

**PRODUKSI ENERGI LISTRIK DAN BIOETANOL DARI
ALGA MERAH (*Gracilaria verrucosa*) DAN MOLASE
MENGUNAKAN *SACCHAROMYCES CEREVISIAE*
BERBASIS TEKNOLOGI SEL BAHAN BAKAR MIKROBA**

**PRODUCTION OF ELECTRICAL ENERGY AND
BIOETHANOL FROM RED ALGAE (*Gracilaria verrucosa*)
AND MOLASSES USING *SACCHAROMYCES CEREVISIAE*
BASED ON MICROBIAL FUEL CELL TECHNOLOGY**

AISYAH RUSDIN

H012201004



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

**PRODUKSI ENERGI LISTRIK DAN BIOETANOL DARI
ALGA MERAH (*Gracilaria verrucosa*) DAN MOLASE
MENGUNAKAN *SACCHAROMYCES CEREVISIAE*
BERBASIS TEKNOLOGI SEL BAHAN BAKAR MIKROBA**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Kimia

Disusun dan diajukan oleh :

AISYAH RUSDIN

Kepada

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

LEMBAR PENGESAHAN

**PRODUKSI ENERGI LISTRIK DAN BIOETANOL DARI
ALGA MERAH (*Gracilaria verrucosa*) DAN MOLASE MENGGUNAKAN
SACCHAROMYCES CEREVISIAE BERBASIS TEKNOLOGI SEL
BAHAN BAKAR MIKROBA**

Disusun dan diajukan oleh

AISYAH RUSDIN

H012201004

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin pada tanggal 19 Januari 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui:

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping

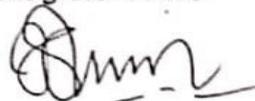

Prof. Ahyar Ahmad, Ph.D.

Nip.196712311991031020


Dr. Abdul Karim, M.Si

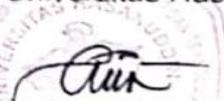
Nip.196207101988031002

Ketua Program Studi,
Magister Kimia


Dr. Hasnah Natsir, M.Si

Nip.196203201987112001

Dekan Fakultas MIPA
Universitas Hasanuddin


Dr. Eng. Amiruddin, M.Si

Nip.197205151997021002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Aisyah Rusdin
NIM : H012201004
Program Studi : Kimia
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

(Produksi Energi Listrik dan Bioetanol dari Alga Merah (*Gracilaria verrucosa*) dan Molase Menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* Berbasis Teknologi Sel Bahan Bakar Mikroba)

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa Tesis yang saya tulis ini benar benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 24 Januari 2022

Yang menyatakan



(Aisyah Rusdin)

Prakata

Bismillahirrahmanirrahim, segala puji dan syukur kehadirat Allah yang telah memberikan rahmat, hidayah dan kemudahan yang selalu diberikan kepada hamba-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan judul **“Produksi Energi Listrik dan Bioetanol dari Alga Merah (*Gracilaria verrucosa*) dan Molase Menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* Berbasis Teknologi Sel Bahan Bakar Mikroba”** sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Sains. Shalawat dan salam kepada Nabi besar Muhammad S.A.W.

Kepada kedua orang tua tercinta, ayahanda **Rusdin**, dan ibunda **Hj. Indo Ulle** terima kasih untuk setiap semangat, bantuan, kasih sayang dan doa yang senantiasa tak henti-hentinya diberikan kepada saya, semoga Allah senantiasa meridhoi, melimpahkan rahmat-Nya berupa kasih sayang, keteguhan hati di atas agama Allah, dan kemuliaan bukan hanya di dunia tapi juga di akhirat Insya Allah. Terima kasih juga kepada kakak saya **Asrul** yang selalu memberikan motivasi untuk saya, serta menjadi penyemangat bagi saya, semoga Allah senantiasa melindungi dan diberikan jalan kebenaran, Aamiin.

Penulis menyadari bahwa banyak pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penulisan tesis ini. Untuk itu, iringan doa dan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada **Prof. Dr. Ahyar Ahmad, Ph. D** dan **Dr. Abdul Karim, M.Si** selaku dosen pembimbing yang dengan penuh kesabaran, ketelatenan dan keikhlasan

di tengah-tengah kesibukannya meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan serta pengarahan dalam menyelesaikan penelitian ini.

Penulis juga tak lupa mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. **Prof. Dr. Abd. Wahid Wahab, M.Sc, Dr. Seniwati Dali, M.Si, dan Prof. Dr. Paulina Taba, M.Phil**, selaku komisi penilai, terima kasih atas masukan berupa kritik dan saran yang telah diberikan demi penyempurnaan penulisan tesis.
2. **Dr. Hasnah Natsir, M.Si**, selaku ketua program studi ilmu kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin terima kasih atas motivasi dan bantuannya.
3. Dekan Fakultas MIPA, Ketua Jurusan Kimia FMIPA, dan seluruh dosen Kimia Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah membagi ilmunya serta seluruh staf Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.
4. Kepala Laboratorium dan seluruh Staff Laboratorium Biokimia, Laboratorium Science Building FMIPA Universitas Hasanuddin, Laboratorium Biokimia dan Instrumen UIN Alauddin Makassar, terima kasih atas segala bantuan fasilitas yang telah diberikan selama penelitian.
5. Pak **Irsan** selaku staff Program Studi S2 Kimia yang selalu membantu dan memberikan masukannya dalam penyelesaian administrasi.

6. Rekan partner penelitian biokimia **Siti Khairunnur, Mira Khairunnisa, Besse Illang Sari, Inal Iqbal**, dan **Jumardi**, terkhususnya tim panel penelitian **Ade Rahmawati idris** atas segala bantuan, dukungan, masukan, saran, doa dan semangatnya.
7. Teman-teman seperjuangan Pascasarjana Kimia angkatan **2020: Noer Khalifah Tuer-ridha, Nur Amaliyah Aslin, Syamdeni, Elva Sihaya, Eka Anggraeni Odja, Dwi Kurniawan** dan **Monas**, terima kasih atas bantuan dan semangatnya.
8. Saudara-saudaraku **Rahmah Harun** dan **Vivi Alfi Yunita**. Terima kasih atas bantuan dan doanya sampai pada tahap ini.
9. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis selama menyelesaikan penelitian, terima kasih.

Penulis sadar bahwa tesis ini tidak sempurna dan banyak kekurangan baik materi maupun teknik penulisannya, karena sejatinya kesempurnaan hanyalah milik Allah SWT. Oleh karena itu, penulis berharap saran dan kritikan yang bersifat membangun dari pembaca, dan semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi pembaca dalam pengembangan ilmu pengetahuan bidang biokimia terkhusus teknologi terbarukan untuk menghasilkan listrik yang ramah lingkungan

Terima kasih

Makassar, Januari 2022

Penulis

Aisyah Rusdin

ABSTRAK

AISYAH RUSDIN: Produksi Energi Listrik dan Bioetanol dari Alga Merah (*Gracilaria verrucosa*) dan Molase menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* Berbasis Teknologi Sel Bahan Bakar Mikroba (dibimbing oleh: Prof. Ahyar Ahmad dan Dr. Abdul Karim, M.Si)

Sel Bahan Bakar Mikroba (MFC) merupakan teknologi yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik dan bioetanol melalui proses metabolisme. Pada penelitian ini digunakan substrat selulosa dari *Gracilaria verrucosa* dan sukrosa dari molase. Tujuan penelitian ini yaitu menganalisis pengaruh perbedaan substrat dengan kombinasi larutan elektrolit terhadap arus, tegangan dan daya pada sistem MFC, menganalisis potensi dan kadar bioetanol hasil samping sistem MFC dari *Gracilaria verrucosa* dan molase. Metode penelitian ini menggunakan *double chamber* yang terdiri dari ruang anoda dan ruang katoda yang dihubungkan melalui *proton exchange membrane* (PEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai arus, tegangan maksimum dan *power density* (mW/cm^2) dengan substrat molase dengan kombinasi larutan elektrolit KMnO_4 0,2 M dan $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0,2 M sebesar 1,20 mA; 670 mV; 4096,81 mW/cm^2 ; 1,65 mA; 470 mV; 3951,59 mW/cm^2 lebih tinggi dibandingkan dengan substrat *gracilaria verrucosa* dengan kombinasi larutan elektrolit KMnO_4 0,2 M dan $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0,2 M sebesar 0,74 mA; 580 mV; 2187 mW/cm^2 ; 0,69 mA; 450 mV; 1582,16 mW/cm^2 . Kadar bioetanol yang diperoleh dengan hasil samping substrat *gracilaria verrucosa* dan molase masing-masing sebesar 28,44% dan 11,72%. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan memperlihatkan substrat molase menghasilkan listrik dan bioetanol lebih tinggi dibandingkan menggunakan substrat *Gracilaria verrucosa* dalam sistem MFC.

Kata kunci: Sel Bahan Bakar Mikroba (MFC), Energi Listrik, Bioetanol, Molase, *Gracilaria verrucosa*,

ABSTRACT

AISYAH RUSDIN: *Production of Electrical Energy and Bioethanol from Red Algae (*Gracilaria verrucosa*) and Molasses using *Saccharomyces cerevisiae* Based on Microbial Fuel Cell Technology.*

(supervised by: Prof. Ahyar Ahmad dan Dr. Abdul Karim, M.Si)

Microbial Fuel Cell (MFC) is a device that converts chemical energy to electrical energy and bioethanol through microbial metabolism. This research, cellulose from *Gracilaria verrucosa* and sucrose from molasses using as substrates. This research aimed to analyze the effect of different substrates with a combination of electrolyte solutions on current, voltage, and power in the MFC system, analyze the potential and bioethanol content of MFC system by-products from *Gracilaria verrucosa* and molasses. The method of this research uses a double chamber consisting of an anode, and a cathode chamber connected through a proton exchange membrane (PEM). This research showed that the values of current, maximum voltage, and power density (mW/cm^2) with molasses substrate with a combination of KMnO_4 0.2 M electrolyte solution and $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0.2 M respectively were 1.20 mA ; 670 mV; 4096.81 mW/cm^2 ;1.65 mA; 470 mV; 3951.59 mW/cm^2 higher than the substrate *gracilaria verrucosa* with a combination of KMnO_4 0.2 M electrolyte solution and $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0.2 M respectively 0.74 mA; 580 mV; 2187 mW/cm^2 ; 0.69 mA; 450 mV; 1582.16 mW/cm^2 . The levels of bioethanol obtained with the by-products of the substrate *Gracilaria verrucosa* and molasses were 28.44% and 11.72%, respectively. Based on the results of the research that has been carried out, it shows that molasses substrate produces higher electricity and bioethanol than using *Gracilaria verrucosa* substrate in the MFC system.

Keywords: Microbial Fuel Cell (MFC), Electrical Energy, Bioethanol, Molasses, Gracilaria verrucosa.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PRAKATA	iv
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	8
C. Tujuan Penelitian	8
D. Manfaat Penelitian	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
A. Sel Bahan Bakar Mikroba (MFC)	10
B. <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	14
C. Larutan Elektrolit	17
D. Analisis Bioetanol	19

E. Tinjauan Tentang Alga	21
F. Tinjauan Tentang <i>Gracilaria verrucosa</i>	23
G. Selulosa	25
H. Tebu (<i>Sacharum officinarum L.</i>)	26
I. Molase	27
J. Sukrosa	28
K. Kerangka Pikir	29
L. Hipotesis	30
BAB III METODE PENELITIAN	32
A. Waktu dan Tempat Penelitian	32
B. Alat dan Bahan	32
1. Alat	32
2. Bahan	33
C. Prosedur Kerja	33
1. Konstruksi MFC	33
2. Preparasi Membran Penukar Proton	34
3. Preparasi Elektroda Grafit	34
4. Pembuatan Larutan DNS dan Standar Glukosa	34
5. Pembuatan Larutan MB	35
6. Pembuatan Kurva Standar Glukosa	35
7. Preparasi Substrat <i>G. verrucosa</i>	35
8. Penentuan Kandungan ADF, NDF, Lignin, Selulosa dan Hemiselulosa pada <i>G. verrucosa</i>	36

a. Penentuan Kadar ADF	36
b. Penentuan Kadar NDF	36
c. Penentuan Kadar Selulosa dan Lignin	37
9. Hidrolisis Selulosa	37
10. Pengukuran Gula Reduksi Hasil Hidrolisis <i>G. verrucosa</i>	38
11. Eksperimen MFC	38
a. Pengaruh perbedaan substrat tanpa kombinasi larutan elektrolit	38
b. Pengaruh perbedaan substrat dengan kombinasi larutan elektrolit KMnO_4 0,2 M	39
c. Pengaruh perbedaan substrat dengan kombinasi larutan elektrolit $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0,2 M.	39
12. Pengukuran Kurva Pertumbuhan <i>S. cerevisiae</i>	40
13. Pengukuran Gula Reduksi Sampel MFC	40
14. Proses Destilasi	41
15. Pengolahan dan Analisis Data	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
A. Substrat <i>G. verrucosa</i> dan Molase dalam Sistem MFC	43
B. Kurva Pertumbuhan <i>S. Cerevisiae</i> dengan Substrat Molase dan <i>G. verrucosa</i>	47
C. Produksi Energi Listrik	52
1. Pengaruh Perbedaan Substrat terhadap Nilai Arus dan Tegangan dengan Kombinasi Larutan KMnO_4 0,2 M	52

2. Pengaruh Perbedaan Substrat Molase dan <i>G. verrucosa</i>	58
terhadap Nilai Arus dan Tegangan dengan Kombinasi	
Larutan Elektrolit $K_3Fe(CN)_6$ 0,2 M	
3. Densitas Daya	64
D. Produksi dan Analisis Bioetanol dari Hasil Samping	67
Sistem MFC	
BAB V. PENUTUP	70
A. Kesimpulan	70
B. Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	72
LAMPIRAN	97

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1. Pelaksanaan Percobaan Pengukuran Listrik	41
2. Kandungan ADF, NDF, Abu tak larut, Selulosa, Hemiselulosa dan Lignin pada <i>G. verrucosa</i>	44
3. Kadar Glukosa <i>G. verrucosa</i> Hasil Hidrolisis dan Molase Sebelum Hidrolisis	46
4. Data Indeks Bias dan Kadar Bioetanol Hasil Samping MFC	69

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
1. Ruang Ganda MFC	10
2. Kurva Pertumbuhan <i>S. cerevisiae</i>	15
3. Kurva Pertumbuhan <i>S. cerevisiae</i> dengan dan tanpa Mediator MB	16
4. <i>G. verrucosa</i>	23
5. Struktur Selulosa	25
6. Struktur Sukrosa	28
7. Kerangka Pikir Penelitian	30
8. Spektrum FTIR Selulosa Standard Serbuk <i>G. verrucosa</i>	44
9. Kurva Pertumbuhan <i>S.cerevisiae</i> menggunakan Substrat Molase dan <i>G. verrucosa</i> pada Panjang Gelombang 600 nm	49
10. Konsumsi Glukosa Fase Eksponensial dengan Substrat Molase dan <i>G. verrucosa</i> dengan Panjang Gelombang 540 nm.	51
11. Pengaruh Perbedaan Substrat Molase dan <i>G. verrucosa</i> terhadap Arus dengan Kombinasi Larutan Elektrolit KMnO_4 0,2 M.	53
12. Pengaruh Perbedaan Substrat Molase dan <i>G. verrucosa</i> terhadap Nilai Tegangan pada Larutan Elektrolit KMnO_4 0,2 M.	56
13. Pengaruh Perbedaan Substrat Molase dan <i>G.verrucosa</i> terhadap Arus dengan Kombinasi Larutan Elektrolit $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0,2 M.	59
14. Pengaruh Perbedaan Substrat Molase dan <i>G. verrucosa</i> terhadap Tegangan dengan Kombinasi Larutan Elektrolit $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0,2 M.	62
15. Perbandingan Densitas Daya (mW/cm^2) dengan Substrat Molase dan <i>G. verrucosa</i> dengan dan tanpa Kombinasi Larutan Elektrolit.	65

- | | |
|---|----|
| 16. Kromatogram GC-MS Hasil Sampung Sistem MFC Substrat Molase | 67 |
| 17. Kromatogram GC-MS Hasil Sampung Sistem MFC Substrat <i>G. verrucosa</i> | 68 |

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
1. Alur penelitian	97
2. Konstruksi MFC	98
3. Preparasi Membran Penukar Proton	98
4. Preparasi Elektroda Grafit	99
5. Pembuatan Larutan DNS	99
6. Pembuatan Larutan MB	99
7. Pembuatan Larutan Standar Glukosa	99
8. Pembuatan Kurva Standar Glukosa	100
9. Preparasi Substrat <i>G. verrucosa</i>	100
10. Penentuan Kandungan ADF, NDF, Lignin, Selulosa dan Hemiselulosa pada <i>G. verrucosa</i>	101
11. Hidrolisis Selulosa	103
12. Pengukuran Gula Reduksi Hasil Hidrolisis <i>G. verrucosa</i>	104
13. Eksperimen MFC	105
14. Pengukuran Kurva Pertumbuhan <i>S. cerevisiae</i>	108
15. Pengukuran Gula Reduksi Sampel MFC	108
16. Proses Destilasi	108
17. Pengolahan dan Analisis Data	109
18. Penentuan Kandungan ADF, NDF, Lignin, Selulosa dan Hemiselulosa pada <i>G. verrucosa</i>	109
19. Kurva Standar Glukosa pada λ 540 nm	112

20. Penentuan Kadar Glukosa pada Sampel MFC dari Molase pada λ 540 nm	113
21. Penentuan Kadar Glukosa pada Sampel MFC dari <i>G. verrucosa</i> pada λ 540 nm	115
22. Data Hasil Pengukuran Kurva Pertumbuhan dari <i>S. cerevisiae</i> dengan Substrat Molase pada λ 600 nm	117
23. Data Hasil Pengukuran Kurva Pertumbuhan dari <i>S. cerevisiae</i> dengan Substrat <i>G. verrucosa</i> pada λ 600 nm	118
24. Data Hasil Pengukuran Arus Substrat <i>G. verrucosa</i> dan Molase Tanpa Penambahan Elektrolit	119
25. Data Hasil Pengukuran Tegangan Substrat <i>G. verrucosa</i> dan Molase Tanpa Penambahan Elektrolit	120
26. Data Hasil Pengukuran Arus Substrat <i>G. verrucosa</i> dan Molase Kombinasi Larutan Elektrolit KMnO_4 0,2 M	121
27. Data Hasil Pengukuran Tegangan Substrat <i>G. verrucosa</i> dan Molase Kombinasi Larutan Elektrolit KMnO_4 0,2 M	122
28. Data Hasil Pengukuran Arus Substrat <i>G. verrucosa</i> dan Molase Kombinasi Larutan Elektrolit $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0,2 M	123
29. Data Hasil Pengukuran Tegangan Substrat <i>G. verrucosa</i> dan Molase Kombinasi Larutan Elektrolit $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0,2 M	124
30. Perhitungan Densitas Daya	125
31. Data Hasil Analisis Fermentasi 6 Hari Hasil Samping Sistem MFC <i>G. verrucosa</i> setelah Destilasi dengan Alat GC-MS	128
32. Data Hasil Analisis Fermentasi 6 Hari Hasil Samping Sistem MFC Molase setelah Destilasi dengan Alat GC-MS	129
33. Data Pengukuran Larutan Standar Bioetanol menggunakan Refraktometer	130

34. Data Perhitungan Konsentrasi Bioetanol (%) Hasil Samping Sistem MFC <i>G. verrucosa</i> dan Molase setelah Destilasi menggunakan Refraktometer	131
35. Dokumentasi	132

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
ATP	<i>Adenosin triphosphate</i>
ADF	<i>Acid Detergent Fiber</i>
NDF	<i>Neutral Detergent Fiber</i>
BOD	<i>Biological oxygen demand</i>
DNS	<i>Dinitro salicylic acid</i>
<i>G. verrucosa</i>	<i>Gracilaria verrucosa</i>
GC-MS	<i>Gas chromatography-mass spectrometry</i>
MB	Metilen biru
MFC	Sel Bahan Bakar Mikroba
NAD ⁺	Nikotinamida adenin dinukleotida
NADH	Nikotinamida adenin dinukleotida hidrogen
OD	<i>Optical density</i>
PEM	Membran Penukar Proton
pH	Derajat keasaman
<i>S. cerevisiae</i>	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
UV-Vis	<i>Ultraviolet-visible</i>

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Peningkatan jumlah dan aktivitas ekonomi penduduk untuk memenuhi kebutuhan hidupnya dapat menyebabkan peningkatan kebutuhan energi listrik (Rajagukguk dkk., 2015). Energi listrik termasuk salah satu kebutuhan yang esensial dalam kehidupan masyarakat (Hartono dkk., 2020; Owusu dan Sarkodie, 2016) pada sumber penerangan pada lampu (Kaminska dan Ozadowicz, 2018), sumber energi gerak pada kipas angin (Mahesh dkk., 2016) dan sumber energi panas sebagai pemanas air (Gadelkareem dkk., 2019). Namun, 80% sumber energi yang digunakan oleh masyarakat dan industri adalah energi konvensional (Handayani dan Ariyanti, 2012) seperti bahan bakar fosil (Kholiq, 2015; Bimanatya dan Widodo, 2018).

Bahan bakar fosil merupakan sumber energi yang berbasis karbon yang sifatnya tidak dapat diperbaharui seperti minyak bumi, batu bara dan gas alam (Bimanatya dan Widodo, 2018; Liu dkk., 2007). Penggunaan bahan bakar fosil secara terus-menerus tanpa adanya usaha untuk meregenerasi dapat memicu adanya krisis energi (Javed dkk., 2016; Parkash, 2016). Selain itu, penggunaan bahan bakar fosil yang berlebih dapat meningkatkan pemanasan global, polusi udara (Martins dkk., 2019)

dan menyebabkan efek rumah kaca dari emisi karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan (Perera, 2018). Oleh karena itu, sumber energi alternatif diperlukan agar energi yang digunakan tidak sepenuhnya berasal dari bahan bakar fosil. Menurut Slate dkk. (2019) dan Moradian dkk. (2021), salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah energi yang berasal dari bahan bakar hidrogen berbasis sel bahan bakar mikroba (MFC).

Sistem MFC merupakan teknologi terbaru yang memiliki keunggulan ramah lingkungan (Ginting dkk., 2019), dapat bekerja pada suhu lingkungan, dan pada kondisi pH yang netral atau sedikit asam (Balat, 2010). Sistem MFC memiliki kelebihan dibandingkan dengan sel bahan bakar. Hal ini disebabkan karena energi listrik yang dihasilkan dari MFC berasal dari degradasi sampah organik maupun biomassa dan menggunakan katalis mikroorganisme yang lebih murah dibandingkan dengan katalis sel bahan bakar yang berupa platina (Novalia, 2018). Teknologi MFC memiliki kemampuan untuk mengubah energi kimia menjadi energi listrik (Parkash, 2016; Kanani, 2017; Singh dan Dharmendra, 2020).

Sistem MFC akan mengoksidasi substrat berupa bahan organik di anoda yang akan menghasilkan CO_2 , proton (H^+) dan elektron. Elektron yang dihasilkan akan di transfer ke ruang katoda melalui sirkuit eksternal yang menghasilkan muatan eksternal listrik, sedangkan proton di transfer melalui membran penukar proton (PEM). Elektron dan proton akan bereaksi di dalam ruang katoda untuk mereduksi oksigen dan akan

menghasilkan listrik (Putra dkk., 2018; Utami dkk., 2019). Faktor yang dapat mempengaruhi kinerja dari sistem MFC adalah jenis mikroorganisme, substrat dan larutan elektrolit (Baharuddin dkk., 2020).

Mikroorganisme yang dapat digunakan dalam sistem MFC adalah bakteri seperti *Pseudomonas aeruginosa* (Ali dkk., 2017), *Klebsiella variicola* (Sarmin dkk., 2021), *Lactobacillus bulgaricus* (Arbianti dkk., 2013; Sulistyawati dkk., 2020), *Xanthomonas translucens* (Khoirunnisa dkk., 2020) dan *Shewanella putrefaciens* (Kim dkk., 2002), khamir seperti *Saccharomyces cerevisiae* (Sarmin dkk., 2021) dan jamur seperti *Rhizopus* (Bakar dkk., 2012). Khamir *S. cerevisiae* memiliki kemampuan dalam sistem MFC untuk mentransfer elektron dengan dan tanpa mediator (Sarma dkk., 2015) dan menghindari terbentuknya biofilm pada anoda sehingga permukaan anoda terisi seluruhnya oleh eksoelektrogen yang dapat meningkatkan kinerja dari MFC (Belniak dan Maminska, 2018). Menurut Shrivastava dkk (2021), *S. cerevisiae* merupakan salah satu organisme yang baik digunakan dalam aplikasi MFC karena bersifat nonpatogen dan sebagai biokatalis untuk fermentasi gula menjadi bioetanol (Yuan dkk., 2020; Permana, dkk., 2015).

S. cerevisiae dalam produksi etanol lebih berperan daripada mikroorganisme lain seperti *Trichoderma viride*. Hal ini disebabkan oleh adanya dua enzim utama pada *S. cerevisiae* yang terdiri atas enzim invertase yang berperan dalam mengubah sukrosa dan fruktosa menjadi glukosa dan enzim zymase yang berperan untuk mengubah glukosa

menjadi etanol (Dutta dan Mukherjee, 2010). *T. viride* mengandung enzim selulolitik seperti enzim selulase yang dapat menghidrolisis selulosa menjadi glukosa sehingga tidak dapat memproduksi etanol (Ndapamuri dkk., 2021). Kesesuaian antara penggunaan mikroba dan substrat yang berbeda dapat mempengaruhi besarnya energi listrik yang dihasilkan dalam sistem MFC.

Substrat yang digunakan dalam sistem MFC dapat diperoleh dari komponen murni sederhana yang terdiri atas satu komponen seperti glukosa (Sayed dkk., 2012; Christwardana dkk., 2018; Chae dkk., 2009), sukrosa (Behera dan Ghangrekar, 2009), pati (Niessen dkk., 2004), selulosa (Yazdi dkk., 2007), asetat, butirat, propionat (Chae dkk., 2009). Komponen kompleks dalam substrat MFC terdiri atas beberapa komponen seperti air limbah tempat pembuatan bir (Feng dkk., 2008), air limbah pabrik daur ulang kertas (Huang dan Logan, 2007), air limbah dari pengolahan makanan (Mansoorian dkk., 2013) dan limbah cair molase (Zhong dkk., 2011).

Menurut Baharuddin dkk. (2020), kesesuaian antara penggunaan mikroba dengan substrat tertentu sangat berperan dalam menghasilkan arus dan beda potensial yang besar. Nilai arus dan beda potensial yang dihasilkan dengan menggunakan substrat molase dan bakteri *Pseudomonas* sp secara berturut-turut sebesar 1,44 mA dan 550 mV lebih kecil dari hasil penelitian Heriyono (2019), substrat eceng gondok dengan bakteri *Pseudomonas* sp dengan arus maksimum sebesar 3,06 mA dan

beda potensial sebesar 860 mV. Hal tersebut terjadi karena *Pseudomonas* sp termasuk bakteri selulolitik yang menghasilkan enzim selulase yang dapat mengubah selulosa menjadi glukosa sehingga selulosa dari eceng gondok dapat terurai dan sukrosa dari molase tidak dapat diurai menjadi glukosa dengan bakteri *Pseudomonas* sp.

Penggunaan larutan elektrolit juga dapat mempengaruhi produksi listrik yang dihasilkan. Larutan elektrolit merupakan larutan yang dapat menghantarkan arus listrik (Miranda dan Afrida, 2018). Penggunaan larutan elektrolit digunakan sebagai akseptor elektron pada ruang katoda dalam sistem MFC yang dapat mempengaruhi besarnya listrik yang dihasilkan (Yuan dkk., 2020). Larutan elektrolit yang digunakan dalam MFC adalah KMnO_4 (Baharuddin dkk., 2020), $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ dan $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (Li dkk., 2009). Larutan elektrolit KMnO_4 dan $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ merupakan oksidator yang digunakan sebagai akseptor elektron yang memiliki potensial reduksi standar secara berturut-turut adalah 1700 mV dan 360 mV. Proton dan elektron pada ruang anoda akan mereduksi Mn^{7+} menjadi Mn^{4+} dari larutan KMnO_4 dan mereduksi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} dari larutan $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$. Pertemuan antara proton dan elektron tersebut akan menyebabkannya adanya perbedaan potensial antara ujung-ujung elektroda di katoda dan anoda (Muftiana dkk., 2018)..

Berdasarkan Yuan dkk. (2020), penelitian energi listrik berbasis MFC dengan substrat glukosa dengan menggunakan *S. cerevisiae* dan larutan elektrolit $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ menghasilkan densitas daya maksimum

sebesar $5,2 \pm 0,5$ mW/cm². Berdasarkan hasil penelitian Permana dkk. (2015), energi listrik berbasis MFC dihasilkan dengan menggunakan larutan elektrolit KMnO₄ yang menghasilkan arus $5,5 \times 10^{-5}$ A, potensial 886 mV dan densitas daya $4,48 \times 10^{-3}$ mW/cm². Berdasarkan hasil penelitian Heriyono (2019), substrat selulosa dari enceng gondok dengan menggunakan *Pseudomonas* sp dan larutan elektrolit KMnO₄ 0,2 M menunjukkan densitas daya sebesar 1802,46 mW/cm². Menurut Muftiana dkk. (2018), substrat MFC *whey* tahu dengan bakteri *L. bulgaricus* dan larutan elektrolit KMnO₄ 0,2 M memberikan beda potensial maksimum 99,2 mV. Proses MFC menghasilkan hasil samping yang berupa bioetanol (Yuan dkk., 2020; Permana dkk., 2015) .

Bioetanol merupakan hasil dari proses fermentasi (Restiawaty dkk., 2020; Nurfadillah dkk., 2018) dengan bantuan mikroorganisme yang dilakukan dalam kondisi anaerob dalam proses memproduksi energi (Masturi dkk., 2020; Julianto dkk., 2019; Mekkawi dkk., 2019; Oktavianis dan Sofiyanita, 2019). Bioetanol dapat diproduksi dari biomassa yang mengandung gula, pati (Mojovic dkk., 2009) dan lignoselulosa (Bouaziz dkk., 2020; Lugani dkk., 2020). Namun, pati (Lareo dkk., 2013; Ojewumi dkk., 2018) dan lignoselulosa dihidrolisis terlebih dahulu untuk menjadi glukosa (Gebrehiwot dkk., 2017; Nurfadillah dkk., 2018). Biomassa yang dapat dijadikan sebagai substrat dalam produksi listrik dan bioetanol dalam sistem MFC adalah *Gracilaria verrucosa* (Park dkk., 2020)

G. verrucosa adalah alga merah yang termasuk dalam kelas Rhodophyceae yang dibudidayakan di tambak (Patahiruddin, 2020; Patahiruddin dan Khalid, 2020). Ma'ruf dkk. (2013), kandungan yang terdapat pada *G. verrucosa* meliputi kadar protein 4,608%, kadar lemak 3,322%, kadar abu 19,575% dan kadar karbohidrat 72,495%. *G. verrucosa* banyak digunakan sebagai bahan dasar penghasil agar (Patahiruddin, 2020) dan bioetanol (Park dkk., 2020). Bahan dasar pembuatan bioetanol juga dapat diperoleh dari molase (Darvishi dan Moghaddami, 2019) dan menghasilkan listrik dalam sistem MFC (Ozturk dan Onat, 2017).

Molase adalah cairan kental yang berwarna coklat yang merupakan hasil samping dari pembuatan gula tebu (Senthilkumar dkk., 2016; Marlinda dkk., 2019; Saric dkk., 2016). Molase tebu banyak dimanfaatkan sebagai bahan dalam pembuatan asam sitrat (Marlinda dkk., 2019) dan bioetanol (Darvishi dan Moghaddami, 2019), sebagai produk kembang gula dan roti (Saric dkk., 2016), sebagai bahan utama pengelolaan pakan sebagai sumber energi dan mineral untuk ternak (Senthilkumar dkk., 2016). Mineral yang terkandung dalam molase adalah kalsium, natrium, kalium, magnesium, mineral, tembaga, seng, besi dan mangan (Senthilkumar dkk., 2016). Komponen yang terkandung dari molase adalah garam dapur 13%, abu 13%, komponen organik nitrogen 10,1%, pati 1,5%, raffinosa 0,3%, fruktosa 0,2% dan sukrosa 60% (Sjolin dkk., 2020). Menurut Gasmalla dkk. (2012), kandungan sukrosa molase

sebesar 32% dan total gula 49%. Menurut Kelly (1954), kandungan glukosa molase sebesar 9,8%.

Berdasarkan uraian sebelumnya, maka telah dilakukan penelitian produksi energi listrik dan bioetanol dari alga merah (*G. verrucosa*) dan molase menggunakan *S. cerevisiae* berbasis teknologi sel bahan bakar mikroba.

B. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. bagaimana pengaruh perbedaan substrat dengan kombinasi larutan elektrolit terhadap arus dan tegangan pada sistem MFC?
2. bagaimana pengaruh perbedaan substrat dengan kombinasi larutan elektrolit terhadap densitas daya pada sistem MFC?
3. berapa kadar bioetanol pada substrat *G. verrucosa* dan molase pada sistem MFC?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. menganalisis pengaruh perbedaan substrat dengan kombinasi larutan elektrolit terhadap arus dan tegangan pada sistem MFC.
2. menganalisis pengaruh perbedaan substrat dengan kombinasi larutan elektrolit terhadap densitas daya pada sistem MFC.
3. menentukan kadar bioetanol pada substrat *G. verrucosa* dan molase pada sistem MFC.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

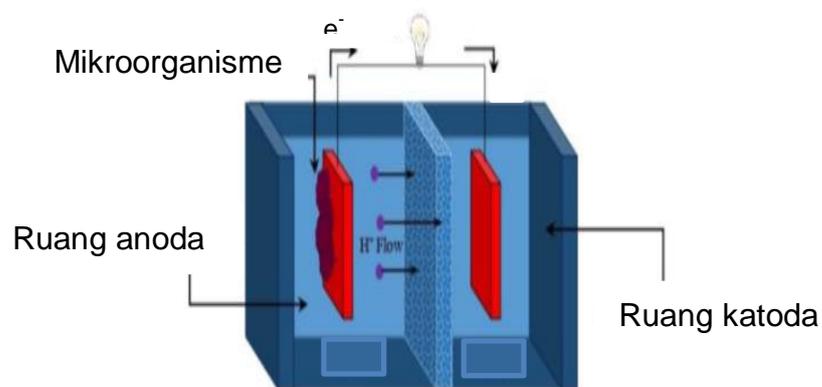
1. memberikan informasi bahwa penggunaan substrat yang berbeda dengan kombinasi larutan elektrolit KMnO_4 dan $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ dalam sistem MFC dapat menghasilkan nilai arus dan tegangan yang berbeda.
2. memberikan informasi bahwa penggunaan substrat yang berbeda dengan kombinasi larutan elektrolit KMnO_4 dan $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ dalam sistem MFC dapat menghasilkan densitas daya yang berbeda.
3. memberikan informasi bahwa kadar bioetanol pada substrat *G. verrucosa* dan molase dalam sistem MFC berbeda.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. *Sel Bahan Bakar Mikroba (MFC)*

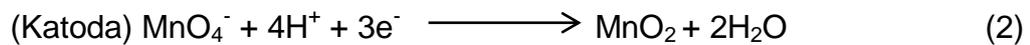
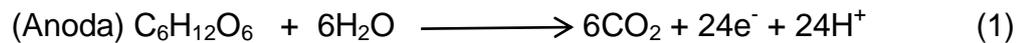
Teknologi MFC merupakan teknologi berbasis mikroba dengan menggunakan substrat berupa biomassa organik yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik melalui proses metabolisme (Tharali dkk., 2016; Kanani, 2017; Al-Asheh dkk., 2020; Parkhas dkk., 2015; Chaturvedi dan Verma, 2016). Proses MFC dapat dilakukan dengan metode ruang tunggal (Fu dkk., 2021) dan ruang ganda (Hossain dkk., 2021). Sistem MFC dapat digunakan sebagai biosensor dalam pengukuran kebutuhan oksigen biokimia (BOD) (Cui dkk., 2019; Sun dkk., 2015; Tardy dkk., 2021), biosensing (Sun dkk., 2015) dan bioremediasi (Pous dkk., 2013; Pisciotta dan Jr, 2016). Desain sistem MFC dengan metode ruang ganda ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ruang Ganda MFC (Gadhve dkk., 2020)

Berdasarkan Gambar 1, mekanisme yang berlangsung pada sistem MFC adalah mikroorganisme akan mengoksidasi substrat yang berada dalam ruang anoda untuk menghasilkan elektron (e^-), proton (H^+) dan karbondioksida (CO_2). Elektron yang dihasilkan melekat pada batang elektroda yang ditransfer ke ruang katoda melewati kawat konduktif yang akan menghasilkan muatan eksternal listrik dan proton akan bermigrasi menuju ruang katoda melalui PEM. Elektron dan proton akan bereaksi dalam ruang katoda untuk mereduksi oksigen dan menghasilkan listrik. Energi listrik dapat diperoleh berdasarkan kecepatan elektron melewati sirkuit dan perbedaan potensial elektrokimia melewati elektroda (Utami dkk., 2019). Menurut Yuan dkk. (2020), oksigen yang berasal dari ruang anoda berperan dalam meningkatkan kinerja MFC serta pertumbuhan *S. cerevisiae*. *S. cerevisiae* menggunakan glukosa sebagai sumber karbon untuk pertumbuhan sel dan pembentukan etanol sebagai produk samping dari produksi listrik.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Putra dkk. (2018); Utami dkk. (2018); Utami dkk. (2019), reaksi yang terjadi dalam ruang anoda dengan menggunakan substrat glukosa dalam ruang anoda menghasilkan elektron dan proton. Sedangkan dalam ruang katoda, oksigen sebagai aseptor elektron (Utami dkk., 2018). Reaksi yang berlangsung di ruang anoda (Putra dkk., 2018; Utami dkk., 2018; Utami dkk., 2019; Gunawerdana, 2008) dan katoda (Utami dkk., 2018) diberikan pada persamaan (1) dan (2).



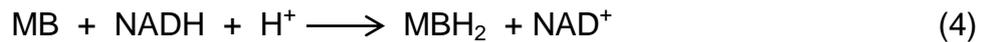
Dalam kondisi anarobik, *S. cerevisiae* akan mengalami fermentasi dimana nikotinamida adenin dinukleotida hidrogen (NADH) teroksidasi oleh enzim alkohol dehidrogenase. Selanjutnya, NADH akan menembus keluar membran sel. Hal ini akan menginisiasi pasangan redoks NADH/NAD⁺ pada pinggiran anoda tempat elektron dan proton akan dilepaskan yang ditunjukkan pada persamaan (3) (Shukla dkk., 2004). Transfer NADH ke luar membran secara signifikan terhambat oleh adanya membran sel. Oleh karena itu, adanya mediator yang menempel pada permukaan membran akan meningkatkan transfer elektron ke elektroda.



Metode transfer elektron pada sistem MFC terbagi menjadi dua yaitu secara langsung dan tidak langsung. Transfer elektron metode langsung adalah elektron akan mentransfer elektron langsung ke elektroda, sedangkan transfer elektron tidak langsung menggunakan mediator elektron untuk transmisi langsung (Utami dkk., 2019). Mediator elektron yang dapat digunakan dalam sistem MFC adalah MB dan neutral red (Oztur dan Onat, 2017).

Menurut Rahimnejad dkk. (2011); Olotu dkk. (2019); Yuan dkk. (2020), metode transfer tidak langsung menggunakan mediator metilen biru (MB) memiliki kemampuan untuk meningkatkan pembangkit listrik. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Rahimnejad dkk. (2011), nilai

energi listrik maksimum yang diperoleh dengan konsentrasi MB 300 mM adalah nilai daya sebesar 12,3 mW dan arus sebesar 232 mA. Berdasarkan Yuan dkk (2020), reaksi yang terjadi ketika MB ditambahkan dalam ruang anoda ditunjukkan pada persamaan (4) dan (5)



MB yang berada dalam ruang anoda, akan menembus membran sel dan menangkap elektron yang dibawa oleh NADH. Kemudian, metilen biru direduksi menjadi MBH₂ yang tidak berwarna dan berdifusi di luar membran sel untuk melepaskan elektron pada elektroda dalam transfer elektron. MB selanjutnya berdifusi dan menghantarkan elektron ke permukaan elektroda tanpa menggunakan sel ragi untuk dipasang di permukaan elektroda. Oleh karena itu, penambahan MB dapat meningkatkan daya *S. cerevisiae* dalam MFC (Yuan dkk., 2020) dan meningkatkan transfer elektron ke elektroda (Gunawardena dkk., 2008).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Olotu dkk. (2019), substrat yang digunakan dalam sistem MFC untuk menghasilkan listrik adalah endapan lumpur. Nilai arus yang diperoleh lebih tinggi dengan menggunakan metode transfer tidak langsung berupa mediator elektron MB dibandingkan metode langsung tanpa penambahan mediator MB. Nilai arus yang dihasilkan dengan mediator MB adalah 0,5 mA dan tegangan sebesar 300 mV. Sementara itu, arus yang dihasilkan tanpa mediator MB adalah 0,4 mA dan tegangan sebesar 300 mV.

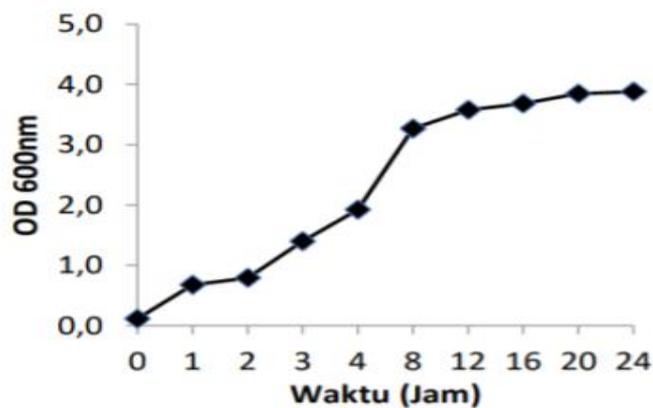
Menurut Yuan dkk. (2020), nilai arus dan tegangan yang dihasilkan dalam MFC dengan menggunakan mediator elektron berupa MB lebih tinggi dibandingkan tanpa mediator elektron. Nilai tegangan sirkuit terbuka maksimum adalah 755 ± 7 mV dengan penambahan MB sebanyak 2 mL. Nilai tegangan sirkuit terbuka maksimum adalah 655 ± 5 mV dan kepadatan daya maksimum adalah $0,53 \pm 0,2$ mW/cm² tanpa penambahan metilen biru. Penerapan teknologi MFC dengan menggunakan mikroba *S. cerevisiae* dapat menghasilkan listrik dan produk samping berupa bioetanol (Yuan dkk., 2020; Permana dkk., 2015).

B. Saccharomyces cerevisiae

S. cerevisiae merupakan organisme yang bersifat fakultatif anaerob yang dapat hidup secara aerob maupun anaerob (Ohmori dkk., 1999; Merico dkk., 2007; Hagman dan Piskur, 2015; Nissen dkk., 2000). *S. cerevisiae* dimanfaatkan dalam pembuatan roti (Zhang dkk., 2018), pembuatan bir (Morejon dkk, 2019), pembuatan bioetanol (Bharti dan Chauhan, 2016; Goncalves dkk., 2016; Chang dkk., 2018) dan produksi energi listrik berbasis MFC (Permana dkk., 2015; Rahimnejad dkk., 2012; Lotfi dkk., 2018).

Pertumbuhan dari *S. cerevisiae* terdiri dari 4 fase yaitu fase adaptasi, fase eksponensial, fase stasioner dan fase kematian (Khofiya dkk., 2019; Azizah, dkk., 2012). Fase adaptasi ditandai dengan garis kurva dari keadaan nol kemudian akan terjadi sedikit kenaikan. Dalam

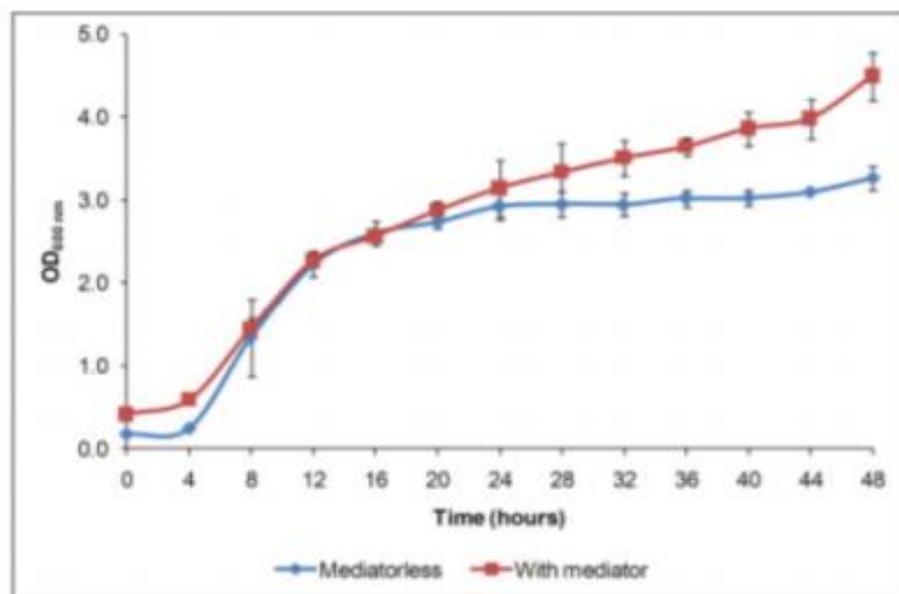
fase ini, *S. cerevisiae* akan mengalami masa adaptasi dengan lingkungan dan belum terjadi pertumbuhan. Fase eksponensial digambarkan dengan garis kurva yang mulai menunjukkan terjadinya peningkatan yang tajam. *S. cerevisiae* akan mengalami pertumbuhan yang sangat cepat dan terjadi pemecahan gula untuk memenuhi kebutuhan pertumbuhan *S. cerevisiae*. Hasil pemecahan gula dari *S. cerevisiae* dalam keadaan anaerob akan menghasilkan alkohol. Selanjutnya, pada fase stasioner digambarkan dengan garis kurva mendatar yang menunjukkan jumlah *S. cerevisiae* yang hidup sebanding dengan jumlah yang mati. Sementara itu, pada fase kematian digambarkan terjadi penurunan garis kurva yang menunjukkan jumlah *S. cerevisiae* yang mati jumlahnya akan lebih banyak sampai akhirnya *S. cerevisiae* mati (Azizah, dkk., 2012).



Gambar 2. Kurva Pertumbuhan *S. cerevisiae* (Ulum dkk., 2020).

Gambar 2 menunjukkan bahwa fase adaptasi (lag) dimulai pada jam ke-0 sampai jam ke-2. Kemudian terjadi fase log pada jam ke-2 sampai jam ke-16 yang menandakan terjadinya pertumbuhan karena

terjadinya pemecahan substrat yang digunakan sebagai nutrisi dalam pertumbuhan, sintesa enzim dan sintesa senyawa lainnya. Fase stasioner pada *S. cerevisiae* terjadi pada jam ke-16 sampai jam ke-24 yang menunjukkan jumlah sel tidak mengalami peningkatan dan cenderung konstan karena berkurangnya substrat (Ulum dkk., 2020)



Gambar 3. Kurva Pertumbuhan *S. cerevisiae* dengan dan tanpa Mediator MB (Permana dkk., 2015).

Gambar 3 menunjukkan kurva pertumbuhan *S. cerevisiae* dengan penambahan metilen biru pada media dapat mempengaruhi pertumbuhan sel dengan sedikit perbedaan nilai OD pada 24 jam terakhir percobaan. *S. cerevisiae* yang ditumbuhkan dalam media dengan atau tanpa mediator memiliki fase lag dari 0-4 jam, kemudian fase eksponensial terjadi dari 4-12 jam. Selanjutnya, kurva pertumbuhan relatif rata, terutama pada khamir yang ditumbuhkan pada media tanpa metilen biru. Sel yang

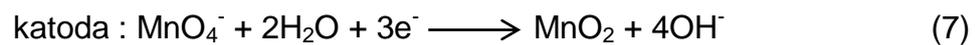
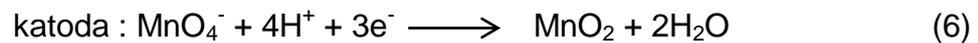
ditumbuhkan pada media dengan penambahan metilen biru masih sedikit menngkat (Permana dkk., 2015).

S. cerevisiae memiliki kemampuan untuk mendegradasi kelompok disakarida seperti sukrosa (Hargono dkk., 2019; Dutta dan Mukherjee, 2010) menjadi glukosa dan fruktosa karena adanya enzim invertase dan kelompok monosakarida seperti glukosa atau fruktosa menjadi etanol dan CO₂ karena adanya enzim zimase (Merico dkk., 2007). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Masturi dkk. (2020), etanol yang dihasilkan dari biji durian menggunakan *S. cerevisiae* dalam keadaan aerobik adalah 14,72%. Menurut Osei (2020), tomat busuk juga dapat dijadikan sebagai bahan baku dalam produksi etanol. Kadar etanol yang dihasilkan adalah 0,17% dengan menggunakan *S. cerevisiae* dengan lama fermentasi 24 jam. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Gunawardena dkk. (2008), energi listrik berbasis MFC dengan menggunakan substrat glukosa dan mikroba *S. cerevisiae* menghasilkan daya maksimum $146,71 \pm 7,7$ mV/m³.

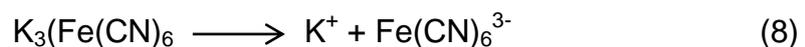
C. Larutan Elektrolit

Penggunaan larutan elektrolit dan mikroba dalam sistem MFC dapat berpengaruh dalam meningkatkan potensial energi yang dihasilkan (Baharuddin dkk., 2020; Muftiana dkk., 2018; Adebule dkk., 2018; Cai dkk., 2016; Arbianti dkk., 2013). Larutan elektrolit yang biasa digunakan dalam sistem MFC adalah K₃(Fe(CN)₆ dengan potensial reduksi standar

360 mV dan KMnO_4 dengan potensial reduksi standar 1700 mV (Muftiana, dkk., 2018; Cai dkk., 2016; You dkk., 2006). Larutan elektrolit KMnO_4 digunakan sebagai akseptor elektron (Eliato dkk., 2016) yang memiliki kapasitas oksidasi yang tinggi dan bersifat ramah lingkungan. Larutan KMnO_4 memiliki atom Mn dengan bilangan oksidasi +7 dan dapat menerima banyak elektron, walaupun bilangan oksidasinya dapat berkurang menjadi +4 atau +2 untuk membentuk MnO_2 atau MnO (Putra dkk., 2018). Reaksi yang terjadi ditunjukkan pada persamaan (6) dan (7)



Eliato dkk. (2016), melaporkan larutan elektrolit yang digunakan dalam ruang katoda pada sistem MFC adalah KMnO_4 dengan konsentrasi 400 μM menghasilkan densitas daya maksimum dan rapat arus pada rapat daya maksimum adalah 93,13 mW/cm^2 dan 0,030 mA/cm^2 dengan substrat lumpur yang berasal dari air limbah susu. Berdasarkan Muftiana dkk. (2018), $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ merupakan larutan elektrolit yang dimanfaatkan dalam sistem MFC pada ruang katoda sebagai oksidator yang dapat menangkap elektron dari ruang anoda. Larutan $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ketika berada di dalam larutan, maka terjadi ionisasi menjadi K^+ dan $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ sehingga terjadi reaksi di ruang katoda yang ditunjukkan pada persamaan (8).



Ion Fe^{3+} akan tereduksi menjadi Fe^{2+} dengan bantuan elektron dari ruang anoda. Ion Fe^{2+} selanjutnya akan teroksidasi kembali dengan proton

H^+ yang berada di ruang katoda dengan adanya bantuan oksigen. Pertemuan antara proton dan elektron mengakibatkan terjadinya perbedaan potensial antara ujung-ujung elektroda di katoda dan anoda.

D. Analisis Bioetanol

Bioetanol merupakan cairan berupa gula sederhana melalui proses fermentasi dengan menggunakan mikroorganisme (Azhar dkk., 2017). Bahan baku dari pembuatan bioetanol dapat berasal dari bahan berpati, bergula dan lignoselulosa (Azhar dkk., 2017). Bahan berpati berupa singkong (Adeley dkk., 2020), biji jagung (Lee dkk., 2016), kentang (Vasques dkk., 2019), sukun (Farida dkk., 2015) dan biji durian (Masturi dkk., 2020). Bahan yang mengandung gula yaitu molase (Khoja dkk., 2015), sari tebu (Suleiman dkk., 2016), sari batang sorgum manis (Buruiana dkk., 2018) dan nira sawit (Offiong dan Akpan, 2017). Bahan yang mengandung selulosa berupa getah pisang (Raghone dkk., 2019), serbuk gergaji (Peace dkk., 2020) dan limbah pertanian seperti jerami padi (Takano dan Hoshino, 2018), ampas tebu (Mizar dkk., 2020) dan tongkol jagung (Melekwe dkk., 2016).

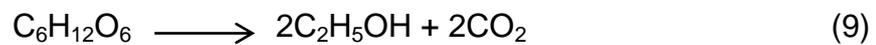
Produksi bioetanol dapat dihasilkan dengan melalui 3 proses, yaitu hidrolisis, fermentasi dan destilasi (Ketut dkk., 2016). Proses hidrolisis dapat dilakukan dengan cara kimiawi menggunakan asam seperti asam sulfat (Ramayanti dan Glasmara, 2017; Sitompol dan Maftuhin, 2020; Bukhari dkk., 2017) dan asam klorida (HCl) (Kalsum dan Juniar, 2017)

maupun dengan cara enzimatik (Bukhari dkk., 2017; Han dkk., 2020; Vasic dkk., 2021). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Ramayanti dan Giasmara (2017), asam yang digunakan dalam proses hidrolisis adalah asam sulfat (H_2SO_4). Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi asam yang digunakan maka akan menghasilkan kadar etanol yang lebih tinggi. Proses hidrolisa gugus H^+ dari asam sulfat dapat mengubah gugus serat dari selulosa menjadi gugus radikal bebas. Gugus radikal bebas serat tersebut selanjutnya berikatan dengan air dari gugus $-OH$ dan menghasilkan glukosa. Konsentrasi asam sulfat yang paling optimum didapatkan adalah 4% dengan kadar etanol sebesar 6,12%.

Menurut Ngili (2013); Valera dkk. (2020), proses fermentasi alkohol dimulai dari proses glikolisis dengan mengubah molekul glukosa menjadi dua molekul piruvat dan dua ATP. Kemudian, piruvat dikatalisis oleh enzim piruvat dekarboksilase menjadi asetaldehid dan karbondioksida. Asetaldehid kemudian direduksi menjadi etanol dengan bantuan enzim alkohol dehidrogenase.

Menurut Bouaziz dkk. (2020), produksi etanol terbaik dengan menggunakan substrat biji kurma menggunakan *S. cerevisiae* dengan fermentasi selama 6 jam adalah konsentrasi etanol 21,57 g/L. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Yesmin dkk. (2020), kadar etanol yang dihasilkan dengan 100 g substrat wortel dengan menggunakan *S. cerevisiae* setelah 6 hari fermentasi menghasilkan 73,67

mL etanol dengan kemurnian 12,66%. Menurut Ramadhani, dkk. (2020), substrat yang digunakan dalam produksi bioetanol adalah buah naga merah dengan menggunakan *S. cerevisiae*. Kadar etanol yang dihasilkan adalah 26%. Menurut Roni dkk. (2019), *S. cerevisiae* digunakan sebagai mikroorganisme yang mengurai glukosa menjadi bioetanol dalam proses fermentasi. Reaksi fermentasi yang dihasilkan ditunjukkan pada persamaan (9).



Menurut Okawanti dkk. (2020), produksi bioetanol dengan menggunakan ampas tahu dengan menggunakan mikroorganisme *S. cerevisiae* dengan variasi lama fermentasi (5, 6 dan 7 hari. Konsentrasi etanol tertinggi diperoleh 22,67% dengan lama fermentasi 6 hari. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Yuan dkk. (2020), produksi energi listrik berbasis MFC dapat menghasilkan produk samping dari bioetanol. Bioetanol yang dihasilkan dengan menggunakan substrat glukosa sebesar $92,5 \pm 2\%$. Menurut Permana dkk. (2015), produksi bioetanol dengan menggunakan sistem MFC menghasilkan kadar bioetanol 0,74%.

E. Tinjauan Tentang Alga

Alga adalah tumbuhan yang dapat hidup di perairan laut, baik perairan dangkal maupun perairan dalam yang dapat disinari oleh cahaya matahari. Alga terdiri dari dua jenis yaitu mikroalga dan makroalga. Mikroalga adalah organisme memiliki bentuk sel tunggal disebut dengan

ganggang (Yanuhar, 2016) yang memiliki bentuk dan ukuran tubuh mikroskopik (Kasim, 2016). Makroalga adalah tumbuhan tingkat rendah yang hidup di dasar perairan yang struktur tubuhnya masih berupa talus (Kordi, 2010) yang tidak memiliki akar, batang, bunga dan daun sejati (Kasim, 2016). Makroalga diklasifikasikan menjadi 3 yaitu alga coklat, alga merah dan alga hijau (Overland dkk., 2018; Kasim, 2016; Manzelat dkk., 2018). Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan makroalga adalah substrat, suhu, pH, kedalaman air dan kuat arus air (Diansyah dkk., 2018)

Makroalga dapat dimanfaatkan secara ekologi untuk menyediakan habitat untuk jenis biota laut seperti moluska, krustasea, Echinodermata, ikan dan mikroalga lainnya. Komponen kimia yang terkandung dalam alga terdiri dari karbohidrat 33,8%, air 27,8%, protein 5,4%, serat kasar 3% dan abu 22,5% (Rehena dan Rehena, 2017). Menurut Purba dkk. (2019), alga merah juga mengandung mineral, serat, natrium, vitamin, kalium, metabolit sekunder dan nutrient.

Makroalga dapat dimanfaatkan sebagai obat (Diansyah dkk., 2018), pakan ternak, pupuk (Setthamongkol dkk., 2015; Shannon dan Ghannam, 2019), bahan pangan (Diansyah dkk., 2018; Shannon dan Ghannam, 2019), seperti agar-agar, sayuran, kue (Kasim, 2016), bahan baku industri (Diansyah dkk., 2018) seperti bahan algin, furcellaran dan karaginan yang digunakan dalam bidang industri farmasi, kosmetik, tekstil (Kasim, 2016) dan bahan dalam bidang laboratorium untuk dijadikan sebagai bahan media pembiakan jamur dan bakteri, bahan pengawet (Diansyah dkk.,

2018). Pemanfaatan makroalga bidang biologi sebagai produsen primer, penghasil bahan organik dan oksigen di lingkungan perairan (Kasim, 2016).

F. Tinjauan Tentang *Gracilaria verrucosa*

Gracilaria sp dikenal dengan nama yang berbeda di setiap daerah seperti sango-sango, rambu kasang, janggut dayong, dongi-dongi, bulung embulung, agar-agar karang dan dan blung sangu (Patawari dkk., 2018). *G. verrucosa* juga dikenal dengan nama lokal jukut dan bulung sangu (Agung dkk., 2019). *Gracilaria verrucosa* termasuk dalam kelas alga merah (Halid dan Patahiruddin, 2019; Widowati dkk., 2014; Febrianto dkk., 2019; Kumar dkk., 2013) yang mengandung pigmen klorofil, fikoeritin, fikosianin dan karotenoid (Ak dan Yucesan, 2012; Agung dkk., 2019).



Gambar 4. *G. verrucosa*

Menurut Dewi dkk. (2018), klasifikasi *G. verrucosa* adalah sebagai berikut:

Kingdom : Rhodophyta
Kelas : Rhodophyceae
Ordo : Gigartinales
Famili : Gracilariaceae
Genus : *Gracilaria*
Species : *Gracilaria verrucosa*

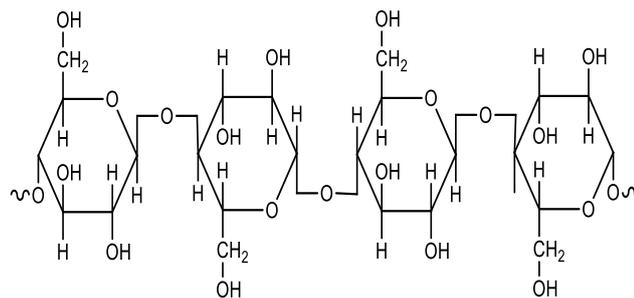
G. verrucosa memiliki kandungan nutrisi berupa vitamin A, C dan E, asam lemak omega 3 dan 6, karbohidrat, mineral berupa I, Zn, Fe, Cu, Na, K, Mg, Ca, P dan Cr dan asam amino (Agung dkk., 2019). Asam amino yang terkandung pada *G. verrucosa* terdiri atas *L-Glutamic acid*, *L-Serine*, *L-Threonin*, *L-Glycine*, *L-Alanine*, *L-Arginine*, *L-Valine*, *L-Leucine* dan *L-Lycine* (Ma'ruf dkk., 2013). Maftuch dkk. (2016), hasil fitokimia *G. verrucosa* mengandung komponen bioaktif berupa alkaloid, flavonoid, tannin dan fenolik.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Septiany (2013), kandungan dari serbuk *G. verrucosa* sebelum delignifikasi meliputi kadar air 9,23%, kadar selulosa 8,76% dan kadar lignin 8,23%. Serbuk *G. verrucosa* setelah delignifikasi meliputi kadar air sebesar 8,87%, kadar selulosa 13,04% dan kadar lignin 3,84%. *G. verrucosa* dimanfaatkan dalam pembuatan bioetanol (Kumar dkk., 2013), bahan baku pembuatan

agar (Santika dkk., 2014), antioksidan (Agung dkk., 2019), antibakteri (Rudi dkk., 2019) dan antikanker (Dewi dkk., 2018; Kurniasari dkk., 2018).

G. Selulosa

Selulosa merupakan polimer glukosa (Chatterjea dan Shinde, 2012) sebagai bahan utama dalam pembentuk dinding sel pada tanaman (Ngili, 2013). Selulosa ditemukan pada rumput laut (Kouzuma dan Fujii, 2018), jerami padi (Rivai dkk., 2018), ampas tebu (Mzimela dkk., 2018), batang jagung (Chesca dkk., 2018) dan kulit pisang (Kabenge dkk., 2018).



Gambar 5. Struktur Selulosa (Campbell dkk., 2000)

Selulosa dapat dihidrolisis menjadi glukosa menggunakan hidrolisis secara kimiawi berupa larutan asam (Tsoutsos dan Bethanis, 2011) dan secara enzimatik (Alrumman, 2016; Idrees dkk., 2014). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Sandi dkk (2016), konsentrasi optimum dalam proses hidrolisis asam selulosa *Gracilaria sp* dengan menggunakan H_2SO_4 adalah 7% menghasilkan kadar gula reduksi tertinggi sebesar 45,01%. Menurut Axel dkk. (2017); Dee dan Bell (2011), reaksi hidrolisis selulosa dengan menggunakan H_2SO_4 diawali dengan ion H^+ yang berasal

dari asam bereaksi dengan ikatan glikosida pada dua unit glukosa dan membentuk ikatan O-H dan menghasilkan H₂O. Selanjutnya H₂O akan bereaksi ion karbonium membentuk ikatan OH sehingga menghasilkan glukosa dan proton.

H. Tebu (*Sacharum officinarum L.*)

Tebu merupakan tanaman yang berasal dari family *Poaceae* (Singh dkk., 2015) yang banyak digunakan sebagai bahan baku gula yang biasanya tumbuh di daerah yang memiliki kondisi tropis (Qibtiyah dkk., 2019) dan subtropis (Elsharif dkk., 2019). Tanaman tebu memiliki akar serabut, daun, bunga dan batang (Rachmat, 2019) yang tinggi dan tidak bercabang yang berwarna keabu-abuan (Zaini dkk., 2017). Menurut Sahu (2018), tebu dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan gula.

Menurut Rahma dkk. (2020), klasifikasi tanaman tebu adalah sebagai berikut:

Kingdom	: Plantae
Super Divis	: Spermatophyta
Divisi/Fillum	: Magnolophyta
Kelas	: Liliopsida
Ordo	: Poales
Family/Suku	: Graminae atau poaceae
Genus	: <i>Saccharum</i>
Spesies	: <i>Saccharum officinarum L.</i>

Menurut Singh dkk. (2015) dan Jain dan Prabhu (2020), hasil uji fitokimia dari lilin tebu dan bagian tanaman tebu (akar, batang dan daun) mengandung asam lemak, alkohol, fitosterol, terpenoid, flavonoid dan asam fenolik. Pemanfaatan tebu dapat digunakan dalam produksi bioetanol (Restiawaty dkk., 2020; Moodley dan Kana, 2019; Tavares dkk., 2018), energi listrik (Santos dkk., 2020) dan bioplastik (Shah dkk., 2021). Produk samping dari produksi gula dapat menghasilkan ampas tebu dan molase (Veana dkk., 2014).

I. Molase

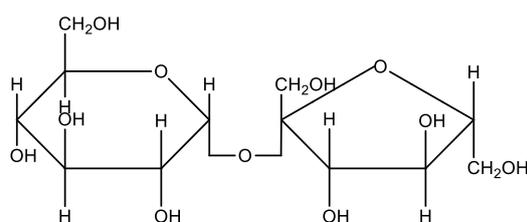
Molase atau tetes tebu merupakan salah satu produk samping dari pembuatan gula tebu (Marlinda dkk., 2019). Molase memiliki karakteristik berbentuk cair dan berwarna cokelat seperti kecap (Gusrina, 2020). Molase memiliki kandungan sukrosa 27%, air 38%, gula inver 22% dan abu belerang 8% (Zentou dkk., 2017). Menurut Cao dkk. (2019), molase mengandung gula lain seperti rafinosa, glukosa 10% dan fruktosa 4%. Menurut Hidayat dkk. (2018), molase juga mengandung protein 0,145-4,3% dan lemak 9,6%.

Molase dimanfaatkan dalam menghasilkan sumber energi (Fues dkk., 2020; Zhang dkk., 2013), pembuatan etanol (Darvishi dan Moghaddami, 2019; Arshad dkk., 2017) dan asam sitrat (Marlinda dkk., 2019; Almakki dkk., 2019). Berdasarkan hasil penelitian Zentou (2017), molase dapat dijadikan sebagai bahan baku pembuatan bioetanol karena

adanya kandungan gula berupa sukrosa. Hasil dari penelitian yang dilakukan bahwa produksi etanol dengan bahan baku 1 kg molase dapat menghasilkan 235 g bioetanol. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Ozturk dan Onat (2017) bahwa molase juga digunakan sebagai substrat dalam sistem MFC *double chamber* yang menghasilkan tegangan sebesar 492,2 mV.

J. Sukrosa

Sukrosa termasuk golongan disakarida yang terdiri atas satu molekul glukosa dan satu molekul fruktosa (Sumbono, 2019; Chatterjea dan Shinde, 2012). Sukrosa memiliki rumus umum $C_{12}H_{22}O_{11}$ dengan massa molekul relatif 342.30 g/mol yang berbentuk padatan Kristal berwarna putih yang larut dalam air (Sumbono, 2019). Sukrosa dapat diperoleh dari tebu, nanas, wortel (Chatterjea dan Shinde, 2012) dan gula bit (Duraism dkk., 2017; Chatterjea dan Shinde, 2012). Struktur pada sukrosa berupa glukosa dan fruktosa terhubung melalui ikatan antara karbon pertama (C1) pada sub unit glukosa dengan karbon kedua (C2) pada subunit fruktosa (Sumbono, 2019; Chatterjea dan Shinde, 2012).



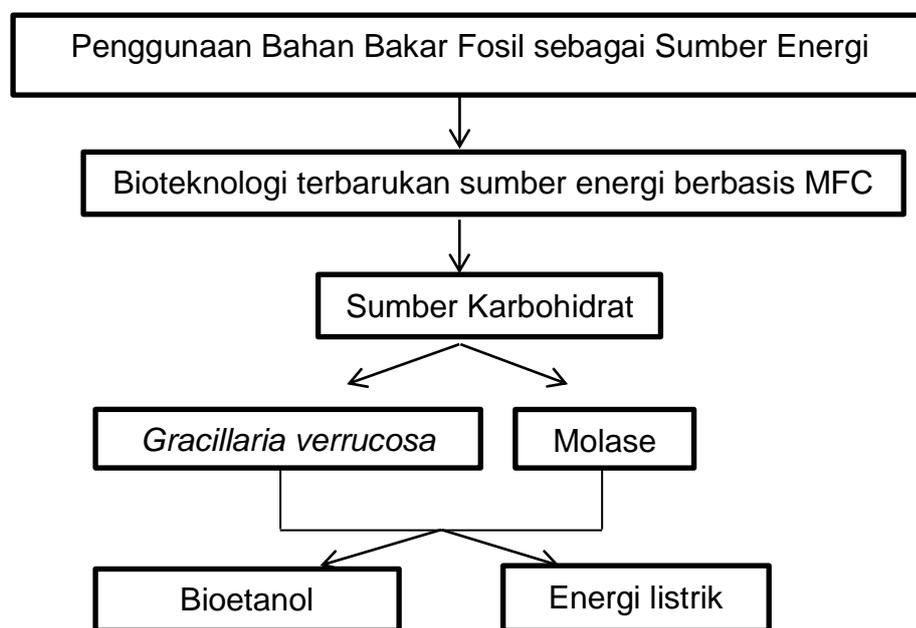
Gambar 6. Struktur Sukrosa (Sumbono, 2019; Chatterjea dan Shinde, 2012).

Proses hidrolisis sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa dapat dilakukan dengan menggunakan asam dan enzim. Sukrosa yang berasal dari gula pasir dihidrolisis menggunakan asam-asam organik yaitu asam sitrat, asam tartrat dan asam klorida (Suwarno dkk., 2015). Enzim yang digunakan dalam proses hidrolisis sukrosa menjadi glukosa adalah enzim invertase yang diproduksi oleh *S. cerevisiae* (Morsy dan Ibrahim, 2016; Saravanan dkk., 2017; Vitolo, 2019; Pang dkk., 2019; Potrich dan Larissa, 2018).

K. Kerangka Pikir

Penggunaan bahan bakar fosil secara terus menerus sebagai sumber energi listrik dapat menyebabkan adanya krisis energi, pemanasan global, polusi udara dan efek rumah kaca. Oleh karena itu, diperlukan alternatif pengembangan bioteknologi terbaru yang dapat menghasilkan energi terbarukan yang bersifat ramah lingkungan dari biomassa organik berupa karbohidrat yaitu lignoselulosa dan sukrosa melalui proses metabolisme mikroba dengan sistem MFC. Sistem MFC memiliki kemampuan untuk mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Sistem MFC akan mengoksidasi substrat yang berada di ruang anoda sehingga menghasilkan karbondioksida, proton dan elektron. Elektron yang dihasilkan akan di transfer ke ruang katoda melalui sirkuit eksternal dan proton akan di transfer melalui PEM. Elektron dan proton akan bereaksi di ruang katoda untuk mereduksi oksigen dan menghasilkan listrik. Biomassa organik yang dapat dijadikan sebagai substrat adalah

G. verrucosa dan molase. Kandungan selulosa dari *G. verrucosa* sebesar 8,7% dan sukrosa dari molases sebesar 48-55%. Produk samping dari sistem MFC dalam menghasilkan energi listrik dapat menghasilkan bioetanol sebagai sumber energi alternatif yang sifatnya dapat diperbaharui.



Gambar 7. Kerangka Pikir Penelitian

L. Hipotesis

Hipotesis dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. pengaruh perbedaan substrat dengan kombinasi larutan elektrolit dapat menghasilkan nilai arus dan tegangan yang berbeda.
2. pengaruh perbedaan substrat dengan kombinasi larutan elektrolit dapat menghasilkan densitas daya yang berbeda.

3. kadar bioetanol pada substrat *G. verrucosa* dan molase dalam sistem MFC menghasilkan kadar bioetanol yang berbeda.