatan gas rumah kaca sehingga iklim menjadi tidak stabil, serta suhu emisi bumi dan permukaan laut naik (Pertamina, 2020). Visi masa depan pengelolaan energi global difokuskan pada jalur pengurangan emisi seperti perluasan kapasitas dan penggunaan pembangkit EBT, menurunkan penggunaan sumber energi fosil di semua sektor, dan menggalakkan penggunaan kendaraan listrik. Beberapa negara, termasuk Korea, Jepang, dan Uni Eropa telah berkomitmen untuk mencapai *net-zero emission* pada tahun 2050, serta China pada tahun 2060 (IEA, 2021).

Indonesia juga fokus dengan pertumbuhan penggunaan sumber energi terbarukan (EBT). Terbukti dengan Peraturan Pemerintah Nomor. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) dan Peraturan Presiden Nomor. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) yang mencantumkan target penggunaan EBT pada tahun 2025 dan 2050 sebesar 23% dan 31% dari total kebutuhan energi nasional masing-masing (Republik Indonesia, 2021). Namun hingga tahun 2020, pangsa EBT baru terealisasi sebesar 11,31% (KESDM, 2021).

Pengembangan EBT telah banyak dilakukan sebelumnya, salah satunya *fuel cell*. *Fuel cell* adalah perangkat konversi energi yang menggunakan proses elektrokimia untuk mengubah energi kimia menjadi listrik (Horri dkk., 2012) yang menghasilkan emisi sangat sedikit terhadap lingkungan (Demirbas, 2007). Gas hidrogen digunakan sebagai bahan bakar, produk limbahnya adalah panas dan uap air. *Fuel cell* ini diharapkan dapat menjadi alternatif peralatan konversi energi yang ramah lingkungan (Wieckowski & Norskov, 2010).

Saat ini teknologi *fuel cell* telah mengembangkan teknologi *fuel cell* menggunakan mikroba sebagai agen katalis. Jenis *fuel cell* ini disebut *microbial fuel cell* (MFC) yang menggunakan mikroba dalam MFC untuk memecah senyawa organik menjadi elektron dan proton. Sebagai hasil dari pergerakan elektron dari anoda ke katoda terjadi perbedaan potensial yang menghasilkan pembentukan energi listrik (Slate dkk., 2019).

Inovasi terbaru dari MFC adalah *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC). PMFC menggunakan tumbuhan sebagai media penghasil mikroorganisme yang beroperasi sebagai biokatalis. Keunggulan PMFC salah satunya yaitu hanya menghasilkan emisi yang sedikit, hal ini dapat mengurangi gas rumah kaca (Chiranjeevi dkk., 2018). Bahan organik yang tidak diambil oleh tanaman selama fotosintesis diubah oleh mikroorganisme di sekitar akar tanaman menjadi elektron dan proton, yang kemudian diubah menjadi arus listrik (Helder dkk., 2013). Selain itu, dengan mengubah emisi CO₂ menjadi biomassa melalui fotosintesis, tanaman yang digunakan dalam PMFC dapat membantu mengurangi emisi CO₂. Proses ini adalah salah satu strategi untuk menghasilkan energi alternatif yang tidak melepaskan zat beracun ke lingkungan. Cara ini juga berfungsi sebagai solusi untuk masalah lingkungan jangka panjang yang muncul sebagai akibat dari penggunaan bahan bakar fosil (Wilberforce dkk., 2017).

Beberapa penelitian mengenai PMFC telah dilakukan mulai dari pembuatan PMFC dengan memvariasikan jenis elektroda Al/Cu, Zn/Cu, dan Al/Pb menghasilkan daya tertinggi pada elektroda Al/Cu (Kadhafi, 2020). Selanjutnya penelitian membuat PMFC dengan memvariasikan jarak anoda-katoda 10 cm dan

20 cm menghasilkan bahwa jarak 10 cm dengan anoda seng menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan pada jarak 20 cm (Hendrawan, 2020). Kemudian penelitian mengenai potensi listrik PMFC dengan memvariasikan jumlah tanaman eceng gondok $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, dan penuh pada reaktor menghasilkan daya yang maksimal pada reaktor penuh eceng gondok (Novelendah dkk., 2018). Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya kebaharuan dari penelitian ini adalah mengkararakteristik PMFC dengan menggunakan elektoda yang memiliki potensial elektroda standar (E^0) dan ukuran elektroda yang lebih besar.

PMFC memiliki beberapa komponen dan karakteristik unik yang berbeda dari MFC seperti matriks pendukung dan pengayaan substrat, tanaman hidup, konversi substrat dan mekanisme transfer elektron, yang dianggap sebagai aspek terpenting PMFC (Kabutey dkk., 2019). Selain itu juga, terdapat komponen lain pada PMFC yaitu elektroda. Elektroda adalah komponen lain yang mempengaruhi hasil akhir dari PMFC, baik itu jenis, bentuk, maupun jarak dari elektroda (Hendrawan, 2020). Elektroda yang memiliki kinerja baik untuk pembangkit listrik adalah Cu-Zn dibandingkan Cu-Al (Nuriskasari Isnanda, 2021).

Secara umum, tanaman yang hidup di lahan basah digunakan pada PMFC karena kemampuan elektrolitnya menghasilkan lebih banyak listrik (Wetser dkk., 2015). *Spartina anglica* (Timmers dkk., 2010), *Phragmites australis* (Wetser dkk., 2015), dan *Eichhornia crassipes* (Venkata Mohan dkk., 2011) adalah beberapa spesies tumbuhan yang paling umum digunakan. Selain itu, tanaman yang digunakan PMFC dengan *rhizodeposit* menggunakan tanaman dari spesies berbunga seperti *Ipomoea aquatica*, *Typha latifolia* dan *Canna indica* dan

tanaman dari spesies rumput seperti *Oryza sativa*, *Glyceria maxima*, *Spartina anglica*, *Arundinella anomala*, *Lemna minuta* dan *Arundo donax* (Lu dkk., 2015). Penelitian ini tanaman yang akan digunakan adalah eceng gondok (*Eichhornia crassipes*). Pemilihan eceng gondok sebagai tanaman sumber mikroorganisme karena eceng gondok mengandung selulosa tinggi, serta memiliki salah satu mikroorganisme yang dapat memecah glukosa yaitu *Saccharomyces cerevisiae*. Selain itu, eceng gondok adalah tanaman yang tumbuh cepat, sering dianggap sebagai gulma karena dapat menyebabkan berbagai masalah, termasuk menurunkan populasi ikan dan menghalangi saluran irigasi (Gaurav dkk., 2020).

Berdasarkan pemaparan sebelumnya, dilakukan penelitian ini untuk mengkarakterisasi elektrik PMFC dengan memvariasikan jumlah eceng gondok dan pengaruh cahaya matahari menggunakan tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes*). Untuk mengetahui pengaruh cahaya matahari pada PMFC, penelitian dilakukan pada dua tempat yang berbeda yaitu di luar ruangan terpapar langsung oleh matahari dan di dalam ruangan yang tidak langsung terpapar oleh sinar matahari.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, permasalahan yang ada dirumuskan dalam beberapa hal sebagai berikut.

- a. Bagaimana mendesain dan membuat PMFC sebagai penghasil energi listrik?
- b. Bagaimana pengaruh variasi jumlah eceng gondok dalam PMFC terhadap karakteristik elektrik yang dihasilkan?

- c. Bagaimana pengaruh cahaya matahari terhadap karakteristik elektrik yang dihasilkan terkait fotosintesis tanaman?
- d. Bagaimana laju korosi yang terjadi pada elektroda sistem PMFC?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian adalah sebagai berikut.

- a. Membuat PMFC sebagai energi alternatif terbarukan.
- b. Mengetahui dan menganalisis pengaruh variasi jumlah eceng gondok terkait transfer proton, terhadap karakteristik elektrik yang dihasilkan.
- c. Mengetahui pengaruh cahaya matahari terkait fotosintesis terhadap karakteristik elektrik yang dihasilkan dari variasi jumlah eceng gondok.
- d. Mengetahui dan menganalisis pengaruh laju korosi terhadap plat elektroda pada PMFC.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian adalah sebagai berikut.

- a. Adanya informasi mengenai PMFC yang dapat dijadikan sebagai energi alternatif yang menghasilkan energi listrik.
- b. Adanya informasi pemanfaatan tanaman eceng gondok sebagai sumber PMFC.
- c. Adanya informasi mengenai perbedaan daya listrik yang dihasilkan PMFC dengan variasi jumlah eceng gondok dan pengaruh cahaya matahari.

1.5 Batasan Masalah

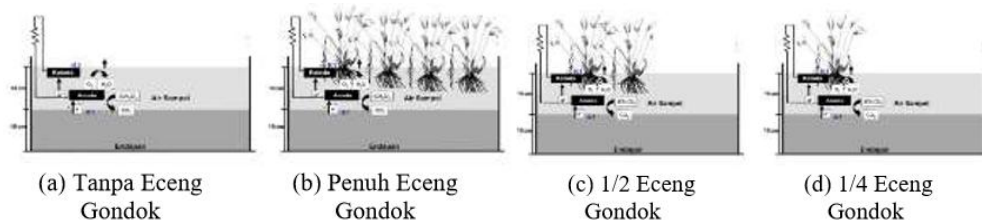
Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut.

- a. Jenis *fuel cell* yang digunakan dalam penelitian ini adalah PMFC dengan ukuran reaktor 54 cm × 36,5 cm × 28,5 cm.
- b. Jenis tanaman yang digunakan adalah eceng gondok.
- c. Jenis elektroda yang digunakan yaitu seng/Zn (anoda) dan tembaga/Cu (katoda).
- d. Menggunakan jumlah eceng gondok dengan massa yang rata-rata hampir sama yaitu 250-300 gram.
- e. Menggunakan ukuran plat elektroda yang sama yaitu 0,2 mm × 200 mm × 300 mm.
- f. Semua box berisi air dengan volume yang sama yaitu sekitar 15 L .
- g. Parameter yang diukur adalah arus listrik, tegangan listrik, dan pH air.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian yang berkaitan dengan karakteristik elektrik PMFC dengan variasi jumlah tanaman menggunakan eceng gondok sudah pernah dilakukan sebelumnya oleh (Novelendah dkk., 2018). Penelitian ini dilakukan pengujian besar potensi listrik dengan menggunakan elektroda graphene yang dibuat secara manual dari plat aluminium berukuran 20×11 cm yang diselubungi bubuk karbon. Reaktor yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 4 buah dengan volume 45 liter yang berisi elektroda graphene (Anoda dan katoda), endapan sungai setinggi 10 cm dari dasar reaktor, air sungai setinggi 14 cm dari bagian atas permukaan sedimen, dan eceng gondok. Jumlah eceng gondok pada setiap reaktor berbeda-beda, terdapat reaktor tanpa eceng gondok, penuh eceng gondok, $\frac{1}{2}$ eceng gondok, dan $\frac{1}{4}$ eceng gondok. Desain reaktor seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Desain reaktor (Novelendah dkk., 2018).

Pengambilan data setiap pukul 10.00 WIB selama 7 hari dengan pengukuran karakteristik elektrik menggunakan beban resistor sebesar 0,965 ohm.

Hasil penelitian memperoleh bahwa reaktor penuh eceng gondok memproduksi daya listrik/satuan luas tertinggi dengan nilai rerata $0,4806 \text{ mW/m}^2$ pengujian selama 7 hari. Daya listrik tertinggi/satuan luas yang dihasilkan sebesar $0,7722 \text{ mW/m}^2$ pada hari ketiga dengan reaktor penuh eceng gondok. Sedangkan reaktor dengan kapasitas $1/2$, $1/4$ dan tanpa eceng gondok berturut-turut menghasilkan daya listrik/satuan luas tertinggi sebesar $0,352 \text{ mW/m}^2$ pada hari pertama, $0,756 \text{ mW/m}^2$ pada hari ketujuh dan $0,575 \text{ mW/m}^2$ pada hari kelima.

Penelitian lainnya mengenai perbedaan elektroda yang digunakan dalam rancang bangun pembangkit listrik tenaga air gambut (Nuriskasari Isnanda, 2021). Penelitian ini membandingkan kinerja elektroda Cu-Zn dengan Cu-Al. Zn dan Al berperan sebagai anoda, dan Cu berperan sebagai katoda. Selain variasi jenis elektroda, penelitian ini juga memvariasikan ukuran penampang lempeng elektroda, yang masing-masing ukuran adalah 3×5 , 5×7 , 7×9 , dan $9 \times 11 \text{ cm}^2$. Dengan variasi volume air gambut yaitu 600 ml, 800 ml, dan 1000 ml.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa elektroda Cu-Zn menghasilkan tegangan listrik yang lebih besar dibandingkan dengan Cu-Al. Elektroda Cu-Zn dengan luas penampang $9 \times 11 \text{ cm}^2$ menghasilkan tegangan sebesar 1,03 V. Sedangkan elektroda Cu-Al pada luas penampang $9 \times 11 \text{ cm}^2$ menghasilkan tegangan sebesar 0,5 V. Hal ini karena nilai potensial reduksi logam pada Al memiliki nilai potensial yang lebih rendah dibandingkan Zn (Harahap, 2016). Luas penampang juga berpengaruh terhadap peningkatan tegangan listrik. Luas penampang $3 \times 5 \text{ cm}^2$ elektroda Cu-Zn menghasilkan tegangan listrik sebesar 0,95 V sedangkan elektroda Cu-Al menghasilkan 0,45 V. Hasil penelitian ini sesuai dengan

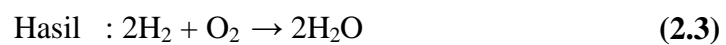
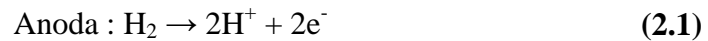
penelitian yang telah dilakukan oleh (Usman dkk., 2017) bahwa peningkatan luas penampang elektroda akan meningkatkan energi listrik yang dihasilkan pada sel elektrokimia.

2.2 Fuel Cell

William Rebolet Grove, seorang ahli hukum yang ternyata seorang ilmuwan amatir, mendemonstrasikan *fuel cell* pada tahun 1839 dengan melakukan elektrolisis air terbalik dengan elektroda platina. Ketika Charles Langer dan Ludwig Mond mencoba membuat mesin generator yang memanfaatkan udara dan gas arang pada tahun 1889, mereka menciptakan istilah "*Fuel Cell*". Francis Bacon berhasil menciptakan *Fuel Cell* pada tahun 1932. Hanya saja 27 tahun kemudian, penggunaan *fuel cell* secara praktis dapat dilakukan, terutama sebagai pembangkit tenaga untuk peralatan las berkapasitas 5 kW. Roket Apollo dan Gemini, yang dikembangkan oleh NASA di Amerika Serikat, telah beroperasi sejak 1950. Tahun 1987, Departemen Teknologi AS, yang telah melakukan penelitian dan pengembangan ekstensif selama lebih dari 30 tahun, mulai fokus pada pengembangan kendaraan (Hendrata, 2001).

Fuel Cell merupakan teknologi elektrokimia yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik secara konstan selama bahan bakar dan oksidan tersedia (Shukla dkk., 2004). Elektroda anoda dan katoda, serta elektrolit, membentuk *fuel cell*. Anoda adalah tempat di mana hidrogen dipecah menjadi proton dan elektron (listrik). Katoda adalah tempat di mana proton, elektron, dan oksigen bergabung untuk membuat air. Media aliran proton adalah elektrolit. Ketika molekul hidrogen bersentuhan dengan anoda, molekul pecah menjadi ion hidrogen dan

elektron, dan elektron mengalir melalui sirkuit luar ke katoda, menghasilkan listrik. Molekul air terbentuk ketika ion hidrogen mengalir melalui membran atau elektrolit menuju katoda dan bercampur dengan elektron dan oksigen dari udara. Reaksi yang terjadi pada anoda dan katoda umumnya berlangsung seperti pada persamaan 2.1 sampai 2.3.



Fuel Cell sekarang mengalami banyak pengembangan karena beberapa keunggulan yang diberikan oleh teknologi tersebut, termasuk efisiensi yang besar jika dibandingkan dengan *heat engines* dan tingkat polusi yang mendekati nol. *Fuel Cell* telah diklasifikasikan berdasarkan berbagai kriteria sebagai hasil dari kemajuan yang bervariasi ini. *Abiotic fuel cell* dan *biological fuel cell* dibedakan berdasarkan ada tidaknya interaksi antara makhluk hidup atau komponen biologis (Mahadevan dkk., 2014). Suhu, bahan bakar yang digunakan, proses yang terjadi, dan katalis yang digunakan semuanya digunakan untuk mengklasifikasi ulang sel bahan bakar abiotik.

Sel bahan bakar diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan suhu operasinya. *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC) dan *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC) adalah dua jenis *fuel cell* suhu operasi tinggi (620°-1000° C) (SOFC). Sedangkan *fuel cell* yang termasuk suhu rendah (60°-220° C) meliputi *Alkaline Fuel Cells* (AFC), *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells* (PEMFC), dan *Phosphoric Acid Fuel Cells* (PAFC).

Biological fuel cell dibagi menjadi dua jenis yaitu *enzymatic fuel cell*, *fuel cell* ini memanfaatkan enzim sebagai katalisnya dan *microbial fuel cell* yang memanfaatkan mikroorganisme sebagai katalisnya. Substrat organik diubah menjadi energi listrik oleh *Biological fuel cell*. Karena komponen biologis memainkan peran penting selama proses reaksi elektrokimia *fuel cell*, beberapa parameter lingkungan, seperti pH dan suhu, harus dimodifikasi dalam praktiknya untuk memastikan kelangsungan hidupnya (Mahadevan dkk., 2014).

2.3 Microbial Fuel Cell (MFC)

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan salah satu teknologi alternatif yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi katalitik menggunakan mikroorganisme (Ibrahim dkk., 2017). MFC adalah suatu bentuk perangkat bioelektrokimia yang menggunakan mikroorganisme elektroaktif untuk secara langsung mengubah energi kimia menjadi listrik menggunakan campuran metabolisme dan elektrokimia pada mikroba dari berbagai substrat, seperti air limbah dan urin (Pant dkk., 2010).

Konversi bakteri dari akseptor elektron alami seperti oksigen dan nitrat menjadi akseptor tidak larut seperti anoda pada MFC menghasilkan energi listrik. Selain itu, dapat pula digunakan sebagai donor elektron pada MFC. Hidrogen (etanol, metanol, atau gas metana) yang ditemukan pada produk metabolisme dapat dimanfaatkan sebagai sumber hidrogen untuk produksi mikroba dan pembangkit energi.

Elektron-elektron yang dihasilkan akan berpindah dari anoda ke katoda. Bahan bakar menghasilkan elektron dan proton di anoda, yang dioksidasi oleh mikroorganisme. Elektron dari anoda kemudian pergi ke katoda melalui membran. Komponen terikat membran atau pembawa elektron terlarut dapat digunakan untuk mentransmisikan elektron.

Setelah itu, bakteri aerob menggunakan oksigen atau nitrat sebagai akseptor elektron terakhir untuk membuat air. Karena kapasitas bakteri untuk mengangkut elektron ke akseptor dengan elektron yang tidak larut sehingga oksigen tidak dapat dihasilkan di anoda. MFC menghasilkan arus listrik dan limbah berupa gas karbondioksida (CO_2) selama proses anaerobik. Bakteri yang ada dalam proses reduksi oksigen yang memadai mengubah substrat (seperti glukosa, asetat, dan air limbah) menjadi CO_2 , proton dan elektron diubah oleh katalis platinum atau katalis logam non-mulia yang umum digunakan.

Elektron kemudian mengalir ke katoda melalui resistor. Aliran elektron-elektron (ampere) dengan beda potensial (volt) menghasilkan daya listrik (watt). Elektron kemudian akan mengalir ke katoda melewati beban eksternal. Akseptor elektron akan direduksi secara kimia di katoda (Purwono dkk., 2015).

Hasil metabolisme bakteri digunakan dalam MFC. Bakteri akan melakukan metabolisme glukosa dengan mengubahnya menjadi hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Hidrogen adalah bahan baku untuk reaksi reduksi dengan oksigen, yang melepaskan elektron di anoda sebagai sumber arus listrik (Fitrialdi, 2011).

Prinsip kerja MFC sangat ditentukan pada pembelahan *semireactions* dari oksidasi yang membentuk reaksi redoks. Proton diproduksi melalui bakteri aktif secara elektrokimia di dalam anoda yang berdifusi melalui separator setengah sel. Mikroba memecah bahan bakar organik menjadi elektron dan proton, elektron yang berasal dari oksidasi anaerob oleh mikroba diangkut ke elektroda anodik dan berjalan melalui sirkuit eksternal ke elektroda katoda, sementara proton dan kation lain melewati membran yang memisahkan kutub anoda dan katoda (Iwona dkk., 2020).

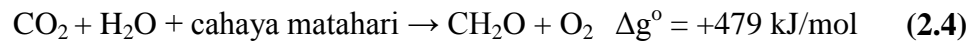
2.4 *Plant Microbial Fuel Cell (PMFC)*

Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) merupakan sebuah inovasi atau pengembangan dari penelitian MFC (Wetser dkk., 2015). Akar tanaman pada PMFC berperan aktif untuk memberi bahan bakar pada mikroorganisme yang di sekitar tanaman bertindak sebagai biokatalis yang dapat mendegradasi material organik menjadi energi listrik.

PMFC memanfaatkan tanaman dan mikroorganisme yang hidup di tanah untuk menghasilkan listrik. PMFC memanfaatkan secara alami proses yang terjadi disekitar akar tanaman untuk langsung menghasilkan listrik. Tumbuhan ini akan memproduksi bahan organik dari sinar matahari dan CO₂ melalui proses fotosintesis.

Proses fotosintesis menjadi hal mendasar pada P-MFC. Tanaman berklorofil mengubah energi matahari menjadi energi kimia berbentuk bahan organik. Bahan organik berbentuk karbohidrat (CH₂O) yang merupakan produk dari reaksi antara

air dan karbon dioksida seperti persamaan 2.4. Indikasi positif pada energi bebas Gibbs (ΔG_0) mengindikasikan bahwa reaksi berlangsung secara endoterm dan membutuhkan energi. Energi tersebut diperoleh dari sinar matahari (Johnson, 2016).

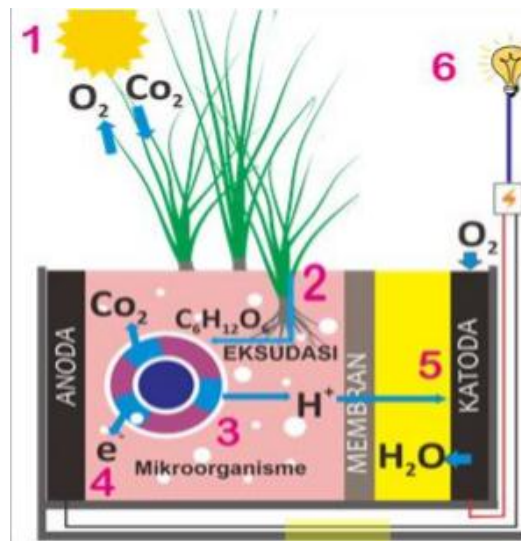


Tanaman akan menghasilkan bahan organik dari sinar matahari dan karbon dioksida (CO_2) melalui fotosintesis, sekitar 70% bahan organik ini berakhir ditanah sebagai bahan humus, akar mati, lysates, lendir dan eksudat. Bahan organik ini bisa dioksidasi oleh bakteri yg hidup disekitar akar, melepaskan karbon dioksida (CO_2), proton dan elektron. Elektron yang didapatkan oleh bakteri ke anoda berasal dari sebuah sistem MFC. Anoda digabungkan melalui beban eksternal ke katoda. Proton yang ditransfer dari anoda menuju katoda melewati membran.

Proses perpindahan elektron reaksi dasar akan terjadi pada anoda, kompartemen anoda terisolasi berupa ruang lingkup anaerob. Karbohidrat berperan penting dalam memberikan bahan bakar untuk metabolisme mikroorganisme. Kompartemen anoda sebagai tempat mikroba melakukan fermentasi akan melepaskan proton dan elektron.

Proton dikirim melalui membran penukar proton/kation dan selanjutnya berdifusi ke katoda, sedangkan elektron dikirim ke katoda melalui elektroda. Elektron negatif yang bergerak secara eksternal dari anoda ke katoda mengalami proses reduksi di katoda dan bercampur dengan partikel hidrogen untuk membentuk H_2O di kompartemen katoda, yang merupakan lingkungan aerob. *Proton elektrolyte*

membrane (PEM) adalah pemisah dua kompartemen anoda dan katoda, bertindak sebagai membran pembatas yang hanya memungkinkan ion positif (proton) dalam bentuk ion hidrogen melewati PEM dari anoda ke katoda, yang kemudian bercampur dengan elektron dan O_2 untuk menghasilkan air atau hidrogen murni (H_2O) (Kadhafi, 2020). Proses dasar PMFC dapat dilihat pada **Gambar 2.2**



Gambar 2.2 Ilustrasi Proses Dasar PMFC (Helder dkk., 2013)

Proses yang pertama yaitu proses fotosintesis pada tanaman yang menghasilkan cadangan makanan berupa bahan organik seperti gula, asetat dll. Kedua, sebagian bahan organik terbuang (eksudasi) diarea perakaran tanaman, dan akar mati (*lysate*) juga menambah jumlah bahan organik di *rhizosphere*. Ketiga, mikroorganisme mendegradasi bahan organik menghasilkan proton, elektron, dan karbondioksida. Keempat, elektron digunakan pada anoda yang tersambung kawat dan beban eksternal serta tersambung ke katoda. Kelima, proton melewati membran menuju katoda, bersama oksigen direduksi menjadi air. Dengan begitu listrik dapat diperoleh dengan perputaran elektron terus menerus.

2.5 Elektroda

Elektroda adalah konduktor yang dapat melakukan kontak dengan komponen atau media non-logam dalam suatu rangkaian, seperti semikonduktor, elektrolit, atau kondisi vakum. Elektroda pada sel elektrokimia disebut sebagai anoda atau katoda. Anoda adalah elektroda tempat elektron meninggalkan sel elektrokimia untuk mengalami oksidasi, sedangkan katoda adalah elektroda tempat elektron masuk ke sel elektrokimia untuk mengalami reduksi. Tergantung pada tegangan yang diterapkan pada sel elektrokimia, setiap elektroda dapat berupa anoda atau katoda. Elektroda anoda adalah elektroda bipolar yang berfungsi sebagai anoda dari sel elektrokimia. Elektroda bipolar merupakan elektroda yang memiliki fungsi sebagai anoda dari sebuah sel elektrokimia dan katoda pada bagian sel elektrokimia lainnya.

Pemilihan elektroda dapat dilihat berdasarkan deret volta. Deret volta diurutkan dari kiri ke kanan, semakin ke kanan potensial elektroda standar (E°), reduksi semakin besar sebagai oksidator kuat atau semakin mudah mengalami reduksi. Umumnya deret volta yang sering digunakan adalah Li, K, Ba, Ca, Na, Mg, Al, Mn, Zn, Cr, Fe, Cd, Ni, Sn, Pb, H, Sb, Bi, Cu, Hg, Ag, Pt, Au. Jika semakin ke kiri kedudukan suatu logam dalam deret volta maka logam akan semakin reaktif (semakin mudah melepas elektron) dan semakin mudah teroksidasi dengan nilai E° lebih negatif. Sebaliknya, jika semakin ke kanan kedudukan suatu logam maka logam semakin kurang reaktif (semakin sulit melepas elektron). Semakin ke kanan, logam akan semakin mudah tereduksi dengan nilai E° lebih positif. Deret volta terdapat lima unsur logam yang dikatakan sebagai unsur logam mulia yaitu

Cu, Hg, Ag, Pt, dan Au. Logam tersebut sulit sekali mengalami perkaratan sehingga banyak dimanfaatkan sebagai perhiasan dengan harga yang mahal.

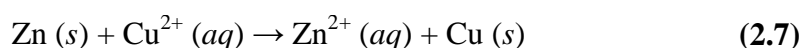
Pasangan elektroda yang sering digunakan pada sel elektrokimia yang memiliki kinerja serta keluaran energi listrik yang baik adalah logam Zn dan Cu (Susanto dkk., 2017). Pasangan pada logam Zn dan Cu akan mengalami reaksi reduksi dan oksidasi jika digunakan pada sel elektrokimia. Reaksi reduksi adalah reaksi yang terjadi penurunan bilangan oksidasi melalui pengkapan elektron. Reaksi reduksi akan terjadi pada elektroda Cu, reaksi reduksi dapat dilihat pada persamaan 2.5.



Sedangkan reaksi oksidasi adalah reaksi yang terjadi peningkatan bilangan oksidasi melalui pelepasan elektron. Reaksi oksidasi akan terjadi pada elektroda Zn, reaksi oksidasi dapat dilihat pada persamaan 2.6.



Diperoleh reaksi pada persamaan 2.5 dan 2.6 akan menjadi reaksi redoks, dengan reaksi dapat dilihat pada persamaan 2.7.



(Suyanta, 2013).

Selain dapat dilihat dari deret volta, penentuan elektroda juga dapat dilihat dari nilai potensialnya (Tabel 2.1). Jika elektroda yang nilai potensial standarnya lebih besar dari hidrogen maka akan mudah mengalami reduksi. Sedangkan jika elektroda yang nilai potensial standarnya lebih kecil dari hidrogen maka akan mengalami oksidasi.

Tabel 2. 1 Nilai potensial elektroda standar

Logam	E⁰(V)
Li	-3,04
K	-2,92
Ba	-2,90
Ca	-2,87
Na	-2,71
Mg	-2,37
Al	-1,66
Mn	-1,18
Zn	-0,76
Cr	-0,74
Fe	-0,44
Cd	-0,40
Ni	-0,28
Sn	-0,14
Pb	-0,13
H	0,00
Sn	+0,13
Bi	+0,30
Cu	+0,34
Hg	+0,79
Ag	+0,80
Pt	+1,20
Au	+1,52

2.6 Korosi

Korosi adalah tantangan teknologi yang disebabkan oleh lingkungan alam, yang ditandai dengan perubahan energi dan mengakibatkan kerugian material sebagai bahan bangunan. Medium yang cenderung berinteraksi dengan suatu benda dalam hal pertukaran energi adalah lingkungan alam benda tersebut. Energi ini diperoleh dari *internal energy* yaitu energi yang tersimpan akibat zat kimia yang menyusun benda tersebut. Pertukaran energi akan terjadi antara *internal energy* dengan energi yang tersedia disekeliling benda yang lazim disebut *free energy* atau *eksternal energy* (Supomo, 2003).

Korosi juga dapat diartikan sebagai degradasi dari sifat suatu material atau hilangnya massa dari waktu ke waktu sebagai akibat dari dampak lingkungan. Komposisi unsur material cenderung kembali menjadi kesetimbangan menurut aturan termodinamika, yang merupakan sifat alami material (Schweitzer, 2004).

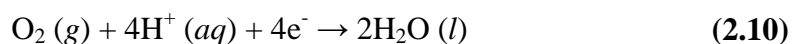
Mekanisme korosi tidak lepas dari reaksi elektrokimia. Elektrokimia merupakan ilmu kimia yang mempelajari tentang perpindahan elektron yang terjadi pada sebuah media pengantar listrik yang disebut elektroda. Konsep elektrokimia didasari oleh reaksi reduksi-oksidasi (redoks) dan larutan elektrolit (Harahap, 2016). Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi oksidasi. Reaksi oksidasi pada logam dapat dilihat pada persamaan 2.8.



Proses korosi dari logam M adalah proses oksidasi logam menjadi satu ion (n^{+}) dalam pelepasan elektron. Nilai n bergantung dari sifat logam yang digunakan, sebagai contoh jika terdapat batang besi mengalami kontak dengan air maka besi akan menjadi anoda dan air/oksigen di sekitar besi akan menjadi katoda. Besi akan terjadi reaksi oksidasi pada anoda, reaksi dapat dilihat pada persamaan 2.9.

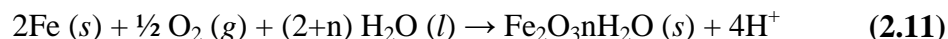


Bila atom besi kehilangan elektron maka akan terjadi kerusakan pada besi. Elektron cenderung berpindah ke daerah yang banyak oksigennya atau berpindah ke katoda dan akan terjadi reduksi, seperti pada persamaan 2.10.



Kemudian, ion Fe^{2+} akan terdispersi dalam tetesan air dan bereaksi lebih lanjut dengan O_2 dan H_2O dan akan membentuk karat besi, sesuai dengan reaksi redoks pada persamaan 2.11.

Reaksi redoks:



(Supomo, 2003).

Metode kehilangan bobot atau massa merupakan metode yang digunakan untuk menghitung laju korosi. Untuk menghitung jumlah kehilangan massa akibat korosi digunakan rumus seperti pada persamaan 2.12.

$$\Delta m = m_0 - m_1 \quad (2.12)$$

dengan Δm adalah selisih massa (mg), m_0 massa sebelum diuji (mg), dan m_1 massa sesudah diuji (mg).

Persamaan 2.12 dapat digunakan untuk menghitung laju korosi dengan data penurunan massa. Rumus laju korosi dapat dilihat seperti persamaan 2.13.

$$CR = \frac{\Delta m \times K}{\rho \times A \times t} \quad (2.13)$$

dengan CR adalah *Corrosion Rate* atau laju korosi (mmpy), Δm selisih massa (mg), K konstanta Faktor ($87,6 \times 10^4$), ρ massa jenis (mg/mm^3), A luas Permukaan (mm^2), dan t Waktu (y).

Dengan nilai konstanta perhitungan laju korosi dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Konstanta perhitungan laju korosi berdasarkan satuannya

<i>Mils per year (mpy)</i>	$3,45 \times 10^6$
<i>Inches per year (ipy)</i>	$3,45 \times 10^3$
<i>Milimeters per year (mm/y)</i>	$8,76 \times 10^4$
<i>Micrometers per year ($\mu\text{m}/\text{y}$)</i>	$8,76 \times 10^7$

(Chodijah, 2008).

2.7 Aspek Utama Pada PMFC

PMFC memiliki beberapa komponen dan karakteristik unik yang berbeda dari MFC seperti matriks pendukung dan pengayaan substrat, tanaman hidup, konversi substrat dan mekanisme transfer elektron, yang dianggap sebagai aspek terpenting PMFC (Kabutey dkk., 2019).

2.7.1 Matriks Pendukung

Komponen utama yaitu matriks pendukung yang digunakan operasi PMFC dipertimbangkan selama desain dan operasi karena mempengaruhi resistansi internal dengan mengganggu migrasi proton (H^+) antara elektroda dan difusi eksudat akar ke anoda (Takanezawa dkk., 2010). Matriks pendukung yang digunakan pada operasi PMFC meliputi tanah tergenang, sawah, lahan basah atau tanah kebun, sedimen, vermikulit, butiran grafit di mana anoda dan tanaman hidup terkubur. Kinerja PMFC dipengaruhi oleh produksi dan ketersediaan rhizodeposit, proliferasi spesies mikroba rhizobia, media pertumbuhan, laju oksidasi substrat, transfer elektron dan proton ke elektroda, kondisi operasi, konfigurasi reaktor, reduksi oksigen di katoda dan seterusnya. Selain itu, untuk meningkatkan kepadatan arus dan daya PMFC, ada tiga faktor lain yang harus direkayasa, yaitu laju fotosintesis, jumlah rhizodeposisi, dan pemulihan energi (Strik dkk., 2011). Faktor utama yang mempengaruhi jumlah rhizodeposisi dan pemulihan energi di PMFC adalah media pertumbuhan karena mempengaruhi perilaku tanaman dan mikroba.

2.7.2 Tanaman Hidup

Tumbuhan mampu menghilangkan logam berat dari ekosistem yang tercemar. PMFC terdapat tiga kelompok tanaman yaitu vaskular, makrofit (hidrofit), dan rumput lahan basah atau berawa. Tanaman lahan basah biasanya digunakan untuk pembuatan biokatoda karena tahan air dan memiliki jaringan aerenkim yang memungkinkan O_2 dari atmosfer masuk ke akar dengan mudah (Kothapalli, 2013). Kriteria pemilihan tanaman meliputi laju pertumbuhan, komunitas mikroba pada rizofe, keluasan sistem perakaran, kemampuan bioakumulasi, daya adaptasi, dan rhizodeposisi. Tanaman yang digunakan untuk PMFC berperan untuk mengubah energi surya menjadi energi bersih tanpa perlu panen tanaman (Regmi, 2017).

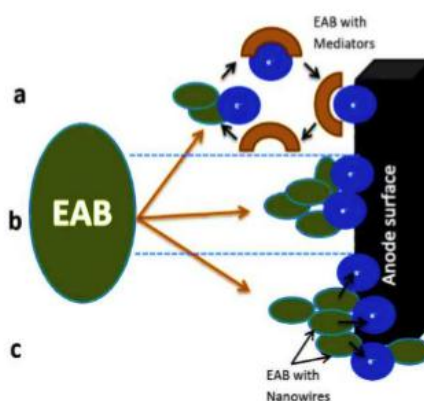
2.7.3 Konversi Substrat

Organic Matter (OM) pada matriks pendukung berfungsi sebagai substrat dan sumber energi untuk *electrochemically active bacteria* (EAB) selama operasi PMFC (Pandit & Das, 2016). Substrat mempengaruhi komunitas EAB di anoda, sehingga mempengaruhi kinerja sistem pada pembangkit listrik dan efisiensi coulombik. Tumbuhan menghasilkan makanannya sendiri, sebagian karbohidrat dan zat organik yang tidak digunakan atau disimpan pada akar sebagai rhizodeposit. Rizodeposit termasuk eksudat (gula, asam organik), sekresi (karbohidrat polimer dan enzim), lisat (bahan sel tumbuhan mati) serta gas etilen dan CO_2 (Strik dkk., 2008), yang dioksidasi oleh EAB dan mikroba akar lainnya untuk menghasilkan elektron (Pandit & Das, 2016). Reaksi lain yang terlibat termasuk oksidasi kimia dari reduktor yang dihasilkan secara mikroba (asam humat, besi(II) dan senyawa belerang), oksidasi mikroba dari belerang menjadi

sulfat (De Schampelaire dkk., 2008), oksidasi amonia menjadi nitrit/nitrat oleh bakteri pengoksidasi amonia (Deng dkk., 2012) konversi karbonat menjadi organik karbon oleh bakteri mandiri, dan hidrolisis karbohidrat menjadi asetat. Semua reaksi ini juga menghasilkan elektron yang ditransfer ke anoda untuk pembangkitan bioelektrik (Deng dkk., 2012).

2.7.4 Mekanisme Transfer Elektron

Dan yang terakhir adalah mekanisme transfer elektron. Proses transfer elektron dapat dilihat pada **Gambar 2.3**. Pada kondisi anaerobik, terjadi reaksi oksidasi oleh mikroba untuk pertumbuhan dan perkembangan dengan mengubah substrat menjadi CO_2 , proton, dan elektron yang dialirkan ke anoda. Elektron yang ditangkap oleh anoda kemudian dipindahkan ke katoda sehingga oksigen akan mereduksi menjadi air (Timmers dkk., 2012).



Gambar 2.3 Proses transfer elektron PMFC (Kabutey dkk., 2019)

Kinerja PMFC dipengaruhi oleh faktor-faktor yang dikaitkan dengan desain sistem atau lingkungan. Faktor-faktor yang berhubungan dengan perancangan sistem adalah jenis bioreaktor, jenis dan kesehatan tanaman, bahan elektroda, hambatan luar, *hydraulic retention time* (HRT), jenis elektroda dan bahan, jarak antar elektroda dan posisi elektroda. Faktor lingkungan meliputi fototropisme,

suhu, salinitas, pH, DO, komunitas mikroba dan kandungan OM pada matriks pendukung. Efek dari faktor-faktor ini berbeda dan tergantung pada lokasi pemasangan, misalnya, di lingkungan yang terkendali seperti rumah kaca, laboratorium atau di lapangan (Doherty dkk., 2015).

2.8 pH (*Power of Hydrogen*)

pH adalah derajat keasaman yang digunakan untuk menyatakan tingkat keasaman atau kebasaan yang dimiliki oleh suatu larutan (Karangan dkk., 2019). pH didefinisikan sebagai aktivitas ion hidrogen $[H^+]$ yang terlarut. Koefisien aktivitas ion hidrogen tidak dapat diukur secara eksperimental, sehingga nilainya didasarkan pada perhitungan teoretis. Skala pH bukanlah skala absolut. Namun bersifat relatif terhadap sekumpulan larutan standar yang pH-nya ditentukan berdasarkan persetujuan internasional.

Konsep pH pertama kali diperkenalkan oleh kimiawan Denmark Søren Peder Lauritz Sørensen pada 1909. Alat ukur keasaman pada air tersebut digunakan untuk mengukur kandungan atau kadar keasaman pada air mulai dari pH 0 sampai pH 14. Air bersifat netral jika pH 7,0. Larutan dengan pH kurang dari 7,0 disebut bersifat asam dan pH lebih dari tujuh bersifat basa atau alkali (Azmi dkk., 2016).

pH sangat menentukan pertumbuhan dan produksi tanaman, pH yang optimal bagi pertumbuhan kebanyakan adalah antara 5,6-6,0. Apabila pH lebih rendah dari 5,6 pada umumnya pertumbuhan tanaman menjadi terhambat akibat rendahnya ketersediaan unsur hara penting. Bila pH lebih rendah dari 4,0 dapat berdampak secara fisik yaitu merusak sistem perakaran, terutama akar-akar muda, sehingga pertumbuhan tanaman menjadi terhambat (Martinus dkk., 2019).

2.9 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. 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 (Gaurav dkk., 2020). Apabila kondisi lingkungan sesuai dengan kondisi optimum, eceng gondok dapat tumbuh dengan cepat hingga menjadi dua kali populasinya jangka waktu dua minggu.

Eceng gondok dapat diklasifikasikan sebagai berikut.

Kingdom	: <i>Plantae</i> (Tumbuhan)
Subkingdom	: <i>Tracheobionta</i> (Tumbuhan berpembuluh)
Super Divisi	: <i>Spermatophyta</i> (Menghasilkan biji)
Divisi	: <i>Magnoliophyta</i> (Tumbuhan berbunga)
Kelas	: <i>Liliopsida</i> (berkeping satu / monokotil)
Sub Kelas	: <i>Alismatidae</i>
Ordo	: <i>Alismatales</i>
Famili	: <i>Butomaceae</i>
Genus	: <i>Eichornia</i>
Spesies	: <i>Eichornia crassipes</i> (Mart.) Solms



Gambar 2.4 Eceng Gondok

Eceng gondok sangat mudah dijumpai dan umumnya sebagai tumbuhan pengganggu. Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) tumbuhan gulma di wilayah perairan yang hidup terapung pada air yang dalam. Baik secara vegetatif maupun generatif, eceng gondok berkembang biak dengan cepat. Selama 7-10 hari, perbanyakan vegetatif bisa berlipat ganda. Ketika tunas baru tumbuh dari ketiak daun, lalu membesar dan akhirnya menghasilkan tanaman baru, yang dikenal sebagai perkembangan vegetatif. Selama waktu 8 bulan, setiap sepuluh tanaman eceng gondok dapat menghasilkan 600.000 tanaman baru. Oleh karena itu, eceng gondok dimanfaatkan untuk mengolah air limbah. Eceng gondok dapat tumbuh dengan tinggi antara 40 dan 80 cm, dengan daun halus yang panjangnya 7 hingga 25 cm. Helaian daun, pelampung, leher daun, ligula, akar, akar rambut, ujung akar, dan stolon semuanya digunakan sebagai tempat perkembangbiakan vegetatif pada tumbuhan eceng gondok. Dengan perkembangan yang pesat, eceng gondok dianggap sebagai gulma yang dapat merusak ekosistem perairan (Renilaili, 2015).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 6 bulan dari November 2021 sampai dengan April 2022 di Laboratorium Elektronika Dasar Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Multimeter untuk mengukur tegangan, arus, dan hambatan.
2. Gunting untuk memotong elektroda.
3. Timbangan digital untuk menimbang massa elektroda dan eceng gondok.
4. pH meter untuk mengukur tingkat asam basa air.
5. Penggaris untuk mengukur elektroda dan jarak elektroda.
6. Laptop, untuk pembuatan laporan penelitian.

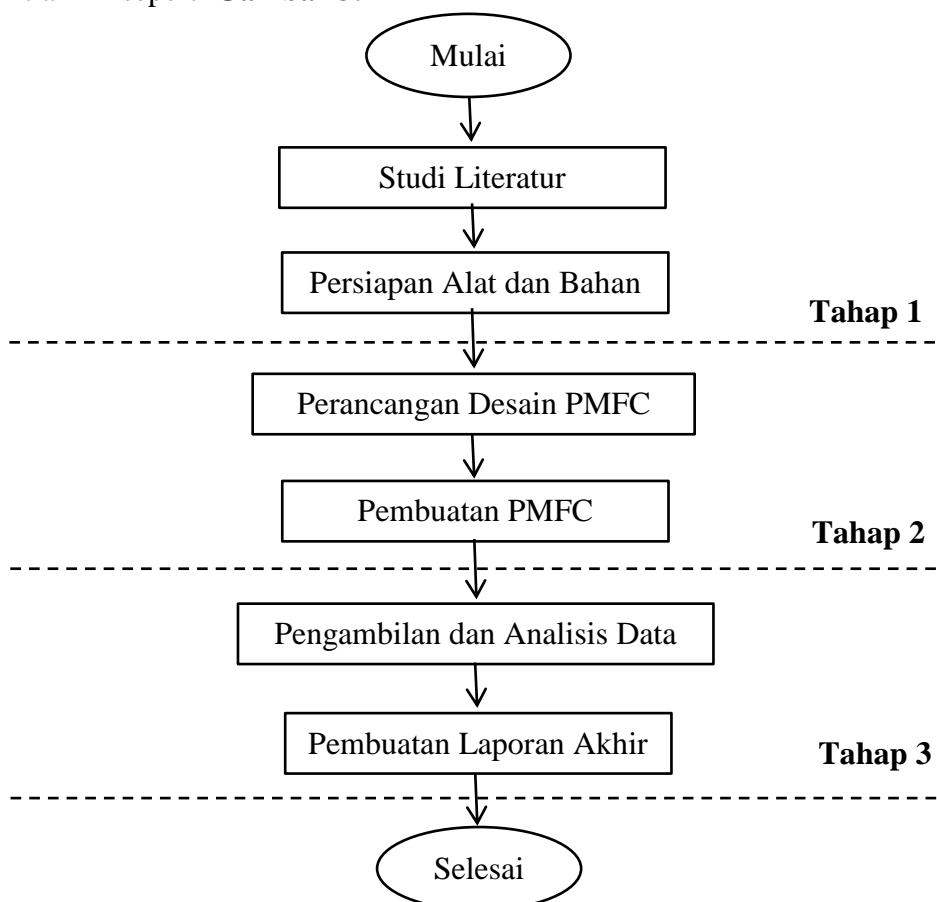
Dan bahan yang digunakan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Box plastik dengan ukuran 54 cm × 36,5 cm × 28,5 cm sebagai wadah komponen PMFC.
2. Plat Zn berukuran 0,2 mm × 200 mm × 300 mm sebanyak 1 buah sebagai anoda.

3. Plat Cu berukuran $0,2 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ sebanyak 1 buah sebagai katoda.
4. Kabel penghubung sebagai penghubung antar elektroda dan multimeter.
5. Air dengan kadar pH 6,8 sebagai media untuk tanaman tumbuh.
6. Sedimentasi sebagai pemberi nutrisi pada akar tanaman eceng gondok.
7. LED sebagai beban untuk menguji energi listik dari alat.
8. Resistor sebagai hambatan beban.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari persiapan penelitian, perancangan dan desain PMFC, dan pengambilan data dan pengujian PMFC. Secara umum prosedur penelitian ini seperti **Gambar 3.1**



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

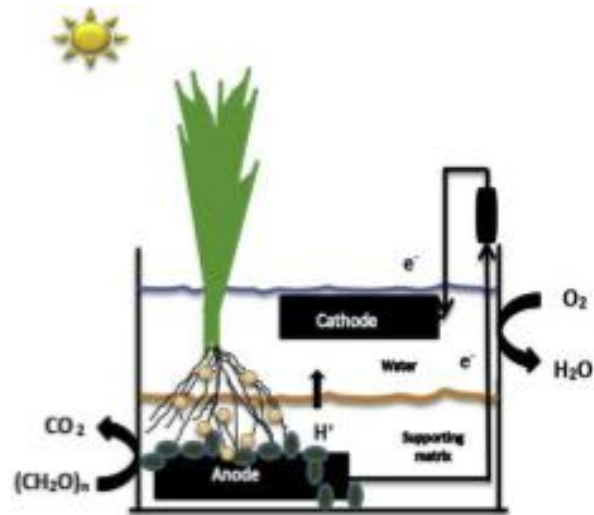
3.3.1 Tahap 1

Persiapan penelitian yang dilakukan adalah studi literatur serta persiapan tempat, alat dan bahan penelitian. Persiapan tempat dilakukan di Laboratorium Laboratorium Elektronika Dasar Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Sementara persiapan alat bahan meliputi pengumpulan alat bahan, seperti box volume 45 liter sebanyak 3 buah, serta pengukuran elektoda zn dan cu dengan ukuran $0,2 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ untuk masing-masing elektroda, dan sampel bahan yang digunakan penelitian ini meliputi tanaman eceng gondok dan lumpur yang berasal dari rawa di Banjar Negeri Natar Lampung Selatan. Terdapat 2 variabel penelitian yakni jumlah rumpun tanaman eceng gondok sebagai variabel bebas dan karakteristik elektrik yang dihasilkan sebagai variabel terikat.

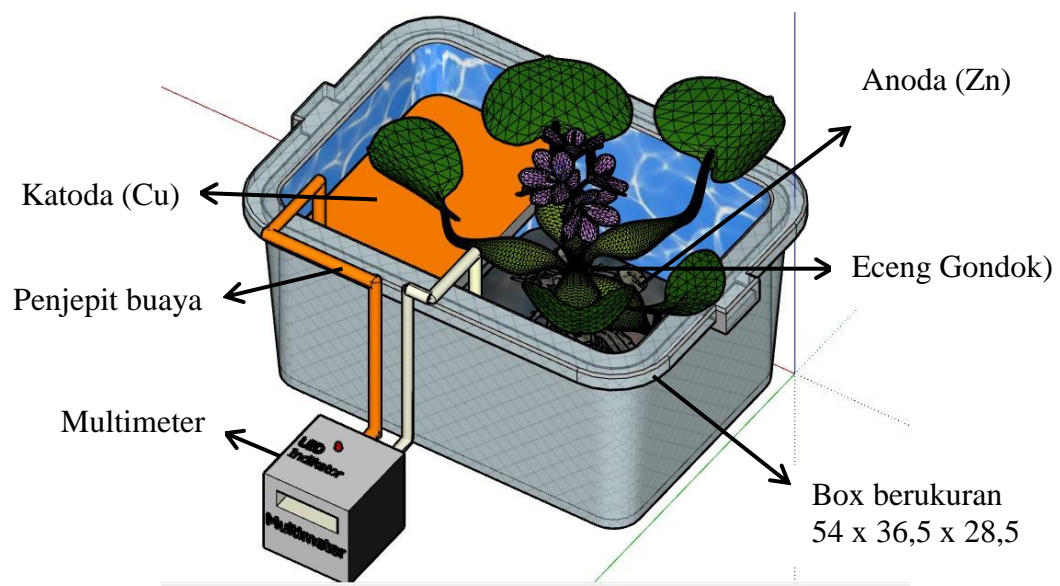
3.3.2 Tahap 2

Perancangan desain PMFC dilakukan dengan membuat sketchup model alat yang digunakan. Perancangan desain merujuk pada penelitian (Kabutey dkk., 2019) seperti **Gambar 3.2**. Elektroda yang digunakan pada penelitian ini berupa elektroda plat anoda dan katoda yang dimasukkan ke dalam sebuah box besar sebagai tempat untuk media pembuatan PMFC. Elektroda yang digunakan adalah elektroda plat Zn berukuran $0,2 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ sebagai anoda dan elektroda plat Cu berukuran $0,2 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ sebagai katoda. Anoda terletak pada dasar box yang ditutupi dengan sedimentasi dan letak katoda berada di atas permukaan air disisi yang berbeda dengan anoda. Anoda diletakkan di dasar box dan tertutup oleh sedimentasi agar mencegah oksigen masuk, sementara

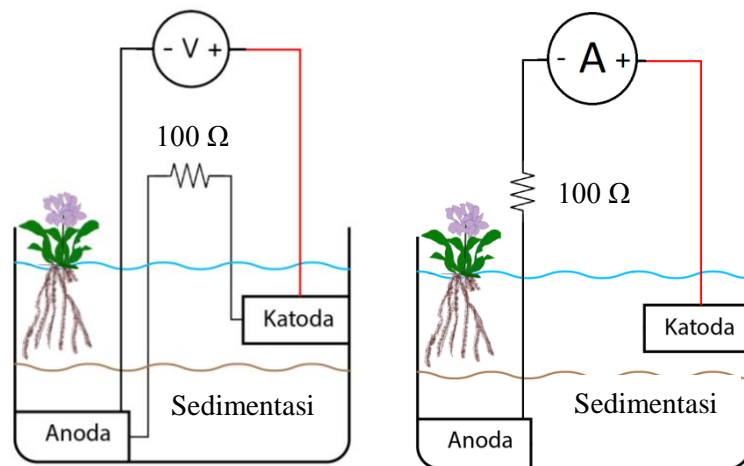
katoda di letakkan terbuka agar oksigen tetap masuk. Anoda dan katoda dihubungkan menggunakan penjepit buaya yang kemudian terhubung ke multimeter. Selanjutnya dipasang resistor sebagai beban luar. Desain PMFC pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3.3** dan desain metode pengukuran PMFC seperti pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3.2 Ilustrasi skema PMFC (Kabutey dkk., 2019)



Gambar 3.3 Desain PMFC



Gambar 3.4 Metode Pengukuran PMFC

Setelah membuat rancangan desain pada sketchup, selanjutnya realisasi PMFC sesuai desain. Setelah elektoda dan LED terhubung semua, kemudian memasukkan air, sedimentasi, dan eceng gondok dengan massa antara 250-300 gram. Jumlah rumpun eceng yang digunakan bervariasi yaitu berjumlah 1, 2, dan 3 dengan massa yang hampir sama. Eceng gondok diletakkan di atas sedimentasi sejajar dengan anoda. Setelah pembuatan PMFC selesai, selanjutnya dilakukan pengambilan data penelitian.

3.3.3 Tahap 3

Pengambilan data dilakukan selama 28 hari yang dibagi menjadi 2 minggu. Minggu pertama dilakukan pengambilan data untuk variasi eceng berjumlah 1, 2, 3 di luar ruangan. Minggu kedua dilakukan pengambilan data untuk variasi eceng berjumlah 1, 2, 3 di dalam ruangan. Langkah-langkah pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Menimbang massa elektroda sebelum dimasukkan ke dalam box.

- b. Meletakkan PMFC yang telah dibuat di luar ruangan dengan tempat yang telah ditutup dengan terpal bening sehingga air hujan tidak akan masuk ke dalam box PMFC.
- c. Mengambil data sesuai dengan jumlah eceng dengan jarak yang digunakan yaitu pada jarak 6 cm.
- d. Pengambilan data berupa tegangan beban dan arus dengan menggunakan multimeter serta pengambilan nilai pH yang diukur menggunakan pH meter. Pengambilan data dilakukan pada pukul 07.00 WIB, pukul 13.00 WIB, dan pukul 19.00 WIB.
- e. Mencatat nilai tegangan (V), arus (i), dan pH yang diperoleh dari hasil pengukuran.
- f. Melakukan langkah c-e dengan mengamati pada variasi jumlah eceng 1, 2 dan 3.
- g. Melakukan pengukuran selama 14 hari berturut-turut dengan langkah yang sama.
- h. Melakukan perhitungan untuk mencari nilai daya listrik (P) yang dihasilkan PMFC berdasarkan nilai tegangan dan arus yang telah diperoleh dengan menggunakan rumus:
$$P = V \times i \quad (3.1)$$
dengan i adalah arus (A), V tegangan (volt), dan P daya (watt).
- i. Melakukan pengambilan data pada minggu ketiga dengan meletakkan PMFC di dalam ruangan.
- j. Melakukan pengambilan data dengan mengikuti langkah pada poin b-g.
- k. Menimbang massa elektroda sesudah digunakan setiap 14 hari sekali.

3.4 Rancangan Data Hasil Penelitian

Data yang diperoleh penelitian ini yaitu nilai tegangan beban, arus listrik, dan pH yang diukur menggunakan multimeter dan pH meter. Pengambilan data dilakukan untuk semua variasi jumlah eceng dengan jarak yang telah ditentukan. Data diambil pada pukul 07.00 WIB, pukul 13.00 WIB, dan pukul 19.00 WIB. Rancangan data penelitian yang dapat diambil pada penelitian ini dapat dilihat seperti **Tabel 3.1** sampai dengan **Tabel 3.4**.

Tabel 3.1 Pengukuran karakteristik elektrik PMFC di luar ruangan

No	Hari ke-	Waktu (WIB)	V1 (V)	A1 (mA)	V2 (V)	A2 (mA)	V3 (V)	A3 (mA)
1	1	07.00						
		13.00						
		19.00						
2	2	07.00						
		13.00						
		19.00						
3	3	07.00						
		13.00						
		19.00						
...								
14								

Tabel 3.2 Pengukuran karakteristik elektrik PMFC di dalam ruangan

No	Hari ke-	Waktu (WIB)	V1 (V)	A1 (mA)	V2 (V)	A2 (mA)	V3 (V)	A3 (mA)
1	1	07.00						
		13.00						
		19.00						
2	2	07.00						
		13.00						
		19.00						
3	3	07.00						
		13.00						
		19.00						
...								
14								

Tabel 3.3 Pengukuran nilai pH air di luar ruangan

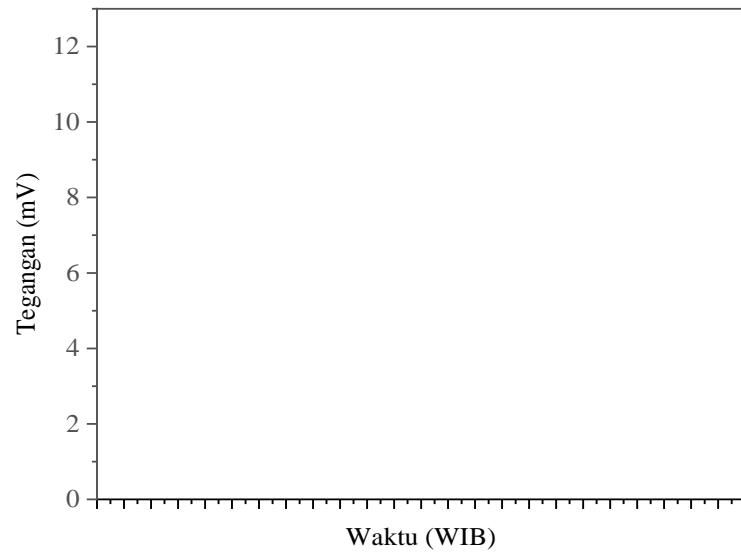
No	Hari ke-	Waktu (WIB)	Reaktor a	Reaktor b	Reaktor c
		07.00			
1	1	13.00			
		19.00			
		07.00			
2	2	13.00			
		19.00			
...					
14					

Tabel 3.4 Pengukuran nilai pH air di dalam ruangan

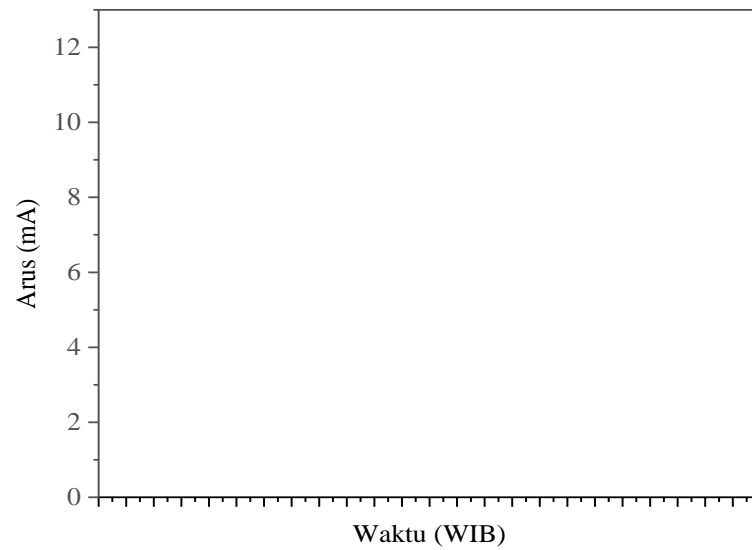
No	Hari ke-	Waktu (WIB)	Reaktor a	Reaktor b	Reaktor c
		07.00			
1	1	13.00			
		19.00			
		07.00			
2	2	13.00			
		19.00			
...					
14					

3.5 Rancangan Analisis Data Penelitian

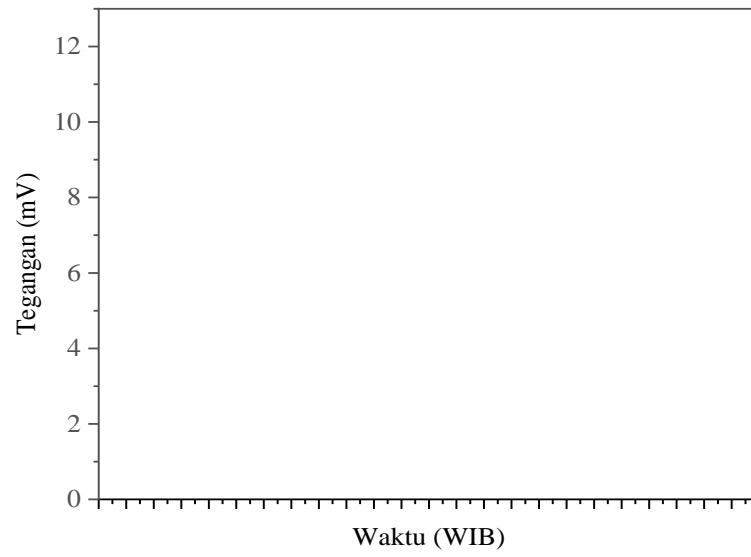
Berdasarkan data hasil penelitian yang telah diperoleh, selanjutnya dilakukan analisis data pengaruh jumlah eceng gondok, cahaya matahari, dan pengaruh pH terhadap karakteristik elektrik PMFC yang telah dibuat. Analisis data yang telah didapat selanjutnya diplot ke sebuah grafik seperti pada **Gambar 3.5** sampai dengan **Gambar 3.10**.



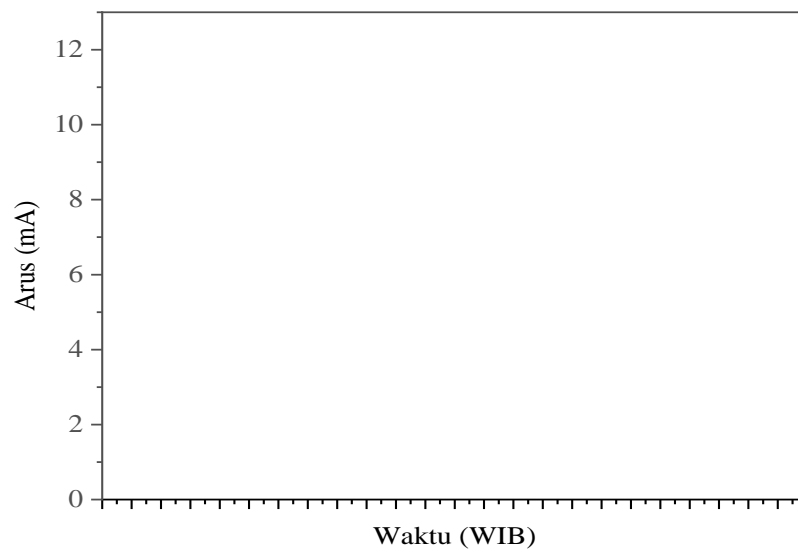
Gambar 3.5 Grafik karakteristik antara tegangan dan waktu pada PMFC di luar ruangan



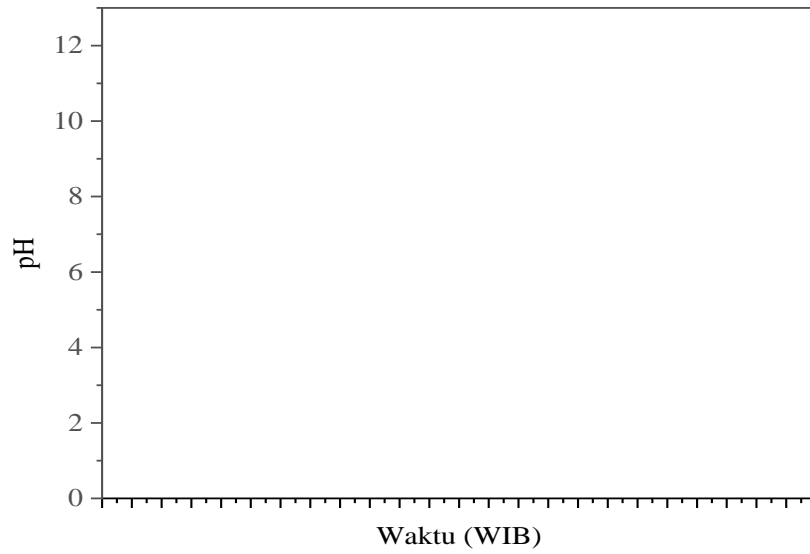
Gambar 3.6 Grafik karakteristik antara arus terhadap waktu pada PMFC di luar ruangan



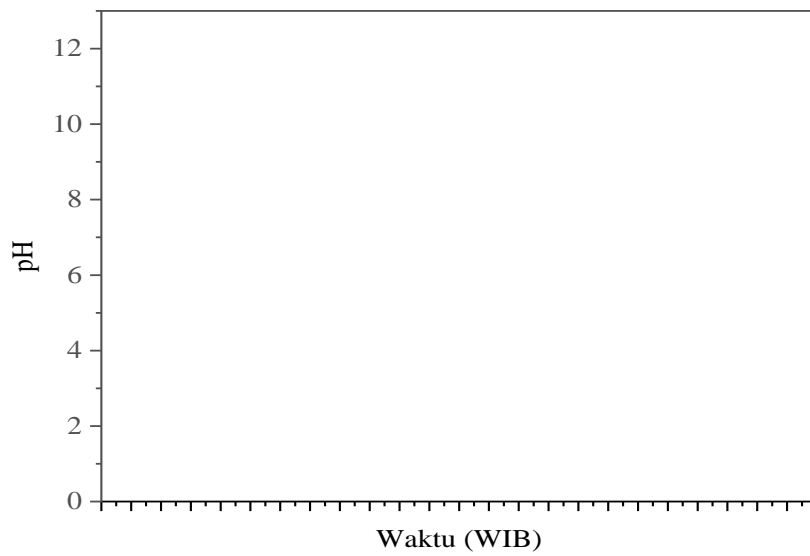
Gambar 3.7 Grafik karakteristik antara tegangan dan waktu pada PMFC di dalam ruangan



Gambar 3.8 Grafik karakteristik antara arus terhadap waktu pada PMFC di dalam ruangan



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



Gambar 3.10 Grafik karakteristik antara pH air terhadap waktu pada PMFC di dalam ruangan

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. PMFC dengan eceng gondok mampu digunakan untuk menghasilkan energi listrik, dengan daya listrik tertinggi 6,31 mW dikondisi luar ruangan terkena cahaya matahari.
2. Karakteristik PMFC dengan variasi jumlah eceng gondok menghasilkan tegangan dan arus tertinggi pada reaktor c yang berisi eceng gondok lebih banyak dengan tegangan sebesar 0,79 V dan arus sebesar 7,99 mA.
3. PMFC yang diletakkan di luar ruangan menghasilkan tegangan dan arus yang lebih tinggi dibandingkan di dalam ruangan.
4. Laju korosi tertinggi pada plat Cu sebesar $4,07 \times 10^4$ mm/y dikondisi PMFC luar ruangan.

5.2 Saran

Saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. PMFC sebaiknya menggunakan elektroda dengan nilai potensial yang lebih besar
2. PMFC sebaiknya mengaplikasikan untuk menhidupkan lampu belajar, bohlam, dan lainnya.

3. Pembuatan desain reaktor berikut elektroda dapat dikaji lebih lanjut untuk menghasilkan energi listrik yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Azmi, Z., Saniman, & Ishak. (2016). Sistem Penghitung pH Air Pada Tambak Ikan Berbasis Mikrokontroller. *Jurnal ilmiah saitikom*, 15(2), 101–108.
- Campbell, N. A., J. B. Reece., & L. G. Mitchell. (2003). *Biologi*. Jakarta: Erlangga.
- Chiranjeevi, P., Yeruva, D. K., Kumar, A. K., Mohan, S. V., & Varjani, S. (2018). Plant-microbial fuel cell technology. In *Microbial Electrochemical Technology* (hal. 549–564). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00022-4>
- Chodijah, Siti.(2008). *Efektivitas penggunaan pelapisan epoxy dalam ketahanan korosi pipa baja ASTM A53*. Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Jakarta.
- De Schampelaire, L., Rabaey, K., Boeckx, P., Boon, N., & Verstraete, W. (2008, November). Outlook for benefits of sediment microbial fuel cells with two bio-electrodes. *Microbial Biotechnology*, 1(6), 446–462. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2008.00042.x>
- Demirbas, A. (2007). Biodiesel from sunflower oil in supercritical methanol with calcium oxide. *Energy Conversion and Management*, 48(3), 937–941. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.08.004>
- Deng, H., Chen, Z., & Zhao, F. (2012). Energy from plants and microorganisms: Progress in plant-microbial fuel cells. *ChemSusChem*, 5(6), 1006–1011. <https://doi.org/10.1002/cssc.201100257>
- Doherty, L., Zhao, Y., Zhao, X., Hu, Y., Hao, X., Xu, L., & Liu, R. (2015, November 5). A review of a recently emerged technology: Constructed wetland - Microbial fuel cells. *Water Research*, 85, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.016>
- Fitrialdi. (2011). *Microbial Fuel Cell sebagai Energi Alternatif Menggunakan Bakteri Escherichia coli*. Universitas Andalas.

- Gaurav, G. K., Mehmood, T., Cheng, L., Klemes, J. J., & Shrivastava, D. K. (2020). Water hyacinth as a biomass: A review. *Journal of Cleaner Production*, 277, 122214. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122214>
- Gowtham, R., & Sundar, K. U. S. (2015). Generating Current From Plants Plant-e Technology. *International Journal of recent Advances in Engineering & Technology (IJRAET)*, 3(10), 1–4.
- Harahap, M. R. (2016). Sel Elektrokimia: Karakteristik dan Aplikasi. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 2(1). <https://doi.org/10.22373/crc.v2i1.764>
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Raes, S. M. T., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2013). Resilience of roof-top Plant-Microbial Fuel Cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, 51(0), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.011>
- Hendratta, S. (2001). Fuel Cell Sebagai Penghasil Energi Abad 21. *Jurnal Teknik Mesin*, 3(2), 92–100. <https://doi.org/10.9744/jtm.3.2.pp.92-100>
- Hendrawan, A. M. (2020). *Pengaruh Jenis Elektroda, Jarak Anoda-Katoda, Dan Waktu Pertumbuhan Tanaman Eceng Gondok (Eichhornia crassipes) Pada Teknologi Plant Microbial Fuel Cell (P-MFC)*. Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pertamina, Jakarta.
- Horri, B. A., Selomulya, C., & Wang, H. (2012). Characteristics of Ni/YSZ ceramic anode prepared using carbon microspheres as a pore former. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(20), 15311–15319. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.108>
- Ibrahim, B., Suptijah, P., & Adjani, Z. N. (2017). Kinerja Microbial Fuel Cell Penghasil Biolistrik Dengan Perbedaan Jenis Elektroda Pada Limbah Cair Industri Perikanan. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 20(2), 296.
- Internasional Energi Agency (IEA). (2021). *World Energy Outlook 2020*. Retrieved from Internasional Energi Agency (IEA): <https://www.iea.org>.
- Iwona, G., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2020). Microbial Fuel Cell stack performance enhancement through carbon veil anode modification with activated carbon powder. *Applied Energy*, 262, 114475. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114475>
- Johnson, M. P. (2016). Photosynthesis. *Essays in Biochemistry*, 60(3), 255–273. <https://doi.org/10.1042/EBC20160016>

- 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, 110*, 402–414. <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*. Jurusan Fisika, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar, Makassar.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM). (2021). *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*. Retrieved from Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi. <https://migas.esdm.go.id/>
- Karangan, J., Sugeng, B., & Sulardi, S. (2019). Uji Keasaman Air Dengan Alat Sensor pH Di STT Migas Balikpapan. *Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil, 2*(1), 65. <https://doi.org/10.31602/jk.v2i1.2065>
- Kothapalli, A. (2013). *Sediment Microbial Fuel Cell as Sustainable Power Resource*. University of Wisconsin, Milwaukee.
- Kurniawati, A. D., Zaman, B., & Purwono. (2017). Pemanfaatan Sistem Microbial Fuel Cell (MFC) Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif Pada Pengolahan COD. *Jurnal Teknik Lingkungan, 6*(2), 1–10.
- Liu, Q. M., Yang, X. M., Zhang, L., & Majetich, G. (2010). Optimization of ultrasonic-assisted extraction of chlorogenic acid from *Folium eucommiae* and evaluation of its antioxidant activity. *Journal of Medicinal Plants Research, 4*(23), 2503–2511.
- Lu, L., Xing, D., & Ren, Z. J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource Technology, 195*, 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.098>
- Mahadevan, A., Gunawardena, D. A., & Fernando, S. (2014). Biochemical and Electrochemical Perspectives of the Anode of a Microbial Fuel Cell. In *Technology and Application of Microbial Fuel Cells*. InTech. <https://doi.org/10.5772/58755>
- Martinus, A., Setyawan, D., & Windusari, Y. (2019). Dampak Mounding Terhadap Kualitas Air pada Tanah Sulfat Masam di Lokasi Areal Hutan Tanaman Industri Kabupaten Ogan Komering Ilir. *Seminar Nasional Hari Air Sedunia, 2*(1), 45–51.

- Nio Song, A. (2012). Evolusi Fotosintesis pada Tumbuhan. *Jurnal Ilmiah Sains*, 12(1), 28. <https://doi.org/10.35799/jis.12.1.2012.398>
- Novelendah, L., Senoaji, M. H., Sinurat, F., Hadi, A. M., & Istirokhatun, T. (2018). Potensi Listrik dan Degradasi Fosfat Berteknologi Plant Microbial Fuel Cell Dengan Media Tanaman Eceng Gondok. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, 1–6.
- Nuriskasari Isnanda, D. (2021). Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Air Gambut Menggunakan Logam Bekas Sebagai Elektroda. *Jurnal Austenit*, 13(1), 32–42. <https://doi.org/http://doi.org/10.5281/zenodo.4735749>
- Pandit, S., & Das, D. (2016). Role of Microalgae in Microbial Fuel Cell. In *Algal Biorefinery: An Integrated Approach* (hal. 375–399). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22813-6_17
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533–1543. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>
- Pertamina Energy Institute. (2020). *Pertamina Energy Outlook 2020*. Jakarta. Pertamina Energy Institute.
- Pauzi, G. A., Pratiwi, N. A., Surtono, A., & Suciwati, S. W. (2022). Analisis Pengaruh Variasi PH Larutan Acid Zinc Pada Sel Volta Dua Kompartemen dengan Elektrode Cu(Ag)-Zn. *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*, 3(1). <https://doi.org/10.23960/jemit.v3i1.88>
- Purwono, P., Hermawan, H., & Hadiyanto, H. (2015). Penggunaan Teknologi Reaktor Microbial Fuel Cells (MFCs) Dalam Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Untuk Menghasilkan Energi Listrik. *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 12(2), 57. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v12i2.57-65>
- Regmi, R. (2017). *Examining Different Classes of Plants Under Various Operating Conditions for Bioelectricity Production in Plant Microbial Fuel Cell*. Engineering And Technology, Thammasat University, Bangkok.
- Renilaili. (2015). Enceng Gondok sebagai Biogas yang Ramah Lingkungan. *Jurnal Ilmiah TEKNO*, 12(12), 1–10.
- Republik Indonesia. (2017). *Peraturan Presiden No 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional*. Jakarta: Sekretariat Negara Republik Indonesia.

- Shukla, A. K., Suresh, P., Berchmans, S., & Rajendran, A. (2004). Biological fuel cells and their applications. *Current Science*, 87(4), 455–468.
- 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*, 101, 60–81. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.044>
- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. N. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870–876. <https://doi.org/10.1002/er.1397>
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J. J., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2011). Microbial solar cells: Applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1), 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2010.10.001>
- Supomo, Heri. (2003). *Buku Ajar Korosi*. Jurusan Teknik Perkapalan, ITS, Surabaya.
- Susanto, A., Baskoro, M. S., Wisudo, S. H., Riyanto, M., & Purwangka, F. (2017). Performance of Zn-Cu and Al-Cu electrodes in seawater battery at different distance and surface area. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7(1), 298–303. <https://doi.org/10.1234/ijrer.v7i1.5506.g7018>
- Susanty, F. H. (2014). *Evaluasi Program ECO Campus Berbasis Nilai Kumulatif Konsentrasi Karbon Dioksida Udaea Ambien (Net_CO2_Con)*. Departemen Teknik Lingkungan, ITS, Surabaya.
- Suyanta. (2013). *Buku Ajar Kimia Unsur*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Takanezawa, K., Nishio, K., Kato, S., Hashimoto, K., & Watanabe, K. (2010). Factors affecting electric output from rice-paddy microbial fuel cells. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 74(6), 1271–1273. <https://doi.org/10.1271/bbb.90852>
- Timmers, R. A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schloter, M., Hartmann, A., Hamelers, B., & Buisman, C. (2012). Microbial community structure elucidates performance of glyceria maxima plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94(2), 537–548. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3894-6>

- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86(3), 973–981. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2440-7>
- Usman, M. A., Hasbi, M., & Sudia, B. (2017). Studi Eksperimen Penggunaan Air Garam Sebagai Sumber Energi Alternatif. *Enthalpy-Jurnal Mahasiswa Teknik Mesin-Jurnal Mahasiswa Teknik Mesin*, 2(2), 1–6.
- Venkata Mohan, S., Mohanakrishna, G., & Chiranjeevi, P. (2011). Sustainable power generation from floating macrophytes based ecological microenvironment through embedded fuel cells along with simultaneous wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 102(14), 7036–7042. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.033>
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C., & Strik, D. (2015). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass and Bioenergy*, 83, 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.006>
- Wieckowski, A., & Norskov, J. K. (2010). *Fuel Cell Science: Theory, Fundamentals, and Biocatalysis* (John Wiley and Sons (ed.)). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470630693>
- Wilberforce, T., El-hassan, Z., Khatib, F. N., Al, A., Baroutaji, A., Carton, J. G., & Olabi, A. G. (2017). ScienceDirect Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), 25695–25734. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.054>
- Zahara, F., & Fuadiyah, S. (2021). Pengaruh Cahaya Matahari Terhadap Proses Fotosintesis. *Prosiding Seminar Nasional Biotik*, 1, 1–4.