



UNIVERSITAS INDONESIA

HALAMAN JUDUL

**PEMANFAATAN *SACCHAROMYCES CEREVISIAE*
DALAM SISTEM MICROBIAL FUEL CELL
UNTUK PRODUKSI ENERGI LISTRIK**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
gelar Sarjana Teknik**

**NOVA CHISILIA ZAHARA
0806368055**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JANUARI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Nova Chisilia Zahara
NPM : 0806368055
Tanda Tangan :
Tanggal : 07 Januari 2011

HALAMAN PENGESAHAN

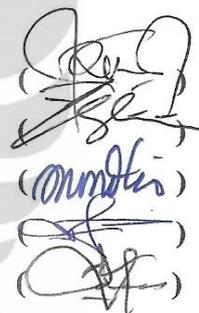
Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Nova Chisilia Zahara
NPM : 0806368055
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pemanfaatan *Saccharomyces cerevisiae* dalam Sistem
Microbial Fuel Cell untuk Produksi Energi Listrik

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Rita Arbianti, M.Si
Pembimbing : Ir. Tania Surya Utami, MT
Penguji : Prof. Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng
Penguji : Dr. Ing. Ir. Misri Gozan, M.Tech
Penguji : Prof. Dr. Ir. Slamet, MT



(*Arbianti*)
(*Surya Utami*)
(*Anondho Wijanarko*)
(*Misri Gozan*)
(*Slamet*)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 07 Januari 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Rita Arbianti, MSi selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran, serta kesabaran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Tania Surya Utami, ST., MT selaku dosen pembimbing II yang telah membantu dalam proses revisi;
3. Dianursanti, ST., MT selaku ketua Laboratorium Bioproses yang telah memberikan izin tempat untuk melakukan penelitian;
4. Seluruh teknisi Lab DTK yang telah banyak membantu secara teknis;
5. Orang tua dan keluarga tercinta yang telah memberikan bantuan dukungan moril dan meteril; dan
6. Damar Wibisono teman baik yang selalu memberikan motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini. Anthony, Canggih, Lia, Daus, dan Maudy sebagai teman seperjuangan dalam bioproses yang telah membantu selama penelitian, sahabat kosan Griya Asih yang telah banyak membantu serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 07 Januari 2011

Penulis

ABSTRAK

Nama : Nova Chisilia Zahara
Jurusan/Bidang : Teknik Kimia / Bioproses
Judul : Pemanfaatan *Saccharomyces cerevisiae* dalam Sistem *Microbial Fuel Cell* untuk Produksi Arus Listrik

Penelitian *Microbial Fuel Cell* skala laboratorium dilaksanakan dengan tujuan untuk mengetahui kapasitas dan efisiensi produksi energi listrik dalam sistem *Microbial Fuel Cell* dengan menggunakan mikroorganisme. Medium yang digunakan merupakan golongan bakteri berupa isolat dari bakteri *Saccharomyces cerevisiae*. Sejumlah media dievaluasi kapasitasnya dalam memberikan fase pertumbuhan yang terbaik untuk *Saccharomyces cerevisiae* menggunakan metode Optical Density dengan Spektrofotometer pada panjang gelombang 550 nm. *Proton Exchange Membrane* yang digunakan adalah jenis Nafion 117, Lynctech, USA. Elektroda yang digunakan sebagai mediator elektron pada kedua kompartmen baik anoda maupun katoda, merupakan elektroda grafit di dalam bejana bervolume 5×10^{-2} m. Sedangkan pada kompartmen katoda merupakan elektrolit berupa campuran senyawa $K_3Fe(CN)_6$ dan K_2HPO_4 . Mikroba yang telah dikultur akan diaplikasikan ke dalam reaktor *Microbial Fuel Cell* untuk dibaca kemampuannya dalam menghasilkan energi listrik dengan mengaplikasikannya pada sistem elektrik yaitu sebuah digital multimeter (microampermeter) dengan penghubung kabel sepanjang $3,0 \times 10^{-1}$ m. Elektron dialirkan melalui sebuah grafit seluas 1.46×10^{-3} m² untuk diukur besar kuat arus dan tegangannya. Sejumlah faktor perlu dikontrol sehingga mikroba dapat menghasilkan energi listrik secara efisien, diantaranya dengan melakukan pengukuran terhadap derajat keasaman dan nilai DO dalam kompartemen anoda. Dari hasil penelitian MFC, diperoleh efisiensi listrik sebesar 53,90% untuk perbandingan antara menggunakan dan tanpa riboflavin sebagai mediator. Sedangkan penambahan minyak nabati ke dalam sistem MFC menghasilkan nilai optimum sebesar 189 μ A. Selain itu, dalam penelitian ini diperoleh bahwa minyak nabati yang ditambahkan saat inokulasi *Saccharomyces cerevisiae*, terbukti dapat meningkatkan kadar riboflavin hingga 42,19 % selama 35 jam proses inkubasi.

Keywords : *Microbial Fuel Cell*, *Riboflavin*, *Saccharomyces cerevisiae*

ABSTRACT

Name : Nova Chisilia Zahara
Study Programme : Chemical Engineering
Title : The Using of *Saccharomyces cerevisiae* in *Microbial Fuel Cell* System for Electricity Energy Production

A laboratory-scale of *Microbial Fuel Cell* carried out in order to determine the capacity and efficiency of electricity production in microbial fuel cell systems by using microorganisms. The medium used is an isolate culture of *Saccharomces cereviciae*. A number of media evaluated its capacity to provide the best growth phase for *Saccharomces cereviciae* using *Optical Density* method with spectrophotometer at a wavelength of 550 nm. *Proton Exchange Membrane* used was kind of Nafion 117, Lynctech, USA. Electrodes are used as electron mediator in both anode and cathode compartment either, a graphite electrode in the vessel volume of $5 \times 10^{-2} \text{ m}^3$. While in the cathode compartment is a mixture of electrolyte compounds $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ and a buffer solution. Microbes that have been cultured to be applied into the reactor *Microbial Fuel Cell* for reading ability in generating electrical energy by applying it to the electric system is a digital multimeter (microammeter) with connecting cable along the $3.0 \times 10^{-1} \text{ m}$. Electrons flow through a graphite covering $1,46 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ to measure the large currents and voltage. A number of factors need to be controlled so that microbes can generate electrical energy efficiently, such as by measuring the degree of acidity and the DO in the anode compartment. From the results of MFC research, obtained by electrical efficiency of 53.90% for the comparison between receipts and without riboflavin as a mediator. While the addition of vegetable oil into the MFC system produces the optimum value of 189 μA . In addition, in this study shows that vegetable oils are added during inoculation of *Saccharomyces cerevisiae*, is proven to increase levels of riboflavin up to 42.19% after 35 hours incubation process.

Keywords : *Microbial Fuel Cell*, *Riboflavin*, *Saccharomyces cerevisiae*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
ABSTRAK	vi
ABTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Perumusan Masalah	2
1.3.Tujuan Penelitian	3
1.4.Batasan Waktu	3
1.5.Tempat dan Waktu	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Fuel Cell.....	4
2.2.Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	6
2.3. Proton Exchange Membrane Biogolycal Fuel Cell (PEMBFC).....	7
2.4. Microbial Fuel Cell.....	10
2.4.1. Jenis-jenis MFC Berdasarkan Rancang Reaktor.	11
2.4.2. Kompartemen Anoda MFC.....	16
2.4.3. Kompartemen Katoda MFC.....	17
2.4.4. Reaksi di Kompartemen Anoda dan Katoda.....	17
2.4.5. Riboflavin.....	18
2.4.6. Minyak Kelapa Sawit.....	21

2.5. Mikroorganisme Uji.....	23
2.6. Kurva Pertumbuhan.....	25
2.7. Metabolisme <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	26
2.8. Media Pertumbuhan.....	27
2.9. Analisis Spektrofotometri.....	27
2.10. <i>State of The Art</i>	28
BAB III METODELOGI PENELITIAN	34
3.1. Diagram Alir Penelitian	34
3.2. Alat dan Bahan	36
3.2.1. Peralatan.....	36
3.2.2. Bahan.....	37
3.3. Prosedur Penelitian	38
3.3.1. Preparasi Awal	38
3.3.2. Pra Eksperimen MFC.....	39
3.3.3. Eksperimen MFC	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	4
4.1. Desain MFC	43
4.2. Kurva Pertumbuhan <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	45
4.3. Pengaruh Parameter Fisik dan Kimia terhadap Kultur <i>S. cerevisiae</i>	48
4.4. Pengukuran Arus Listrik dan Tegangan pada Variasi Volume Suspensi Anoda.....	49
4.5. Pengukuran Arus Listrik dan Tegangan pada Variasi Konsentrasi Riboflavin ...	54
4.6. Pengujian MFC dengan penambahan Minyak Nabati... ..	55
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	58
5.1. Kesimpulan	58
5.2. Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA.....	60
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR GAMBAR

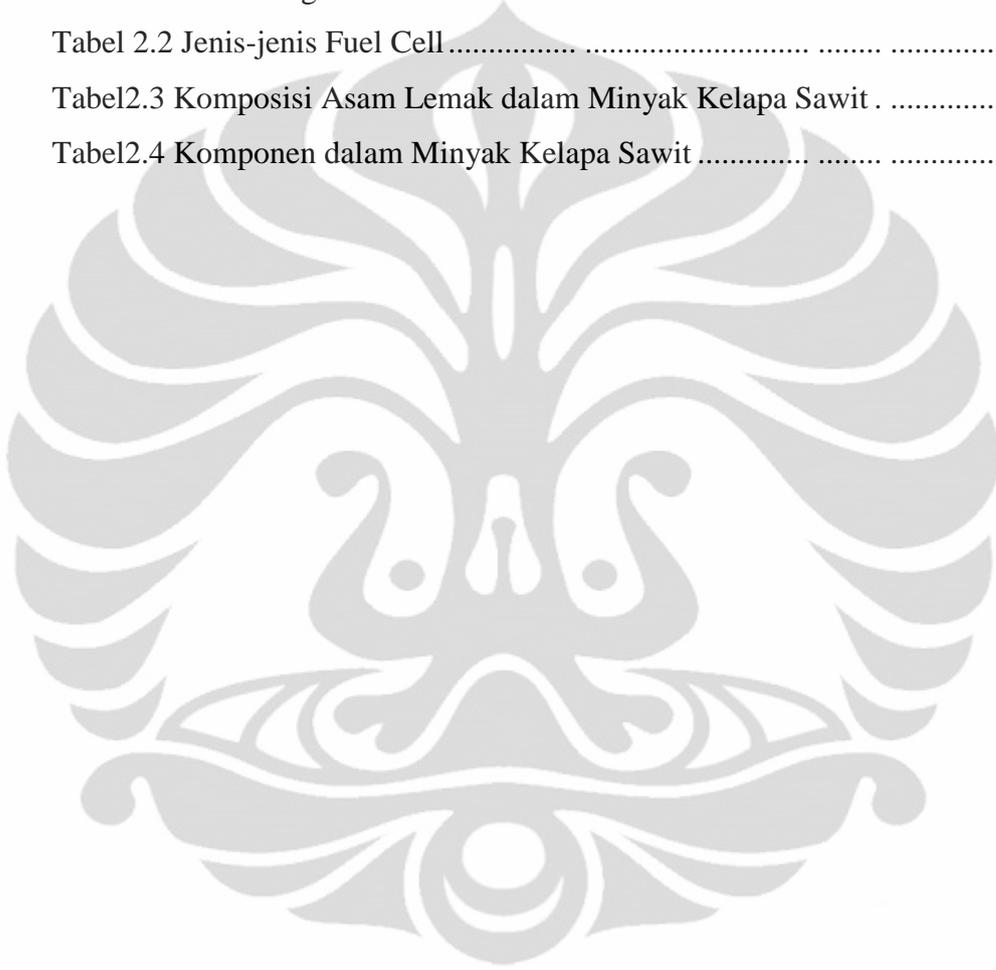
Gambar 2.1 Prinsip Kerja Fuel Cell.....	5
Gambar 2.2 Prinsip kerja sistem MFC.....	11
Gambar 2.3 Desain MFC bioreaktor dibuat terpisah dari fuel cell.....	12
Gambar 2.4 Desain MFC dengan mikroba ditambahkan pada permukaan elektroda di kompartemen anoda.....	13
Gambar 2.5 Desain MFC dengan Mediator transfer elektron di kompartemen anoda mikroba ditambahkan pada permukaan elektroda di kompartemen anoda.....	14
Gambar 2.6 Desain MFC tanpa mediator transfer elektron.....	15
Gambar 2.7 Struktur Kimia Riboflavin.....	19
Gambar 2.8 Struktur Kimia FAD dan FMN.....	20
Gambar 2.9 <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	24
Gambar 2.10 Fase Pertumbuhan mikroorganisme.....	25
Gambar 2.11 Skema Cara Kerja Spektrofotometer.....	28
Gambar 2.12 Mapping State of The Art.....	33
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Microbial Fuel Cell.....	34
Gambar 4.1 Desain Reaktor MFC dan Elektroda Grafit.....	43
Gambar 4.2 Kurva Pertumbuhan <i>Saccharomyces cerevisiae</i> pada Berbagai Macam Medium.....	46
Gambar 4.3 Grafik Pertumbuhan Kurva <i>Saccharomyces cerevisiae</i> pada Berbagai Media Medium (Tonggo, 2006).....	47
Pertumbuhan <i>Saccharomyces cerevisiae</i> pada Media GYE 51	
Gambar 4.4 Grafik Pengukuran Nilai <i>Optical Density</i> selama 40 jam dengan Menggunakan Media GYE.....	48
Gambar 4.5 Grafik Pengukuran Arus Listrik yang Dilakukan pada Fase Eksponensial.....	49
Gambar 4.6 Grafik Pengukuran Arus Listrik pada Variasi Volume Suspensi Anoda.....	50
Gambar 4.7 Grafik Pengukuran Arus Listrik (Tonggo, 2006).....	51

Gambar 4.8 Grafik Pengukuran Tegangan Listrik pada Variasi Volume Suspensi Anoda.....	51
Gambar 4.9 Grafik Pengukuran Tegangan Listrik (Tonggo, 2006).....	52
Gambar 4.10 Grafik Pengukuran Arus Listrik pada Variasi Konsentrasi Riboflavin	55
Gambar 4.11 Grafik Pengukuran Arus Listrik pada Variasi Konsentrasi Riboflavin	57
Gambar 4.12 Grafik Pengukuran Kuat Arus pada Penambahan Riboflavin dengan Konsentrasi Sebesar 225 nM (Marsili et.,al 2008).....	55
Gambar 4.13 Grafik Hasil Pengukuran MFC dengan Penambahan M. Nabati	52



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Persentase Penggunaan Sumber Daya Alam	1
Tabel 2.1 Pebandingan Kondisi dalam Sistem Fuel Cell Kimiawi dan Biologis.....	8
Tabel 2.2 Jenis-jenis Fuel Cell.....	9
Tabel 2.3 Komposisi Asam Lemak dalam Minyak Kelapa Sawit .	22
Tabel 2.4 Komponen dalam Minyak Kelapa Sawit	22



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Energi merupakan suatu kebutuhan yang sangat dasar untuk kelangsungan hidup manusia. Persentase penggunaan energi di Indonesia setara dengan penggunaan energi di dunia yakni semakin meningkat seiring dengan pesatnya pertumbuhan penduduk, perekonomian dan juga perkembangan teknologi. Oleh karena itu, ketersediaan energi telah menjadi landasan pembahasan yang sangat fundamental di hampir seluruh kalangan pada saat ini. Hal ini menjadi sangatlah penting, mengingat sumber daya alam yang digunakan sebagai bahan dasar penghasil energi, tidak dapat diperbaharui. Hal tersebut dibuktikan dengan data penggunaan sumber daya alam sebagai bahan penghasil energi pada tahun 2006, berdasarkan pemakaian *energy mix* di Indonesia dalam Tabel 1.1 berikut ini :

Tabel 1.1 Persentase Penggunaan Sumber Daya Alam

Sumber Daya Alam	Persentase Penggunaan (%)
Minyak bumi	51.66
Gas bumi	28.57
Batu bara	15.34
Tenaga air	3.11
Panas bumi	1.32
Renewable source	0.2

Sumber : Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM)

Berdasarkan sumber energi, bentuk listrik merupakan energi yang paling praktis digunakan, namun konversi teknologi pembakaran dan *gasification* yang biasa digunakan dalam pembangkit listrik berdampak terhadap penipisan cadangan bahan bakar fosil dan peningkatan jumlah CO₂ di atmosfer, sedangkan konversi dari biogas menjadi listrik memiliki efisiensi yang rendah, yaitu kurang

dari 40% (Rittmann et al, 2008). Hal tersebutlah yang melandasi berbagai penelitian untuk mencari peluang terciptanya sumber energi yang terbaharukan melalui penemuan teknologi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan (*sustainable technology*).

Berbagai penelitian telah dilakukan oleh banyak peneliti dari seluruh dunia, salah satu diantaranya adalah pembuatan *Microbial Fuel Cell*. *Microbial Fuel Cells* (MFC) merupakan suatu alat yang menggunakan bakteri dalam menghasilkan tenaga listrik dari senyawa organik maupun non organik. Alat MFC sama seperti fuel cell biasa yang tersusun atas anoda, katoda dan elektrolit. Namun, pada *Microbial Fuel Cell* (MFC) sebagai komponen anoda digunakan kultur mikroba dalam hal ini aktivitas metabolisme mikroba (misalnya konsorsium mikroba yang mengoksidasi substrat organik seperti glukosa). Prinsip dalam MFC adalah aktivitas mikroba dalam medium cair tersebut. Aktivitas mikroba dapat menghasilkan komponen organik yang mengandung unsur hidrogen seperti etanol, metanol, maupun gas metan yang dapat digunakan untuk menghasilkan elektron dan arus listrik. Dalam penelitian ini akan digunakan bakteri *Saccharomyces cerevisiae* dan dilakukan penambahan mediator electron berupa riboflavin ke dalam kompartemen anoda untuk meningkatkan kapasitas bakteri dalam menghasilkan energi listrik.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan sebelumnya, maka dapat dirumuskan permasalahan yang ada sebagai berikut :

1. Bagaimana potensi bakteri *Saccharomyces cerevisiae* dalam menghasilkan energi listrik jika dikembangkan pada medium terpilih.
2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi mikroba dalam kompartemen anoda terhadap energi listrik yang dihasilkan.
3. Bagaimana pengaruh penambahan riboflavin, sebagai mediator elektron, ke dalam kompartemen anoda terhadap energi listrik yang dihasilkan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Mengkaji potensi *Saccharomyces cerevisiae* dalam menghasilkan energi listrik jika dikembangbiakkan pada medium terpilih.
2. Mengkaji pengaruh penambahan riboflavin ke dalam kompartemen anoda terhadap energi listrik yang dihasilkan.

1.4 Batasan Penelitian

Dalam penelitian ini, pembatasan terhadap masalah yang akan dibahas adalah sebagai berikut :

1. Reaktor yang digunakan dalam sistem MFC ini adalah reaktor *dual-chamber*.
2. Kultur mikroba yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Scharomyces cerevisiae*.
3. Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis elektroda grafit dengan luas permukaan sebesar $1,46 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.
4. Proton penukar ion yang digunakan adalah jenis Nafion 117, Lynteh, Amerika.
5. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan peralatan dalam skala kecil.

1.5 Tempat dan Waktu

Tempat : Laboratorium Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok.

Waktu : September – Desember 2010.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Fuel Cell*

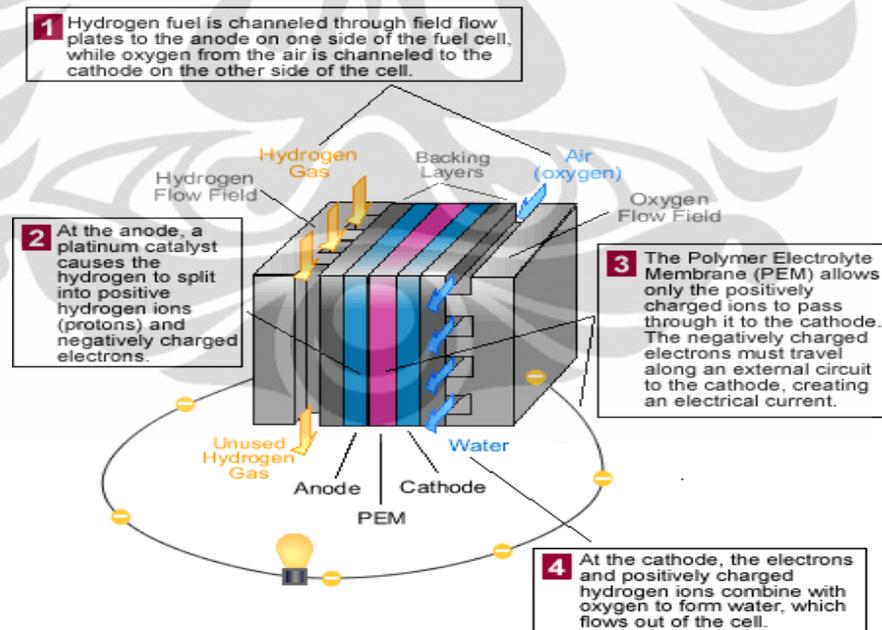
Fuel cell merupakan teknologi elektrokimia yang secara kontinyu mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik selama terdapat bahan bakar dan pengoksidan (Shukla *et al.* 2004). *Fuel cell* tersusun atas anoda, katoda dan elektrolit (membran). Anoda berperan sebagai tempat terjadinya pemecahan hidrogen (H_2) menjadi proton dan elektron (listrik). Katoda berperan sebagai tempat terjadinya reaksi penggabungan proton, elektron dan oksigen untuk membentuk air. Elektrolit adalah media untuk mengalirkan proton. Pada *fuel cells* berbahan bakar hidrogen, ketika molekul hidrogen melakukan kontak dengan anoda, molekul tersebut terpisah menjadi ion hidrogen dan elektron. Elektron mengalir melalui sirkuit luar menuju katoda, menimbulkan aliran listrik. Ion hidrogen melewati elektrolit (membran) juga menuju katoda, lalu bergabung dengan elektron dan oksigen dari udara membentuk molekul air (hondacorporate.com, 2006).

Fuel Cell ditemukan oleh Francis Bacon (1904-1992), lulusan Cambridge University berkebangsaan Inggris. Bacon memulai penelitiannya sejak tahun 1930 dan menemukan fuel cell yang menggunakan elektrolit basa (KOH), yang kemudian disebut *alkaline fuel cell* (fuel cell tipe basa). Pada tahun 1950-an, Perusahaan Amerika, General Electric (GE) berhasil mengembangkan fuel cell tipe baru, dengan membran polimer sebagai elektrolitnya, yang kemudian disebut PEMFC. PEMFC yang ditemukan oleh GE mampu menghasilkan daya sekitar 1 Kwatt dan memiliki keunggulan pada desain yang lebih *compact* bila dibandingkan fuel cell yang ditemukan oleh F.Bacon pada saat itu.

Fuel cell mulai mendapat perhatian ketika NASA menggunakan fuel cell buatan GE sebagai sumber energi pada komputer dan alat komunikasinya pada tahun 1965. Tahun 1969, saat Neil Amstrong berhasil menginjakkan kaki di bulan dengan pesawat Appolo 11, di dalam pesawat itu telah terpasang fuel cell, yaitu alkaline fuel

cell yang dayanya lebih besar dibanding buatan GE. *Alkaline fuel cell* digunakan pada *space shuttle* sebagai sumber listrik di dalam pesawat luar angkasa dan sumber air minum hingga saat ini. Namun, *alkaline fuel cell* yang digunakan harus menggunakan air dan oksigen dengan tingkat kemurnian tinggi, sehingga belum dapat diterapkan selain untuk pengembangan eksplorasi luar angkasa.

Ada berbagai macam *fuel cell* yang telah digunakan dan dikembangkan saat ini. Setiap jenis *fuel cell* membutuhkan bahan bakar yang berbeda. *Fuel cell* berbasis biologi memiliki konsep yang sangat berbeda dengan *fuel cell* pada umumnya. *Fuel cell* berbasis biologi menggunakan biokatalis untuk mengonversi bahan kimia menjadi energi listrik. *Fuel cell* ini dibagi menjadi dua kategori, yaitu *microbial fuel cell* (MFC) dan *enzim fuel cell* (Kordesch dan Simader 2001). Tidak seperti *fuel cell* dengan bahan kimia, *fuel cell* berbasis biologi dioperasikan pada kondisi lunak, yaitu pada suhu dan tekanan lingkungan (Logan et al, 2008). Prinsip kerja *Fuel Cell* dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah ini :



Gambar 2.1 Prinsip Kerja *Fuel Cell* (O'Hayre, 2006)

Hingga saat ini, telah muncul berbagai macam jenis *fuel cell*. Berdasarkan perbedaan elektrolit, *fuel cell* dapat dibagi menjadi empat tipe. Keempat tipe tersebut berbeda pada suhu dan skala energi yg dihasilkan. Keempat tipe tersebut erbagi lagi

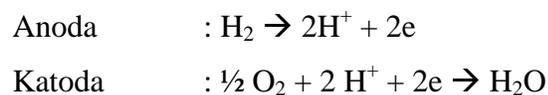
menjadi 2, yaitu yang bekerja pada suhu tinggi (dua tipe) dan pada suhu rendah (dua tipe), diantaranya adalah adalah MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell), SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) dan PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell).

2.2 *Proton Exchange Membran Fuel Cell (PEMFC)*

PEMFC adalah sel bahan bakar yang menggunakan membran polimer sebagai elektrolitnya. Sel ini beroperasi pada suhu relatif rendah (di bawah 80 °C), dengan kerapatan daya yang cukup tinggi (50-250 kW), dan efisiensi sekitar 40-50%. Karena sifat-sifat ini maka PMFC banyak digunakan sebagai sumber daya bagi alat-alat elektronik portable dan alat transportasi.

Membran polimer merupakan komponen yang sangat penting dalam PEMFC mengingat peran komponen ini dalam memisahkan reaktan dan menjadi sarana transportasi ion hidrogen yang dihasilkan oleh reaksi di anoda menuju ke katoda. Ketebalan membran hanya beberapa mikrometer saja.

Prinsip kerja dari PEMFC ini adalah gas H₂ dialirkan ke dalam bagian anoda fuel cell sedangkan gas O₂ dialirkan ke dalam bagian katoda. Namun gas hidrogen dan oksigen ini tidak akan bercampur karena adanya membran. Gas hidrogen dipecah menjadi proton dan elektron, dimana proton akan mengalir melalui membran (PEM/*Proton Exchange Membrane*) menuju ke katoda, sedangkan elektron tidak dapat melewati PEM sehingga seluruh elektron akan menumpuk di anoda dan seluruh proton akan menumpuk di katoda. Adanya penghantar arus listrik berupa platina (Pt) menyebabkan elektron dapat mengalir dari anoda ke katoda, sehingga pertemuan kedua ion positif dan ion negatif tersebut dapat menghasilkan arus listrik yang akan diukur besar arusnya melalui suatu rangkaian penukur arus yang dirancang sebagai output dari sistem fuel cell. Persamaan reaksi yang terjadi pada anoda dan katoda dapat ditulis sebagai berikut :



Jenis fuel cell biasanya ditentukan oleh material yang digunakan sebagai elektrolitnya yang mampu menghantarkan proton, diantaranya adalah :

- Alkaline (AFC)
- Proton Exchange Membrane (PEM)
- Phosforic Acid (PAFC)
- Molten Carbonate (MCFC)
- Solid Oxide (SOFC)
- Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)

Saat ini membran yang digunakan terbuat dari fluoro polimer dengan rantai cabang yang mengandung gugus asam sulfonat. Fluoro polimer dimaksud adalah politetrafluoroetilen (PTFE) dan dikenal dengan nama dagang Nafion[®] dalam memisahkan reaktana dan menghantarkan proton sudah terbukti sangat efisien tetapi harganya cukup mahal.

2.3 Proton Exchange Membran Biological Fuel Cell (PEMBFC)

PEMBFC merupakan peralatan yang langsung mengubah sumber bahan bakar dengan mengkonversi energi biokimia menjadi energi listrik melalui proses metabolisme mikroba yang melibatkan sistem enzim. Energi penggerak biofuel cell adalah reaksi redoks dari substrat karbohidrat seperti glukosa. Energi kimia dapat diubah menjadi energi listrik dengan adanya pasangan reaksi oksidasi substrat dengan reaksi reduksi suatu oksidator pada permukaan antara anoda dan katoda. Adanya perbedaan potensial oksidasi pada kedua elektroda menyebabkan elektron dapat mengalir dari anoda ke katoda.

Perbedaan utama dari biofuel cell dengan fuel cell adalah pada penggunaan katalisnya, dimana pada biofuel cell tidak menggunakan logam mulia dan kondisi operasi dapat dilakukan pada larutan netral dan pada suhu kamar. Sebagai contoh, oksidasi sempurna dari 1 gram metanol dengan bantuan enzim, secara teoritis menghasilkan 5000mAh. Oksidasi sempurna 1 mol glukosa akan melepaskan 24 mol e⁻, seperti pada reaksi di bawah ini:



Oleh karena itu, muatan sebesar $2,32 \times 10^6$ C/mol glukosa berpotensi untuk disambungkan melalui sirkuit elektronik. Besarnya arus yang dihasilkan dalam biofuel cell ini sangat tergantung pada besarnya angka metabolisme dan efisiensi transfer elektron menuju katoda.

Secara ekonomis, PEMBFC merupakan sistem yang relatif lebih murah dan ramah lingkungan. Keunggulan sistem ini dibandingkan dengan Fuel Cell kimia lain meliputi temperatur operasional yang sedang, tidak memerlukan katalis yang mahal, pemakaian mikroorganisme yang mudah diperoleh dan penggunaan larutan elektrolit yang tidak korosif.

Pada perkembangan selanjutnya, PEMBFC dibagi menjadi dua macam yaitu *Microbial Fuel Cell* (MFC) dan *Enzymtic Fuel Cell* (EFC). MFC memanfaatkan sel mikroorganisme sedangkan EFC memanfaatkan biomolekul enzim pada proses konversi bahan bakar menjadi energi listrik. MFC jauh lebih praktis dibandingkan dengan EFC, karena pada MFC sel utuh mikroorganisme digunakan tanpa harus mengisolasi enzim terlebih dahulu (Shukla et.,al 2004). Berikut merupakan Tabel 2.1 yang berisi tentang perbandingan kondisi antara Fuel Cell Kimiawi dan Fuel Cell Biologis

Tabel. 2.1 Perbandingan Kondisi dalam Sistem Fuel Cell Kimiawi dan dan Fuel Cell Biologis (Bruce et.,al, 2006)

Kondisi Operasi	Fuel Cell Kimiawi	Fuell Cell Biologis
Katalis	Logam Mulia	Mikroorganisme/Enzim
pH	Larutan asam (pH < 1)	Larutan netral (pH 7-9)
Temperatur	>200 °C	22-25 °C
Elektrolit	Asam fosfat	Larutan fosfat
Kapasitas	Tinggi	Rendah
Efisiensi	40-60 %	>40 %
Tipe Bahan Bakar	Gas Alam	Karbohidrat dan hidrokarbon

Sedangkan Tabel di bawah ini merupakan Tabel 2.2 yang berisi tentang perbandingan jenis-jenis fuel cell :

Tabel 2.2 Jenis-jenis fuel cell (Sumber : wikipedia.org/wiki/Microbialfuelcell)

No.	Jenis fuel cell (FC)	Elektrolit	Suhu (°C) *)	Efisiensi listrik (%) *)
1.	<i>Metal hydride</i> FC	Larutan Alkali (potasium hidroksida)	>-20	Belum diketahui
2.	<i>Elektro galvanic</i> FC	Larutan Alkali (potasium hidroksida)	<40	Belum diketahui
3.	<i>Zinc-air battery</i>	Larutan Alkali (potasium hidroksida)	<40	Belum diketahui
4.	<i>Microbial</i> FC	Membran polimer (humic acid)	<40	Belum diketahui
5.	<i>Reversible</i> FC	Membran polimer (ionomer)	<50	Belum diketahui
6.	<i>Direct borohydride</i> FC	Larutan Alkali (sodium hidroksida)	70	Belum diketahui
7.	<i>Alkaline</i> FC	Larutan Alkali (potasium hidroksida)	<80	Sel : 60-70
8.	<i>Direct-methanol</i> FC, energi = 1mW-100kW	Membran polimer (ionomer)	90-120	Sel : 20-30 Sistem : 10-20
9.	<i>Reformed- methanol</i> FC, Energi =5-100kW	Membran polimer (ionomer)	125-300	Sel : 50-60 Sistem : 25-40
10.	<i>Direct-ethanol</i> FC Energi 140mW/cm ²	Membran polimer (ionomer)	>25, 90-120	Belum diketahui
11.	<i>Formic acid</i> FC	Polimer	90-120	
12.	<i>Proton Exchange Membran</i> FC energi = 100W-500kW	Membran Polimer (ionomer) (Nafion®/Polybenzimidazole fiber)	Nafion : 70-120	Sel : 50-70 Sistem : 30-50
13.	<i>RFC-Redox</i> energi = 1 kW-10MW	Liquidelectrolytes with redox shuttle & polymer membrane (ionomer)	Belum diketahui	Belum diketahui
14.	<i>Phosphoric-acid</i> FC, energi hingga 10 MW	Molten phosphoric acid (H ₃ PO ₄)	150-200	Sel : 55 Sistem 40
15.	<i>Molten-carbonate</i> FC, energi = 100 MW	<i>Molten alkaline carbonate</i> (sodium bicarbonate NaHCO ₃)	600-650	Sel : 55 Sistem : 47
16.	<i>Proton-conducting ceramic</i> FC	H ⁺ -conducting ceramic oxide	700	Belum diketahui
17.	<i>Direct carbon</i> FC	-	750-850	70 - 80
18.	Solid oxide FC, energi hingga 100MW	O ₂ ⁻ conducting ceramic oxide (zirconium dioxyd, ZrO ₂)	700-1000	Sel : 60-65 Sistem : 55-60

*) Keterangan :

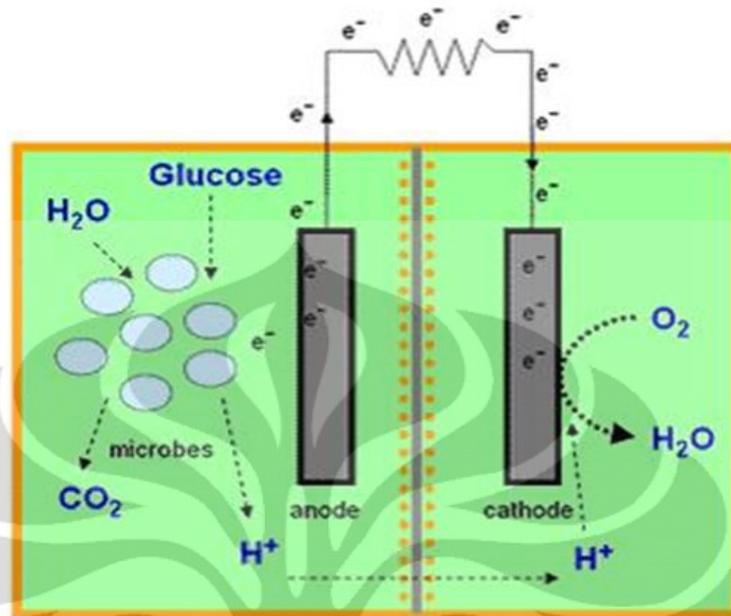
Suhu : suhu yang diperlukan dalam menjalankan sistem tersebut

Efisiensi listrik : persentase energi listrik yang dihasilkan dari suatu sel atau sistem

2.4 *Microbial Fuel Cell*

Microbial fuel cell (MFC) merupakan salah satu cara untuk memproduksi energi secara berkesinambungan dalam bentuk listrik dari bahan-bahan yang dapat didegradasi. MFC adalah alat untuk mengonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan reaksi katalitik dari mikroorganisme (Allan dan Benneto 1993). MFC membangkitkan listrik dengan mengoksidasi bahan organik secara anaerob melalui bantuan mikroorganisme. Aktivitas katalitik dan transfer proton dilakukan dengan menggunakan enzim atau tambahan mediator (Kordesch dan Simader 2001). Dalam MFC, yang dapat digunakan sebagai donor elektron adalah zat hasil metabolisme mikroba atau elektron yang dilepaskan mikroba saat melakukan metabolismenya. Zat hasil metabolisme mikroba umumnya merupakan senyawa yang mengandung hidrogen, seperti etanol, metanol, atau gas metan. Senyawa ini dapat digunakan sebagai sumber hidrogen melalui serangkaian proses dalam reformer untuk memproduksi elektron dan menghasilkan arus listrik. Setiap aktivitas metabolisme yang dilakukan mikroba umumnya melibatkan pelepasan elektron bebas ke medium (Madigan *et al.*, 1997). Elektron ini dapat dimanfaatkan langsung pada anoda dalam MFC untuk menghasilkan arus listrik. Cara ini lebih mudah daripada mengolah senyawa yang mengandung hidrogen menjadi hidrogen murni lebih dulu.

Pada dasarnya, berbagai bentuk bahan organik dapat digunakan sebagai substrat dalam *microbial fuel cell*, seperti glukosa (Liu dan Logan 2004), pati (Min dan Logan 2004), asam lemak (Liu *et al.* 2005), asam amino dan protein (Logan *et al.* 2005), dan air limbah dari manusia dan hewan (Liu *et al.* 2004). Secara umum mekanisme prosesnya adalah substrat dioksidasi oleh bakteri menghasilkan elektron dan proton pada anoda. Elektron ditransfer melalui sirkuit eksternal, sedangkan proton didifusikan melalui larutan menuju katoda. Pada katoda, reaksi elektron dan proton terhadap oksigen akan menghasilkan air (Cheng *et al.* 2006). Berikut merupakan Gambar 2.5 yang berisi tentang prinsip kerja *Microbial fuel cell*.

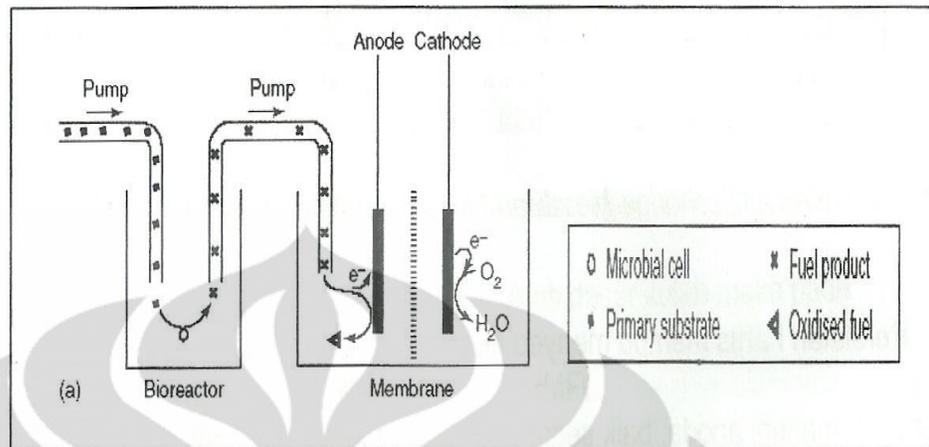


Gambar 2.2 Prinsip kerja sistem MFC (Liu et.,al 2005)

2.4.1 Jenis-jenis Microbial Fuel Cell Berdasarkan Rancangan Bioreaktornya

2.4.1.1 Microbial Fuel Cell dengan biorekator dibuat terpisah dari fuel cell

Prinsip dari cara ini adalah mengubah karbohidrat menjadi hidrogen yang diperantai oleh sistem multienzim bakteri. Pada tipe ini digunakan Hydrogen-Oxygen Fuel Cell yang dihubungkan dengan bioreaktor pengasil hidrogen (H₂), yaitu kultur bakteri. Hidrogen yang terbentuk pada bioreaktor kemudian dialirkan menuju ke kompartemen anoda dan akan digunakan sebagai bahan bakar. Oksidasi hidrogen (H₂) di anoda akan membentuk elektron yang akan dibawa menuju katoda, sedangkan proton akan ditransfer melewati Proton Exchange Membran (PEM) menuju ke kompartemen katoda. Bila terdapat supply oksigen di katoda, elektron akan bereaksi dengan oksigen dan ion H⁺ membentuk air (H₂O).

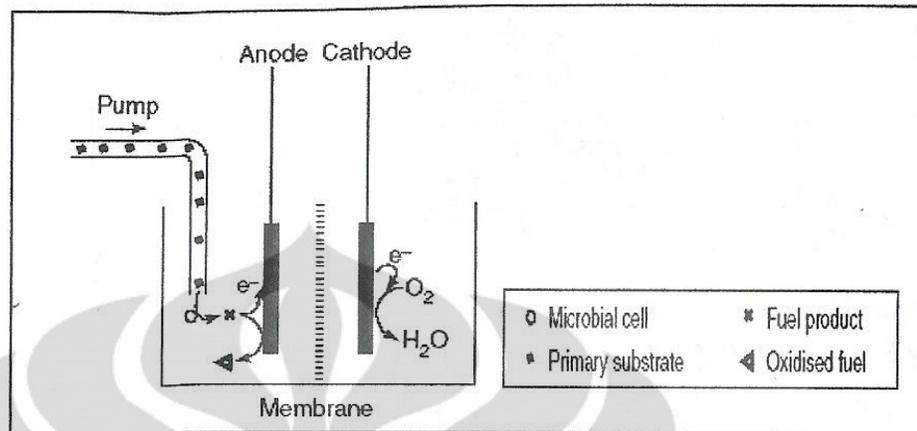


Gambar 2.3 Desain MFC biorekator dibuat terpisah dari fuel cell

2.4.1.2 Microbial Fuel Cell dengan mikroba ditambatkan pada permukaan elektroda di kompartemen anoda

Dari proses fermentasi substrat seperti glukosa yang terjadi pada permukaan elektroda, sel mikroba memproduksi gas H_2 yang akan digunakan sebagai bahan bakar. Selain dari glukosa, produksi H_2 juga dapat diperoleh dengan menggunakan produk samping hasil fermentasi mikroba seperti asam format, asam asetat dan asam laktat.

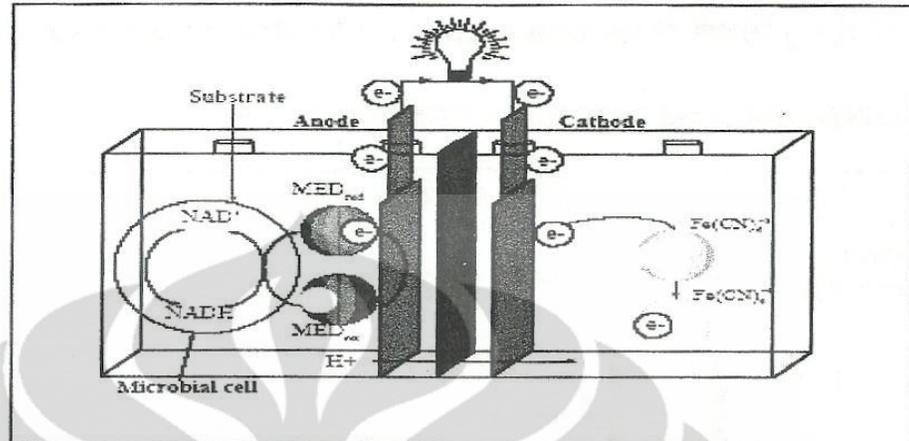
Asam format dan metabolit yang mengandung sulfur juga dapat diproduksi selama proses fermentasi laktat. *Desulfovibriodesulfuricans* adalah bakteri yang telah diketahui mampu mereduksi sulfat hingga dapat juga dimanfaatkan sebagai penghasil listrik (Vielstich et.,al 2003).



Gambar 2.4 Desain MFC dengan mikroba ditambatkan pada permukaan elektroda di kompartemen anoda

2.4.1.3 Microbial Fuel Cell dengan mediator transfer elektron di kompartemen anoda

Pada tipe ini, bioreaktor berada di kompartemen anoda. Spesies tereduksi hasil metabolisme sel mikroba yang bertanggung jawab atas aktivitas redoks tersimpan di dalam gugus prostetik dan dibatasi oleh membran sel, sehingga hanya sedikit elektron yang dapat ditransfer menuju permukaan elektroda. Akibatnya aliran listrik antara sel dan permukaan elektroda berlangsung sangat lemah. Agar dapat terjadi kontak antara sel mikroba dan permukaan elektroda, dibutuhkan spesi elektroaktif (mediator) yang akan membantu mentransfer elektron dari sel bakteri menuju permukaan elektroda.



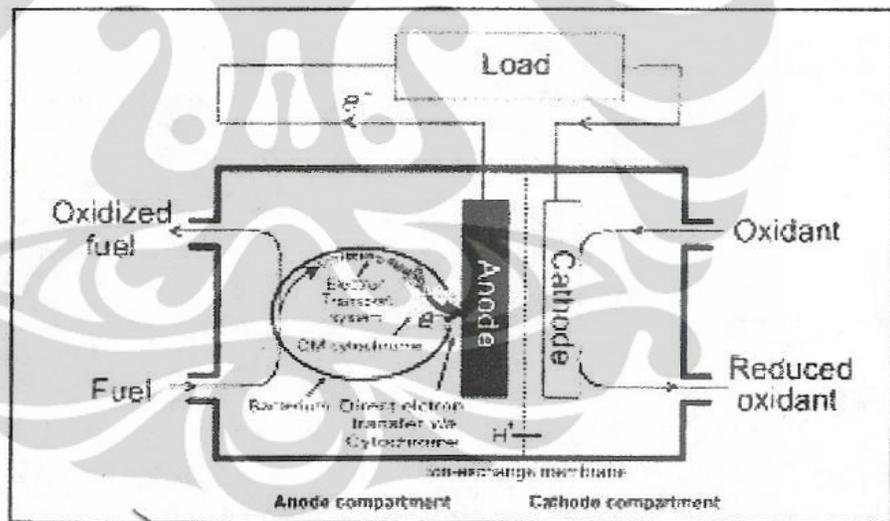
Gambar 2.5 Desain MFC dengan mediator transfer elektron di kompartemen anoda

Mediator kimia seperti merah netral, metilen biru, atau antar quinon 2,6-disulfonat (AQDS) dapat ditambahkan ke dalam sistem untuk memberikan kesempatan pada bakteri yang tidak dapat langsung mentransfer elektron ke elektroda untuk menghasilkan arus listrik. Jika tidak ada mediator luar yang ditambahkan ke dalam sistem, MFC ini dikelompokkan sebagai MC tanpa mediator (mediatorless), walaupun mekanisme transfer elektronnya belum dapat diketahui.

Berdasarkan data yang ada, para peneliti berkeyakinan akan banyak ditemukan banyak bakteri baru yang dapat melakukan transfer elektron langsung ke anoda (anodophilic). Sementara itu penelitian lain menunjukkan bahwa *Pseudomonas aureginosa* mampu memproduksi senyawa pentransfer elektron yang dapat digunakan oleh dirinya sendiri dan bakteri lain untuk meningkatkan produksi listrik dalam sistem MFC (Masuda et., al 2010).

2.4.1.4 Microbial Fuel Cell tanpa menggunakan mediator transfer elektron.

Tipe ini digunakan pada mikroba yang memiliki sitokrom pada membran luarnya sehingga mampu mereduksi logam dan dapat berkomunikasi secara elektrik dengan permukaan elektroda. Mikroorganisme pereduksi Fe (III) diketahui mempunyai spesi elektroaktif pada membran luarnya sehingga mampu mentransfer elektron langsung ke elektroda tanpa difasilitasi oleh mediator. *Shewanella putrefciens*, *Rhodoferrax ferrireducens*, dan mikroorganisme dari famili Geobacteraceae merupakan mikroba yang pertama kali diketahui mampu mentransfer elektron ke permukaan elektroda tanpa menggunakan mediator (Logan, Bruce et., al 2006).



Gambar 2.6 Desain MFC tanpa mediator transfer elektron.

Pada keempat cara tersebut, elektron yang mencapai katoda berkombinasi dengan proton yang berdifusi dari anoda melalui sebuah membran penukar proton dan oksigen dari udara, menghasilkan air. Pengoksidasi kimia, seperti ferrisianida atau Mn (IV), dapat digunakan meskipun keduanya harus selalu diganti atau diregenerasi. Pada kasus

ion logam, seperti Mn yang direduksi dari Mn (IV) ke Mn(II), bakteri dapat membantu untuk mengkatalis reoksidasi logam menggunakan oksigen terlarut. Pelepasan elektron yang dikatalis oleh mikroba pada anoda serta penggunaan elektron berturut-turut pada katoda merupakan karakteristik dasar semua MFC.

2.4.2 Kompartemen Anoda MFC

Material anoda harus bersifat konduktif, *biocompatible* (sesuai dengan makhluk hidup), dan secara kimia stabil di dalam larutan bioreaktor. Logam anoda dapat berupa *stainless steel* nonkorosif, tetapi tembaga tidak dapat digunakan akibat adanya toksisitas ion tembaga pada bakteri. Material elektroda yang paling bermanfaat adalah karbon, dalam bentuk lempeng grafit (padat, batang, atau granula), dalam bentuk material *fiber*/berserat, dan dalam bentuk *glass carbon*.

Dari ketiga bentuk karbon, lempengan atau batang grafit banyak dipakai karena relatif murah, sederhana, dan memiliki luas permukaan tertentu. Area permukaan yang lebih luas diberikan oleh elektroda lempeng grafit ($0,47 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, seri GF, GEE Graphite Limited, Dewsbury, UK). Tetapi tidak semua area permukaan yang terindikasi dapat digunakan oleh bakteri (Logan, Bruce et., al 2006).

Karbon aktif adalah karbon dengan struktur amorphous atau monokristalin yang telah melalui perlakuan khusus sehingga memiliki luas permukaan yang sangat besar ($300\text{-}2000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$). Karakteristik karbon yang ideal adalah pada rentang pH antara 5-6 ($50\text{g/L H}_2\text{O}$, 20°C), titik leleh 3800°C , dan ukuran partikel $\leq 50 \mu\text{m}$. Resin perekat berguna untuk merekatkan karbon aktif sehingga memiliki struktur yang kuat dan tidak rapuh selama MFC dioperasikan. Resin perekat ini digunakan karena memiliki konduktivitas yang rendah yaitu $10^{-10}/\Omega\cdot\text{m} - 10^{-15}/\Omega\cdot\text{m}$.

2.4.3 Kompartemen Katoda MFC

Dilihat dari kinerjanya, kalium ferrisianida ($K_3[Fe(CN)_6]$) dikenal sangat baik sebagai aseptor elektron dalam sistem MFC. $K_3[Fe(CN)_6]$ merupakan spesies elektroaktif yang mampu menangkap elektron dengan baik dengan harga potensial reduksi standar sebesar + 0.36 V.

Keuntungan terbesar dalam penggunaan kalium ferrisianida adalah dihasilkannya overpotensial yang rendah bila menggunakan katoda karbon. Akan tetapi kerugian terbesar adalah terjadinya proses reoksidasi yang tidak sempurna oleh oksigen sehingga larutannya harus diganti secara teratur. Kinerja jangka panjang ferrisianida dalam sistem MFC sangat dipengaruhi oleh efisiensi difusinya melewati PEM menuju ruang katoda (Logan, Bruce and Regan, John M 2006).

2.4.4 Reaksi di Kompartemen Anoda dan Katoda

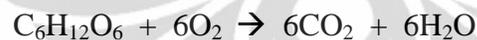
Prinsip penggunaan MFC ini erat berhubungan dengan proses biokimia yang terjadi dengan melibatkan mikroba yang disebut glikolisis, siklus asam sitrat, dan rantai transfer elektron.

Glikolisis adalah suatu proses penguraian molekul glukosa yang memiliki enam atom karbon, secara enzimatik untuk menghasilkan dua molekul piruvat yang memiliki tiga atom karbon. Selama reaksi-reaksi glikolisis yang berurutan banyak energi bebas yang diberikan oleh glukosa yang disimpan dalam bentuk ATP.

Mediator elektron berperan selama proses transportasi elektron, membawa elektron dari membran plasma bakteri ke anoda. Elektron-elektron ini bergerak melewati sirkuit elektrik dan setelah itu mereduksi ion ferrisianida menjadi ion ferisianida pada katoda (Day et., al, 1999).

Kultur *Saccharomyces cerevisiae* yang terdapat di dalam kompartemen anoda akan memetabolisme glukosa untuk menghasilkan ATP. Elektron yang dihasilkan dalam proses metabolisme tersebut selanjutnya diberikan kepada NAD^+ dan direduksi menjadi NADH, yaitu koenzim yang berperan sebagai pembawa elektron, pada proses metabolisme tingkat sel. Pada rantai transfer elektron yang terjadi di membran plasma bakteri, NADH akan teroksidasi membentuk NAD^+ sebagai pasangan redoks (NADH/NAD^+) dan memberikan elektronnya pada aseptor elektron yang memiliki potensial redoks lebih rendah. Dalam respirasi aerob, oksigen berperan sebagai akseptor elektron yang akan bereaksi dengan ion H^+ membentuk air dan melepaskan energi bebas yang akan digunakan dalam fosforilasi oksidatif untuk mensintesis ATP dari ADP dan fosfat organik (Rabaey Komeel et.,al 2005). Kemudian terjadi reaksi reduksi pada kompartemen katoda, dimana Fe_3^+ kan berubah menjadi Fe_2^+ dengan bantuan elektron yang datang dari anoda. Fe_2^+ kemudian akan dioksidasi menjadi Fe_3^+ dengan melepaskan elektron dan akan bereaksi dengan H^+ yang datang dari anoda dengan cara melewati Proton Exchange Membrane, dan membentuk molekul air. Berikut merupakan reaksi yang terjadi pada kompartemen dalam sistem MFC :

✚ Reaksi di Anoda :



✚ Reaksi di Katoda :



2.4.5 Riboflavin

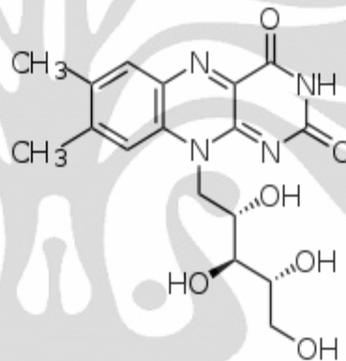
Riboflavin (7,8-dimethyl-10-ribityl-isoalloxazine) terdiri atas sebuah cincin isoaloksazin heterosiklik yang terikat dengan gula alkohol, dan ribitol. Riboflavin yang dikenal juga sebagai vitamin B2, adalah mikronutrisi yang

mudah dicerna, bersifat larut dalam air, dan memiliki peranan kunci dalam menjaga kesehatan pada manusia dan hewan.

Riboflavin memainkan peranan penting dalam metabolisme energi dan diperlukan dalam metabolisme lemak, zat keton, karbohidrat dan protein.

➤ **Struktur Kimia Riboflavin**

Struktur kimia riboflavin, dikenal pula sebagai vitamin B₂ atau laktoflavin. Berikut merupakan Gambar 2.7 yang berisi struktur Kimia Riboflavin



Gambar 2.7 Struktur Kimia Riboflavin (Dowel, 2008)

➤ **Sifat-sifat Riboflavin**

Riboflavin akan mudah terurai apabila suatu bahan yang terkandung riboflavin di dalamnya dibiarkan terkena cahaya matahari.

➤ **Fungsi Riboflavin**

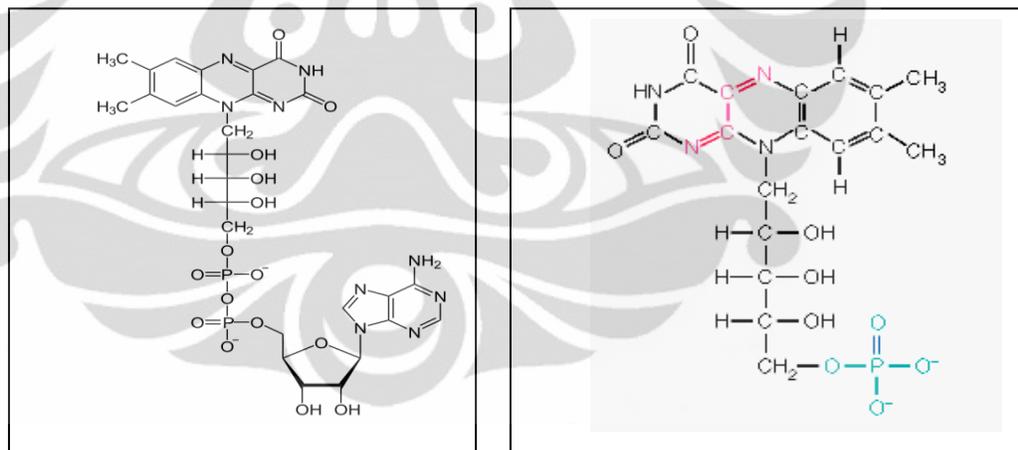
Riboflavin berfungsi sebagai koenzim dan esensial dalam pemindahan energi di tubuh manusia dan hewan, juga penting dalam metabolisme protein.

Di tubuh, riboflavin berfungsi sebagai bagian dari berbagai susunan enzim. Enzim tersebut adalah flavoprotein dan biasanya disebut pula sebagai enzim kuning, karena warna kuningnya yang disebabkan oleh gugusan flavin. Satu atau lebih enzim kuning dibutuhkan bersama-sama dengan koenzim I

atau koenzim II di dalam katabolisme (pemecahan) glukosa untuk memperoleh energi yang berguna untuk proses-proses tubuh.

Riboflavin juga merupakan bagian dari enzim-enzim oksidase yang berfungsi pada tingkatan terakhir metabolisme protein dan merupakan bagian dari xantin oksidase yang menyangkut metabolisme purin.

Riboflavin juga merupakan bagian dari molekul FAD (*Flavin Adenin Dinukleotida*) dan FMN (*Flavin Mononukleotida*), yang keduanya merupakan koenzim (bagian enzim yang sangat membantu kerja enzim), berperan pada reaksi pembentukan asam fumarat dari asam suksinat dengan enzim suksinat dehidrogenase. Selain itu, riboflavin juga merupakan bagian penting enzim monoamin oksidase dan glukonolaktonoksidase. FAD membantu enzim suksinat dehidrogenase, dalam merubah suksinat menjadi fumarat. Struktur kimia riboflavin dapat dilihat pada Gambar 2.8 di bawah ini :



Gambar 2.8 : Struktur Kimia FAD dan FMN (Dowel et.,al, 2008)

Diketuinya peranan dasar dari riboflavin dalam melepaskan energi makanan dan asimilasi zat-zat makanan, maka dapat dimengerti mengapa defisiensi riboflavin menimbulkan gejala-gejala yang sangat bervariasi pada setiap spesies.

Namun, pada penelitian ini riboflavin digunakan sebagai mediator elektron yang berfungsi untuk menghantarkan elektron yang dihasilkan dari metabolisme mikroba ke permukaan anoda sehingga dapat meningkatkan kapasitas mikroorganisme dalam meningkatkan produksi energi listrik dalam sistem MFC (Sharon.B, et al., 2010).

2.4.6 Minyak Kelapa Sawit

Minyak kelapa sawit diperoleh dari pengolahan buah kelapa sawit (*Elaeis guinensis*). Secara garis besar buah kelapa sawit terdiri dari serabut buah (*pericarp*) dan inti (kernel). Serabut buah kelapa sawit terdiri dari tiga lapis yaitu lapisan luar atau kulit buah yang disebut *pericarp*, lapisan sebelah dalam disebut *mesocarp* atau *pulp* dan lapisan paling dalam disebut *endocarp*. Inti kelapa sawit terdiri dari lapisan kulit biji (*testa*), *endosperm* dan embrio. *Mesocarp* mengandung kadar minyak rata-rata sebanyak 56%, inti (kernel) mengandung minyak sebesar 44%, dan *endocarp* tidak mengandung minyak (Pasaribu, Nurhida. 2004).

Minyak kelapa sawit seperti umumnya minyak nabati lainnya adalah merupakan senyawa yang tidak larut dalam air, sedangkan komponen penyusunnya yang utama adalah trigliserida dan nontrigliserida.

Minyak kelapa sawit terdiri dari gliserida campuran yang merupakan ester dari gliserol dan asam lemak rantai panjang. Dua jenis asam lemak yang paling dominan dalam minyak kelapa sawit yaitu asam palmitat, C16:0 (jenuh), dan asam oleat, C18:1 (tidak jenuh). Umumnya, komposisi asam lemak minyak kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 2.3 di bawah ini:

Tabel 2.3 Komposisi Asam Lemak dalam Minyak Kelapa Sawit

Nama Asam Lemak	Rumus Asam Lemak	Komposisi
Laurat	C12:0	0,2 %
Myristat	C14:0	1,1 %
Palmitat	C16:0	44,0 %
Stearat	C18:0	4,5 %
Oleat	C18:1	39,2 %
Linoleat	C18:2	10,1 %
Lainnya	-	0,9 %

Sumber : Arghainc, 2008

Selain asam lemak, minyak kelapa sawit memiliki kandungan lain seperti karoten dan fosfolipid. Komposisi komponen-komponen tersebut di dalam minyak kelapa sawit dapat dilihat pada di bawah ini.

Tabel 2.4 Komponen dalam Minyak Kelapa Sawit

No	Komponen	Kuantitas
1	Densitas, g/ml 50°C	0.8896 - 0.8910
2	Indeks refraksi, n_D 50	1.4544 - 1.4550
3	Angka Penyabunan, mgKOH/g minyak	190 - 202
4	Komposisi asam lemak, (wt % metil ester)	
	C12:0	0.1 - 0.4
	C14:0	1.0 - 1.4
	C16:0	40.9 - 47.5
	C16:1	0 - 0.6
	C18:0	3.8 - 4.8
	C18:1	36.4 - 41.2
	C18:2	9.2 - 11.6
	C18:3	0 - 0.5
	C20:0	0 - 0.8
5	Angka Iodin(Wijs)	50.1 - 54.9
6	Titik leleh, °C	33.0 - 39.0
7	Karotenoid total (β carotene), mg/kg	500 - 1000

Sumber : Arghainc, 2008

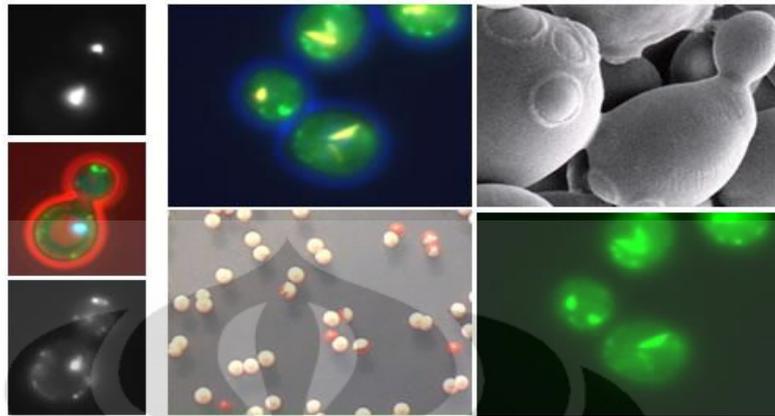
Dalam beberapa proses pada tahap pembuatan minyak nabati, terdapat sisa minyak yang masih terkandung atau tersisa di dalamnya. Minyak tersebut merupakan minyak residu atau minyak sisa yang biasa disenut dengan rapeseed oil.

Minyak residu adalah minyak nabati yang telah mengalami pemanasan sehingga jumlah rantai karbonnya meningkat. Minyak ini sangat berbahaya apabila dikonsumsi karena mengandung senyawa-senyawa yang bersifat karsinogenik yang dapat menimbulkan penyakit bagi manusia, antara lain kanker dan penyempitan pembuluh darah. Sedangkan bila minyak ini dibuang ke lingkungan, akan dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. Untuk dapat mencegah pencemaran ini, minyak goreng bekas tersebut dapat dikonversi menjadi sesuatu yang lebih bermanfaat dan diharapkan dapat mengurangi pencemaran lingkungan.

Salah satu bentuk pemanfaatan rapeseed oil agar dapat bermanfaat, salah satunya adalah dengan menggunakannya dalam sistem *Microbil Fuel Cell* untuk diteliti pengaruhnya terhadap peningkatan kadar riboflavin yang dihasilkan oleh kultur *Saccharomyces cerevisiae*, agar dapat menghantarkan elektron lebih banyak sehingga energi listrik yang dapat dihasilkan menjadi lebih besar. Hal ini dapat dilakukan karena rapeseed oil juga merupakan minyak nabati, turunan dari CPO (*crude palm oil*).

2.5 Mikroorganisme Uji

Mikroorganisme yang digunakan adalah *Saccharomyces cerevisiae* yang bersifat nonpatogenik. *Saccharomyces cerevisiae* (yeast) merupakan organism uniseluler dan umumnya membelah diri dengan pertunasan. Pada umumnya, sel yeast lebih besar daripada bakteri dengan ukuran sangat beragam yaitu lebar antara 1-5 μ m dan panjangnya lebih dari 3-30 μ m. Yeast biasanya berbentuk bulat telur atau memanjang dan tidak dilengkapi dengan *flagellum* atau organ penggerak lainnya. Morfologi sel dari *Saccharomyces cerevisiae* dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut ini :



Gambar 2.9 *Saccharomyces cerevisiae*

(<http://www.bio.davidson.edu/courses/genomics/2004/Bossie/MFYG.html>)

Yeast bersifat fakultatif anaerob, artinya dapat hidup dalam keadaan anaerob maupun aerob. *Yeast* dapat tumbuh dalam kisaran suhu yang cukup luas. Suhu optimum pertumbuhannya yaitu 30°C, suhu maksimumnya adalah 35-37°C, sedangkan suhu minimumnya adalah 9-11°C.

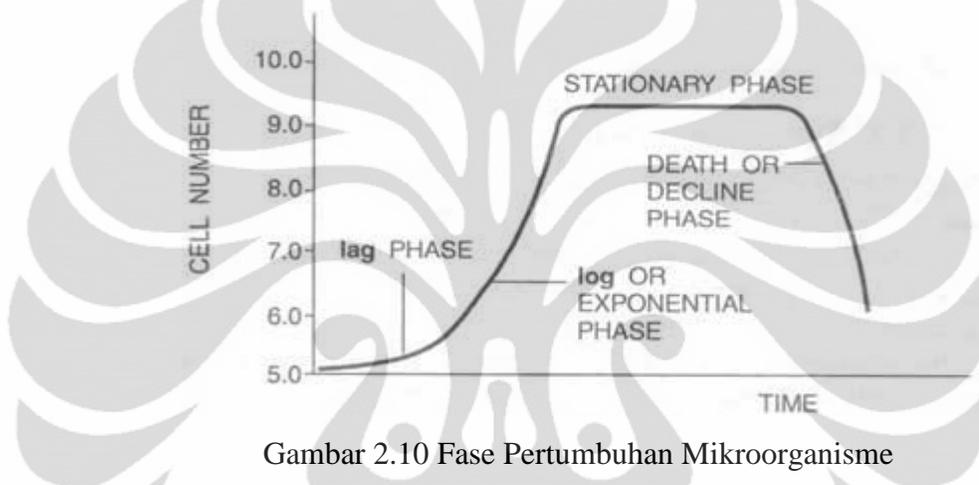
Yeast sering digunakan dalam proses pembuatan roti, anggur, dan bir dalam rumah tangga maupun skala industri. Klasifikasi *yeast* adalah sebagai berikut :

Kingdom : Fungi
 Filum : Ascomycota
 Kelas : Hemiascomycetes
 Ordo : Saccharomycetales
 Famili : Saccharomycetaceae
 Genus : *Saccharomyces*
 Spesies : *Saccharomyces cerevisiae*

Yeast dapat tumbuh dalam suatu media/substrat yang mengandung glukosa. Pertumbuhan maksimum yeast biasanya terjadi hingga hari ke-3 dan mulai mengalami penurunan setelah hari ke-7.

2.6 Kurva Pertumbuhan

Mikroorganisme bila ditumbuhkan / diinokulasikan ke dalam medium yang tepat akan mengalami peningkatan jumlah sel yang sangat banyak. Dengan jumlah sel yang sangat banyak, sangat sulit untuk mengalurkan grafik peningkatan jumlah sel. Oleh karena itu, digunakan log₁₀ dari jumlah sel untuk mengalurkan kurva pertumbuhan. Berdasarkan kurva pertumbuhan yang ada pada Gambar 2.10 di bawah ini :



Gambar 2.10 Fase Pertumbuhan Mikroorganisme

Mikroorganisme mengalami beberapa fase pertumbuhan diantaranya adalah fase lag, fase eksponensial, fase stasioner, dan fase kematian.

- Fase lag adalah kondisi dimana bakteri baru saja diinokulasikan atau dibiakan dalam medium. Pada fase ini bakteri belum melakukan pembelahan, tetapi sudah terjadi peningkatan massa volume, sintesis enzim, protein, RNA dan peningkatan aktifitas metabolik. Pada fase tersebut bakteri lebih banyak melakukan adaptasi dengan lingkungan.
- Fase eksponensial adalah fase dimana bakteri melakukan pembelahan secara biner dengan jumlah kelipatan (eksponensial). Pada fase ini, terjadi lonjakan peningkatan jumlah biomassa sel, sehingga bisa diketahui seberapa besar terjadi pertumbuhan secara optimal dan tingkatan produktifitas biomassa sel.

➤ Fase stasioner

adalah fase dimana bakteri sudah tidak melakukan pembelahan lagi. Ada 3 penyebab utama yang menyebabkan fase tersebut, diantaranya adalah :

1. Ketidaktersediaan nutrient
2. penumpukan metabolit penghambat dan produk akhir,
3. kekurangan ruang gerak. Pada fase stasioner juga disebut “lack of biological space”

➤ Fase kematian

adalah fase keterlanjutan dari fase stasioner adalah fase kematian, dimana akan terjadi pengurangan jumlah sel bakteri yang hidup. Fase kematian ditandai dengan jumlah sel yang mati lebih banyak daripada sel yang hidup karena nutrien semakin menurun (bahkan habis), energi cadangan di dalam sel juga habis dan terkumpulnya produk limbah.

2.7 Metabolisme *Saccharomyces cerevisiae*

Saccharomyces cerevisiae bersifat fakultatif anaerob, sehingga dapat melakukan respirasi aerob menggunakan oksigen sebagai akseptor elektron dan dapat melakukan respirasi dibawah kondisi aerob.

Saccharomyces cerevisiae menggunakan glukosa sebagai sumber karbon untuk pertumbuhannya. Proses pengubahan glukosa menjadi sumber elektron yang dimanfaatkan dalam aplikasi MFC melalui serangkaian tahap metabolisme yang kompleks.

Pada tahap awal metabolisme substrat yaitu glukosa akan melalui jalur *Embden-Meyerhoff Pathway* atau Glikolisis. Glikolisis terjadi di dalam sitoplasma. Akhir dari proses Glikolisis menghasilkan 2 mol asam piruvat dan beberapa ATP. Pada kondisi anaerob, asam piruvat akan masuk ke Siklus Asam Sitrat (Siklus Krebs) di dalam mitokondria. Pada siklus ini juga dihasilkan ATP, NADH, dan FADH₂.

Tahap selanjutnya adalah rantai transfer elektron yang juga menghasilkan ATP. NADH dan FADH₂ yang dihasilkan dari Siklus Asam Sitrat akan dioksidasi menjadi NAD⁺ dan FAD⁺ dengan melepaskan elektron dan proton. Elektron dan proton ini

masuk ke dalam rantai pernafasan melalui beberapa kompleks : NADH-dehidrogenase, Ubiquinone, dan Sitokrom b-c.

Pada tahap akhir, bila tersedia oksigen (aerob) maka O_2 sebagai aseptor elektron terakhir akan bereaksi dengan proton membentuk air. Kondisi inilah yang dimanfaatkan oleh sistem MFC. Bila keadaan tidak tersedia oksigen (aerob), maka mediatorlah sebagai aseptor elektron yang akan menangkap dan mengalirkan elektron ke elektroda menghasilkan listrik.

2.8 Media Pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae*

Untuk pertumbuhannya, semua mikroba membutuhkan berbagai unsur kimia sebagai nutrient, baik dalam bentuk senyawa organik maupun anorganik. Unsur-unsur untuk pertumbuhan sel mikroba meliputi unsur karbon, nitrogen, oksigen, hidrogen, belerang, dan unsure fosfor.

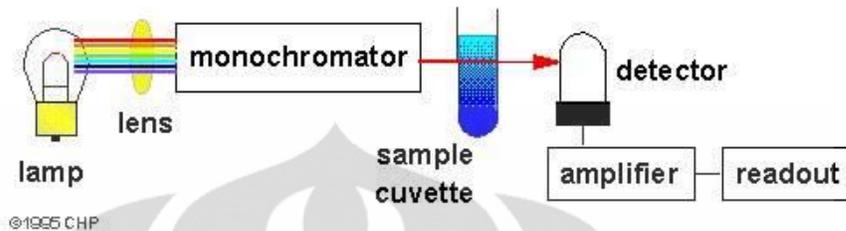
Kandungan suatu medium harus memenuhi kebutuhan dasar untuk biomassa dan produksi metabolit serta harus cukup memberikan energi untuk biosintesis dan pemeliharaan sel. *Saccharomyces cerevisiae* dapat hidup baik pada media yang kaya akan glukosa dan juga protein.

2.9 Analisis Spektrofotometri

Pada penelitian ini, digunakan metode analisis spektrofotometri untuk menentukan media yang terbaik bagi pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae*, mengetahui jumlah mikroba yang terdapat dalam suatu medium, dan juga menganalisa kadar riboflavin.

Spektrofotometri merupakan suatu metoda analisis yang didasarkan pada pengukuran serapan sinar monokromatis oleh suatu lajur larutan berwarna pada panjang gelombang spesifik dengan menggunakan monokromator prisma atau kisi difraksi dengan detektor *phototube*. Pada spektrofotometri, pengukuran dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer, yaitu alat untuk mengukur transmittan atau absorban suatu sampel sebagai fungsi panjang gelombang. Absorpsi radiasi oleh suatu sampel diukur pada berbagai panjang gelombang dan dialirkan oleh suatu

perekam untuk menghasilkan spektrum tertentu yang khas untuk komponen yang berbeda.



Gambar 2.11: Skema Cara Kerja Spektrofotometer (bioingnior.org)

Spektrofotometri dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan sumber cahaya yang digunakan, salah satunya adalah spektrofotometri sinar tampak (*visible*). Cahaya *visible* termasuk spektrum elektromagnetik yang dapat ditangkap oleh mata manusia. Panjang gelombang sinar tampak adalah 380 sampai 750 nm. Sample yang dapat dianalisis dengan metode ini hanya sample yang memiliki warna. Untuk sample yang tidak memiliki warna harus terlebih dulu dibuat berwarna dengan menggunakan reagent spesifik yang akan menghasilkan senyawa berwarna.

2.10 State of The Art

Berbagai penelitian telah banyak dilakukan untuk mengkaji potensi dari berbagai macam bakteri dalam menghasilkan energi listrik dengan menggunakan berbagai spesifikasi yang berbeda-beda, mulai dari desain bioreaktor, penggunaan elektroda dan membran sampai pada kondisi aerob dan anaerob. Variasi dari berbagai parameter penting dalam sistem Microbial Fuel Cell tersebut dilakukan dengan tujuan untuk mencapai hasil arus listrik dan efisiensi yang lebih besar agar dapat terus dikembangkan potensinya dalam menghasilkan sumber alternatif energi listrik dan diaplikasikan kedalam berbagai komponen.

Penggunaan alternatif energi listrik ini sendiri telah diaplikasikan ke berbagai komponen kecil elektrik dan juga pada penanganan limbah atau *waste water plant*. Bahkan sebagian dari sistem MFC telah diaplikasikan ke dalam instrument kelautan seperti *seismic detector*, dan *monitoring device* (Lowy et., al 2006).

Sistem Microbial Fuel Cell dalam skala laboratorium telah dilakukan oleh Lowy et.,al (2006) dengan menggunakan *single-chamber bioreactor*. Dalam penelitian ini, dianalisa mengenai pengaruh aktifitas kinetik pada variasi dalam anoda terhadap kapasitasnya menghasilkan arus listrik. Bioreactor dalam penelitian ini dirancang tanpa menggunakan mebran dan mediator. Variasi berbagai anoda diteliti oleh Lowy et.,al (2006), diantaranya adalah elektroda grafit-ceramic containing Mn^{2+} dan Ni^{2+} ; grafit-paste containing Fe_3O_4 ; grafit-paste containing $Fe_3O_4 + Ni^{2+}$. Hasil arus atau power electricity yang diperoleh dari penelitian ini dapat stabil selama 18 bulan dan diaplikasikan dalam instrumentasi kelautan seperti *monitoring device* dan *seismic detector* dengan voltase atau OCP (Open Circuit Potential) sebesar 472 mV.

Penelitian lain mengenai MFC dilakukan oleh Eileen Hao Yu pada tahun 2007. Penelitian yang dilakukan di bawah kerja sama University of Newcastle, UK dan Penn State University, USA ini, menitikberatkan pada analisa berbagai jenis katoda yang digunakan dalam MFC dengan sistem single-chamber. Tujuannya adalah untuk mengetahui jenis elektroda selain Pt yang dapat digunakan dalam sistem MFC dan memberikan efisiensi yang cukup baik dalam menghasilkan energi listrik. Dalam bioreaktor ini, digunakan kultur mikroba *Escherichia coli* K.12. Variasi parameter ini, diantaranya diuji pada berbagai elektroda seperti Iron phthalocyanine (FePc, TCI Amerika); Cobalt phthalocyanine (CoPc, Aldrich), Copper phthalocyanine (CuPc, Alfar Aesar); Manganese II (MnPc, Alfar Aesar); Cobalt tetramethylphthalocyanine (CoTMPP, Aldrich); Carbon Nanoparticles Ketjenblack EC, 300 dan sebagai standar yaitu campuran antara Carbon + Pt 20 % wt.

Selain itu, Scott dan Murano (2007) juga melakukan penelitian mengenai *Microbial Fuel Cell* dengan menggunakan kultur *Escherichia coli* dan juga Waste Carbohydrate yang berasal dari yogurt bacteria. Penelitian ini menggunakan sistem dual-chamber dengan menggunakan KCl-Reference sebagai elektrodanya. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh posisi geometrik dari anoda dan katoda terhadap kapasitasnya menghasilkan energi listrik dalam sistem MFC.

Pada tahun yang sama, tepatnya November 2007, Martin Lanthier et.,al melakukan penelitian mengenai *Microbial Fuel Cell* dengan menggunakan kultur

bakteri *Shewanella oneidensis*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh proses oksidasi senyawa laktat menjadi asetat di dalam kompartemen anoda pada sistem MFC. Bioreaktor yang digunakan dirancang anaerob dengan mengalirkan gas nitrogen dan karbondioksida ke dalam kompartemen anoda, sedangkan pada kompartemen katoda kedalamnya dialirkan udara. Elektroda yang digunakan pada kedua kompartemen adalah elektroda jenis batang grafit seluas $61,2 \text{ cm}^2$.

Bakteri *Shewanella* yang berasal dari lingkungan perarian laut Artik dan Antartika tepatnya di tempat perpipaan minyak yang berkarat atau terkorosi dan juga di lingkungan akuafier yang terkontaminasi uranium ini, ternyata tidak hanya diteliti oleh Lanthier et.,al (2007). Namun juga diteliti oleh Marsili et.,al (2008) dengan menggunakan spesies *Shewanella oneidensis* MR-1 dan MR-4 yang telah diisolasi. Dalam penelitian ini, dieksplorasi kemampuan dari *Shewanella* dalam mentransfer elektron menuju ke permukaan mediasi dengan penambahan senyawa riboflavin. Selain itu, Marsili et.,al juga melakukan penelitian mengenai adaptasi teknik elektrokimia dengan tujuan untuk mengetahui biofilm yang utuh dari *Shewanella oneidensis* MR-1 dan MR-4, yang dikembangkan sebagai penerima elektron. Kultur bakteri yang telah diinkubasikan, direaksikan di dalam kompartemen anoda dengan kondisi yang anaerob (dengan penambahan gas Nitrogen). Elektroda yang digunakan adalah elektroda *Glassy Carbon*. Selama proses pengukuran energi listrik yang dihasilkan melalui sistem MFC ini, kompartemen anoda dilakukan pengadukan dengan menggunakan *magnetic stirrer* untuk menghomogenkan suspensi di dalam bioreaktor. Kandungan ribofavin yang terdapat di dalam suspensi, dianalisis dengan menggunakan HPLC (High Performance Liquid Chromatograph) dan juga menggunakan metode Spektrofotometri pada panjang gelombang $444 - 525 \text{ nm}$.

Berbeda dengan peneliti sebelumnya, kali ini Nevin et.,al (2008) melakukan penelitian dengan menggunakan *mix-culture microbe* atau konsorsium mikroba. Tujuan dari penggunaan konsorsium bakteri ini adalah untuk mengetahui apakah konsorsium mikroba yang terdiri dari berbagai jenis bakteri yang belum diisolasi, juga memiliki potensi yang baik untuk dalam menghasilkan energi listrik. Desain bioreaktor dari penelitian ini dirancang menggunakan *dual-chamber bioreactor*

sehingga memungkinkan penggunaan membran yaitu Proton Exchange Membrane jenis Nafion 117. Elektroda yang digunakan dalam kedua kompartemen ini adalah elektroda Carbon Fibre, dimana ditambahkan lapisan Platina seberat 4,0 mg pada bagian katoda. Nevin et.,al (2008) menggunakan campuran lumpur yang dibandingkan kapasitasnya dalam menghasilkan energi listrik dengan bakteri *Geobacter sulfurreducens*. Coloumbic efficiency yang dihasilkan dari penelitian di atas mencapai 40-45% dan 100% untuk campuran lumpur dan isolat *Geobacter sulfurreducens* secara berturut-turut.

Geobacter sulfurreducens yang merupakan bakteri dari keluarga Geobacteraceae yang dapat hidup dengan mengurai material organik ini, juga diteliti oleh Ngov Trung et.,al (2008). Dalam penelitian ini, hidrokarbon yang ada dikonversi menjadi energi listrik dengan *metal reducing bacteria* dalam hal ini *Geobacter sulfurreducens* sebagai katalis. Asetat digunakan sebagai fuel atau bahan bakar dalam sistem MFC yang dirancang dual-chamber ini. Karena desainnya yang terdiri dari dua kompartemen maka digunakan membran yaitu Proton Exchange Membrane jenis Nafion 177, Dupont, USA. Elektroda yang digunakan adalah elektroda lempeng karbon pada kompartemen anoda, sedangkan pada bagian katodanya digunakan elektroda Platina yang ditambahkan dengan larutan Nafion 5%. Sistem anaerob yang diterapkan dalam bioreaktor ini, dilakukan dengan mengairkan 80% gas Nitrogen dan 20% gas karbon monoksida. Sebagai perbandingan hasilnya, kompartemennya. Power density yang dihasilkan dalam penelitian ini, mencapai 418 mW/m² dan meningkat menjadi 866 mW/m² dengan penggunaan Platina sebagai elektroda pada katoda.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Li et.,al (2009) menganalisa mengenai berbagai konfigurasi dan larutan elektrolit terhadap sistem Microbial Fuel Cell. Pada penelitian ini, digunakan elektroda karbon. Sedangkan ada kompartemen katoda, larutan elektrolit yang digunakan adalah larutan elektrolit ferisianida dan larutan nitrat. Desain bioreaktor MFC yang dibuat dual-chamber ini, juga menguji kinerja sistem MFC dengan dan tanpa membran. Selain itu, dilakukan juga pengujian pada modifikasi konfigurasi sistem MFC yakni termasuk didalamnya variasi jarak

elektroda, dengan fokus yang dititikberatkan pada penurunan hambatan (R_{in}) sehingga dapat meningkatkan kuat arus ataupun *power generation* yang dihasilkan. Penurunan hambatan yang dihasilkan mencapai 310 ohm, dimana daya yang dihasilkan adalah sebesar 230 mW/m².

Penelitian mengenai *Microbial Fuel Cell* tidak hanya terbatas pada bentuk bioreaktor yang didesain layaknya wadah biasa (chamber), seperti halnya penelitian yang dilakukan oleh Yi and Nevin et.,al (2009) menggunakan bioreaktor yang dirancang berbentuk *H-cell*. Meskipun dirancang dalam bentuk *H-cell*, biorekato ini juga tetap diaplikasikan dalam keadaan anaerob. Bioreaktor ini dibentuk dengan menggunakan dua buah botol yang dihubungkan melalui sebuah membran, dalam hal ini yang digunakan adalah *proton exchange membrane* jenis Nafion 117. Elektroda yang digunakan adalah elektroda grafit. Dalam penelitian ini, digunakan kultur mikroba *Geobacter sulfurreducens* dari strain yang berbeda yaitu KN 400 dan DL 1.

Hingga saat ini, memang masih sangat sedikit penelitian tentang *Microbial Fuel Cell* yang menggunakan senyawa riboflavin sebagai mediator elektron seperti Sharon, B et.,al (2009). Dalam penelitiannya, Sharon, B et.,al menguji bagaimana elektron campuran bakteri tertentu berpisah dari sel ke anoda, dan pengaruhnya terhadap produksi energi listrik. Selain itu, dilakukan identifikasi juga apakah senyawa mediator elektron memang diproduksi dengan sendirinya dalam sistem MFC membran berupa *proton exchange membrane* jenis Nafion 117, Sigma, UK. Sedangkan elektroda yang digunakan dalam kedua kompartemen adalah elektroda grafit. Selama proses pengukuran arus listrik yang dihasilkan dari sistem MFC ini, dilakukan pengadukan dengan menggunakan *magnetic stirrer*. Dalam kompartemen anoda, dibuat dalam kondisi anaerob dengan mengalirkan gas nitrogen ke dalamnya. Hasil pengukuran kuat arus listrik mencapai 0,23 mA dan 0,08 mA untuk bioreaktor yang ditambahkan dengan riboflavin dan tanpa riboflavin secara berturut-turut.

**Parameter
Operasi**

Riboflavin				Masuda, 2010		Sharon. B, 2009 Marsili, 2008	Penelitian ini, batch <i>S.cerevisiae</i> dan Substrat glukosa, 2010
Elektroda Grafrit	Lowy, 2006		Yi, 2009			Sharon. B, 2009 Lanthier, 2007	
Elektroda Platina			Ngoc Trung, 2008 Yi, 2009				
Elektroda Carbon	Nevin, 2008	Li, 2009	Nevin, 2008		Yu, 2007	Marsili, 2008	
Mediator- Less		Scott, 2007		Masuda, 2010	Scott, 2007	Sharon B, 2009 Marsili, 2008	
Anaerob		Li, 2009	Nevin, 2008 Ngoc Trung, 2008 Yi, 2009 Lanthier, 2007			Sharon. B, 2009 Lanthier, 2007	
Membran- Less	Lowy, 2006				Yu, 2007		
Dual- Chamber	Nevin, 2008	Li, 2009	Nevin, 2008				
Single- Chamber	Lowy, 2006				Yu, 2007		
H-Cell			Yi, 2009				
	Mix- Culture	Mix-c (Waste)	<i>G.sulfur- reducens</i>	<i>L. lactic</i>	<i>E. coli</i>	<i>S. oneidensis</i>	<i>S. cerevisiae</i>

Mikroba

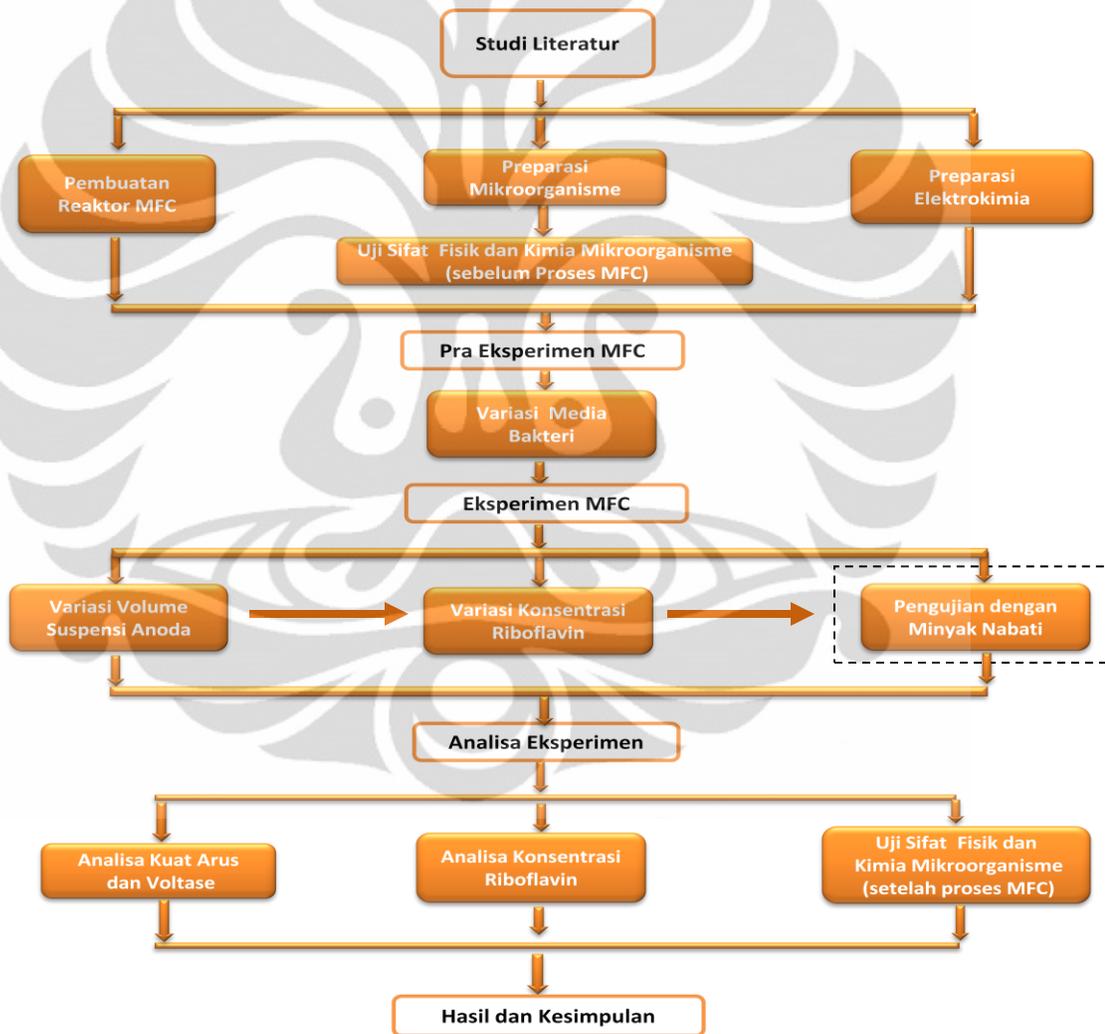
Gambar 2.11 Mapping State of The Art MFC Riboflavin

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok. Diagram alir penelitian *Microbial Fuel Cell* ditunjukkan pada Gambar 3.1 di bawah ini :



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian *Microbial Fuel Cell*

*)  : hasil optimum

----- : percobaan tambahan

Tahapan awal penelitian adalah studi literatur yang dilakukan dengan mempelajari jurnal publikasi nasional maupun internasional yang berkaitan dengan penelitian biofiltrasi sebelumnya. Peralatan biofilter yang digunakan merupakan alat skala yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya.

Langkah berikutnya adalah perancangan alat *Microbial Fuel Cell*. Perancangan alat ini dilakukan berdasarkan pada prinsip kerja reaktor sel elektrolisis dimana terdapat ruang anoda dan katoda yang dipisahkan dengan penggunaan membran diantara kedua ruang tersebut dan juga peletakkan elektroda di masing-masing ruang.

Kemudian dilakukan preparasi alat elektrolisis berupa persiapan membran penukar ion yang dalam penelitian ini digunakan jenis Nafion 117 yang terlebih dahulu diaktivasi dengan mereaksikannya dengan aquades, larutan peroksida dan asam sulfat. Selain itu, dilakukan pula persiapan elektroda grafit berupa batang karbon yang berasal dari batu baterai bekas.

Ruang anoda berisikan mikroorganisme yang sebelumnya telah diinokulasi dan diencerkan sampai konsentrasi tertentu sedangkan pada ruang katoda digunakan larutan buffer KH_2PO_4 dengan kisaran pH sebesar 7.6.

Sebelum dilakukannya eksperimen, perlu diketahui faktor fisik dan kimia dari mikroorganisme dengan cara menganalisa diantaranya nilai pH, temperature, dan nilai DO sebagai indikasi jumlah oksigen terlarut . Pengukuran tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa mikroorganisme terjaga pada kondisi lingkungan hidupnya.

Percobaan *Microbial Fuel Cell* (MFC) dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan suatu mikroorganisme dalam menghasilkan energi listrik dan juga pengaruhnya dengan penambahan nutrient berupa riboflavin ke dalam reaktor *Microbial Fuel Cell*, khususnya pada ruang anoda yang diketahui dapat mentransfer elektron dari mikroorganisme tertentu. Efisiensi kinerja *Microbial Fuel Cell*, dilihat dari besarnya arus listrik dan beda potensial yang dihasilkan yang diukur menggunakan multimeter. Evaluasi kinerja *Microbial Fuel Cell* (MFC) dilakukan dengan memvariasikan sejumlah parameter operasi *Microbial Fuel Cell*.

Pada penelitian ini, dilakukan juga analisa terhadap blanko buffer dan blanko buffer + riboflavin, untuk dapat diketahui pembanding atau kontrol dalam kinerja sistem MFC dalam menghasilkan energi listrik. Selain itu, dilakukan pula analisis terhadap peningkatan kadar riboflavin dalam media *Saccharomyces cerevisiae* dengan penambahan minyak nabati dan tanpa penambahan minyak nabati.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Peralatan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian *Microbial Fuel Cell* diantaranya adalah sebagai berikut :

Alat Gelas

- Reaktor MFC
- Erlenmeyer
- Tabung reaksi
- Pipet tetes
- Pipet ukur
- Gelas ukur
- Kaca arloji

Alat Listrik

- *Magnetic stirrer*
- *Autoklaf*
- *Shaker Inkubator*
- Timbangan analitik
- pH meter
- Elektroda grafit (diameter = 0.7 cm dan panjang = 5 cm)
- Kabel dan jepit buaya (panjang = 30 cm)
- DO meter

- *Digital Multimeter(Microamperemeter)*

Alat Instrumen

- *Spektrofotometer*

3.2.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian *Microbial Fuel Cell* diantaranya adalah sebagai berikut :

- Kultur bakteri *Saccharomyces cerevisiae*
- Tripton
- Pepton
- Yeast extract
- Glukosa
- Tauge segar
- Larutan buffer fospat
- Riboflavin murni
- Membran Nafion 117 (diameter = 3-5 cm)
- Aquades
- Serbuk K_2HPO_4
- Serbuk KH_2PO_4
- Padatan NaOH
- Larutan H_2O_2
- Larutan H_2SO_4
- Larutan $K_3Fe(CN)_6$

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi Awal

Pembuatan Reaktor MFC

Reaktor MFC didesain dalam bentuk *dual-chamber* yaitu kompartemen anoda dan katoda. Kedua kompartemen ini dipisahkan oleh sebuah membran yaitu membran penukar ion jenis Nafion 117[®], Lyntech, Amerika. Sebagai elektroda dalam sistem MFC ini, digunakan elektroda grafit.

Preparasi Proton Exchange Membrane

Proton Exchange Membrane, dalam hal ini adalah membran Nafion 117 perlu dilakukan pre-treatment terlebih dahulu sebelum diaplikasikan pada MFC dengan cara direbus dengan aquades selama 1 jam lalu dididihkan dengan H₂O₂ 3% selama 1 jam dan dicuci dengan aquades. Membran selanjutnya dididihkan kembali dalam H₂SO₄ 1M selama 1 jam lalu dicuci dengan aquades sebanyak 3 kali. Membran disimpan (direndam) dalam aquades hingga saat akan digunakan. Sesaat sebelum mengaplikasikan membran ke dalam reaktor MFC, membran perlu dikeringkan dengan cara diangin-anginkan.

Preparasi *Proton Exchange Membrane*

Elektroda grafit direndam ke dalam larutan HCl 1N selama 1 hari kemudian dibilas dengan menggunakan aquades. Setelah itu elektroda direndam lagi ke dalam larutan NaOH 1 N selama 1 hari kemudian dibilas lagi dengan menggunakan aquades. Elektroda direndam dalam larutan aquades hingga saat akan digunakan.

3.3.2 Pra Eksperimen MFC

3.3.2.1 Variasi Media *Saccharomyces cerevisiae*

Variasi media bakteri ini dilakukan pada tahap awal dengan tujuan untuk mengetahui secara pasti, medium bakteri yang optimal untuk pertumbuhannya sehingga dapat menghasilkan energi potensial listrik dengan optimal. Kemudian bakteri yang terpilih akan dilakukan variasi berikutnya yaitu variasi volume suspensi anoda dan konsentrasi riboflavin.

1. Media GYE

- 1g tripton, 1g yeast extract dan 0.5 g glukosa dalam dilarutkan dengan 100ml larutan buffer fosfat
- pH nya diatur menjadi 7.0

2. Media Saborauds

- 4g glukosa dan 1 g pepton dilarutkan dalam 100ml larutan buffer fosfat
- pHnya diatur menjadi 7.0

3. Media Tauge Ekstrak

- 10g tauge segar direbus di dalam 100ml air mendidih selama 2-3jam
- Tauge Extract yang didapat ditambahkan 6g glukosa
- Kemudian volumenya dicukupkan dengan larutan buffer hingga 100ml kemudian diatur pH nya menjadi 7.0

4. Media air rebusan jagung manis

- 50 g biji jagung manis muda direbus dalam 200 ml aquades mendidih selama 2-3jam
- Ekstrak yang diperoleh dicukupkan volume nya dengan larutan buffer fospat kemudian diatur pH nya menjadi 7.

Semua media masing-masing dimasukkan ke dalam Erlenmeyer yang bersumbat kemudian disterilisasi dalam autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit. Setelah media dingin, masing-masing media diinokulasi dengan sel *Saccharomyces cerevisiae*. Lalu keempat media diinkubasi pada suhu 30°C di dalam *shaker incubator* dengan laju pengocokan 120 rpm. Untuk mengetahui pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae*, maka diamati pertumbuhan optimalnya setiap 2 jam selama 40 jam dengan metode Optical Density menggunakan spektrofotometer ($\lambda=550\text{nm}$). Media pertumbuhan bakteri *Saccharomyces cerevisiae* yang paling optimal, digunakan untuk pengukuran energi listrik pada sistem MFC.

3.3.3 Eksperimen MFC

3.3.3.1 Variasi Volume Suspensi Anoda

- variasi ini dilakukan setelah proses inokulasi, dengan memvariasikan volume suspensi mikrob ke dalam bioreaktor MFC, masing adalah sebesar 20 ml; 30 ml; 40 ml; 50 ml dan 60 ml.

- ditambahkan larutan buffer fospat 0.1M pH 7.0, dengan jumlah volume yang juga divariasikan yaitu berturut-turut sebesar 50 ml; 40 ml; 30 ml; 20 ml; dan 10 ml.
- Kemudian masing-masing ditambahkan aquades 20 ml aquades dan larutan glukosa 0,1 M sebanyak 10 ml hingga mencapai volume total 100 ml (pada kompartemen anoda)
- kemudian diukur arus listrik dan tegangan yang dihasilkan oleh sistem MFC dengan menggunakan mikroamper analog dan alat multimeter digital
- dari variasi konsentrasi bakteri ini, dipilih bakteri dengan konsentrasi yang paling optimum dalam menghasilkan energi listrik untuk kemudian diaplikasikan kembali dalam MFC dengan penambahan riboflavin yang juga divariasikan

3.3.3.2 Variasi Konsentrasi Riboflavin

- ditambahkan sejumlah riboflavin ke dalam sistem MFC (kompartemen anoda) dengan variasi konsentrasi sebesar 10 ppm; 20 ppm; 30 ppm; 40 ppm; 50 ppm
- kemudian diukur arus listrik dan tegangan yang dihasilkan oleh sistem MFC dengan menggunakan mikroamper analog dan alat multimeter digital

3.3.1.3 Pengujian pada Penambahan Minyak Nabati

- penambahan minyak ke dalam reaktor MFC dilakukan sebelum tahap proses dimulai
- minyak diteteskan ke dalam suspensi pada kompartemen anoda sebanyak 12 tetes

- kemudian diukur arus listrik dan tegangan yang dihasilkan oleh sistem MFC dengan menggunakan mikroamper analog dan alat multimeter digital

3.3.1.4 Kompartemen Anoda

Kompartemen anoda diisi dengan larutan yang terdiri dari 50 ml suspensi bakteri yang telah disiapkan sebelumnya, 10 ml glukosa, 20 ml buffer fosfat 0.2M pH7.0 dan 20 ml aquades.

3.3.1.5 Kompartemen Katoda

Kompartemen katoda diisi dengan larutan kalium ferrisianida 0.2M dan buffer fosfat 0.2M pH 7.0. Keduanya dicampurkan dengan volume masing-masing 50 ml. Campuran ini kemudian disterilisasi menggunakan autoklaf selama 15 menit pada suhu 121°C.

3.3.1.6 Pengukuran Arus Listrik dan Beda Potensial

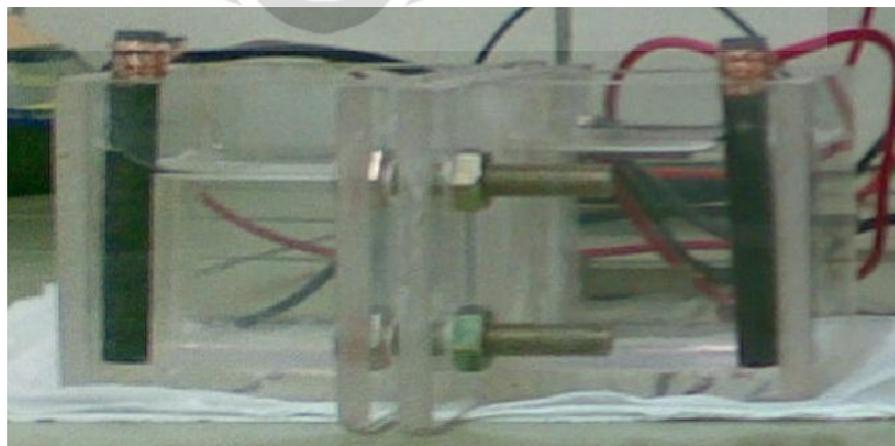
- Larutan yang berisikan mikroorganisme dalam ruang anoda dan larutan potassium ferisianida dalam ruang katoda dipisahkan dengan menggunakan membran penukar ion yaitu membran Nafion 117 (Lyntech, Amerika Serikat).
- Kemudian kedua elektroda grafit pada masing-masing ruang dihubungkan dengan rangkaian kabel pada alat digital multimeter.
- Alat digital multimeter diatur untuk pengukuran arus listrik dan tegangan listrik pada skala terkecil terlebih dahulu.
- Diamati nilai arus listrik dan tegangan yang tertera pada layar digital multimeter hingga stabil dan dicatat.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Desain *Microbial Fuel Cell*

Desain alat MFC pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.1, yaitu menggunakan sel elektrokimia dengan sistem 2 kompartemen atau *dual-chamber*. Kedua kompartemen ini dapat menampung volume masing-masing sebanyak 100 mL. Sistem MFC ini, menggunakan elektroda grafit yang berasal dari batang karbon batu baterai bekas berukuran A. Luas permukaan dari elektroda ini sebesar $1,46 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ dengan diameter sebesar 0,3 inch dan panjang elektroda 2,25 inch. Selain itu, diantara kedua kompartemen dipisahkan dengan sebuah membran yaitu *Proton Exchange Membran* Nafion 117. Membran penukar proton (H^+) ini berfungsi sebagai membran yang secara khusus dapat mendifusikan proton yang dihasilkan di dalam kompartemen anoda ke dalam kompartemen katoda, sehingga akan terjadi pertemuan antara ion positif dan ion negatif dari larutan elektrolit yang dapat diukur sebagai suatu arus listrik. Instrument pengukur kuat arus dan tegangan yang digunakan dalam penelitian MFC ini ada dua, yaitu *Analog Mikroampere* (Yokogawa Electric Works. Ltd, tipe 2011b9000em class 1.0, Singapore) dan *Digital Multimeter* Sanwa Electric Instrument co., Ltd cd 771. Sistem ini memiliki hambatan berkisar 0,88 – 2.5 k Ω dengan desain reaktor MFC seperti Gambar 4.1 berikut :



Gambar 4.1 Desain Reaktor MFC dengan Elektroda Grafit

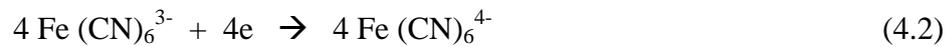
Pada kompartemen anoda digunakan kultur isolat *Saccharomyces cerevisiae*. Pada kompartemen ini, proses metabolisme substrat *Saccharomyces cerevisiae* yang menghasilkan elektron dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik. Proses yang terjadi pada kompartemen anoda ini merupakan reaksi transfer elektron dari mikroorganisme ke elektroda. Secara teoritis pada anoda, konversi glukosa menjadi karbondioksida akan menghasilkan 12 mol hidrogen (24 H^+ dan 24 e) (Madiraju et.,al 2004 dan Mu et.,al 2001) dimana elektron yang dihasilkan akan diterima oleh elektroda sebagai suatu arus yang akan diukur melalui loading masa dalam multimeter. Arus listrik yang dihasilkan akan dipengaruhi oleh kecepatan laju reaksi pada metabolisme *Saccharomyces cerevisiae* dan efisiensi transfer elektron yang terjadi. Reaksi yang terjadi dalam kompartemen anoda dapat dituliskan seperti persamaan 4.1 di bawah ini : (Benetto, 1990)



Sedangkan pada kompartemen katoda, larutan elektrolit yang digunakan adalah larutan kalium ferisianida dan buffer fosfat 0,2 M pH 7,0. Buffer fosfat yang juga digunakan dalam kompartemen katoda berfungsi untuk menyeimbangkan pH larutan di kedua kompartemen dalam sistem MFC ini. Volume masing-masing larutan adalah 50 mL. Ferisianida merupakan suatu elektrolit yang cukup baik untuk diaplikasikan dalam sistem MFC. Larutan ini memiliki nilai hambatan yang rendah yang membuatnya sebagai akseptor elektron yang cukup baik dalam pengukuran MFC (Bruce et.,al, 2006). Namun elektrolit ini dapat mengalami reoksidasi sehingga dalam pemakaiannya untuk sistem MFC ini tidak bisa dilakukan secara terus menerus. Larutan ini harus dalam kondisi *fresh* atau baru untuk setiap memulai pengukuran arus listrik dan voltase dalam sistm MFC.

Pada kompartemen ini, elektron yang berasal dari bagian anoda digunakan untuk mereduksi spesi elektroaktif lain yaitu kalium ferisianida dalam larutan buffer pH 5 (Skoog et.,al 1996). Di dalam katoda terjadi reaksi reduksi ion Fe^{3+} menjadi ion Fe^{2+} dibantu dengan elektron yang datang dari anoda. Hasil akhir reaksi di dalam kompartemen katoda adalah air, maka diperlukan 2 proton yang disuplai dari kompartemen anoda melewati *Proton Exchange Membrane* Nafion

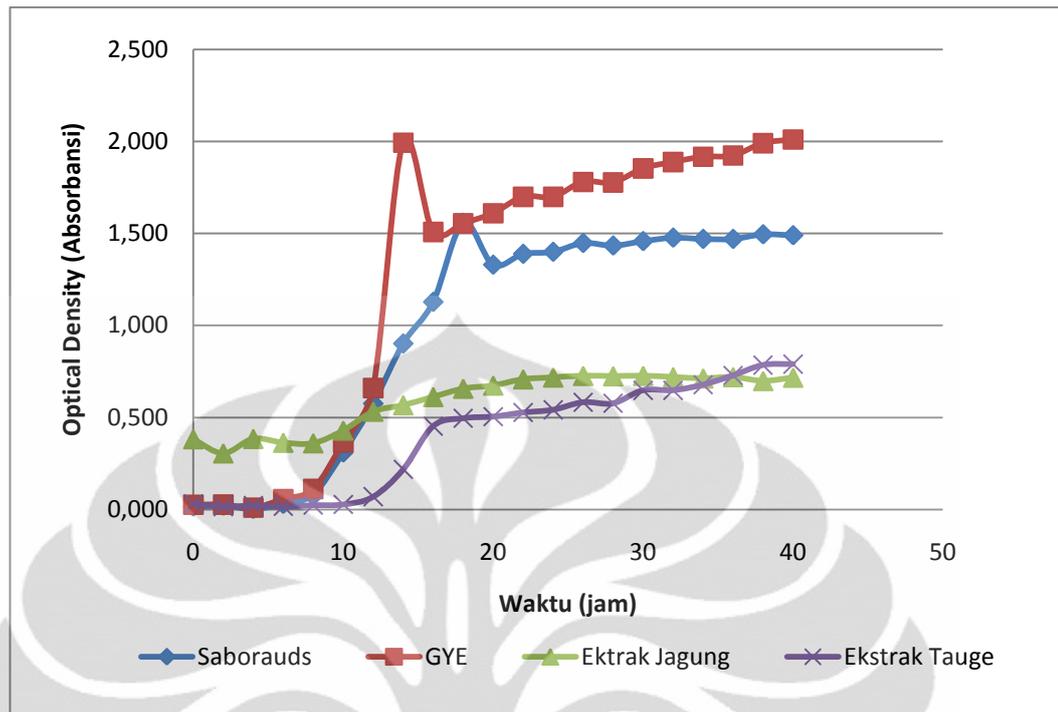
117. Reaksi yang terjadi di dalam kompartemen katoda ini dapat dituliskan seperti pada persamaan 4.2 dan 4.4 berikut ini : (Bruce et.,al, 2004)



4.2 Kurva Pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae* dalam Beberapa Media

Kultur isolat *Saccharomyces cerevisiae* yang akan diaplikasikan ke dalam MFC, sebelumnya dilakukan pengujian untuk mengetahui pertumbuhannya yang paling optimum pada beberapa media yang telah dipersiapkan. Pertumbuhan optimum bakteri dan organisme hidup lain sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungannya seperti pH, suhu, nutrisi, kandungan oksigen atau karbondioksida dan lain sebagainya. Dalam penelitian ini, *Saccharomyces cerevisiae* ditumbuhkan pada beberapa media diantaranya adalah Glucose Yeast Extract (GYE), Saborauds, Tauge Extract, dan media ekstrak jagung muda yang masing-masing diatur pHnya pada nilai 7,0. Kultur *Saccharomyces cerevisiae* diinokulasikan dan diinkubasikan ke dalam inkubator selama 40 jam pada suhu 30 °C.

Pada Gambar 4.2 di bawah ini, dapat dilihat kurva pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae* pada setiap media. Pertumbuhan sel diamati dengan melihat pertambahan jumlah sel berdasarkan teknik *Optical Density* (OD) terhadap waktu inkubasi (Dwidjoseputro, 1994).

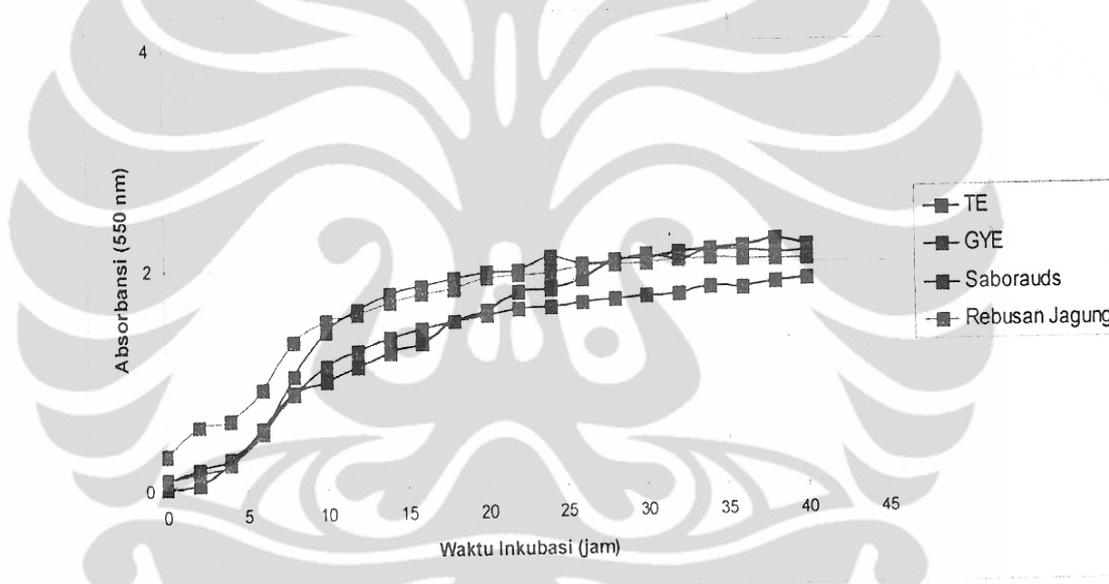


Gambar 4.2 Kurva Pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae* pada Berbagai Macam Medium

Pengukuran absorbansi dilakukan melalui metode Optical Density (OD) dengan menggunakan instrument Spektrofotometer pada panjang gelombang sebesar 550 nm. Berdasarkan pada grafik di atas, didapatkan bahwa nilai optimum pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae* adalah di dalam media GYE (*Glucose Yeast Extract*). Hal ini ditandai dengan nilai $OD_{550\text{ nm}}$ yang paling tinggi dibandingkan pada ketiga medium lainnya, dengan nilai absorbansi yang diperoleh yaitu sebesar 2,010. Pola yang diperoleh dari kurva pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae* pada medium GYE menunjukkan bahwa fase eksponensial berakhir pada jam ke-20 yang ditunjukkan dengan nilai $OD_{550\text{ nm}}$ sebesar 1,610. Setelah 20 jam *Saccharomyces cerevisiae* memasuki fase stasioner, yaitu fase ketika populasinya cenderung stabil atau tidak memberikan peningkatan jumlah sel yang cukup signifikan. Hal ini dikarenakan oleh jumlah sel yang tumbuh sebanding dengan jumlah sel yang mati. Media GYE (*Glucose Yeast Extract*) merupakan media cair yang umum digunakan untuk bakteri atau yeast, karena berisi hampir semua komponen yang dibutuhkan untuk pertumbuhan, yang paling utama yaitu glukosa, tripton (*Pepton from casein*), dan *yeast extract*. *Yeast*

extract yang terkandung dalam medium ini selain kaya akan sumber C dan N terlarut, juga mengandung vitamin B yang sangat dibutuhkan untuk mendukung pertumbuhan sel. Berdasarkan Masuda, riboflavin yang terkandung di dalam *yeast extract* dapat mempercepat proses transfer elektron anodik oleh mikroba (Masuda et.,al, 2010).

Metode pemilihan media di atas dilakukan berdasarkan pada referensi dari Tonggo, dimana dilakukan juga metode *Optical Density* untuk mengetahui media yang terbaik bagi mikroba uji, yaitu *Saccharomyces cerevisiae* dengan hasil data seperti pada Gambar 4.3 di bawah ini :

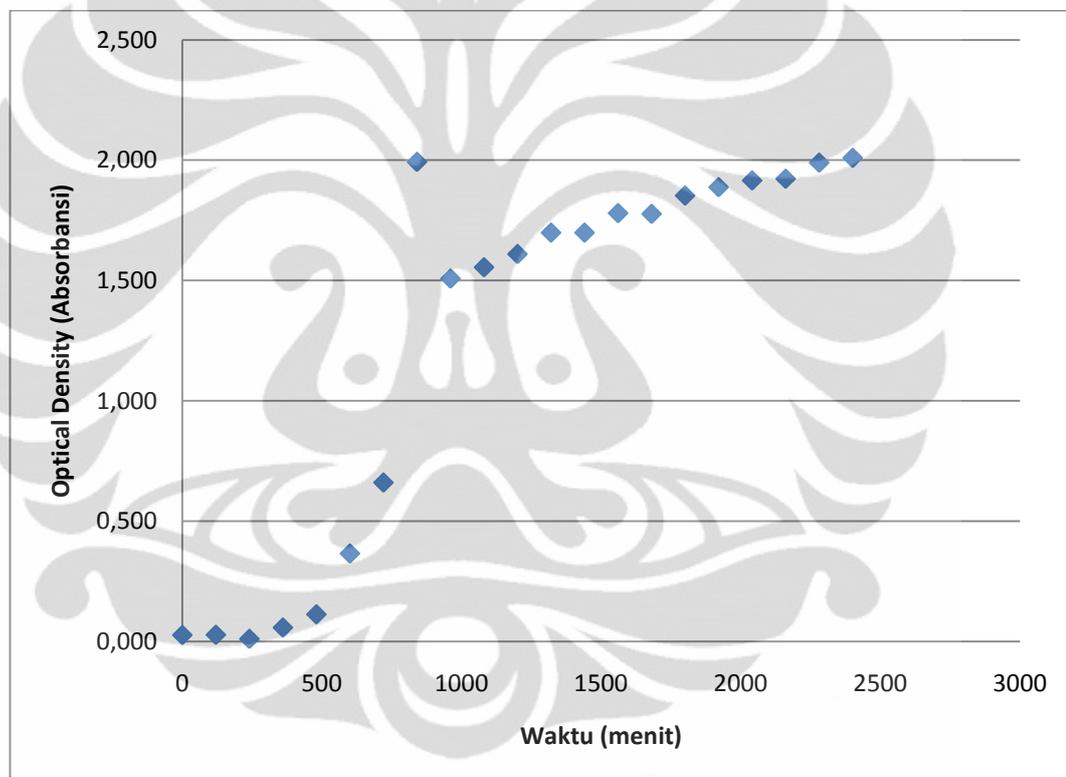


Gambar 4.3 Grafik Pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae* pada Berbagai Media (Tonggo, 2006)

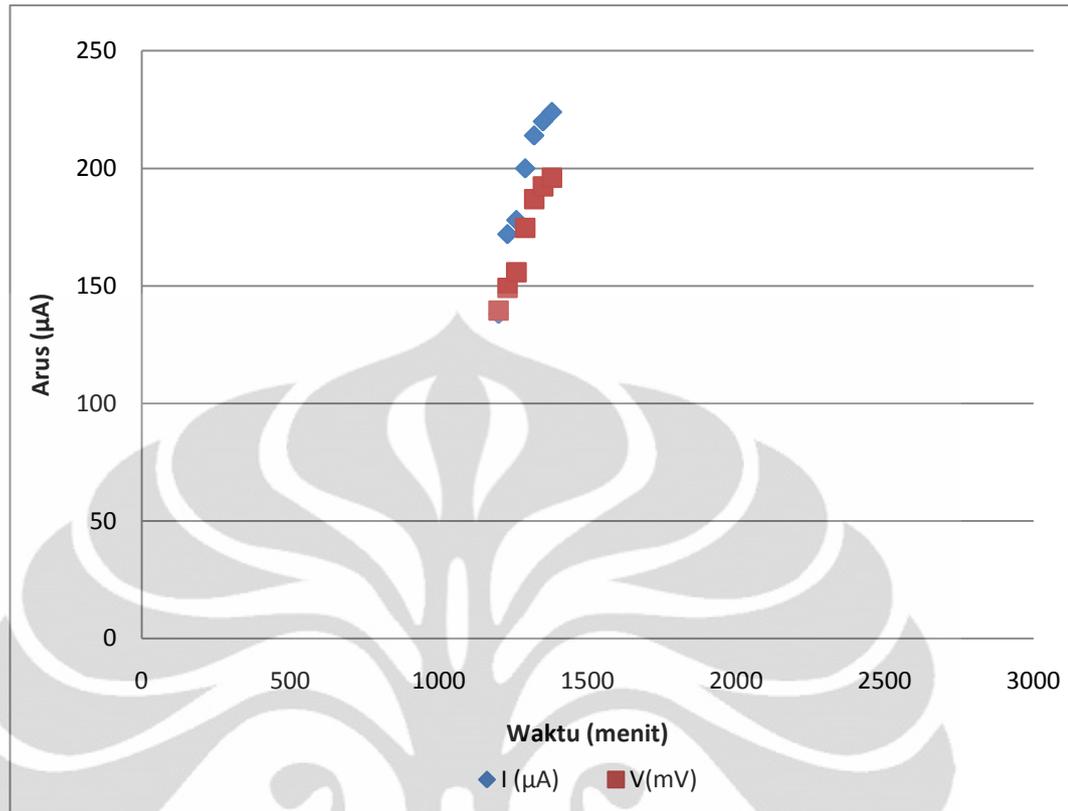
Berdasarkan hasil penelitian Tonggo tersebut, diperoleh bahwa media GYE dan air rebusan jagung manis merupakan media yang baik untuk pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae*. Namun media yang dipilih pada penelitian (Tonggo, 2006), untuk diaplikasikan dalam MFC adalah media air rebusan jagung manis. Berbeda dengan penelitian yang sedang dilakukan saat ini, media yang terpilih adalah media GYE karena media ini memberikan pertumbuhan yang optimum pada *Saccharomyces cerevisiae*. Hal ini dibuktikan dengan nilai hasil pengukuran OD yang mencapai absorbansi sebesar 2,010.

4.3 Pengaruh Pengukuran Arus dan Tegangan Listrik pada Face Eksponensial

Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan terhadap data hasil pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae* dalam media GYE terhadap produksi arus listrik yang dihasilkan. Hal ini dilakukan untuk dapat membuktikan bahwa produksi listrik yang dihasilkan memang berasal dari aktivitas mikroba yang memetabolisme substrat di dalam kompartemen anoda. Data yang berisi hasil pengukuran nilai OD dan pengukuran arus dan tegangan listrik dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 di bawah ini.



Gambar 4.4 Grafik Hasil Pengukuran Nilai Optical Density (Absorbansi) selama 40 jam dengan Menggunakan Media GYE

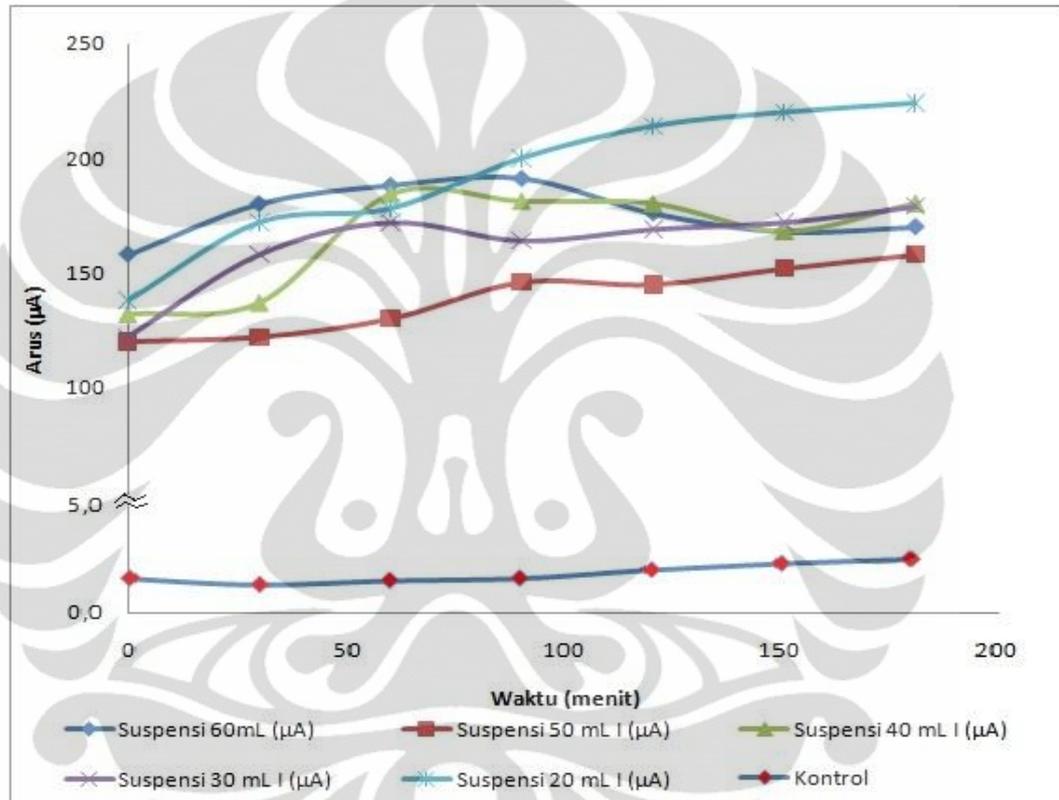


Gambar 4.5 Grafik Hasil Pengukuran Kuat arus dan Tegangan Listrik yang Dilakukan pada Fase Ekspensial (Setelah 20 jam Inkubasi)

Pengukuran kuat arus dan tegangan listrik ini dilakukan saat medium *Saccharomyces cerevisiae* memasuki fase ekponensial, yaitu fase dimana mikroba mengalami pertumbuhan secara optimal. Pada fase ekponensial, pembelahan sel dan peningkatan jumlah sel berjalan sangat cepat. Selain itu, pada fase ini juga terjadi peningkatan produktifitas biomassa sel. Dengan melakukan pengukuran arus dan tegangan listrik pada fase ekponensial ini, diharapkan mikroba dalam sistem MFC dapat memproduksi arus listrik lebih besar. Pada Gambar di atas, dapat dilihat bahwa arus listrik yang dihasilkan mencapai 224 μ dengan tegangan yang terukur yaitu sebesar 196 mV. Sedangkan pengukuran arus listrik yang terkecil adalah sebesar 138 μ A, sehingga dapat disimpulkan bahwa terjadi kenaikan yang cukup signifikan selama pengukuran MFC pada fase eksponensial.

4.4 Pengukuran Arus Listrik Variasi Volume Suspensi Anoda

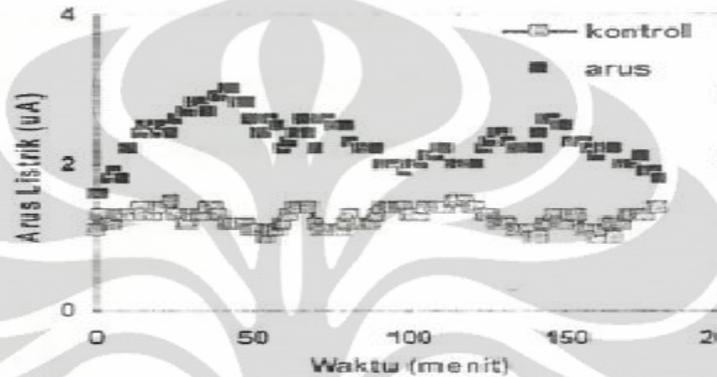
Pada fase eksponensial pembelahan sel dan peningkatan jumlah sel di dalam mikroba berjalan sangat cepat. Pada saat ini, *Saccharomyces cerevisiae* melakukan respirasi untuk pembentukan ATP yang akan digunakan untuk pertumbuhan. Pada Gambar 4.6 diperlihatkan hasil pengukuran arus dan tegangan listrik dalam sistem MFC selama 3 jam volume suspensi anoda pada sistem MFC.



Gambar 4.6 Grafik Pengukuran Arus Listrik pada Variasi Volume Suspensi Anoda

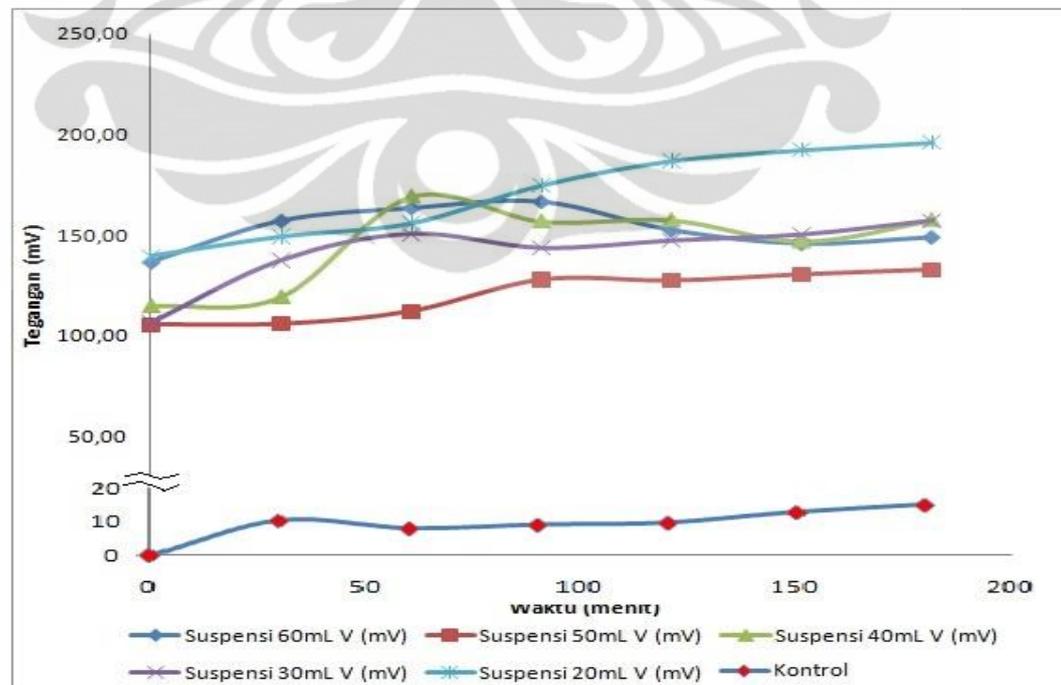
Pengukuran yang dilakukan pada kondisi aerob ini, cenderung mengalami kenaikan. Hal ini menunjukkan peningkatan aktivitas metabolisme mikroba yang melibatkan glukosa sebagai substrat. Sejalan dengan berkurangnya jumlah glukosa yang dikonsumsi, maka terjadi penurunan arus listrik dan voltase. Penurunan ini juga disebabkan karena diproduksi zat-zat buangan yang tidak diperlukan lagi, sehingga lingkungan tempat tinggalnya mengalami perubahan. Perubahan ini dapat memberikan kontribusi pada peningkatan jumlah sel yang mati.

Hasil yang didapat dari penelitian ini, dibandingkan dengan hasil dari penelitian Tonggo (2006). Tonggo melakukan pengukuran MFC pada reaktor dengan desain *H-cell* dengan menggunakan media ekstrak jagung dan lempeng karbon sebagai elektrodanya. Data hasil pengukuran dari penelitian Tonggo dapat dilihat pada Gambar 4.7 di bawah ini.



Gambar 4.7 Grafik Pengukuran Arus Listrik (Tonggo, 2006)

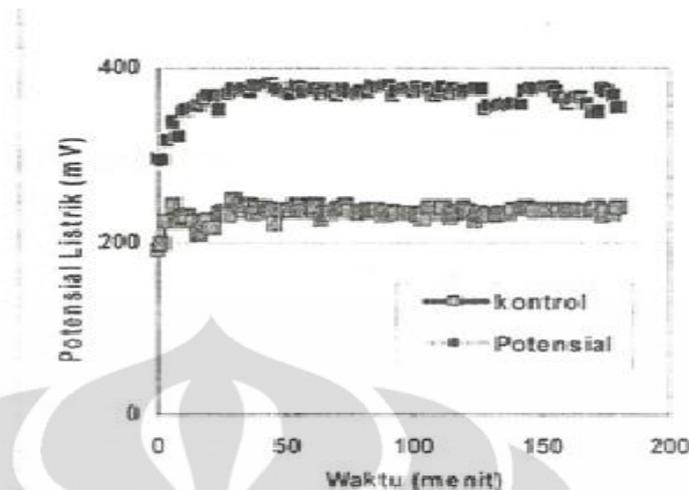
Sedangkan Gambar 4.8 dibawah ini merupakan data hasil pengukuran tegangan listrik dengan variasi volume suspensi anoda.



Gambar 4.8 Grafik Pengukuran Voltase pada Variasi Volume Suspensi Anoda

Pada pengukuran beberapa sampel, terjadi penurunan tegangan listrik. Hal ini disebabkan oleh polarisasi yang terjadi pada elektroda. Polarisasi elektroda terjadi pada kompartemen anoda ketika pengukuran elektrokimia sudah melewati arus maksimumnya (Bruce et.,al, 2006). Metabolisme *Saccharomyces cerevisiae* juga menghasilkan gas hidrogen. Gas hidrogen ini semakin lama akan semakin banyak dan akan menutupi permukaan anoda. Semakin lama waktu pengukuran, gelembung dari gas hidrogen akan semakin menutupi hampir seluruh permukaan anoda. Hal ini menyebabkan penurunan arus dan tegangan listrik yang dihasilkan dalam sistem MFC.

Selain hal tersebut di atas, menurut Gusphyl, terdapat juga beberapa faktor lain yang memicu terjadinya peningkatan hambatan dalam diantaranya adalah bahwa *Saccharomyces cerevisiae* juga dapat menghasilkan *biofilm*, yang memiliki efek yang sama seperti polarisasi yang terjadi, yaitu meningkatnya hambatan dalam dari anoda yang mengakibatkan penurunan arus dan tegangan listrik yang dihasilkan (Gusphyl, 2004). Biofilm yang terbentuk menyebabkan elektroda terlapis oleh lapisan film. Untuk meregerasinya diperlukan perendaman elektroda dalam larutan HCl dan NaOH masing-masing selama satu hari. Pembentukan produk samping hasil metabolisme mikroba yang melapisi permukaan elektroda dan juga membran penukar proton sehingga mengganggu proses dalam sistem MFC. Kematian sel bakteri akibat adanya perubahan pH dan menurunnya ketersediaan elektron yang akan ditransfer ke elektroda disebabkan karena berkurangnya konsentrasi gula juga dapat menjadi penyebab penurunan beda potensial yang dihasilkan dalam sistem MFC. Grafik hasil pengukuran tegangan listrik dalam penelitian Tonggo dapat dilihat pada Gambar 4.9 di bawah ini.

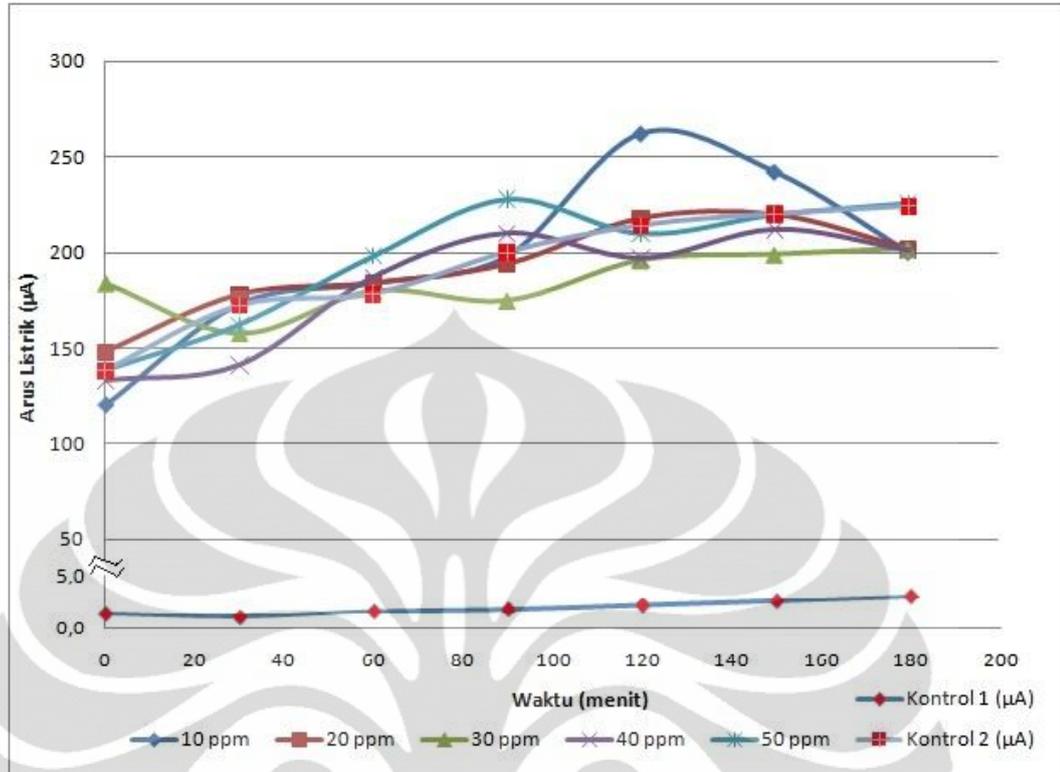


Gambar 4.9 Grafik Hasil Pengukuran Tegangan Listrik (Tonggo, 2006)

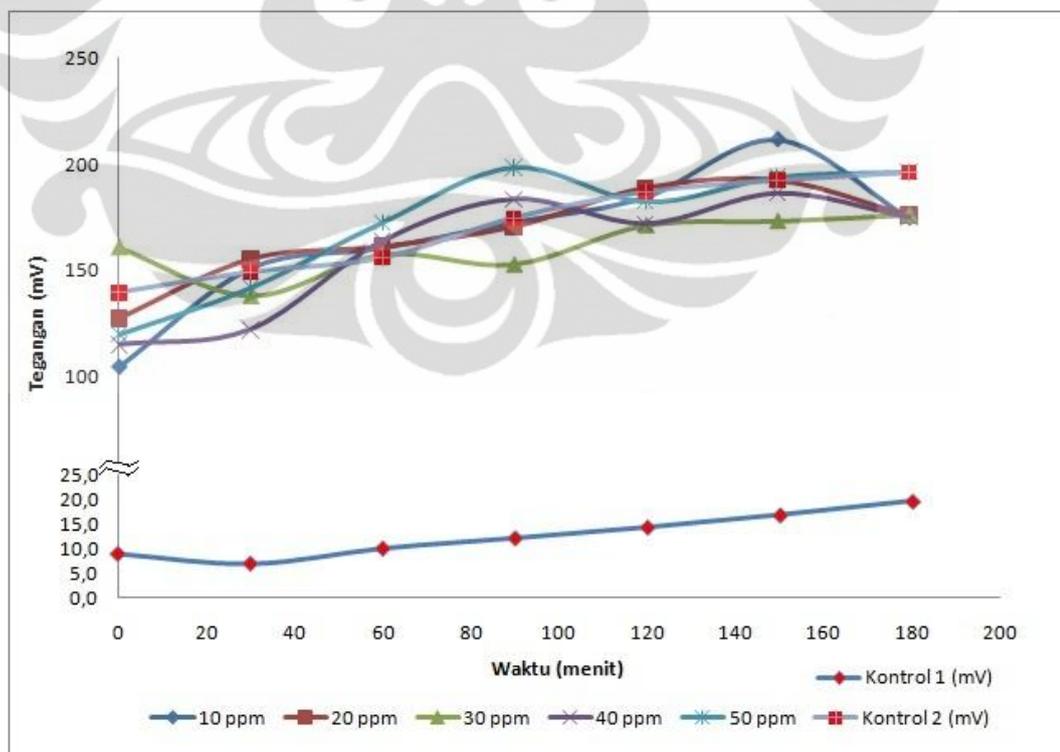
Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Tonggo, diperoleh bahwa arus dan tegangan listrik cenderung mengalami kenaikan, sama halnya dengan data tersebut di atas. Hal ini menunjukkan peningkatan aktivitas metabolisme yang melibatkan glukosa sebagai substrat, sehingga berpengaruh langsung pada hasil pengukuran arus dan tegangan listrik dalam sistem MFC. Pada penelitiannya, Tonggo juga menyatakan bahwa untuk memperoleh arus dan tegangan listrik yang lebih besar dibutuhkan kondisi operasi yang anaerob sehingga tidak terjadi persaingan aseptor elektron di dalam rantai pernafasan yaitu antara oksigen dan mediator elektron (Tonggo,2006).

4.5 Pengukuran Arus Listrik dan Tegangan pada Variasi Konsentrasi Riboflavin

Pengukuran arus dan tegangan listrik dengan menggunakan penambahan riboflavin sebagai mediator elektron, diharapkan dapat lebih meningkatkan hasil dari pengukuran arus dan tegangan listrik dalam sistem MFC. Hasil pengukuran arus dan tegangan listrik dengan variasi konsentrasi riboflavin dalam sistem MFC dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan 4.11 berikut ini.



Gambar 4.10 Grafik Pengukuran Arus Listrik pada Variasi Kosentrasi Riboflavin

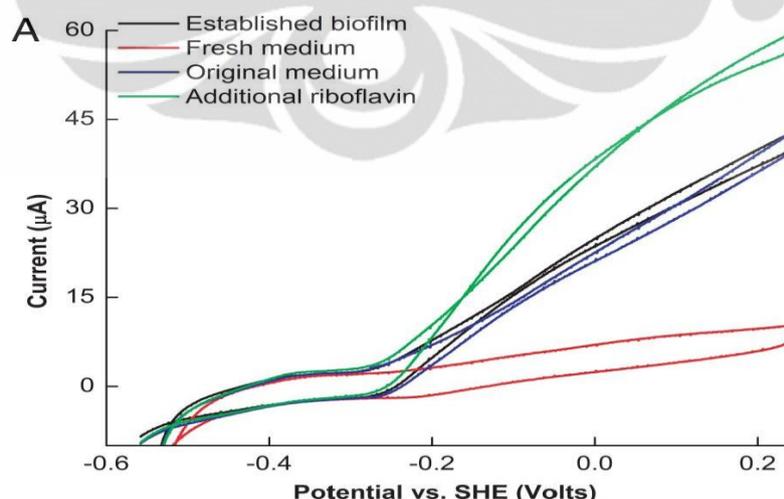


Gambar 4.11 Grafik Pengukuran Tegangan pada Variasi Kosentrasi Riboflavin

Berdasarkan hasil yang diperoleh, terjadi peningkatan arus listrik hingga mencapai 262 μA . Bila dibandingkan dengan hasil optimum pengukuran arus listrik tanpa riboflavin yaitu sebesar 224 μA , maka diperoleh persentase efisiensi sebesar 53,90 %. Hal ini dapat terjadi karena riboflavin sebagai mediator senyawa elektron mampu menghantarkan mikroba ke akseptor elektron yaitu elektroda dalam anoda (Sharon et.,al, 2009). Menurut Masuda, berdasarkan titik tengah potensialnya, riboflavin dapat digunakan sebagai mediator yang hampir optimum untuk biokatalis pada anoda yang berfungsi untuk transfer elektron (Masuda et.,al, 2010).

Pada beberapa pengukuran arus dan tegangan listrik, terjadi penurunan pada beberapa data yang diukur pada waktu tertentu. Penyebabnya adalah sama seperti yang telah dipaparkan di atas, namun pada percobaan dengan penambahan riboflavin ini dapat juga disebabkan oleh terjadinya denaturasi pada mediator transfer elektron sehingga mempengaruhi kemampuannya dalam proses transfer elektron dari membran plasma ke permukaan elektroda dan terjadinya persaingan antara mediator dan oksigen sebagai akseptor elektron (Gusphyl, 2004).

Terdapat beberapa penelitian yang telah menggunakan riboflavin sebagai mediator elektron dalam MFC, salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh Marsili, dengan hasil data seperti pada Gambar 4.12 di bawah ini.



Gambar 4.12 Hasil Pengukuran Kuat Arus dan Tegangan Listrik pada Penambahan Riboflavin dengan Konsentrasi Sebesar 225 nM (Marsili et.,al 2008)

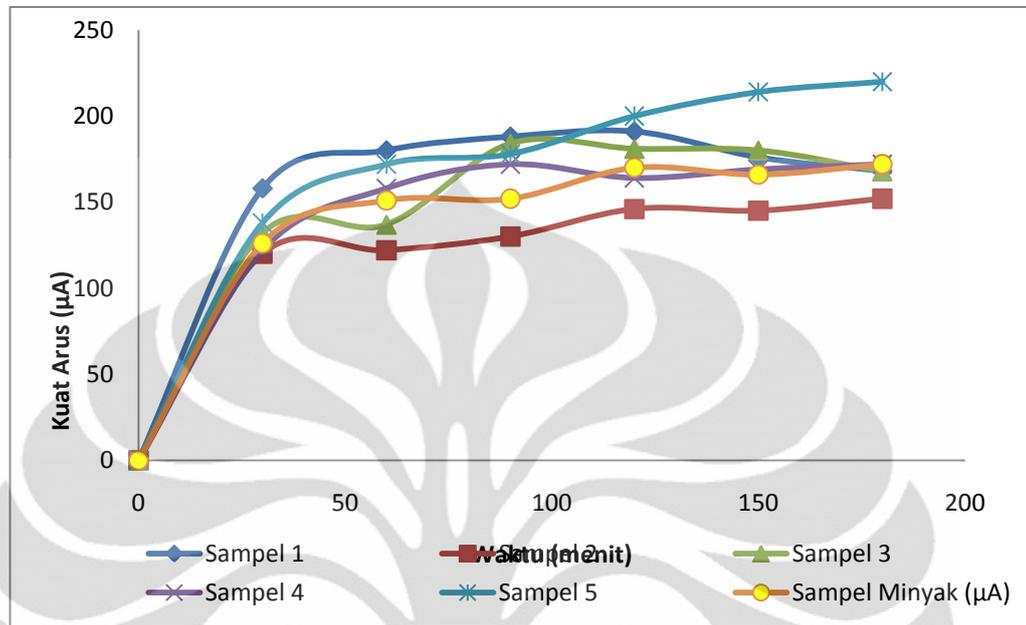
Pada penelitiannya, Marsili menggunakan kultur mikroba *Shewanella oneidensis* MR-1 dan MR-4 yang diaplikasikan dalam MFC dengan kondisi anaerob. Sedangkan elektroda yang digunakan adalah elektroda karbon dengan laktat sebagai substratnya. Menurut Marsili, penambahan riboflavin dilakukan dengan asumsi bahwa riboflavin dapat menghantarkan elektron dengan jarak hingga mencapai 50 μm dari permukaan sel (Marsili et.,al, 2008).

Penelitian yang dilakukan dengan penambahan riboflavin ini, mampu menghasilkan arus listrik hingga mencapai $\pm 60\mu\text{A}$. Desain reaktor, membran yang digunakan, dan mediator elektron yang digunakan sama dengan penelitian yang telah dilakukan saat ini. Dari hasil yang diperoleh di atas, dapat dibuat satu kesimpulan bahwa *Shewanella oneidensis* dalam sistem MFC dengan penambahan riboflavin sebagai mediator dapat meningkatkan arus listrik yang dihasilkan, sama halnya dengan penelitian yang dilakukan dengan menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* pada media GYE.

4.6 Perngujian MFC dengan Penambahan Minyak Nabati

Menurut Kiyosaki, minyak nabati yang digunakan sebagai sumber karbon untuk media pertumbuhan mikroorganisme penghasil riboflavin harus dalam bentuk medium cair (Kiyosaki et.,al 2010). Berdasarkan Park, tingginya kandungan minyak nabati yang mencapai 40 % pada *spent bleaching earth*, memiliki potensial untuk dimanfaatkan sehingga perlu dilakukan *recovery*, selain itu *spent bleaching earth* dapat dilakukan proses regenerasi untuk digunakan kembali dalam proses pemurnian minyak nabati ataupun dikembangkan melalui berbagai macam proses untuk menghasilkan bioproduk yang lebih bermanfaat (Park et.,al, 2003). Salah satu penggunaan minyak nabati dari sisa proses *Activated Bleaching Earth* (ABE) adalah penggunaannya dalam sistem MFC. Menurut Park, kandungan minyak dalam limbah ABE pun dapat dimanfaatkan sebagai bioproduk yang mengandung riboflavin (Park et.,al, 2003). Dalam hal ini, minyak sisa proses ABE, selain dapat bermanfaat sebagai substrat bagi mikroba, dapat juga meningkatkan kapasitas mikroba dalam menghasilkan riboflavin yang

berguna sebagai mediator elektron dalam sistem MFC. Data hasil pengukuran MFC dengan penambahan minyak dapat dilihat pada Gambar 4.11 di bawah ini :



Gambar 4.13 Grafik Hasil Pengukuran MFC dengan Penambahan M. Nabati

Berdasarkan grafik di atas dapat dilihat bahwa terjadi penurunan jumlah arus listrik yang dihasilkan setelah 1 jam proses MFC, hal ini disebabkan oleh pengadukan yang dilakukan selama proses pengukuran MFC melalui *magnetic stirrer*. Menurut (Kiyosaki et.,al 2010), dalam kondisi pengadukan, minyak nabati akan teremulsi dan tersuspensi dalam cairan yang menandakan terjadinya kematian dan hancurnya sel mikroba, sehingga menyebabkan penurunan metabolisme yang juga akan berakibat pada penurunan produksi energi listrik.

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa dengan penambahan minyak nabati, arus listrik dapat tetap dihasilkan dengan hasil yang setara pada eksperimen MFC pada variasi suspensi volume anoda. Hal ini dapat disebabkan oleh tingkat keasaman dalam kompartemen anoda. Menurut Park, Hal ini menunjukkan bahwa nilai asam (AV) dari 23 mg KOH/g minyak memiliki efek yang dapat diabaikan pada produksi riboflavin dan sebaliknya bila lebih dari nilai asam tersebut. Hal ini dapat menyebabkan turunnya produksi riboflavin sehingga menurun juga efisiensi MFC dalam menghasilkan energi listrik akibat tidak adanya riboflavin sebagai mediator elektron.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

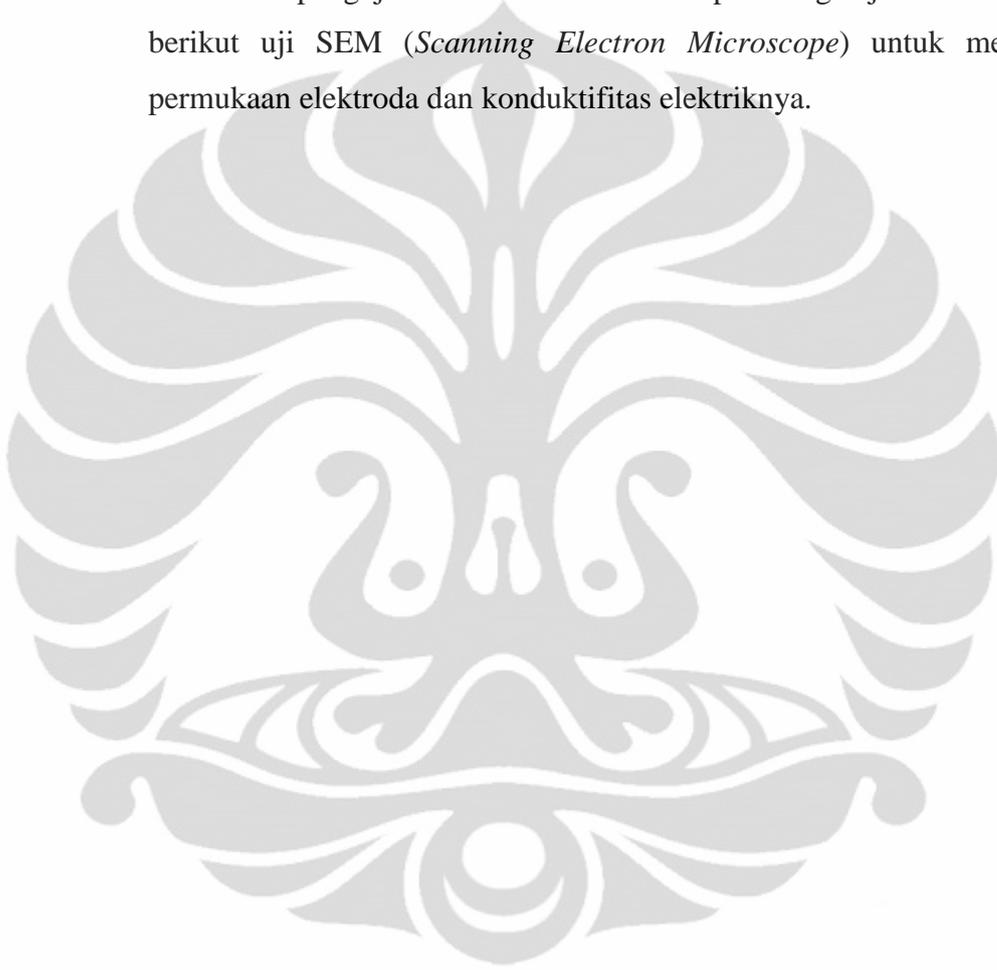
Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, diperoleh beberapa kesimpulan yaitu:

- Kultur mikroba *Saccharomyces cerevisiae* dapat digunakan untuk memproduksi energi listrik alternatif dalam sistem *Microbial Fuel Cell*.
- Pada variasi media pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae*, didapat bahwa media GYE adalah media yang paling optimum untuk pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae*.
- Pada variasi volume suspensi anoda, didapat bahwa produksi energi listrik yang optimum diperoleh dengan menggunakan suspensi mikroba sebanyak 20 mL dalam bioreaktor MFC.
- Pada variasi konsentrasi riboflavin, didapat bahwa produksi energi listrik yang optimum diperoleh dari konsentrasi riboflavin sebesar 10 ppm.
- Efisiensi produksi listrik yang dihasilkan melalui pengukuran MFC dengan dan tanpa menggunakan riboflavin sebagai mediator elektron mencapai 53,90 %.
- Minyak nabati dapat diaplikasikan ke dalam sistem *Microbial Fuel Cell*.
- Penambahan minyak nabati dalam kultur mikroba *Saccharomyces cerevisiae* terbukti dapat meningkatkan kadar riboflavin selama proses inkubasi.

5.2 Saran

- Penelitian yang telah dilakukan belum mencapai optimal maka dari itu perlu dilakukannya penelitian lanjut untuk dapat lebih menghasilkan sumber energi alternatif berupa energi listrik dari sistem MFC.

- Percobaan tambahan dengan menggunakan minyak nabati belum dilakukan secara optimal, oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut.
- Dilakukan pengujian sistem MFC terhadap konsorsium mikroba yang diperoleh dari berbagai macam limbah.
- Dilakukan pengujian sistem MFC terhadap berbagai jenis elektoda dan berikut uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk mengetahui permukaan elektroda dan konduktifitas elektriknya.

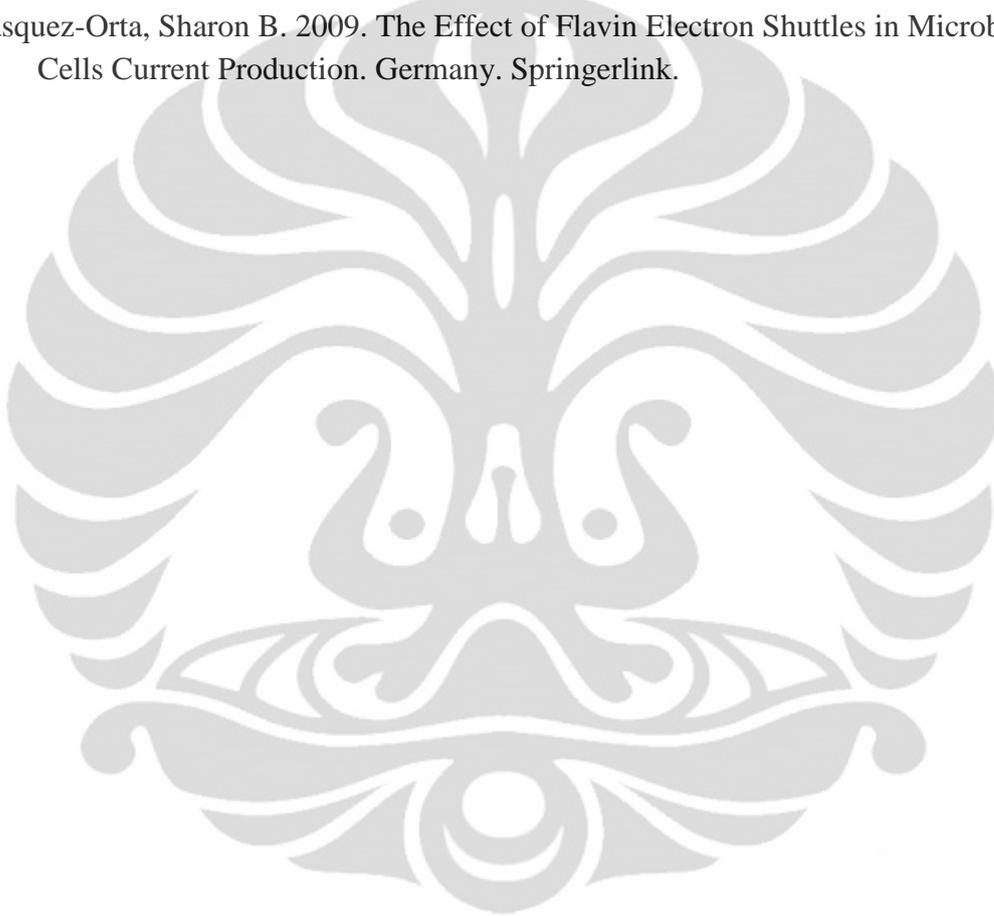


DAFTAR PUSTAKA

- Brad J, Allen and Larry R. Faulker. 2001. *Electrochemical Methods Fundamentals and Application*. Second Edition. University of Texas, Austin. John Willey & sons Inc.
- Bond DR dan Lovley DR. 2003. Electricity Production by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes. *J. Applied Environmental Microbiology* 69: 1548-1555.
- Buchanan E., Robert and Estelle D. Buchanan. 1961. *Bacteriology*. New York. The Macmillan Company.
- Cantarow MD., Abraham and Bernard Schepartz PhD. 1962. *Biochemistry*. London. W.B. Saunders Company.
- Chen ,Guo-Wei. 2008. *Application of Biocathode in Microbial Fuel Cells: Cell Performance and Microbial Community*. China. Springerlink.
- Cheng S, Liu H, dan Logan BE. 2006^a. Increased Performance of Single-Chamber Microbial Fuel Cell Using an Improved Cathode Structure. *J. Electrochemistry Communications* 8: 489-494.
- Choi Y, Jung E, Park H, Park SR, Jung S *et al.* 2004. Construction of Microbial Fuel Cell using Thermophilic Microorganisms, *Bacillus licheniformis* and *Bacillus thermoglucosidasius*. *J. Korean Chem. Soc.* 25: 813-818.
- De Schamphelaire L, Rabaey K, Boeckx P, Boon N, dan Verstraete W. 2008. Outlook for Benefits of Sediment Microbial Fuel Cell with Two Bio-electrodes. *J. Microbial Biotechnology* 1: 446-462.
- Dowel, Mc and Lee R. 2008. *Vitamins in Animal and Human Nutrition* (2nd Edition). Willey-Backwell Publisher.
- Gorby YA, Yanina S, McLean JS, Rosso KM, Moyles D, *et al.* 2006. Electrically Conductive Bacterial Nanowires Produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and Other Microorganisms. *J. Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 103: 11358–11363.
- Gosser K., David. 2004. *Cyclic Voltammetry Simulation and Analysis of Reaction Mechanism*. Canada. Wiley-Vch.
- Hao Yu, Eileen. 2007. *Microbial Fuel Cell Performance with Non-Pt Cathode Catalysts*. United Kingdom. Elsevier.
- Holmes DE, Bond DR, O'Neil RA, Reimers CE, Tender LM, dan Lovley DR. 2004. Microbial Community Associates with Electrodes Harvesting Electricity from a Variety of Aquatic Sediments. *J. Microbial Ecol.* 48: 178-190.
- Holmes, Dawn E. 2008. Genes for Two Multicopper Proteins Required for Fe(III) oxide Reduction in *Geobacter sulfurreducens* have Different Expression Patterns Both in the Subsurface and on Energy-harvesting Electrodes. USA. SGM.

- Justin , A. Gusphyl. 2004. Biofuel Cells as a Possible Power Source For Impantable Electronic Device. University of Pittsburgh.
- Kim HJ, Park HS, Hyun MS Chang IS, Kim M, dan Kim BHA. 2002. Mediator-less Microbial Fuel Cell Using a Metal Reducing Bacterium, *Shewanella putrefaciens*. J. Enzyme Microbiology Technology 30: 145-152.
- Lee, Seung Won. 2009. Effect of bacterial cell size on electricity generation in a single-compartmented microbial fuel cell. Korea. Springer Science and Business Media.
- Lens, Piet. 2005. Biofuels for Fuel Cells-Renewable Energy from Biomass Fermentation. London. IWA Publishing.
- Logan BE. 2008. *Microbial Fuel Cell*. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd.
- Lovely DR. 2006. Bug Juice: Harvesting Electrocitcy with Microorganisms. J. Nat Rev Microbial 4:497-508.
- Madiraju, Kartik. 2004 Review Article : Electricity Production Using Yeast and Anaerobic Sludge as Electron Mediators in Conventional MFC and RMFC Built with Recyclable Materials.
- Maggy, Lehninger. 1988. Principles of Biochemistry First Edition. Worth Edition.
- Marsili, Enrico. 2008. Shewanella Secretes Flavins that Mediate Extracellular Electron Transfer. University of Texas, Austin. PNAS.
- Masuda, Masaki. 2010. Flavins Contained in Yeast Extract are Exploited for Anodic Electron Transfer by Lactococcus lactis. Kyoto University, Japan. Elsevier.
- Mu Chiao. 2001. Design of Microfabricated Microbial Fuel Cell. Departement of Engineering.
- Nevin, K. P. 2008. Power output and columbic efficiencies from biofilms of *Geobacter sulfurreducens* comparable to mixed community microbial fuel cells. University of California, USA. Society for Applied Microbiology and Blackwell Publishing Ltd.
- O'Hayre, Ryan. 2006. Fuel Cells Fundamentals. New Jersey. John Willey & Sons, Inc.
- Prof. Dr. Dwidjoseputro. 1985. Dasar-dasar Mikrobiologi. Universitas Brawijaya. Penerbit Djembatan.
- Rabaey, Korneel. 2003. A Microbial Fuel Cell Capable of Converting Glucose to Electricity at High Rate and Efficiency. Ghent University, Belgium. *Kluwer Academic Publisher*.
- Rajalaksmi and Dhathathreyan. 2008. Present Trends in Fuel Cell Technology Development. New York. Nova Science Publisher, Inc.
- Ren Z, Ward TE, dan Regan JM. 2007. Electricity Production from Cellulose in a Microbial Fuel Cell Using a Dified Binary Culture. J. Environmental Science Technology 41: 4781-4786.

- Shukla, A.K, Suresh, P, Berchmans, S, Rajendran, A. 2004. Review Article Biological Fuel Cell and Their Application. *Current Science*. 87(4): 455-468.
- Skoog, AD, West D.M, Holler, F.J. 1996. Fundamentals of Analytical Chemistry.7th ed. Saunders Collage Publishing, Florida.
- Strik , David. B . T . B . 2010.Solar Energy Powered Microbial Fuel Cell with a Reversible Bioelectrode. Netherland. Americal Chemical Society.
- Trinh, Ngoc Trung. 2008.Increased generation of electricity in a microbial fuel cell using *Geobacter sulfurreducen*. Sungkyunkwan University. Korea.
- Velasquez-Orta, Sharon B. 2009. The Effect of Flavin Electron Shuttles in Microbial Fuel Cells Current Production. Germany. Springerlink.



LAMPIRAN

Lampiran 1 Sistem *Microbial Fuel Cell*



Lampiran 2 Data Absorbansi Fase Pertumbuhan Media dalam 50 mL Medium

No.	Waktu (jam)	Optical Density (Absorbansi)			
		Saborauds	GYE	Ekstrak Jagung	Ekstrak Tauge
1	0	0,017	0,026	0,382	0,031
2	2	0,021	0,027	0,305	0,016
3	4	0,004	0,010	0,384	0,022
4	6	0,031	0,057	0,363	0,017
5	8	0,083	0,112	0,360	0,024
6	10	0,310	0,365	0,429	0,028
7	12	0,576	0,660	0,532	0,070
8	14	0,902	1,993	0,567	0,218
9	16	1,128	1,508	0,612	0,453
10	18	1,557	1,555	0,657	0,496
11	20	1,330	1,610	0,674	0,505
12	22	1,389	1,699	0,708	0,527
13	24	1,400	1,699	0,718	0,542
14	26	1,448	1,780	0,727	0,583
15	28	1,434	1,777	0,725	0,577
16	30	1,458	1,853	0,727	0,648
17	32	1,477	1,888	0,720	0,648
18	34	1,470	1,916	0,713	0,678
19	36	1,470	1,923	0,720	0,728
20	38	1,495	1,990	0,699	0,785
21	40	1,490	2,010	0,717	0,790

Lampiran 3 Data Pengukuran Kuat Arus dan Voltase serta Sifat Kimia MFC (Tanpa Penambahan Riboflavin)

Sampel 60 ml suspensi

Waktu (Menit)	Kuat Arus (μA)	Voltase (mV)	DO (mg/L)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	158	136,50	0,25	7,23	25,50
30	180	157,10	0,17	7,04	25,30
60	188	163,40	0,16	6,80	25,20
90	191	166,60	0,15	6,50	25,20
120	176	152,40	0,18	6,50	25,20
150	168	145,70	0,11	6,47	25,30
180	170	148,90	0,05	6,40	25,40

Sampel 50 ml suspensi

Waktu (Menit)	Kuat Arus (μA)	Voltase (mV)	DO (mg/L)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	120	105,50	3,30	6,81	26,00
30	122	105,80	3,10	6,84	26,00
60	130	112,10	3,50	6,82	26,10
90	146	127,80	2,30	6,85	26,10
120	145	127,30	1,88	6,82	26,10
150	152	130,40	1,70	6,82	26,10
180	158	132,80	1,68	6,80	26,40

Sampel 40 ml suspensi

Waktu (Menit)	Kuat Arus (μA)	Voltase (mV)	DO (mg/L)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	132	114,90	0,14	7,03	25,70
30	137	119,40	0,08	7,01	25,80
60	184	169,20	0,06	6,94	25,80
90	181	157,00	0,07	6,86	25,80
120	180	157,60	0,05	6,82	25,90
150	168	147,10	0,02	6,74	25,90
180	180	157,50	0,00	6,69	26,00

Sampel 30 ml suspensi

Waktu (Menit)	Kuat Arus (μA)	Voltase (mV)	DO (mg/L)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	122	106,70	0,77	6,95	26,30
30	158	137,50	0,68	6,94	26,30
60	172	150,50	0,57	6,78	26,30
90	164	143,60	0,50	6,79	26,30
120	169	147,20	0,45	6,67	26,30
150	172	150,20	0,25	6,60	26,40
180	179	157,10	0,27	6,48	26,40

Sampel 20 ml suspensi

Waktu (Menit)	Kuat Arus (μA)	Voltase (mV)	DO (mg/L)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	138	139,50	0,36	7,09	25,90
30	172	149,20	0,24	6,97	26,10
60	178	155,80	0,21	6,90	25,90
90	200	174,70	0,24	6,82	25,90
120	214	186,90	0,22	6,82	25,70
150	220	192,30	0,18	6,70	25,60
180	224	196,00	0,11	6,71	25,50

Blanko Buffer

Waktu (menit)	Kuat Arus (μA)	Tegangan (mV)
0	1,6	10,4
30	1,3	8,0
60	1,5	9,1
90	1,6	9,7
120	2,0	12,9
150	2,3	15,1
180	2,5	16,5

Lampiran 4 Data Pengukuran Kuat Arus dan Voltase serta Sifat Kimia MFC (Dengan Penambahan Riboflavin)

Sampel 10 ppm riboflavin

Waktu (Menit)	Kuat Arus (μA)	Voltase (mV)	DO (mg/L)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	120	104,6	6,21	6,85	26,4
30	173	151,1	5,91	6,88	26,2
60	184	160,7	5,94	6,89	26,2
90	198	172,8	5,75	6,81	26,1
120	200	174,6	5,41	6,9	26,2
150	242	211,5	4,75	6,86	26,1
180	262	228,9	3,32	6,87	26,2

Sampel 20 ppm riboflavin

Waktu (Menit)	Kuat Arus (μA)	Voltase (mV)	DO (mg/L)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	148	127,4	6,86	6,84	26,1
30	178	155,3	5,78	6,86	25,9
60	184	161,3	4,83	6,87	25,8
90	194	170,6	4,10	6,86	25,8
120	218	188,9	0,24	6,86	25,9
150	220	192,4	0,09	6,74	25,8
180	202	175,9	0,00	6,69	25,8

Sampel 30 ppm riboflavin

Waktu (Menit)	Kuat Arus (μA)	Voltase (mV)	DO (mg/L)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	184	160,9	5,22	6,87	25,6
30	158	137,8	3,61	6,87	25,4
60	180	157,5	2,63	6,83	25,4
90	175	152,8	1,65	6,82	25,4
120	196	171,3	0,48	6,80	25,4
150	199	173,3	0,27	6,77	25,5
180	202	176,3	0	6,67	25,5

Sampel 40 ppm riboflavin

Waktu (Menit)	Kuat Arus (μA)	Voltase (mV)	DO (mg/L)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	133	115,1	4,76	6,90	26,00
30	141	122,2	3,05	6,84	25,90
60	187	163,7	2,02	6,84	26,20
90	197	172,0	1,42	6,73	25,70
120	210	183,5	0,32	6,80	27,10
150	212	186,2	0,21	6,61	27,40
180	201	175,0	0,17	6,61	27,10

Sampel 50 ppm riboflavin

Waktu (Menit)	Kuat Arus (μA)	Voltase (mV)	DO (mg/L)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	138	120,1	8,31	6,82	26,0
30	162	142,0	7,89	6,79	26,0
60	198	172,6	4,96	6,78	26,2
90	228	198,4	3,38	6,71	25,7
120	210	182,4	2,84	6,71	26,2
150	220	194,0	2,61	6,69	26,1
180	226	196,3	1,77	6,59	26,1

Blanko Buffer dengan riboflavin

Waktu (menit)	Kuat Arus (μA)	Tegangan (mV)
0	1,4	8,9
30	1,1	6,9
60	1,6	10,0
90	1,8	12,1
120	2,2	14,3
150	2,6	16,8
180	3,0	19,6

Lampiran 5 Data Hasil Pengukuran MFC dengan penambahan Minyak Nabati

Waktu (Menit)	Kuat Arus (μA)	Voltase (mV)	DO (mg/L)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	126	109,3	5,62	6,74	25,9
30	151	130,2	5,14	6,78	25,7
60	152	131,9	4,60	6,74	25,8
90	170	148,7	3,61	6,74	25,9
120	166	144,4	2,34	6,66	25,9
150	172	148,2	1,92	6,60	25,9
180	189	151,4	1,67	6,63	26,1

Kandungan Riboflavin Selama Pengukuran

Waktu (jam)	Absorbansi	
	Tanpa M.Nabati	Dengan M.Nabati
0	0,226	0,239
30	0,233	0,229
60	0,239	0,243
90	0,243	0,256
120	0,274	0,277
150	0,291	0,295
180	0,305	0,316