



UNIVERSITAS INDONESIA

**OPTIMASI KINERJA *MICROBIAL FUEL CELL* (MFC)
UNTUK PRODUKSI ENERGI LISTRIK MENGGUNAKAN
BAKTERI *Lactobacillus bulgaricus***

SKRIPSI

**DENI NOVITASARI
0706269691**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**OPTIMASI KINERJA *MICROBIAL FUEL CELL* (MFC)
UNTUK PRODUKSI ENERGI LISTRIK MENGGUNAKAN
BAKTERI *Lactobacillus bulgaricus***

SKRIPSI

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

**DENI NOVITASARI
0706269691**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 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 : Deni Novitasari

NPM : 0706269691

Tanda Tangan : 

Tanggal : 13 Juni 2011

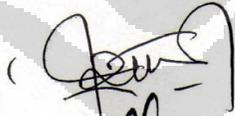
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Deni Novitasari
NPM : 0706269691
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Optimasi Kinerja *Microbial Fuel Cell* untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Bakteri *Lactobacillus bulgaricus*.

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 ()
Penguji : Prof. Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng ()
Penguji : Dr. Eng. Muhamad Sahlan, S.Si, M.Eng ()
Penguji : Dr. Ing. Ir. Misri Gozan, M.Tech ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 29 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT 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:

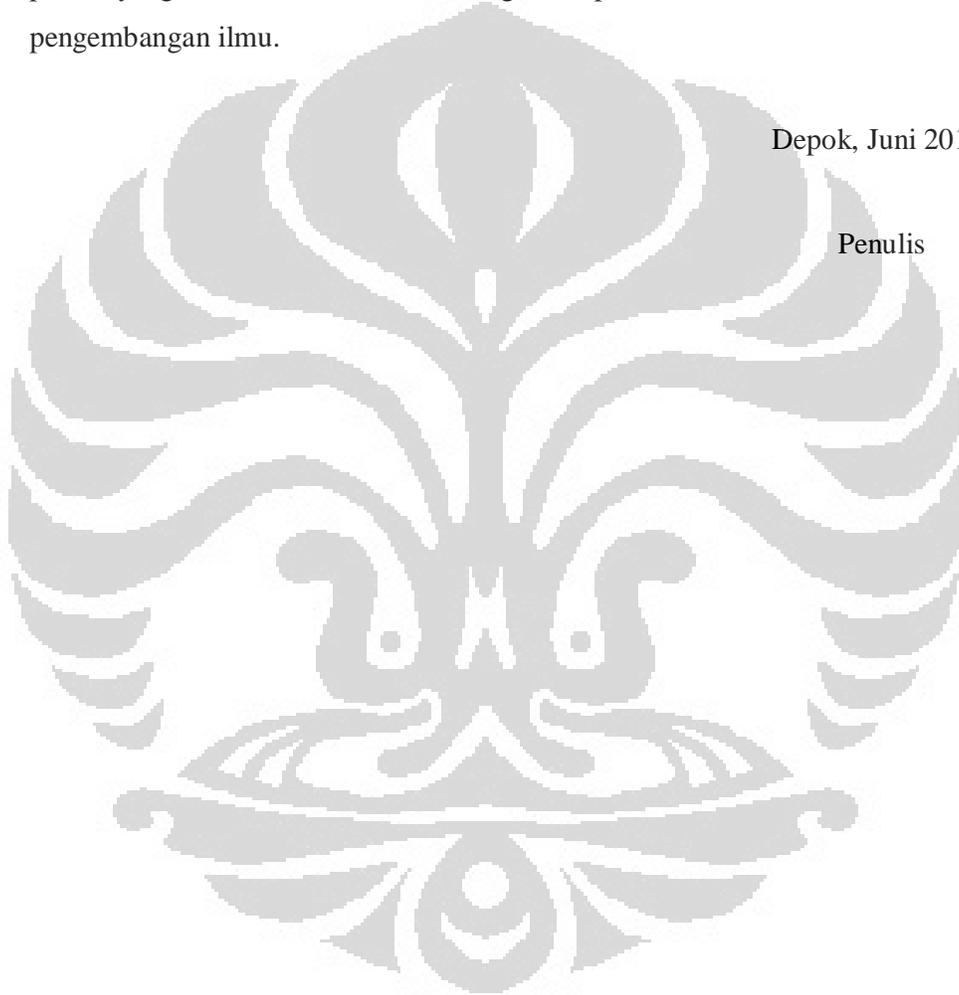
1. Ir. Rita Arbianti, M.Si selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran, serta kesabaran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Para dosen dan karyawan Departemen Teknik Kimia FTUI yang telah memberi ilmu dan membagi wawasannya.
3. Teh Neng dan Ibu Tatiek, selaku mentor dan pembimbing dari Lab. Biokimia Mikrobiologi LIPI Cibinong.
4. Keluarga (mama dan papa) yang telah memberi dukungan dan doa, baik secara langsung maupun tidak langsung.
5. Icha dan Anthony, sebagai teman senasib dan satu bimbingan yang telah memberi dukungan, semangat, dan bantuan selama penelitian.
6. Nova, yang telah memberikan bantuan dan informasinya mengenai penelitian MFC.
7. Irfan, untuk semuanya, baik waktu, dorongan semangat, dukungan, maupun bantuannya selama ini.
8. Muthia dan Ayuko, atas kamar dan waktu kebersamaannya selama penelitian dan penyusunan skripsi.
9. Teman – teman satu riset grup Bioproses, yang telah membantu dan memberikan suasana segar di Lab. Bioproses selama penelitian.
10. Ius, sebagai penanggung jawab Lab. Bioproses atas kesediaannya membantu kegiatan selama di Lab.

11. Teman – teman Teknik Kimia 2007 atas semangat dan informasinya selama ini.
12. Pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuannya selama penyusunan skripsi ini.

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

Depok, Juni 2011

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Deni Novitasari
NPM : 0706269691
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Optimasi Kinerja *Microbial Fuel Cell* untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Bakteri *Lactobacillus bulgaricus*.

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 29 Juni 2011
Yang menyatakan



(Deni Novitasari)

ABSTRAK

Nama : Deni Novitasari
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Penelitian : Optimasi Kinerja *Microbial Fuel Cell* (MFC) untuk
Produksi Energi Listrik Menggunakan Bakteri
Lactobacillus bulgaricus

Kebutuhan energi listrik di Indonesia diperkirakan akan terus meningkat. Namun penggunaan minyak bumi sebagai sumber penghasil energi masih mendominasi, padahal cadangan minyak bumi di Indonesia kian menipis (ESDM, 2010). Oleh karena itu, perlu dikembangkan alternatif penghasil sumber energi yang berkelanjutan, yaitu *Microbial Fuel Cell* (MFC). Pada penelitian ini, digunakan bakteri *Lactobacillus bulgaricus* sebagai penghasil listrik pada reaktor MFC *dual-chamber*. Untuk memperoleh energi listrik yang maksimum, dilakukan variasi *optical density* (OD), waktu operasi, volume reaktor, larutan elektrolit, dan konfigurasi reaktor MFC. Dari penelitian ini, dihasilkan energi listrik maksimum berupa *power density* sebesar 201,9 mW/m² pada reaktor MFC seri dengan OD 0,5 dan kalium permanganat sebagai larutan elektrolit.

Kata kunci : *Microbial Fuel Cell*, *Lactobacillus bulgaricus*, reaktor *dual-chamber*, energi listrik.

ABSTRACT

Name : Deni Novitasari
Study Program : Chemical Engineering
Title : Performance Optimization of Microbial Fuel Cell (MFC) for
Electrical Energy Production Using *Lactobacillus bulgaricus*
Bacteria

Electrical energy demand in Indonesia is increasing in past few years. However, the use of crude oil as the source of energy is still dominating, while the reserve of crude oil in Indonesia is depleted (ESDM, 2010). Therefore, there is necessary to develop an alternative sustainable energy source, such as Microbial Fuel Cell (MFC). In this study, the bacteria *Lactobacillus bulgaricus* is used as electricity-producing in dual-chamber MFC reactor. The maximum electrical energy is reached by varying optical density (OD), operation time, reactor volume, electrolyt solution, and MFC reactor configuration. From this study, the highest electrical energy generated in term of power density is 201,9 mW/m². This value obtained in MFC reactor series using OD 0,5 and potassium permanganate as electrolyt solution.

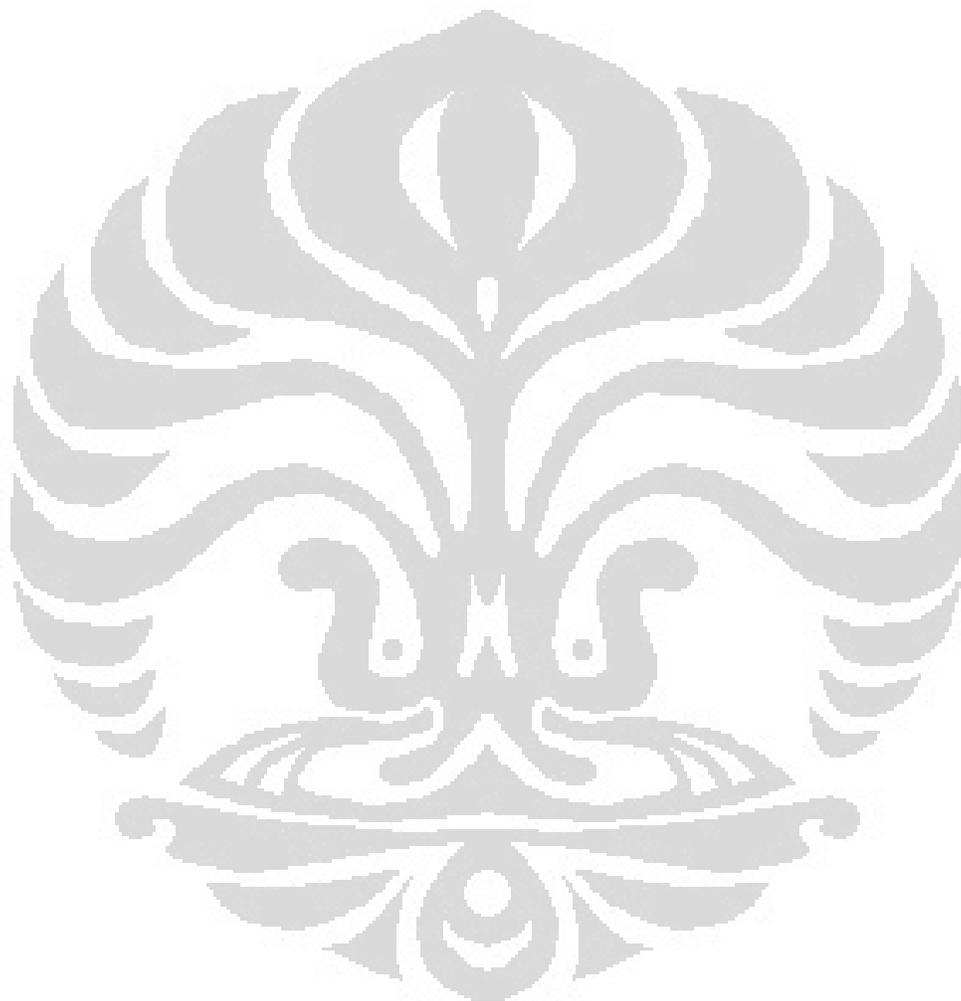
Keyword : Microbial fuel cell, *Lactobacillus bulgaricus* bacteria, dual-chamber reactor, electrical energy.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Penelitian.....	3
1.5 Tempat dan Waktu	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 <i>Fuel Cell</i>	4
2.2 <i>Microbial Fuel Cell (MFC)</i>	5
2.2.1 Prinsip Kerja MFC	6
2.2.2 Kompartemen Anoda.....	8
2.2.3 Kompartemen Katoda.....	8
2.2.4 Elektroda.....	9
2.2.5 <i>Proton Exchange Membrane (PEM)</i>	10
2.3 Riboflavin	11
2.3.1 Struktur Kimia dan Sifat Riboflavin	11
2.3.2 Fungsi Riboflavin.....	11
2.4 <i>Lactobacillus bulgaricus</i>	12
2.5 Pertumbuhan Mikroorganisme	14

2.6 Analisis Spektrofotometri.....	16
2.7 <i>State of The Art</i>	17
BAB 3 METODE PENELITIAN	23
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	23
3.2 Alat dan Bahan.....	25
3.2.1 Alat	25
3.2.2 Bahan	26
3.3 Prosedur Penelitian.....	26
3.3.1 Preparasi Alat Elektrolisis	26
3.3.1.1 Preparasi <i>Proton Exchange Membran</i>	27
3.3.1.2 Preparasi Elektroda.....	27
3.3.2 Preparasi Mikroorganisme.....	28
3.3.2.1 Pembuatan Medium GYP	28
3.3.2.2 Pembuatan Inokulum <i>Lactobacillus bulgaricus</i>	29
3.3.2.3 Pengukuran <i>Optical Density</i> (OD)	29
3.3.3 Eksperimen MFC	30
3.3.3.1 Pengukuran Kuat Arus dan Tegangan	30
3.3.3.2 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi <i>Optical Density</i>	31
3.3.3.3 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Waktu Operasi MFC.....	32
3.3.3.4 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Volume Reaktor	33
3.3.3.5 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Larutan Elektrolit.....	34
3.3.3.6 Pengukuran Energi Listrik pada Reaktor MFC Dual-chamber Seri	
34	
BAB 4 PEMBAHASAN	36
4.1 Desain <i>Microbial Fuel Cell</i>	36
4.2 Reaksi di Anoda dan Katoda	37
4.3 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi <i>Optical Density</i> (OD)	40
4.4 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Waktu Operasi	44
4.5 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Volume Reaktor	53
4.6 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Larutan Elektrolit	57
4.7 Pengukuran Energi Listrik pada Reaktor <i>Dual-chamber</i> Rangkaian Seri	62
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	68

5.1 Kesimpulan.....	68
5.2 Saran.....	69
DAFTAR REFERENSI	70



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Kebutuhan dan Produksi Energi di Indonesia	1
Gambar 2. 1 Prinsip Kerja <i>Fuel Cell</i>	4
Gambar 2. 2 Prinsip Kerja Sistem MFC	7
Gambar 2. 3 Elektroda Batang Grafit	9
Gambar 2. 4 Struktur Kimia Riboflavin	11
Gambar 2. 5 <i>Lactobacillus bulgaricus</i>	12
Gambar 2. 6 Skema Metabolisme Glukosa.....	13
Gambar 2. 7 Kurva Pertumbuhan Mikroorganisme	15
Gambar 2. 8 Skema Cara Kerja Spektrofotometer.....	16
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian <i>Microbial Fuel Cell</i>	23
Gambar 3. 2 Diagram Alir Preparasi <i>Proton Exchange Membran</i>	27
Gambar 3. 3 Diagram Alir Preparasi Elektroda	27
Gambar 3. 4 Diagram Alir Prosedur Pembuatan Medium GYP	28
Gambar 3. 5 Diagram Alir Pembuatan Inokulum	29
Gambar 3. 6 Diagram Alir Pengukuran <i>Optical Density</i>	29
Gambar 3. 7 Diagram Alir Pengukuran Kuat Arus dan Tegangan.....	30
Gambar 3. 8 Rangkaian Alat MFC.....	31
Gambar 3. 9 Diagram Alir Pengukuran Energi Listrik pada Variasi <i>Optical Density</i>	31
Gambar 3. 10 Diagram Alir Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Waktu Operasi MFC.....	32
Gambar 3. 11 Diagram Alir Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Volume Reaktor.....	33
Gambar 3. 12 Diagram Alir Pengukuran Energi Listrik pada Larutan Elektrolit .	34
Gambar 3. 13 Diagram Alir Pengukuran Energi Listrik pada Rangkaian Seri Reaktor MFC.....	35
Gambar 4. 1 Reaktor MFC: (a) 100 mL (b) 500 mL.....	36
Gambar 4. 2 (a) Analog Mikroampere (b) Digital Multimeter	37
Gambar 4. 3 Ilustrasi Sel Bakteri yang Kontak dengan Elektroda.....	38
Gambar 4. 4 Skema Proses Aliran Proton dan Elektron di Anoda.....	39

Gambar 4. 5 Pengukuran Kuat Arus pada Variasi <i>Optical Density</i>	41
Gambar 4. 6 Pengukuran Tegangan pada Variasi <i>Optical Density</i>	42
Gambar 4. 7 Pengukuran (a) Kuat Arus dan (b) Tegangan pada <i>Optical Density</i> 0,5	43
Gambar 4. 8 <i>Power Density</i> pada Variasi <i>Optical Density</i>	44
Gambar 4. 9 Perbandingan Kuat Arus dan Tegangan pada (a) 3 jam (b) 30 jam .	45
Gambar 4. 10 Grafik Kuat Arus Maksimum pada Variasi Waktu Operasi	46
Gambar 4. 11 Pengukuran Kuat Arus dan Tegangan selama 100 jam	46
Gambar 4. 12 Nilai Kuat Arus oleh <i>Geobacter Sulfurreducens</i> pada 30 ⁰	48
Gambar 4. 13 Grafik Tegangan Maksimum pada Variasi Waktu Operasi	49
Gambar 4. 14 Variasi Nilai Tegangan pada Enam Material Anoda.....	50
Gambar 4. 15 Hasil <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) Membran Nafion setelah 50 Hari.....	51
Gambar 4. 16 Grafik <i>Power Density</i> Maksimum pada Variasi Waktu Operasi ...	52
Gambar 4. 17 <i>Power Density</i> pada Variasi Waktu Operasi.....	52
Gambar 4. 18 Lapisan <i>Biofilm</i> pada <i>Carbon-felt</i> Setelah 50 Hari.....	53
Gambar 4. 19 Perbandingan Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi Volume Reaktor.....	54
Gambar 4. 20 <i>Power Density</i> pada Variasi Volume Reaktor.....	55
Gambar 4. 21 Pengaruh Volume Reaktor Terhadap Kuat Arus pada MFC <i>Single- chamber</i>	57
Gambar 4. 22 Perbandingan Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi Larutan Elektrolit.....	58
Gambar 4. 23 Energi Listrik pada MFC <i>Two-chamber</i> dengan Variasi Akseptor Elektron.....	59
Gambar 4. 24 Perbandingan Tegangan pada <i>Two-chamber</i> MFC Menggunakan 3 Akseptor Elektron Berbeda.....	60
Gambar 4. 25 <i>Power Density</i> pada Variasi Larutan Elektrolit.....	61
Gambar 4. 26 Perbandingan Kuat Arus pada Rangkaian Reaktor Tunggal dan Seri	62
Gambar 4. 27 Perbandingan <i>Power Density</i> pada Reaktor Tunggal dan Seri	64
Gambar 4. 28 Nilai Tegangan pada Peningkatan Jumlah Rangkaian MFC Seri ..	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Jenis <i>Fuel Cell</i> Anorganik	5
Tabel 2. 2 Perbandingan Kondisi Sistem <i>Fuel Cell</i> Biasa dengan MFC.....	5
Tabel 2. 3 Penggunaan Berbagai Jenis Substrat dan Mikroorganisme pada MFC ...	6
Tabel 2. 4 <i>State of The Art</i> Penelitian Riboflavin.....	18
Tabel 4. 1 Perbandingan Tipe Reaktor MFC	56
Tabel 4. 2 Energi Listrik pada MFC <i>Two-chamber</i> untuk Variasi Larutan Katodik	61
Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai Kuat Arus pada Variasi Konfigurasi Reaktor	63
Tabel 4. 4 Perbandingan Nilai OCV pada Variasi Konfigurasi Reaktor	64
Tabel 4. 5 Hasil Penelitian Ieropoulos.....	65
Tabel 4. 6 Perbandingan Hasil Penelitian	66

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Medium <i>Glucose Yeast Extract</i> dan Hasil Inokulum Bakteri <i>Lactobacillus bulgaricus</i>	74
Lampiran 2 Data Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi <i>Optical Density</i> (OD)..	74
Lampiran 3 Data Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi Waktu	75
Lampiran 4 Data Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi Volume.....	75
Lampiran 5 Data Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi Larutan Elektrolit.....	76
Lampiran 6 Data Kuat Arus dan Tegangan pada Reaktor Rangkaian Seri.....	78

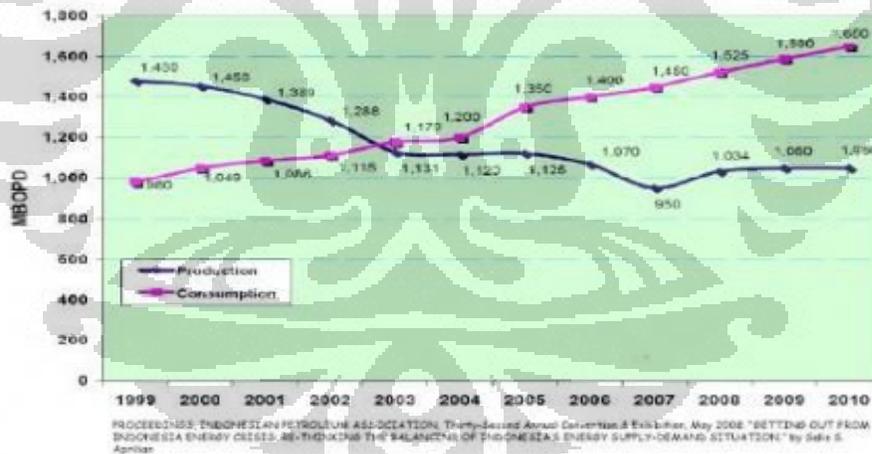


BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Di Indonesia, penggunaan energi terus mengalami lonjakan hebat. Kebutuhan energi listrik Indonesia diperkirakan terus bertambah sebesar 4,6 % setiap tahunnya, seperti yang terlihat pada Gambar 1.1, dan akan mencapai tiga kali lipat pada tahun 2030. Apabila hal ini tidak diiringi oleh usaha peningkatan produksi energi, dikhawatirkan Indonesia akan mengalami krisis energi. Faktanya, pemanfaatan minyak bumi sebagai bahan bakar fosil penghasil energi masih mendominasi, yaitu sebesar 50,66% (Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, 2010). Sedangkan cadangan minyak bumi di Indonesia hanya sekitar 3,7 miliar barel dan diperkirakan akan habis dalam waktu 24 tahun (*Handbook of Energy and Economic Statistic of Indonesia 2008*). Oleh sebab itulah, perlu dilakukan sebuah upaya untuk menghasilkan sumber energi alternatif yang berkelanjutan (*sustainable technology*).



Gambar 1. 1 Kebutuhan dan Produksi Energi di Indonesia

Sumber : Sutrisna

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan salah satu alternatif teknologi yang prospektif untuk dikembangkan. MFC adalah alat yang menggunakan bakteri dalam menghasilkan tenaga listrik dari senyawa organik maupun non organik. Menurut Barua (2010), bakteri mampu menghasilkan energi listrik. Telah banyak

penelitian yang mengkaji cara-cara peningkatan kinerja MFC dalam menghasilkan energi listrik. Min (2008) mengkaji pengaruh temperatur dan media anoda terhadap produksi energi listrik. Dari hasil penelitiannya, dihasilkan daya maksimum pada temperatur operasi 30⁰C dan dengan penambahan buffer fosfat pada anoda. Selain itu, dilakukan pula optimasi MFC dari segi konfigurasi reaktor MFC, jenis elektrolit, dan material elektroda terhadap daya listrik yang dihasilkan. Hasilnya adalah MFC tanpa membran dengan kalium ferrisianida sebagai elektrolit dan karbon aktif granular sebagai elektroda mampu menghasilkan daya listrik yang maksimum (Li, 2010). Beragam jenis mikroba pun telah digunakan di dalam MFC, antara lain *Geobacter sulfurreducens* (Richter et al, 2009; Yi et al, 2009; Trinh et al, 2009), *Escherichia coli* (Scott et al, 2007), *Lactococcus lactis* (Masuda, 2010), *Saccharomyces cerevisiae* (Zahara, 2011), dan *Shewanella oneidensis* (Biffinger et al, 2008; Lanthier et al, 2007).

Pada penelitian ini akan dilakukan optimasi kinerja MFC menggunakan bakteri *Lactobacillus bulgaricus* dan kemudian dilihat pengaruh dari variasi *optical density* bakteri, waktu operasi, volume reaktor, jenis elektrolit, dan konfigurasi reaktor rangkaian seri terhadap produksi energi listrik. Sistem MFC yang mampu menghasilkan energi listrik terbesar diharapkan dapat diaplikasikan untuk menyalakan lampu LED berdaya 0,3 Watt.

1.2 Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana potensi bakteri *Lactobacillus bulgaricus* dalam menghasilkan energi listrik.
2. Bagaimana pengaruh *optical density* bakteri, lama operasi, volume reaktor, jenis larutan elektrolit, dan rangkaian reaktor seri terhadap kinerja MFC untuk memproduksi energi listrik.
3. Apakah MFC dapat diaplikasikan untuk menyalakan lampu dengan daya 0,3 Watt.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengkaji potensi bakteri *Lactobacillus bulgaricus* dalam menghasilkan energi listrik.
2. Mengkaji pengaruh *optical density* bakteri, lama operasi, volume reaktor, jenis larutan elektrolit, dan rangkaian reaktor seri terhadap kinerja MFC untuk memproduksi energi listrik.
3. Mengaplikasikan sistem MFC untuk menyalakan lampu dengan daya 0,3 Watt.

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 *Lactobacillus bulgaricus*.
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. Lampu yang digunakan adalah jenis LED dengan daya 0,3 Watt.
6. 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 : Februari – Juni 2011

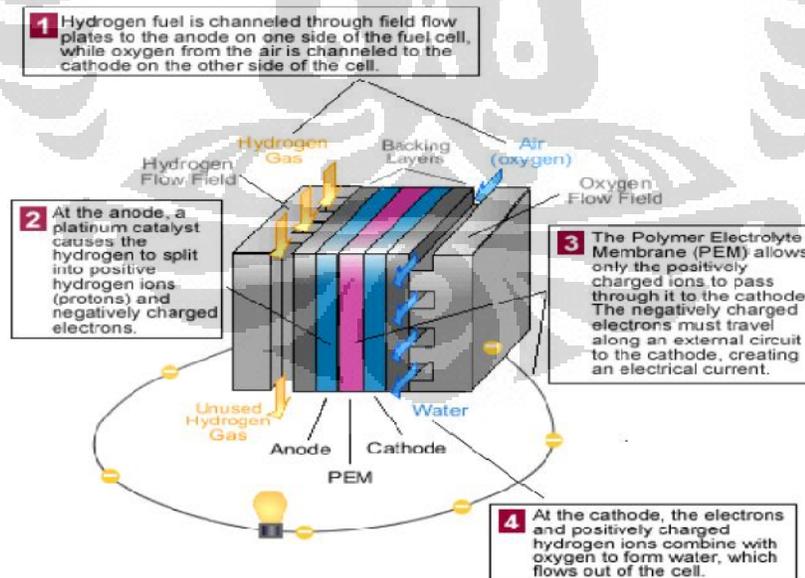
BAB 2

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 (Idham, 2009). *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 dan menimbulkan aliran listrik. Ion hidrogen melewati elektrolit (membran) menuju katoda, lalu bergabung dengan elektron dan oksigen dari udara kemudian membentuk molekul air (Zahara, 2011). Secara umum, prinsip kerja *fuel cell* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Prinsip Kerja Fuel Cell

Sumber : Zahara (2011)

Saat ini berbagai jenis *fuel cell* telah diteliti dan dikembangkan. Berbagai tipe *fuel cell* dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Jenis *Fuel Cell* Anorganik

Tipe <i>Fuel cell</i>	Ion	Suhu Operasi (°C)
Alkalin (AFC)	OH ⁻	50-200
Proton exchange membran (PEMFC)	H	50-100
Phosphoric acid (PAFC)	H	220
Molten carbonat (MCFC)	CO ₃ ²⁻	650
Solid oxide (SOFC)	O ²⁻	500-1000

Sumber : Idham (2009)

2.2 *Microbial Fuel Cell* (MFC)

MFC merupakan sistem bioelektrokimia yang dapat membangkitkan listrik dari oksidasi substrat organik dan anorganik dengan bantuan katalisis mikroorganisme. MFC memiliki komponen yang sama seperti *fuel cell* biasa, yaitu tersusun atas anoda, katoda, dan elektrolit. Pada MFC, komponen anoda yang digunakan adalah kultur mikroorganisme. Penggunaan mikroorganisme dalam MFC ini bertujuan untuk menggantikan fungsi enzim sehingga dihasilkan substrat yang lebih murah (Idham, 2009).

Menurut Lovley (2006), MFC memiliki keuntungan yang lebih banyak dibandingkan *fuel cell* biasa. Hal ini dikarenakan MFC dapat menghasilkan listrik dari sampah organik dan biomassa terbaru. Bakteri mampu menjadi katalis dan beradaptasi dengan baik terhadap bahan organik berbeda yang terdapat pada limbah lingkungan sehingga menghasilkan elektron. Penggunaan katalis yang digunakan pada *fuel cell* biasa berupa platina merupakan investasi yang mahal, sedangkan pada MFC dapat digantikan oleh pertumbuhan mikroorganisme. Perbandingan selengkapnya antara MFC dengan *fuel cell* biasa dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. 2 Perbandingan Kondisi Sistem *Fuel Cell* Biasa dengan MFC

Kondisi Operasi	<i>Fuel Cell</i> biasa	<i>Microbial Fuel Cell</i>
Katalis	Logam mulia	Mikroorganisme/enzim
pH	Larutan asam (pH<1)	Larutan netral (pH 7 – 9)
Temperatur	>200 ⁰ C	22 – 25 ⁰ C
Elektrolit	Asam fosfat	Larutan fosfat
Kapasitas	Tinggi	Rendah

Efisiensi	40 – 60%	>40%
Tipe Bahan Bakar	Gas alam	Karbohidrat dan hidrokarbon

Sumber : Idham (2009)

Berbagai bentuk bahan organik dapat digunakan sebagai substrat dalam *microbial fuel cell*, seperti glukosa, pati, asam lemak, asam amino dan protein, serta air limbah dari manusia dan hewan (Idham, 2009). Percobaan MFC pada berbagai jenis substrat dan bakteri dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Penggunaan Berbagai Jenis Substrat dan Mikroorganisme pada MFC

Jenis Substrat	Biokatalis	Referensi
Galaktosa, maltosa, sukrosa, trehalose	<i>Proteus vulgaris</i>	Kim <i>et al.</i> (2000)
Pati (<i>Starch</i>)	<i>Clostridium butyricum</i> atau <i>C. beijerinckii</i>	Niessen <i>et al.</i> (2004)
Asetat	<i>E. coli</i>	Park <i>et al.</i> (2000)
Endapan kotoran	<i>E. coli</i> K12	Liu <i>et al.</i> (2004)
Glukosa	<i>Rhodospirillum rubrum</i>	Chaudhuri dan Lovley (2003)

Sumber : Idham (2009)

Kinerja MFC dapat dipengaruhi oleh beberapa hal. Menurut Liu *et al.* (2005), faktor-faktor yang berpengaruh antara lain kecepatan degradasi substrat, kecepatan transfer elektron dari bakteri ke anoda, dan transfer proton dalam larutan. Sedangkan Chaudhuri dan Lovley (2003) menyatakan bahwa kinerja MFC dapat dipengaruhi oleh aktivitas mikroba dan substrat yang digunakan. Selain itu, kinerja MFC dapat juga dipengaruhi oleh suhu karena berkaitan langsung dengan kinetik bakteri, kecepatan reaksi oksigen yang dikatalis oleh Pt pada katoda, dan kecepatan transfer proton melalui larutan. Faktor lainnya adalah komponen penyusun MFC, seperti elektroda (anoda dan katoda) dan membran penukar proton, serta kelengkapan membran (Liu *et al.* 2005).

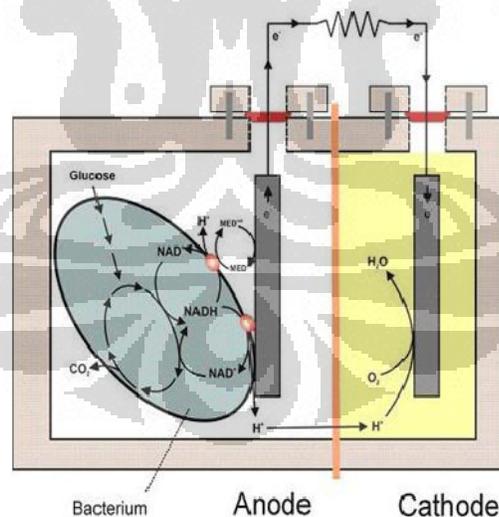
2.2.1 Prinsip Kerja MFC

Prinsip kerja MFC adalah memanfaatkan mikroba yang melakukan metabolisme terhadap medium di anoda untuk mengkatalisis pengubahan materi organik menjadi energi listrik dengan mentransfer elektron dari anoda melalui

kabel dan menghasilkan arus ke katoda. Transfer elektron dari anoda diterima oleh ion kompleks di katoda yang memiliki elektron bebas.

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 metana. Senyawa ini dapat digunakan sebagai sumber hidrogen melalui serangkaian proses untuk memproduksi elektron dan menghasilkan arus listrik. Setiap aktivitas metabolisme yang dilakukan mikroba umumnya melibatkan pelepasan elektron bebas ke medium. Elektron ini dapat dimanfaatkan langsung pada anoda dalam MFC untuk menghasilkan arus listrik.

Secara umum mekanisme prosesnya adalah substrat dioksidasi oleh bakteri menghasilkan elektron dan proton pada anoda. Elektron ditransfer melalui sirkuit eksternal, sedangkan proton didifusikan melalui separator membran (*proton exchange membrane*) menuju katoda. Pada katoda, reaksi elektron dan proton terhadap oksigen akan menghasilkan air (Cheng *et al.* 2006). Berikut merupakan skema prinsip kerja MFC.



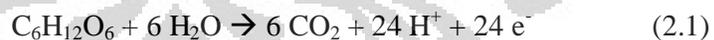
Gambar 2. 2 Prinsip Kerja Sistem MFC

Sumber : Kim (2009)

2.2.2 Kompartemen Anoda

Kompartemen anoda berisikan bakteri dan material organik. Material organik yang digunakan adalah glukosa. Berdasarkan Rabaey, penggunaan glukosa sebagai sumber karbon dapat meningkatkan elektrisitas hingga 89% (Rabaey, 2003). Selanjutnya glukosa akan terurai secara enzimatik untuk menghasilkan dua molekul piruvat yang memiliki tiga atom karbon. Proses ini dikenal dengan glikolisis. Selama reaksi-reaksi glikolisis yang berurutan, banyak energi bebas yang diberikan oleh glukosa yang disimpan dalam bentuk ATP (Zahara, 2011).

Bakteri pada 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 akseptor 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. Berikut merupakan reaksi yang terjadi pada kompartemen anoda dalam sistem MFC (Barua, 2010).



2.2.3 Kompartemen Katoda

Pada kompartemen katoda, terdapat larutan elektrolit yang bersifat konduktif. Kalium ferrisianida ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$) dikenal sangat baik sebagai akseptor elektron dalam sistem MFC. $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 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 elektroda 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, 2006).

Pada katoda terjadi reaksi reduksi, dimana Fe^{3+} akan 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 katoda dalam sistem MFC :



2.2.4 Elektroda

Elektroda harus bersifat konduktif, *biocompatible* (sesuai dengan makhluk hidup), dan secara kimia stabil di dalam larutan bioreaktor. Logam 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 lelehan 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, 2006).

Gambar 2. 3 Elektroda Batang Grafit

Sumber : Sidharta (2007)

Karbon aktif adalah karbon dengan struktur amorphous atau monokristalin yang telah melalui perlakuan khusus sehingga memiliki luas permukaan yang sangat besar (300-2000 $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$). Karakteristik karbon yang adalah ideal adalah pada rentang pH antara 5-6 (50g/L H_2O , 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 $10-10/\Omega\cdot\text{m} - 10-15/\Omega\cdot\text{m}$.

Sebelum digunakan, elektroda harus dibersihkan dan diaktifkan terlebih dahulu. Elektroda direndam dalam larutan HCl 1 M dan NaOH 1 M, masing – masing selama 1 hari. Tujuannya adalah untuk menghilangkan kontaminasi logam dan bahan organik (Chae, 2008). Kemudian elektroda disimpan dalam aquades hingga saat akan digunakan.

2.2.5 *Proton Exchange Membrane (PEM)*

PEM merupakan sebuah membran yang memisahkan kompartemen anoda dan katoda pada sistem MFC. Proton yang terdapat di anoda akan mengalir melalui PEM menuju katoda, sedangkan elektron tidak dapat melewati PEM sehingga seluruh elektron akan menumpuk di anoda dan seluruh proton akan menumpuk di katoda. Adanya bakteri penghantar arus listrik pada anoda 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 sebagai output dari sistem *microbial fuel cell*.

Nafion 117 membran (Lynntech, Amerika Serikat) adalah salah satu PEM yang umum digunakan pada sistem MFC. Nafion merupakan membran yang paling bersifat permeabel terhadap oksigen (Kim, 2007). Ketebalan membran ini adalah $183 \mu\text{m}$ dan berat untuk setiap m^2 sebesar 360 g (Sidharta, 2007). Membran diapit oleh kedua wadah (*chamber*) tempat anoda dan katoda, tepat di lubang yang tersedia. Oleh karena itu, membran memisahkan anoda dan katoda dengan tetap memungkinkan kontak langsung antara keduanya. Pemakaian membran Nafion harus diganti secara periodik. Berdasarkan Chae (2008), membran Nafion yang beroperasi melebihi 50 hari dapat terkontaminasi lapisan biofilm dan mengakibatkan menurunnya kinerja perpindahan massa yang melalui membran. Sebelum digunakan, membran diberikan perlakuan awal, yaitu dididihkan secara berturut-turut di dalam aquades, H_2O_2 (3% v/v), dan H_2SO_4 1

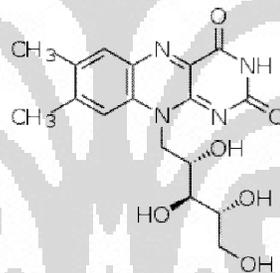
M, masing – masing selama 1 jam. Kemudian membran disimpan di dalam aquades sampai akan digunakan.

2.3 Riboflavin

Riboflavin (7,8-dimethyl-10-ribityl-isoalloxazine) terdiri atas sebuah cincin isoaloksazin heterosiklik yang terikat dengan gula alkohol, dan ribitol. Riboflavin merupakan mikronutrisi yang mudah dicerna, bersifat larut dalam air, dan memiliki peranan kunci dalam menjaga kesehatan pada manusia dan hewan.

2.3.1 Struktur Kimia dan Sifat Riboflavin

Riboflavin atau yang juga dikenal dengan vitamin B2 memiliki struktur kimia seperti yang terlihat pada Gambar 2.4. Struktur ikatan riboflavin tersebut akan mudah terurai apabila terpapar cahaya matahari. Oleh karena itu, sebaiknya vitamin ini tidak disimpan dalam wadah yang transparan.



Gambar 2. 4 Struktur Kimia Riboflavin

Sumber : Dowel (2008)

2.3.2 Fungsi Riboflavin

Riboflavin memainkan peranan penting dalam metabolisme energi dan diperlukan dalam metabolisme lemak, zat keton, karbohidrat dan protein. Vitamin ini juga banyak berperan dalam pembentukan sel darah merah, antibodi dalam tubuh, dan metabolisme pelepasan energi dari karbohidrat.

Di dalam 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

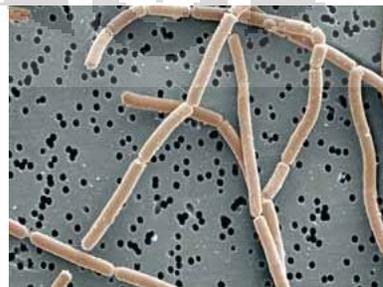
koenzim II di dalam katabolisme (pemecahan) glukosa untuk memperoleh energi yang berguna untuk proses-proses tubuh.

Riboflavin 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 termasuk 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 memegang peranan penting untuk enzim monoamin oksidase dan glukonolaktonoksidase. FAD membantu enzim suksinat dehidrogenase, dalam merubah suksinat menjadi fumarat.

Secara alami, mikroorganisme dapat memproduksi riboflavin oleh dirinya sendiri. Riboflavin yang terakumulasi di dalam bakteri mampu meningkatkan elektrisitas hingga 370% karena kemampuannya dalam mentransfer elektron dari bakteri ke elektroda (Gralnick, 2008). Oleh karena itu, riboflavin sering digunakan sebagai mediator elektron dari bakteri ke anoda pada sistem MFC.

2.4 *Lactobacillus bulgaricus*

Lactobacillus bulgaricus merupakan bakteri gram positif yang berbentuk batang dan tidak membentuk spora. Gram positif dapat berubah menjadi gram negatif dengan bertambahnya umur dan derajat keasaman. Pembentukan rantai umum dijumpai terutama pada fase pertumbuhan logaritma lanjut. Biasanya hidup di kisaran suhu optimum 30 – 40°C dengan pH optimal 5,5 – 6,2. Secara alami, bakteri ini terdapat di dalam sistem pencernaan manusia.

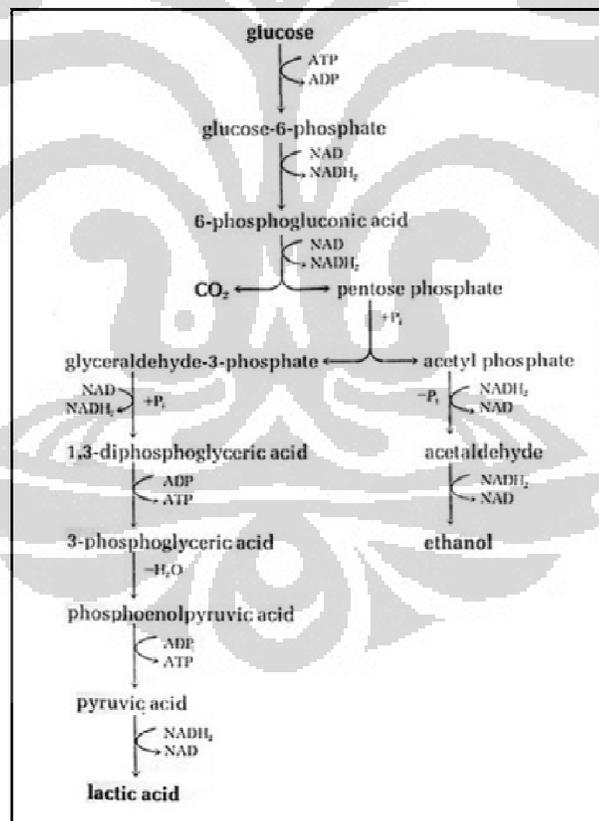


Gambar 2. 5 *Lactobacillus bulgaricus*

Sumber : microbewiki.kenyon.edu

Untuk pertumbuhannya, semua mikroba membutuhkan berbagai unsur kimia sebagai nutrien, baik dalam bentuk senyawa organik maupun anorganik. Begitu pula dengan *Lactobacillus bulgaricus* yang tumbuh dengan baik dalam medium yang mengandung glukosa dan protein. Medium yang digunakan adalah *Glucose Yeast Protein (GYP)*. GYP mengandung glukosa, *yeast extract*, *beef extract*, Tween 80, natrium asetat, dan larutan garam, yang terdiri dari $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $MnSO_4 \cdot 4H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, dan NaCl. Tween 80 merupakan senyawa yang berguna untuk menstimulasi pertumbuhan anaerob pada bakteri (Dalynn Biologicals).

Dalam melakukan metabolisme, *Lactobacillus bulgaricus* menggunakan glukosa sebagai sumber energi. Proses metabolisme glukosa akan membentuk ATP dan beberapa molekul lainnya, yaitu CO_2 , asam laktat, dan etanol. Mekanisme metabolisme glukosa selengkapnya terdapat pada gambar berikut.



Gambar 2. 6 Skema Metabolisme Glukosa

Sumber : biosiva.50webs.org/micromet.htm

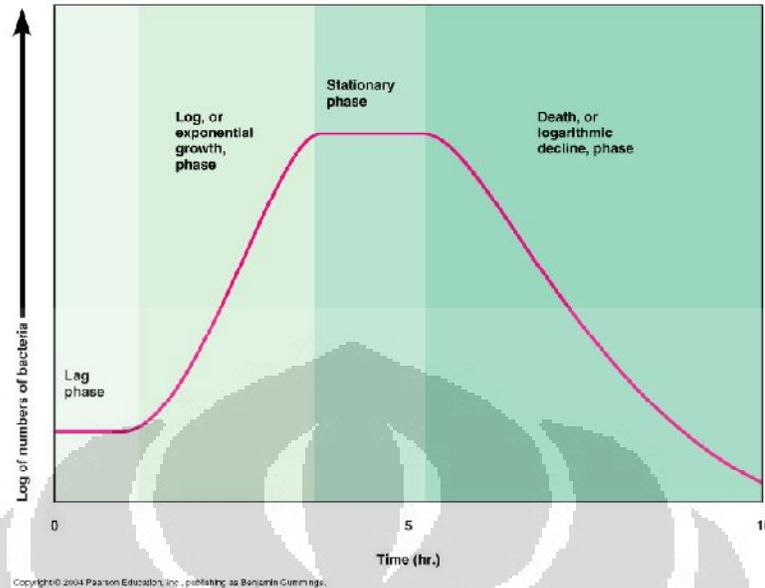
2.5 Pertumbuhan Mikroorganisme

Pertumbuhan diukur dari perubahan jumlah sel atau berat kering massa sel. Jumlah sel dapat dihitung dari jumlah sel total yang tidak membedakan jumlah sel hidup atau mati, dan jumlah sel hidup (*viable count*). Jumlah sel hidup dapat ditetapkan dengan metode *plate count* atau *colony count*, dengan cara ditaburkan pada medium agar sehingga satu sel hidup akan tumbuh membentuk satu koloni, jadi jumlah koloni dianggap setara dengan jumlah sel. Cara ini ada dua macam, yaitu metode taburan permukaan (*spread plate method*) dan metode taburan (*pour plate method*). Cara lain untuk menghitung jumlah sel hidup adalah dengan filter membran dan MPN (*Most Probable Number*) yang menggunakan medium cair. Sampel mikrobial yang dihitung biasanya dibuat seri pengenceran.

Pertumbuhan sel dapat diukur dari massa sel dan secara tidak langsung dengan mengukur turbiditas cairan medium tumbuh. Massa sel dapat dipisahkan dari cairan mediumnya menggunakan alat sentrifus sehingga dapat diukur volume massa selnya atau diukur berat keringnya (dikeringkan dahulu dengan pemanasan pada suhu 90-110⁰C semalam). Umumnya berat kering bakteri adalah 10- 20 % dari berat basahnya.

Turbiditas dapat diukur menggunakan alat fotometer (penerusan cahaya), semakin pekat atau semakin banyak populasi mikrobial maka cahaya yang diteruskan semakin sedikit. Turbiditas juga dapat diukur menggunakan spektrofotometer (*optical density/ OD*), yang sebelumnya dibuat kurva standar berdasarkan pengukuran jumlah sel baik secara total maupun yang hidup saja atau berdasarkan berat kering sel. Unit fotometer atau OD proporsional dengan massa sel dan juga jumlah sel sehingga cara ini dapat digunakan untuk memperkirakan jumlah atau massa sel secara tidak langsung.

Pengamatan jumlah sel dalam waktu yang cukup lama akan memberikan gambaran berupa kurva pertumbuhan sebagai berikut:



Gambar 2. 7 Kurva Pertumbuhan Mikroorganisme

Sumber : Sumarsih (2007)

Berdasarkan kurva tersebut, 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. Selama fase ini, metabolisme sel paling aktif dan sintesis bahan sel terjadi sangat cepat.

- Fase stasioner

adalah fase dimana bakteri sudah tidak melakukan pembelahan lagi. Pada fase stasioner, jumlah sel yang mati semakin meningkat sehingga jumlah sel hidup

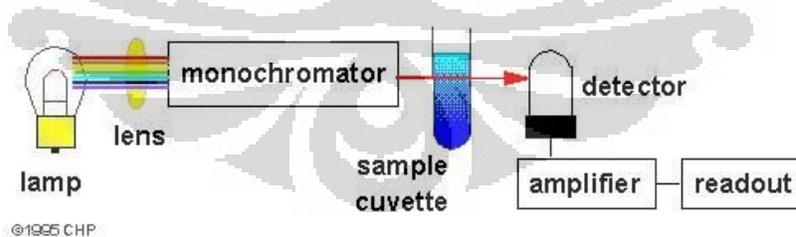
hasil pembelahan sama dengan jumlah sel yang mati. Akibatnya, jumlah sel hidup konstan seolah-olah tidak terjadi pertumbuhan (pertumbuhan nol). Penyebab utama yang menyebabkan fase tersebut antara lain ketidaktersediaan nutrisi, penumpukan metabolit penghambat dan produk akhir, dan kekurangan ruang gerak. 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 nutrisi semakin menurun (bahkan habis), energi cadangan di dalam sel juga habis dan terkumpulnya produk limbah.

2.6 Analisis Spektrofotometri

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 transmittansi atau absorbansi 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. 8 Skema Cara Kerja Spektrofotometer

Sumber : bioingenior.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. Sampel yang dapat dianalisis dengan metode ini hanya sampel yang memiliki warna. Untuk sampel yang tidak memiliki warna harus terlebih dulu dibuat berwarna dengan menggunakan reagent spesifik yang akan menghasilkan senyawa berwarna.

Spektrofotometer dapat digunakan untuk mengukur kekeruhan suatu objek melalui nilai *optical density* (OD). Cara ini sering digunakan untuk memperkirakan jumlah atau massa sel, salah satunya sel bakteri, pada panjang gelombang (λ) 660 nm. Panjang gelombang ini memberikan korelasi antara *optical density* bakteri dengan total jumlah sel yang terkandung di dalamnya. Ketika sel bakteri terkena cahaya tampak dari spektrofotometer, cahaya tersebut akan berusaha tembus melalui sel. Spektrofotometer akan mengukur seberapa banyak cahaya yang dapat tembus dan yang terpantul kembali oleh sel bakteri. Semakin banyak jumlah sel bakteri dalam sampel, semakin banyak cahaya yang dihamburkan dan akan semakin tinggi pula nilai *optical density* yang terukur. Perhitungan *optical density* atau absorbansi dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$A = \log_{10}(1/T) = \log_{10}(I_0/I) \quad (2.4)$$

Ket : A = absorbansi (*optical density*)

T = transmitansi

I_0 = intensitas cahaya yang menuju sampel

I = intensitas cahaya setelah melewati sampel

2.7 *State of The Art*

Berbagai penelitian telah banyak dilakukan untuk mengkaji potensi berbagai macam bakteri dalam menghasilkan energi listrik dengan spesifikasi yang berbeda-beda, mulai dari desain bioreaktor, penggunaan elektroda, jenis larutan elektrolit, dan sampai pada kondisi aerob dan anaerob. Variasi berbagai parameter 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. Berikut merupakan tabel *state of the art* tentang penelitian ini.

Parameter operasi

Tabel 2. 4 *State of The Art* Penelitian Riboflavin

Elektroda Grafit	Lee,2010.	Guo,2008. Guerrero,2010			Zahara,2011	Lanthier, 2007.	Novitasari,2011	
Elektroda karbon		Min,2008. You,2006. Ieropoulos, 2008	Trinh,2009. Nevin,2008.	Scot,2007.				Scott,2008.
Elektroda platina			Trinh,2009.					
Mediator-less		Li,2010. Guerrero,2010						
Membran-less								Scott,2008.
Single Chamber	Lee,2010.					Velasquez-Orta, 2009.		Scott,2008.
Dual chamber		Min,2008. Guo,2008. Li,2010. You,2006. Guerrero,2010 Ieropoulos, 2008	Trinh,2009. Nevin,2008.	Scott,2007.	Zahara,2011	Lanthier,2007.	Novitasari,2011	
Riboflavin					Zahara,2011	Velasquez-Orta, 2009.		
	Mix-cultur	Waste	G-sulfurreducens	E.coli	S.cerevisiae	S.oneidensis	L. bulgaricus	Sea water

Mikroba

Pada tahun 2007, Scott melakukan penelitian mengenai MFC dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh posisi geometrik anoda dan katoda terhadap produksi energi listrik. Pada penelitian ini, digunakan reaktor *dual chamber* dengan elektroda kertas karbon. Faktor yang dibandingkan adalah bahan bakar, dengan dan tanpa mediator, serta dengan dan tanpa membran. Pada kondisi pertama, digunakan *waste carbohydrate* sebagai bahan bakar dan *seawater* (larutan garam) pada kompartemen anoda. Namun tidak digunakan membran dan mediator. Selanjutnya pada kondisi kedua, reaktor menggunakan membran dengan bahan bakar berupa glukosa dari yoghurt dan *methylene blue* sebagai mediator. Pada kondisi ketiga, reaktor menggunakan membran dan mediator yang sama, hanya saja dengan bakteri berbeda, yaitu *Escherichia coli*. Kondisi ini memberikan hasil *power density* yang tertinggi, yaitu 180 mW/m^2 .

Setahun kemudian, Scott kembali melakukan penelitian tentang MFC. Kali ini, digunakan *single-chamber* tanpa membran dengan *sea water* pada anoda dan kertas karbon sebagai elektroda. Hal yang ditinjau adalah efek material anoda terhadap kinerja MFC. Material anoda yang digunakan antara lain *carbon sponge*, *carbon cloth*, *carbon fibre*, dan *reticulated vitreous carbon* (RVC). Dari penelitian ini, diperoleh bahwa *power density* tertinggi dicapai oleh MFC dengan material anoda berupa *carbon sponge*, diikuti oleh *carbon cloth*, *carbon fibre*, dan yang terakhir adalah *reticulated vitreous carbon* (RVC).

Selain Scott, Lanthier juga melakukan penelitian tentang MFC. Pada penelitian ini, digunakan bakteri *Shewanella oneidensis* yang ditumbuhkan selama 50 hari di dalam sistem MFC yang menggunakan batang grafit sebagai elektrodanya. 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 dialirkan udara ke dalamnya.

Dengan bakteri yang sama, Velasquez (2009) melakukan penelitian MFC menggunakan reaktor *single-chamber* dan lempengan grafit sebagai elektrodanya. Zat anolit diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan mediator terhadap transpor elektron dari

sel bakteri ke anoda dalam rangka meningkatkan produksi kuat arus listrik. Mediator yang ditambahkan adalah FMN dan riboflavin. Hasilnya adalah bahwa MFC dengan menggunakan mediator mampu menghasilkan *power density* lebih tinggi dibandingkan dengan tidak menggunakan mediator.

Penambahan riboflavin sebagai mediator juga dilakukan oleh Zahara (2011). Kultur *Saccharomyces cerevisiae* digunakan sebagai anoda pada reaktor *dual-chamber* dengan elektroda grafit. Sedangkan pada katoda digunakan kalium ferisianida dan larutan bufer. Dari penelitian ini, diperoleh bahwa penambahan riboflavin mampu meningkatkan kuat arus dari 224 μA menjadi 262 μA . Selain itu, dilakukan pula upaya penambahan riboflavin dengan menggunakan minyak kelapa sawit dan dihasilkan peningkatan riboflavin sebesar 42,19%.

Bakteri lain yang sering digunakan dalam MFC adalah *Geobacter sulfurreducens*. Trinh (2009) menggunakan kultur *G. Sulfurreducens* sebagai anoda pada reaktor *dual-chamber* dengan asetat sebagai substrat. Elektroda di anoda berupa kertas karbon, sedangkan di katoda ditambahkan katalis Pt. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh temperatur dan *loading* katalis Pt pada elektroda di katoda. *Power density* maksimum sebesar 418 – 470 mW/m^2 dicapai saat temperatur optimum 30 – 32⁰C dan meningkat sebesar dua kali lipat setelah *loading* katalis Pt ditambahkan dari 0,5 menjadi 3 mg/cm^2 .

Dengan menggunakan bakteri yang sama, Nevin (2008) melakukan penelitian dengan tujuan membandingkan kinerja MFC pada kultur murni *G. Sulfurreducens* dengan kultur campuran. *G. Sulfurreducens* ditumbuhkan dalam asetat sebagai substrat pada sistem MFC dengan elektroda kertas karbon pada anoda dan katoda yang diletakkan sedekat mungkin. *Power density* yang dihasilkan *G. Sulfurreducens* lebih tinggi dibandingkan dengan kultur murni. Hasil ini diperoleh pada saat ukuran dan volume anoda diperkecil. Dalam penelitiannya, Nevin juga membandingkan kinerja kertas karbon dan grafit sebagai elektroda. Dibandingkan dengan kertas karbon, grafit dapat menghasilkan *current density* lebih besar. Namun lapisan *biofilm* yang ditimbulkan juga lebih tebal (50 μm) dibanding dengan kertas karbon (3 – 18 μm).

Selain bakteri, *wastewater* juga dapat digunakan sebagai inokulum di anoda. You melakukan penelitian tentang MFC dari *wastewater* pada tahun 2006.

You menggunakan 3 jenis larutan elektrolit sebagai perbandingan, yaitu permanganat, ferisianida, dan oksigen (dengan dan tanpa katalis Pt). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan permanganat sebagai akseptor elektron di katoda mampu menghasilkan *power density* maksimum sebesar 115,6 mW/m². Nilai ini 4,5 kali *power density* dengan ferisianida (25,62 mW/m²) dan 11,3 kali lebih besar dibanding oksigen (10,2 mW/m²). Selain itu, dikaji pula pengaruh pH dan konsentrasi awal permanganat terhadap *Open Circuit Potential* (OCP). Dari percobaan ini diperoleh bahwa nilai OCP sebanding dengan konsentrasi awal permanganat dan berbanding terbalik dengan pH.

Gurrero-Rangel (2010) juga menggunakan *wastewater* untuk meninjau pengaruh larutan elektrolit terhadap *power density* MFC. Kali ini, larutan yang dibandingkan adalah potassium permanganat, potassium ferisianida, dan potassium dikromat. Penelitian ini menggunakan *dual-chamber* reaktor yang dihubungkan oleh jembatan garam (*salt bridge*) dengan grafit sebagai elektroda dan glukosa sebagai substrat. Hasilnya adalah potassium permanganat mampu menghasilkan *power density* tertinggi, yaitu 7,29 mW/m², diikuti oleh potassium ferisianida (0,92 mW/m²) dan potassium dikromat (0,79mW/m²).

Penelitian MFC menggunakan *waste water* juga dilakukan oleh Guo pada tahun 2008. Penggunaan *waste* sebagai biokatoda berfungsi menggantikan peran mediator dan katalis. Reaktor yang digunakan adalah *dual-chamber* dengan grafit sebagai elektrodanya. Pada anoda terdapat *domestic waste water* sementara katoda dialiri oleh udara sebagai akseptor elektron. *Power density* yang dihasilkan dari sistem MFC ini adalah 19,53 W/m³.

Peneliti lain yang menggunakan *waste* sebagai inokulum adalah Min (2008). Digunakan reaktor *dual-chamber* dengan kertas karbon sebagai elektroda dan terdapat pengaliran udara secara kontinyu di katoda. Hal yang ingin ditinjau adalah pengaruh penambahan komposisi medium pada anoda dan peningkatan temperatur terhadap *power density* yang dihasilkan. Dari ketiga temperatur yang diuji, yaitu 15⁰, 22⁰, dan 30⁰C, *power density* tertinggi dihasilkan saat MFC dioperasikan pada temperatur 30⁰C. Penambahan bufer fosfat pada medium di anoda terbukti dapat meningkatkan *power density* 4 kali lebih besar dibandingkan kontrol, yaitu 320 mW/m².

Di tahun yang sama, Ieropoulos (2008) juga meneliti *wastewater* dalam bentuk *sludge* pada reaktor *dual-chamber* MFC yang dialiri substrat secara kontinyu (*continous flow*). Hal yang dikaji adalah pengaruh konfigurasi reaktor MFC terhadap produksi energi listrik. Ieropoulos menggunakan 10 reaktor identik yang dirangkaikan secara seri, paralel, dan seri-paralel. Tegangan maksimum sebesar 1400 mV diperoleh pada rangkaian seri, sedangkan kuat arus maksimum didapatkan dari rangkaian paralel, yaitu sebesar 23 mA/m². Gabungan rangkaian seri-paralel menghasilkan *power density* tertinggi, yaitu 5,2 mW/m². Gabungan seri-paralel ini kemudian dimodifikasi dengan tidak mengalirkan substrat ke dalam reaktor (*fluidically isolated*) dan dihasilkan kenaikan *power density* menjadi 12,5 mW/m².

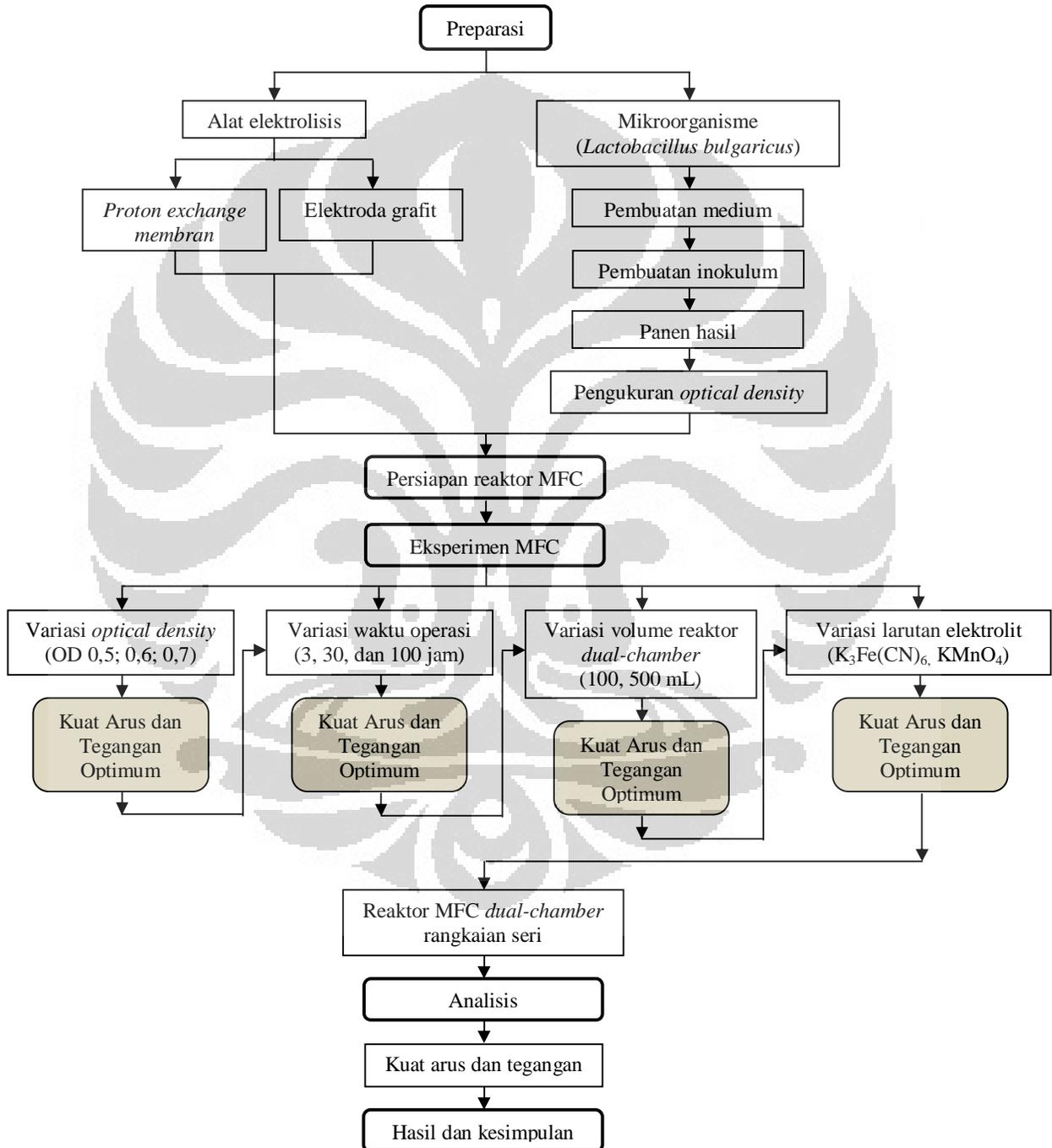
Penggunaan *wastewater* sebagai inokulum juga dilakukan oleh Li (2010). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh konfigurasi reaktor, larutan elektrolit, dan material elektroda terhadap energi listrik. Dalam hal konfigurasi, reaktor *dual-chamber* tanpa membran memiliki resistansi internal lebih rendah dan menghasilkan tegangan lebih tinggi daripada reaktor konvensional. Anoda dengan *wastewater* menghasilkan *power density* lebih besar dibandingkan dengan anoda yang ditambahkan asetat. Penggunaan ferisianida sebagai larutan katoda memberikan nilai tegangan yang lebih tinggi daripada katoda dengan nitrat. Berdasarkan material elektroda, karbon aktif granular menghasilkan *power density* 2,5 kali lebih besar daripada kertas karbon. Secara keseluruhan, reaktor *dual-chamber* tanpa membran dengan elektroda karbon aktif granular memiliki daya keluaran yang tertinggi.

Pada tahun 2010, Lee meninjau pengaruh ukuran sel bakteri terhadap produksi energi listrik. Reaktor yang digunakan adalah *single-compartment*, dimana katoda berada di luar sehingga dapat kontak langsung dengan udara atmosfer. Digunakan elektroda FeC untuk katoda dan elektroda *graphite felt* yang dimodifikasi dengan *Neutral Red* untuk anoda. Sebagai perbandingan, digunakan bakteri *Microbacterium* sp dan *Pseudomonas* sp. Hasilnya adalah bakteri *Microbacterium* sp yang memiliki ukuran lebih kecil (panjang 0,3 µm; lebar 0,9 µm) dapat menghasilkan energi listrik 3-4 kali lebih besar daripada *Pseudomonas* sp (panjang 0,9 µm; lebar 1,2 µm).

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian *Microbial Fuel Cell*

Penelitian ini diawali preparasi alat elektrolisis dan mikroorganismenya. Alat elektrolisis yang dipreparasi adalah *proton exchange membrane* (PEM) dan elektroda karbon. Sebelum digunakan, PEM dididihkan di dalam aquades, H₂O₂ 3%, dan H₂SO₄ 1 M. Sedangkan elektroda karbon grafit direndam selama 1 hari di dalam HCl 1 M, NaOH 1 M, dan di dalam aquades hingga akan digunakan. Preparasi mikroorganismenya meliputi pembuatan medium GYP (*Glucosa Yeast Protein*), pembiakan inokulum *Lactobacillus bulgaricus* di dalam medium untuk waktu inkubasi 48 jam, pemanenan bakteri menggunakan vortex, dan pengukuran *optical density* bakteri menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 660 nm.

Setelah alat elektrolisis dan bakteri telah siap, selanjutnya dilakukan persiapan reaktor MFC. Membran PEM diletakkan di antara kompartemen katoda dan anoda, kemudian kedua kompartemen ini dihubungkan. Pada kompartemen anoda dimasukkan inokulum bakteri, glukosa sebagai substrat, aquades, dan bufer fosfat. Sedangkan di kompartemen katoda terdapat larutan elektrolit dan bufer fosfat. Penggunaan jenis larutan elektrolit nantinya akan divariasikan pada percobaan MFC. Pada kedua kompartemen, dipasang elektroda grafit yang dihubungkan ke instrumen pengukur.

Pada percobaan *Microbial Fuel Cell* (MFC) ini dilakukan variasi parameter operasi MFC, yaitu nilai *optical density* (OD) bakteri, waktu operasi MFC, volume reaktor, dan larutan elektrolit. Nilai OD yang sebelumnya telah diukur menggunakan spektrofotometer, kemudian divariasikan nilainya menjadi OD 0,5; 0,6; dan 0,7. Setelah diperoleh nilai OD optimum, dilakukan variasi waktu operasi MFC selama 3 jam, 30 jam, dan 100 jam. Kemudian waktu operasi yang optimum akan digunakan untuk melakukan variasi volume reaktor, yaitu 100 mL dan 500 mL. Selanjutnya percobaan MFC dilakukan pada volume reaktor optimum dengan memvariasikan larutan elektrolit, yaitu kalium ferisianida dan kalium permanganat. Setelah didapat larutan elektrolit yang menghasilkan energi listrik tertinggi, percobaan dilakukan dengan menggabungkan reaktor *dual-chamber* 100 dan 500 mL secara seri pada nilai OD optimum.

Pada penelitian ini, dilakukan analisis pengaruh variasi parameter operasi terhadap kinerja MFC. Kinerja MFC ini dilihat dari kuat arus (I) dan tegangan (V)

yang dihasilkan melalui pengukuran menggunakan digital multimeter dan analog mikroampere. Dari data kuat arus dan tegangan, dapat diperoleh nilai *power density* (mW/m^2), yaitu daya per satuan luas permukaan elektroda. *Power density* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Momoh *et al*, 2010).

$$\text{Power density (mW/m}^2\text{)} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (Volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} \quad (3.1)$$

Selain itu, kinerja MFC juga dilihat secara langsung untuk menyalakan lampu jenis LED dengan daya sebesar 0,3 Watt. Keseluruhan kegiatan penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Bioproses Departemen Teknik Kimia UI.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

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

Alat Gelas

- Reaktor MFC 100 mL dan 500 mL
- Erlenmeyer
- Tabung reaksi
- Pipet tetes
- Pipet ukur
- Gelas ukur
- Cawan petri

Alat Listrik

- *Autoklaf*
- *Inkubator*
- Timbangan analitik
- pH meter
- Elektroda karbon aktif
- Kabel dan jepit buaya (panjang = 30 cm)
- *Multimeter (Microamperemeter)*
- Lampu LED 0,3 W

Alat Instrumen

- *Spektrofotometer*

3.2.2 Bahan

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

- Kultur bakteri *Lactobacillus bulgaricus*
- Media GYP (*Glucosa Yeast Protein*)
- Larutan buffer fosfat 0,1 M pH 7,0
- Membran Nafion 117 (diameter = 3-5 cm)
- Aquades
- Larutan HCl
- Larutan NaOH
- Larutan H₂O₂ 3%
- Larutan H₂SO₄ 1M
- Larutan K₃Fe(CN)₆ 1M
- Larutan KMnO₄ 1M

3.3 Prosedur Penelitian

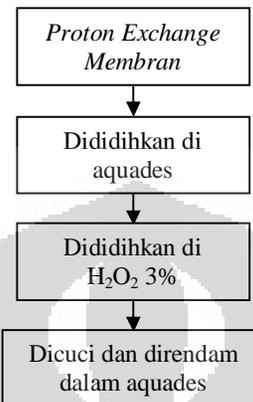
Prosedur penelitian ini terdiri dari preparasi alat elektrolisis dan mikroorganisme, serta eksperimen MFC.

3.3.1 Preparasi Alat Elektrolisis

Sebelum digunakan pada sistem MFC, alat elektrolisis harus dipreparasi terlebih dahulu. Alat elektrolisis terdiri dari *Proton Exchange Membran* dan elektroda.

3.3.1.1 Preparasi *Proton Exchange Membran*

Berikut merupakan diagram alir untuk preparasi *Proton Exchange Membran*.

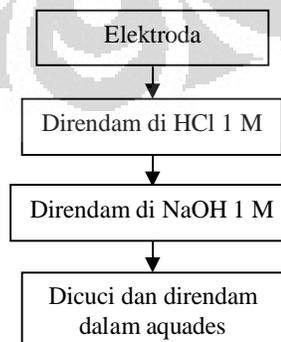


Gambar 3. 2 Diagram Alir Preparasi *Proton Exchange*

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 H_2O_2 3% selama 1 jam dan dicuci dengan aquades. Membran selanjutnya dididihkan kembali dalam H_2SO_4 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.

3.3.1.2 Preparasi Elektroda

Berikut merupakan diagram alir untuk preparasi elektroda.



Gambar 3. 3 Diagram Alir Preparasi Elektroda

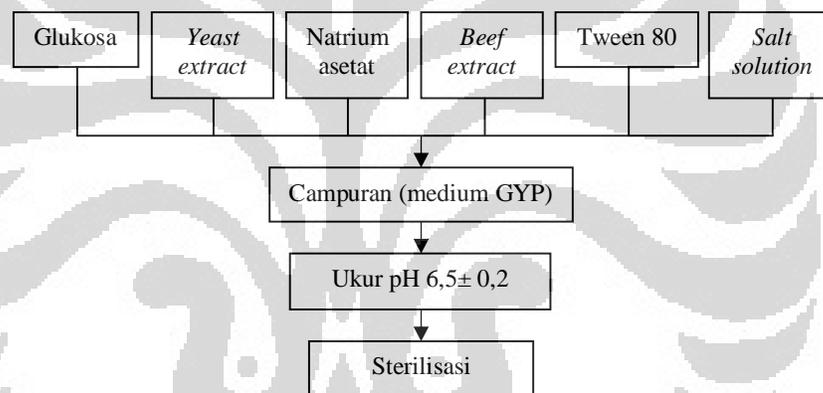
Elektroda grafit (karbon aktif) direndam ke dalam larutan HCl 1 M selama 1 hari kemudian dibilas dengan menggunakan aquades. Setelah itu elektroda direndam lagi ke dalam larutan NaOH 1 M selama 1 hari kemudian dibilas lagi dengan menggunakan aquades. Elektroda direndam dalam larutan aquades hingga saat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

3.3.2 Preparasi Mikroorganisme

Preparasi mikroorganisme yang dilakukan berupa pembuatan media GYP (*Glucose Yeast Peptone*) dan pembuatan inokulum *Lactobacillus bulgaricus*.

3.3.2.1 Pembuatan Medium GYP

Berikut merupakan diagram alir untuk pembuatan medium GYP.



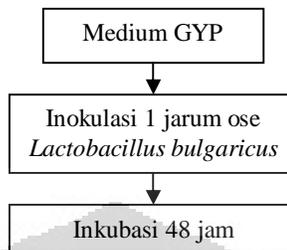
Gambar 3. 4 Diagram Alir Prosedur Pembuatan Medium GYP

Prosedur pembuatan medium GYP cair (*broth*) antara lain:

1. Glukosa 1%, *yeast extract* 1%, natrium asetat 0,14%, *beef extract* 0,2%, Tween[®] 80 1%, dan *salt solution* 0,5% dilarutkan dalam 1 L aquades. *Salt solution* 100 mL terdiri dari 4 g MgSO₄·7H₂O; 0,2 g MnSO₄·4H₂O; 0,2 g FeSO₄·7H₂O; 0,2 g NaCl.
2. Kemudian pH akhir diatur hingga 6,5±0,2.
3. Medium dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang bersumbat kemudian disterilisasi dalam autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit.

3.3.2.2 Pembuatan Inokulum *Lactobacillus bulgaricus*

Berikut merupakan diagram alir untuk pembuatan inokulum *Lactobacillus bulgaricus*.



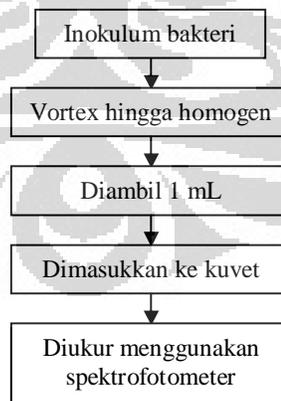
Gambar 3. 5 Diagram Alir Pembuatan Inokulum

Prosedur yang dilakukan dalam pembuatan inokulum *Lactobacillus bulgaricus* antara lain:

1. Setelah disterilisasi, media didinginkan sampai suhu ruang.
2. Diambil 1 jarum ose isolat bakteri *Lactobacillus bulgaricus* dan dimasukkan ke dalam medium. Langkah ini dilakukan di dalam *transfer box*.
3. Medium yang telah diinokulasi kemudian diinkubasi pada suhu 37°C di dalam inkubator selama 48 jam.

3.3.2.3 Pengukuran *Optical Density* (OD)

Berikut merupakan diagram alir untuk pengukuran *optical density*.



Gambar 3. 6 Diagram Alir Pengukuran *Optical Density*

Pengukuran nilai OD bakteri dilakukan setiap kali akan dilakukan percobaan MFC. Prosedurnya antara lain:

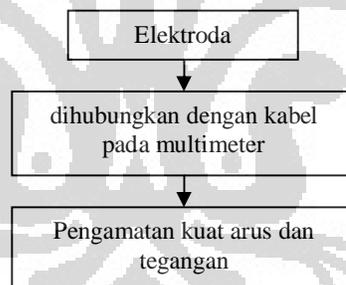
1. Hasil inokulasi bakteri dihomogenkan dengan menggunakan *vortex*.
2. Diambil sebanyak 1 mL inokulum bakteri dan dimasukkan ke dalam kuvet.
3. *Optical density* diukur menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 660 nm.
4. Untuk memperkecil nilai OD, dilakukan pengenceran dengan menambahkan aquades. Kemudian dilakukan pengukuran kembali.
5. Pengukuran dilakukan hingga dicapai nilai OD yang diinginkan.

3.3.3 Eksperimen MFC

Pada eksperimen MFC, dilakukan pengukuran kuat arus dan tegangan untuk 4 variasi, yaitu nilai OD, waktu operasi, volume reaktor, dan larutan elektrolit.

3.3.3.1 Pengukuran Kuat Arus dan Tegangan

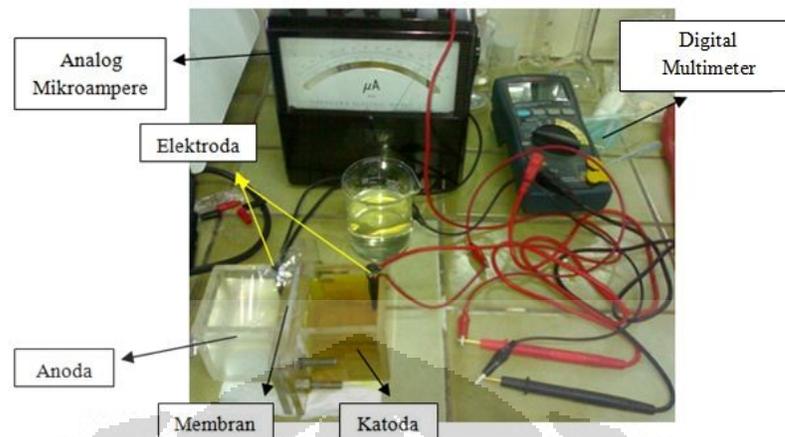
Berikut merupakan diagram alir untuk pengukuran kuat arus dan tegangan.



Gambar 3. 7 Diagram Alir Pengukuran Kuat Arus dan Tegangan

Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Ruang anoda dan katoda dipisahkan dengan menggunakan membran penukar ion yaitu membran Nafion 117 (Lyntech, Amerika Serikat).
2. Kemudian elektroda dipasang di masing-masing ruang dan dihubungkan dengan rangkaian kabel pada alat digital multimeter, seperti pada gambar berikut.

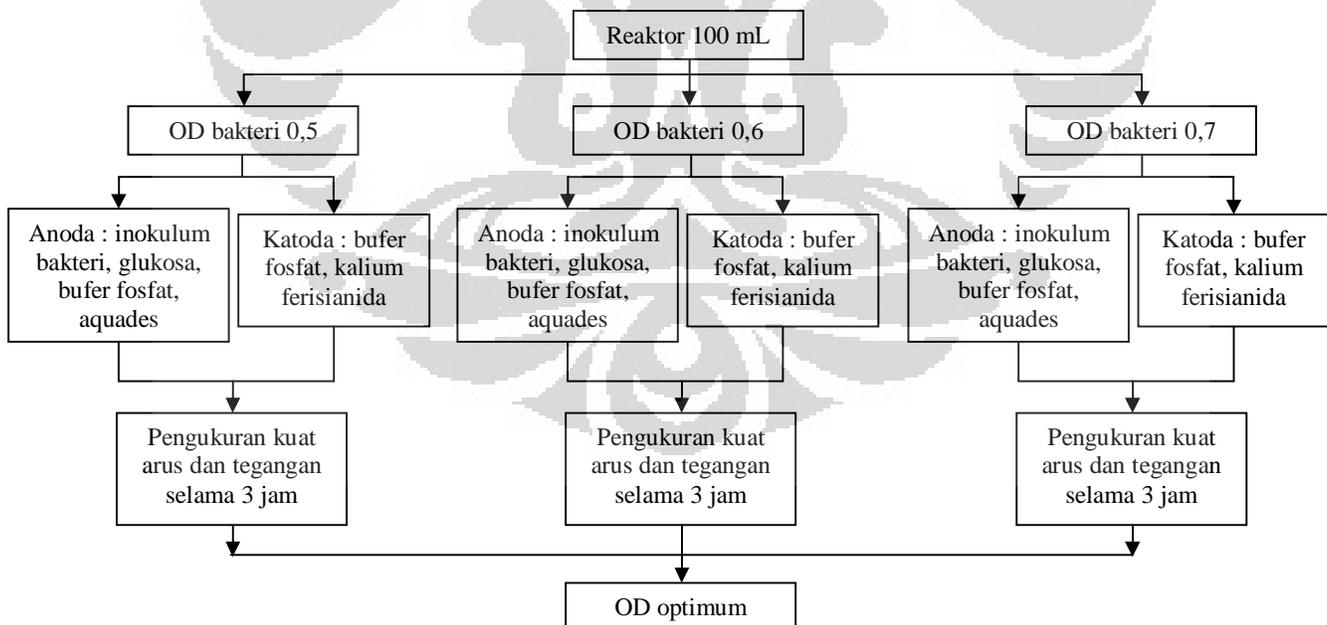


Gambar 3. 8 Rangkaian Alat MFC

3. Diamati nilai arus listrik dan tegangan yang tertera pada layar digital multimeter hingga stabil dan dicatat.

3.3.3.2 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi *Optical Density*

Berikut merupakan diagram alir untuk pengukuran energi listrik pada variasi *optical density*.



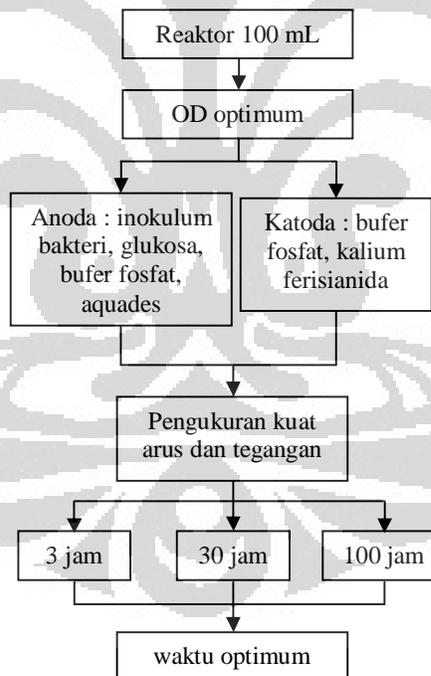
Gambar 3. 9 Diagram Alir Pengukuran Energi Listrik pada Variasi *Optical Density*

Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Disiapkan reaktor MFC dengan volume 100 mL.
2. Kompartemen anoda diisi dengan larutan yang terdiri dari 20 mL inokulum bakteri dengan OD yang divariasikan (0,5; 0,6; 0,7), 10 mL glukosa, 50 mL buffer fosfat 0,1 M pH 7,0 dan 20 mL aquades.
3. Kompartemen katoda diisi dengan 50 mL larutan kalium ferrisianida 0,1 M dan 50 mL buffer fosfat 0,1 M pH 7,0.
4. Kemudian diukur arus listrik dan tegangan dengan menggunakan digital multimeter selama 3 jam.
5. Diperoleh nilai *optical density* optimum.

3.3.3.3 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Waktu Operasi MFC

Berikut merupakan diagram alir untuk pengukuran energi listrik pada variasi waktu operasi MFC.



Gambar 3. 10 Diagram Alir Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Waktu Operasi MFC

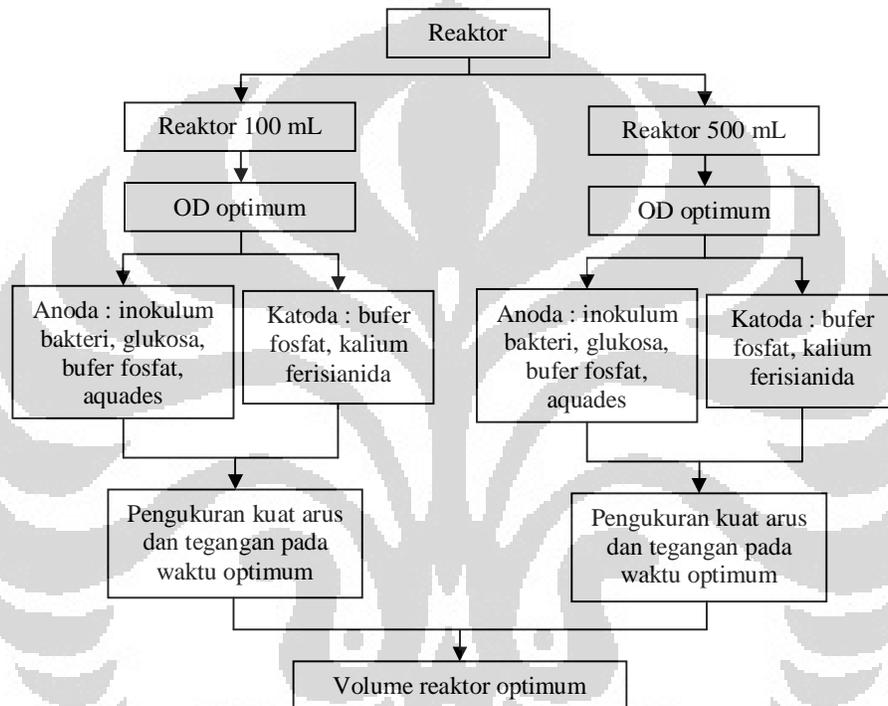
Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan langkah 1 – 3 pada prosedur sebelumnya dengan menggunakan OD optimum.

2. Kemudian diukur arus listrik dan tegangan dengan menggunakan digital multimeter pada variasi waktu operasi 3 jam, 30 jam, dan 100 jam.
3. Diperoleh waktu operasi MFC optimum.

3.3.3.4 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Volume Reaktor

Berikut merupakan diagram alir untuk pengukuran energi listrik pada variasi volume reaktor.



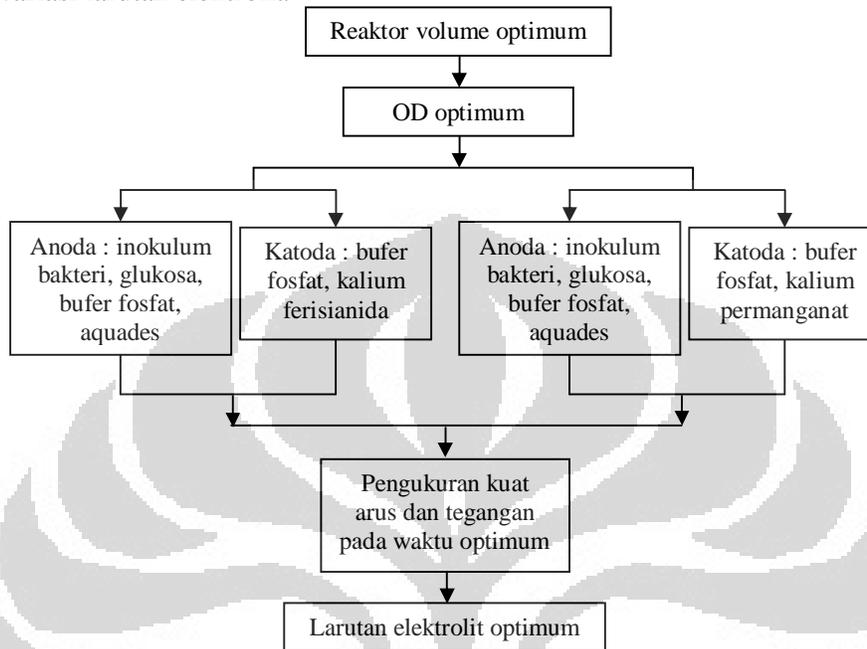
Gambar 3. 11 Diagram Alir Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Volume Reaktor

Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan langkah 1 – 3 pada prosedur sebelumnya dengan menggunakan reaktor 500 mL dan nilai OD optimum.
2. Kemudian diukur arus listrik dan tegangan dengan menggunakan digital multimeter pada waktu operasi optimum.
3. Diperoleh volume reaktor yang menghasilkan energi listrik paling tinggi.

3.3.3.5 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Larutan Elektrolit

Berikut merupakan diagram alir untuk pengukuran energi listrik pada variasi larutan elektrolit.



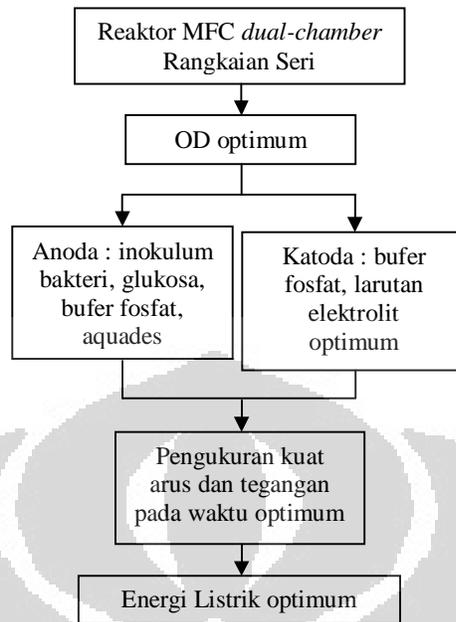
Gambar 3. 12 Diagram Alir Pengukuran Energi Listrik pada Larutan Elektrolit

Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan langkah 1 – 3 pada prosedur sebelumnya dengan menggunakan volume reaktor dan nilai OD optimum.
2. Mengganti larutan elektrolit dengan NaCl 0,1 M
3. Kemudian diukur arus listrik dan tegangan dengan menggunakan digital multimeter pada waktu operasi optimum.
4. Mengulangi langkah di atas untuk larutan kalium permanganat 0,1 M.
5. Diperoleh larutan elektrolit yang menghasilkan energi listrik paling tinggi.

3.3.3.6 Pengukuran Energi Listrik pada Reaktor MFC *Dual-chamber* Seri

Berikut merupakan diagram alir untuk pengukuran energi listrik pada reaktor MFC rangkaian seri.



Gambar 3. 13 Diagram Alir Pengukuran Energi Listrik pada Rangkaian Seri Reaktor MFC

Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan langkah 1 – 3 pada prosedur sebelumnya dengan menggunakan rangkaian seri reaktor 100 dan 500 mL dan nilai OD optimum.
2. Menggunakan larutan elektrolit optimum.
3. Kemudian diukur arus listrik dan tegangan dengan menggunakan digital multimeter pada waktu operasi optimum.
4. Diperoleh energi listrik optimum pada reaktor MFC *dual-chamber* rangkaian seri.

BAB 4

PEMBAHASAN

4.1 Desain *Microbial Fuel Cell*

Alat MFC pada penelitian ini menggunakan reaktor *dual-chamber*, yaitu terdapat dua buah kompartemen (anoda-katoda) dan di setiap kompartemen tersebut dipasang sebuah elektroda. Pada kompartemen anoda dipasang penutup untuk mencegah oksigen masuk, sedangkan kompartemen katoda dibiarkan tetap terbuka. Pada penelitian ini digunakan dua buah reaktor dengan volume berbeda, yaitu 100 mL dan 500 mL untuk masing – masing kompartemen. Di antara kedua kompartemen terdapat lubang dengan diameter 3 cm untuk reaktor 100 mL dan 4 cm untuk reaktor 500 mL. Di lubang ini dipasang sebuah membran pemisah yang dapat mengalirkan proton. Berikut merupakan gambar reaktor MFC yang digunakan.



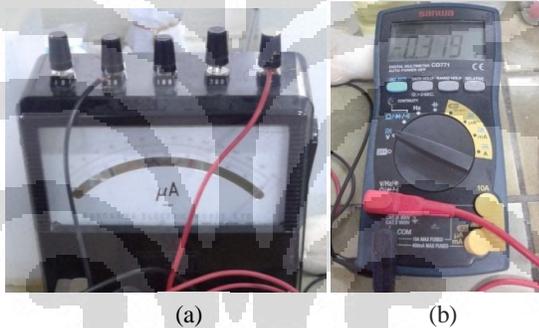
Gambar 4. 1 Reaktor MFC: (a) 100 mL (b) 500 mL

Elektroda yang digunakan pada setiap kompartemen adalah elektroda grafit yang berasal dari batang karbon batu baterai bekas berukuran A. Luas permukaan elektroda ini sebesar $1,46 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ dengan diameter 0,3 inch dan panjang 2,25 inch. Sebelum digunakan dalam sistem MFC, elektroda ini terlebih dahulu di rendam dalam HCl 1 M dan NaOH 1 M. Kemudian elektroda disimpan di dalam aquades sampai akan digunakan. Hal ini bertujuan untuk meregenerasi elektroda dan menghilangkan kontaminasi logam dan bahan organik (Chae *et al*, 2008).

Di antara kedua kompartemen terdapat membran, yaitu *Proton Exchange Membran* (PEM) Nafion 117. Membran ini berfungsi sebagai membran khusus

tempat proton berdifusi dari anoda ke katoda, sedangkan elektron tidak dapat berdifusi melalui membran ini. Sama halnya seperti elektroda, membran ini pun terlebih dahulu dilakukan *pretreatment* sebelum digunakan, yaitu dididihkan di dalam aquades, H₂SO₄ 1 M, dan H₂O₂ 3% secara terpisah. Hal ini dilakukan untuk membersihkan pori – pori membran dari kontaminan sehingga tidak mengganggu proses perpindahan massa yang berlangsung selama proses MFC (Chae *et al.*, 2008).

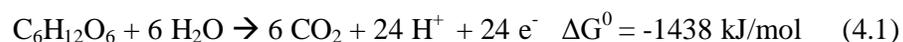
Instrumen pengukur kuat arus dan tegangan yang digunakan dalam penelitian MFC ini ada dua, yaitu *Analog Mikroampere* (Yokogawa Electric Works. Ltd, tipe 2011b9000em class 1.0, Singapore) dan *Digital Multimeter* Sanwa Electric Instrument co., Ltd cd 771. Sistem ini memiliki hambatan berkisar 0,88 – 2,5 k Ω .



Gambar 4. 2 (a) Analog Mikroampere (b) Digital Multimeter

4.2 Reaksi di Anoda dan Katoda

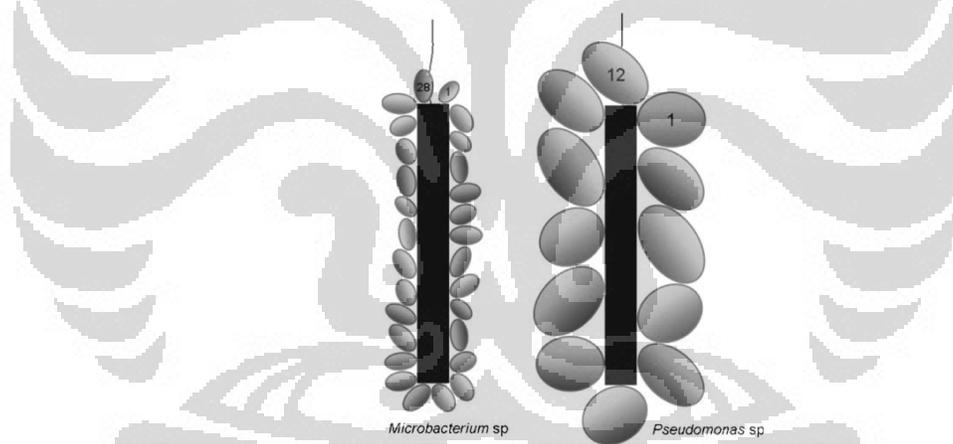
Pada kompartemen anoda, terdapat kultur bakteri *Lactobacillus bulgaricus*. Untuk melakukan metabolisme, bakteri ini membutuhkan glukosa sebagai sumber karbon. Oleh karena itu, dilakukan penambahan glukosa ke dalam kompartemen anoda. Selain sebagai sumber karbon untuk bakteri, glukosa juga berperan sebagai substrat dalam sistem MFC (Liu, 2004). Ketika bakteri mengonsumsi glukosa pada kondisi anaerob, akan dihasilkan 12 mol hidrogen (Madiraju, 2004). Glukosa akan terkonversi menjadi karbondioksida, proton, dan elektron (Barua, 2010).



Reaksi pada persamaan (4.1) memberikan perubahan energi bebas Gibbs (ΔG) yang bernilai negatif. Secara termodinamika, ΔG menunjukkan tingkat

kemudahan terjadinya suatu reaksi kimia. ΔG yang bernilai negatif ($\Delta G < 0$) akan semakin disukai dan dapat berlangsung secara spontan. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa reaksi metabolisme glukosa dapat berjalan secara spontan dalam menghasilkan listrik (Cheng, 2009).

Besarnya energi listrik pada sistem MFC dipengaruhi oleh laju metabolisme yang dilakukan oleh bakteri. Oleh karena itu, penggunaan bakteri yang berbeda akan menghasilkan energi listrik yang berbeda pula. Selain itu, terdapat pula hubungan antara ukuran sel bakteri terhadap besarnya energi listrik yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan penelitian Lee (2010), bahwa bakteri dengan ukuran yang lebih kecil mampu menghasilkan energi listrik lebih besar daripada bakteri yang berukuran besar. Fenomena ini diakibatkan oleh perbedaan densitas bakteri yang terdapat di sekeliling elektroda, di mana bakteri ukuran kecil dapat lebih banyak melakukan kontak dengan elektroda, seperti yang terlihat pada gambar berikut.

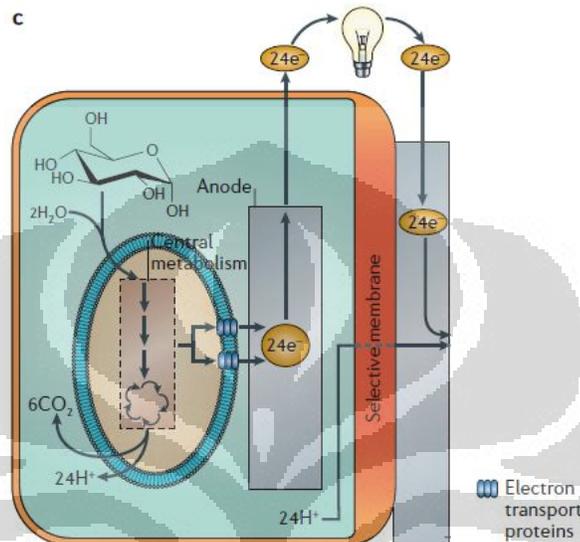


Gambar 4. 3 Ilustrasi Sel Bakteri yang Kontak dengan Elektroda

Sumber : Lee (2010)

Selanjutnya, elektron hasil metabolisme akan mereduksi NAD^+ menjadi NADH di dalam sel bakteri, 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^+ dan elektron. Elektron yang masih terdapat di dalam sel ini kemudian ditransfer ke luar sel menuju elektroda di anoda oleh mediator yang dihasilkan bakteri, yaitu riboflavin. Secara alami, sel bakteri mampu menghasilkan riboflavin yang

berfungsi mentransfer elektron dari sel bakteri ke elektroda (Gralnick, 2008). Elektron ini kemudian mengalir menuju katoda melalui sirkuit eksternal, sedangkan proton H^+ berdifusi melalui membran Nafion 117. Keseluruhan proses yang terjadi di anoda ini terlihat jelas pada gambar berikut.



Gambar 4. 4 Skema Proses Aliran Proton dan Elektron di Anoda

Sumber : Lovley (2006)

Di dalam katoda dan anoda, terdapat larutan bufer fosfat 0,1 M dengan pH 7,0 yang berfungsi menyeimbangkan pH larutan di kedua kompartemen dalam sistem MFC. Selain itu, larutan bufer fosfat juga berfungsi menambah kekuatan ion dan konduktivitas larutan sehingga dapat digunakan untuk meningkatkan nilai *power density* (Min *et al*, 2008).

Di katoda, terdapat kalium ferisianida ($K_3Fe(CN)_6$) yang berguna untuk menangkap elektron (akseptor elektron) yang berasal dari anoda. Di dalam larutan, kalium ferisianida ini mengalami ionisasi menjadi ion K^+ dan $Fe(CN)_6^{3-}$ sehingga di katoda akan terjadi reaksi berikut.



Selanjutnya ion Fe^{3+} dari $Fe(CN)_6^{3-}$ akan tereduksi menjadi ion Fe^{2+} dengan bantuan elektron yang berasal dari anoda. Kemudian ion Fe^{2+} ini kembali teroksidasi oleh proton H^+ yang terdapat di katoda dengan bantuan oksigen. Berikut merupakan reaksi yang terjadi di katoda (Qian, 2010).



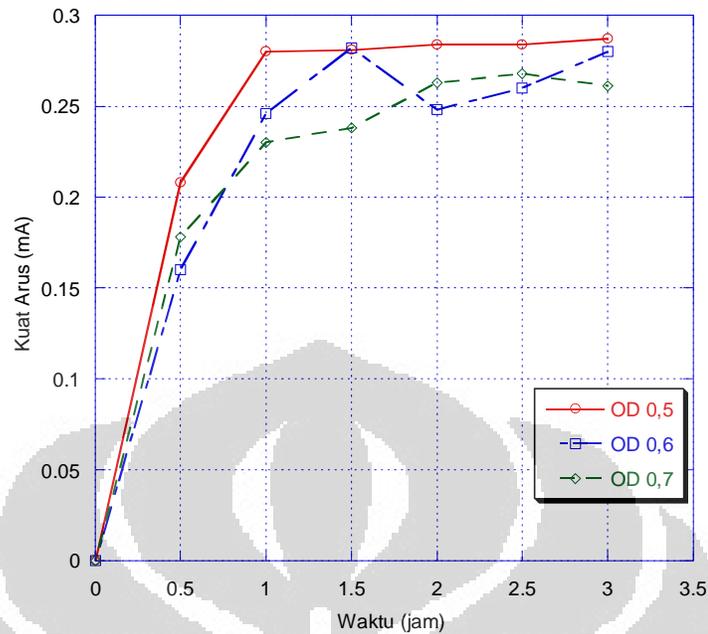


Pertemuan antara proton dan elektron inilah yang menyebabkan perbedaan potensial antara ujung – ujung elektroda di katoda dan anoda. Energi listrik yang dihasilkan oleh sistem MFC ini sebanding dengan metabolisme bakteri, sedangkan efisiensi transfer elektron dari bakteri ke elektroda sebanding dengan jumlah sel bakteri yang melakukan kontak dengan elektroda tersebut (Lee *et al*, 2010).

4.3 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi *Optical Density* (OD)

Dalam setiap pengoperasian MFC, kultur bakteri *Lactobacillus bulgaricus* yang dimasukkan ke dalam anoda harus memiliki jumlah yang sama. Dengan kata lain, bakteri harus memiliki nilai OD yang sama untuk setiap percobaan. Hal ini dilakukan untuk menyamakan kondisi operasi MFC sehingga pengaruh dari parameter operasi yang divariasikan dapat terlihat. Untuk itu, perlu diketahui nilai OD optimum yang dapat menghasilkan energi listrik tertinggi. Nilai OD optimum inilah yang selanjutnya digunakan dalam percobaan MFC. Oleh karena itu, dilakukan percobaan variasi nilai OD dengan tujuan mengetahui pengaruh jumlah bakteri terhadap energi listrik yang dihasilkan.

Pada variasi nilai OD, percobaan MFC dilakukan menggunakan reaktor 100 mL pada nilai OD 0,5; 0,6; dan 0,7. Setelah pengamatan selama 3 jam, diperoleh data hasil pengukuran kuat arus pada berbagai nilai OD yang dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. 5 Pengukuran Kuat Arus pada Variasi *Optical Density*

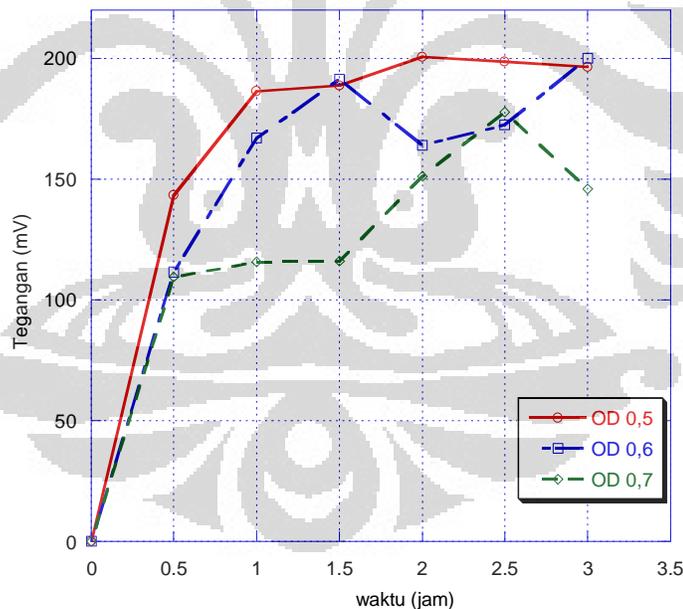
Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa kuat arus maksimum dicapai oleh OD 0,5 setelah 150 menit pengamatan, yaitu 0,287 mA. Sedangkan kuat arus maksimum untuk OD 0,6 adalah 0,282 mA dan 0,268 mA untuk OD 0,7. Dari hasil ini dapat dikatakan bahwa semakin tinggi nilai OD, semakin kecil kemampuan bakteri untuk dapat menghasilkan listrik.

Di dalam medium, bakteri tumbuh membentuk suspensi yang dapat dilihat tingkat kekeruhannya (turbiditas) melalui spektrofotometer. Nilai OD dapat digunakan untuk merepresentasikan jumlah sel bakteri yang terdapat di ruang anoda. Apabila nilai OD semakin besar maka semakin banyak jumlah sel bakteri di dalam reaktor. Bertambahnya jumlah sel bakteri ini memungkinkan semakin banyaknya proton dan elektron yang dapat dihasilkan dari proses metabolisme sehingga kuat arus yang terbaca semakin besar. Akan tetapi, jumlah glukosa sebagai substrat di anoda bernilai tetap. Akibatnya, terjadi perebutan “makanan” di antara sel bakteri sehingga tidak semua sel bakteri dapat melakukan metabolisme. Oleh karena itulah penambahan nilai OD justru dapat menurunkan kuat arus yang dihasilkan.

Di dalam anoda, bakteri berkembang biak melalui pembelahan biner sehingga jumlah sel bakteri akan berlipat ganda dengan bertambahnya waktu

operasi MFC. Oleh karena itu, sel bakteri pada OD yang lebih tinggi menghasilkan kuat arus yang besar pada satu jam pertama, namun mengalami penurunan kembali. Penurunan ini terjadi karena seiring dengan bertambahnya jumlah sel pada OD yang lebih tinggi, konsentrasi glukosa semakin cepat berkurang. Dengan kadar glukosa yang rendah, kemampuan transfer elektron dari sel bakteri ke elektroda akan berkurang. Hal ini sesuai dengan penelitian Lee (2010) bahwa transfer elektron dari sel bakteri ke elektroda sebanding dengan kadar glukosa (Lee *et al*, 2010). Oleh sebab itulah, kuat arus pada OD yang lebih tinggi cepat mengalami penurunan dibandingkan dengan OD 0,5.

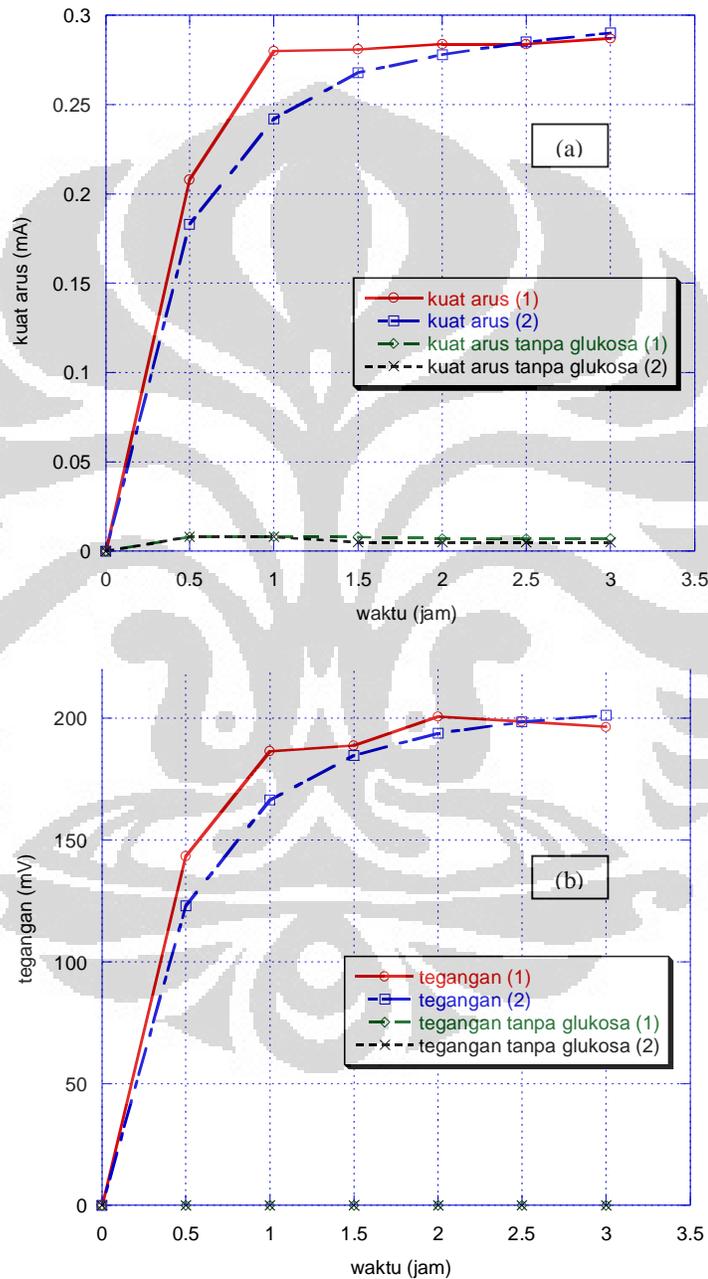
Selain kuat arus, pada percobaan ini juga dilihat pengaruh OD terhadap tegangan atau beda potensial yang dihasilkan antara elektroda di anoda dan katoda. Sama halnya dengan kuat arus, peristiwa yang sama terjadi pada pengukuran nilai tegangan. Nilai tegangan menurun seiring dengan bertambahnya nilai OD yang digunakan, dimana nilai tegangan maksimum sebesar 200,7 mV dicapai pada saat OD 0,5.



Gambar 4. 6 Pengukuran Tegangan pada Variasi *Optical Density*

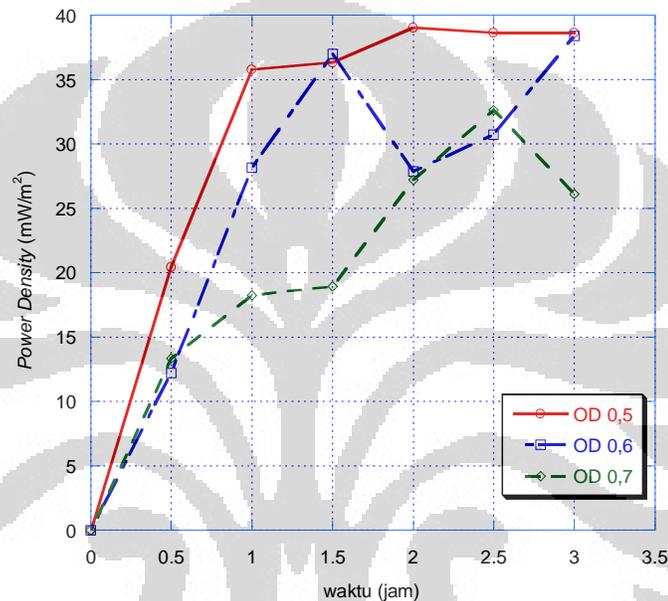
Untuk menunjang pengambilan data kuat arus dan tegangan yang telah dilakukan, maka dilakukan kembali pengukuran data dan kuat arus pada nilai OD 0,5 selama 3 jam. Kemudian data ini dibandingkan terhadap kontrol negatif, yaitu

sistem MFC tanpa menambahkan glukosa di anoda. Dari perbandingan hasil ini, diperoleh bahwa sistem MFC tanpa menggunakan glukosa menghasilkan kuat arus dan tegangan yang kecil. Itulah sebabnya, penurunan kadar glukosa dapat menyebabkan penurunan nilai kuat arus dan tegangan. Hasil selengkapnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. 7 Pengukuran (a) Kuat Arus dan (b) Tegangan pada *Optical Density* 0,5

Setelah diperoleh nilai kuat arus dan tegangan, dapat dihitung berapa *power density* yang dihasilkan oleh sistem MFC ini. *Power density* (mW/m^2) adalah daya yang dihasilkan per luas permukaan elektroda. Dengan menggunakan persamaan (3.1), diperoleh hasil bahwa nilai *power density* maksimum sebesar $39,04 \text{ mW}/\text{m}^2$ dicapai pada saat OD 0,5. Untuk lebih jelasnya, hasil perhitungan *power density* pada berbagai nilai OD disajikan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



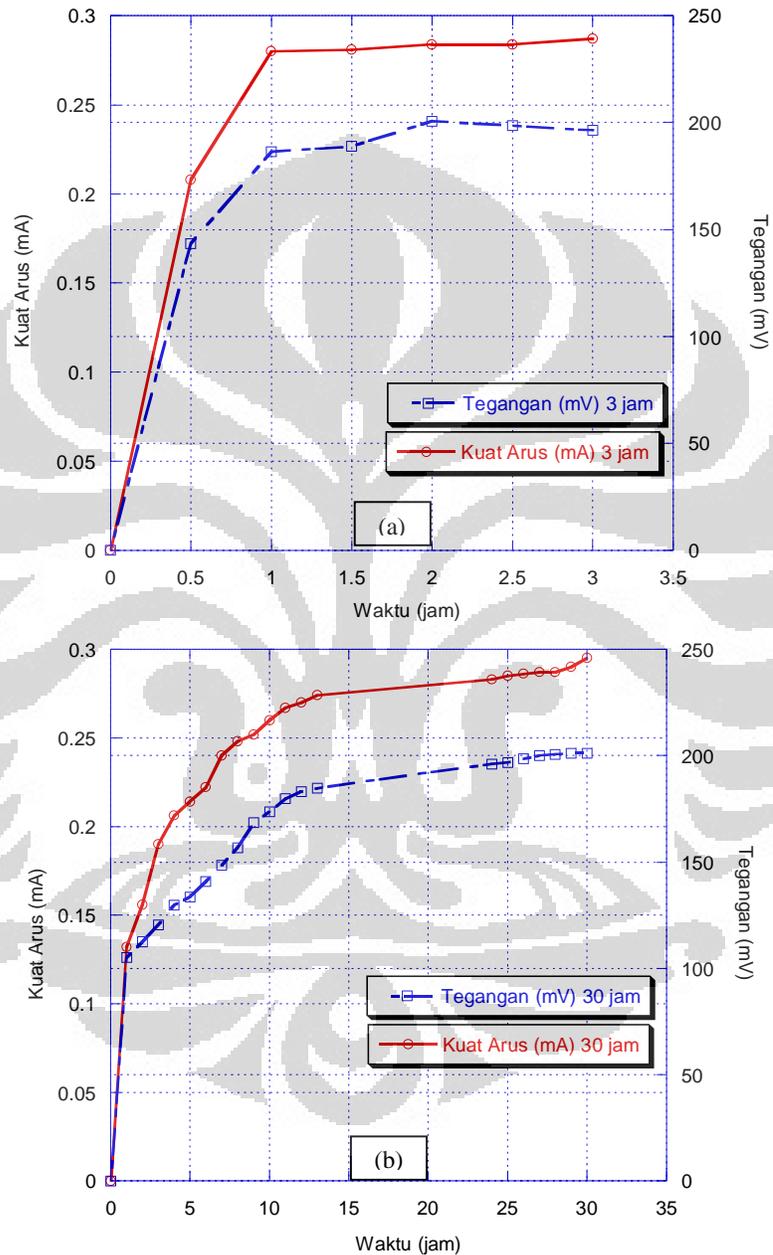
Gambar 4. 8 *Power Density* pada Variasi *Optical Density*

4.4 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Waktu Operasi

Setelah didapatkan nilai OD optimum selama 3 jam pengamatan, selanjutnya dilakukan pengukuran energi listrik pada variasi waktu operasi MFC. Tujuannya adalah meninjau pengaruh penambahan waktu operasi terhadap energi listrik dan melihat masa operasi MFC maksimum yang dapat dilakukan. Dari percobaan ini, akan didapatkan waktu operasi optimum yang menghasilkan energi listrik tertinggi.

Percobaan variasi waktu operasi ini dilakukan menggunakan reaktor 100 mL dengan menggunakan OD optimum, yaitu OD 0,5. Waktu pengamatan dilakukan selama 3, 30, dan 100 jam. Pada waktu operasi selama 3 dan 30 jam, nilai kuat arus dan tegangan masih mengalami peningkatan sampai akhir

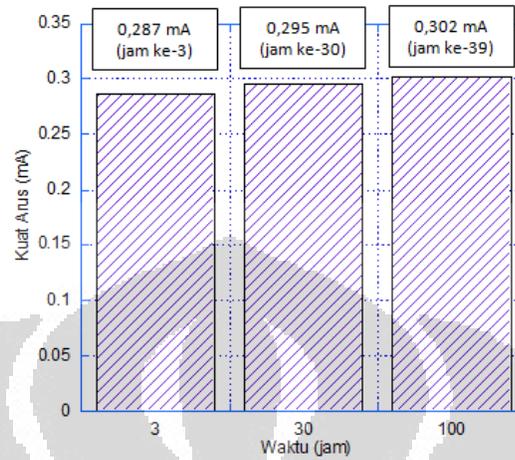
pengamatan, seperti yang terlihat pada Gambar 4.9. Hal ini terjadi karena pada awal operasi MFC, konsentrasi glukosa masih tinggi sehingga laju metabolisme meningkat. Peningkatan laju metabolisme ini diiringi oleh meningkatnya energi listrik.



Gambar 4. 9 Perbandingan Kuat Arus dan Tegangan pada (a) 3 jam (b) 30 jam

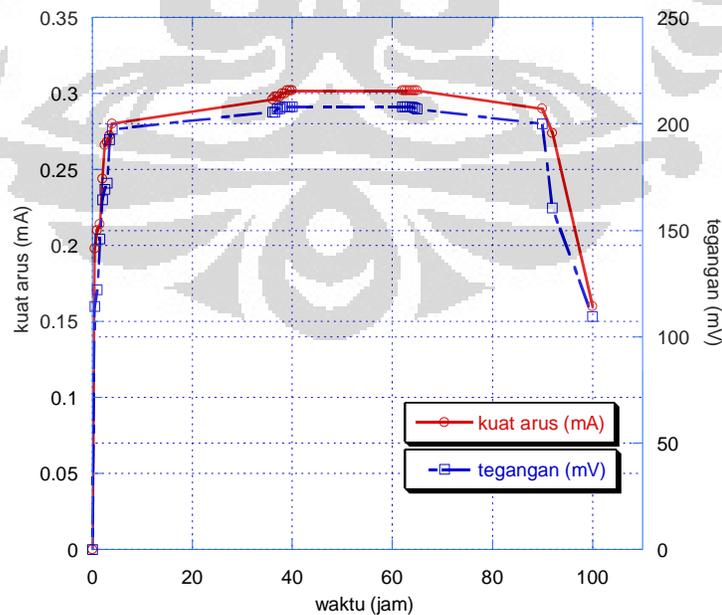
Oleh karena itu, percobaan MFC kembali dilakukan pada periode yang lebih lama, yaitu 100 jam, untuk mendapatkan energi listrik maksimum. Gambar 4.10

berikut menunjukkan nilai kuat arus maksimum yang diperoleh untuk masing-masing waktu operasi.



Gambar 4. 10 Grafik Kuat Arus Maksimum pada Variasi Waktu Operasi

Berdasarkan gambar di atas, dapat dilihat bahwa kuat arus tertinggi diperoleh pada waktu operasi selama 100 jam. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan waktu operasi dapat meningkatkan kuat arus. Namun, lama pengoperasian MFC ini memiliki batas maksimum sampai mulai terjadi penurunan kuat arus setelah 90 jam pengamatan, seperti yang terlihat pada gambar berikut.



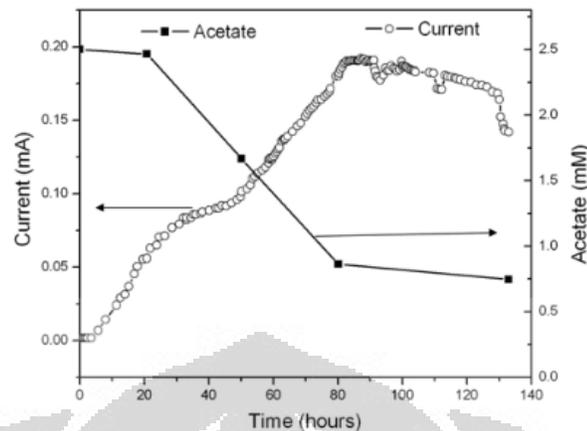
Gambar 4. 11 Pengukuran Kuat Arus dan Tegangan selama 100 jam

Pada 3 jam pertama, nilai kuat arus mengalami kenaikan yang tinggi. Hal ini terjadi karena bakteri *L. bulgaricus* yang digunakan sedang berada pada fase eksponensial. Pada fase ini, sel melakukan metabolisme secara aktif yang disertai oleh pembelahan dan sintesis bahan sel yang berlangsung cepat (Sumarsih, 2007). Ketersediaan glukosa juga masih mencukupi sehingga proses transfer elektron berjalan dengan baik. Selain itu, proses konversi glukosa sebagai sumber karbon juga dapat menunjang terjadinya peningkatan energi listrik (Rabaey, 2003). Biomassa yang terakumulasi di anoda akibat aktivitas sel bakteri juga dapat meningkatkan kuat arus yang dihasilkan (Nevin *et al.*, 2008).

Setelah 3 jam, kuat arus tetap mengalami kenaikan sedikit demi sedikit hingga akhirnya cenderung bernilai stabil sampai 70 jam pengamatan. Keadaan yang cenderung stabil ini terkait dengan fase bakteri yang sudah berada di tahap stasioner. Pada fase ini, pertumbuhan mulai terhambat dan terjadi kondisi di mana jumlah sel hidup hasil pembelahan sama dengan jumlah sel yang mati sehingga seolah – olah tidak terjadi pertumbuhan (Sumarsih, 2007).

Penurunan kuat arus mulai terlihat setelah 90 jam pengamatan. Penurunan ini terjadi sehubungan dengan kondisi bakteri yang mulai memasuki fase kematian. Pada fase ini, kecepatan kematian sel terus meningkat sedangkan kecepatan pembelahan sel nol (Sumarsih, 2007). Akibatnya, jumlah sel bakteri yang hidup semakin sedikit. Kadar glukosa di anoda juga semakin berkurang seiring dengan bertambahnya waktu. Akibatnya, terjadinya penurunan kecepatan metabolisme sel sehingga kuat arus yang dihasilkan pun semakin kecil. Hal ini sesuai dengan pernyataan Lee bahwa energi listrik sebanding dengan metabolisme bakteri (Lee *et al.*, 2010).

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini kemudian dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan Trinh (2009). Dengan menggunakan bakteri *Geobacter sulfurreducens* dan asetat sebagai donor elektron pada MFC *dual-chamber*, diperoleh bahwa kuat arus mengalami kenaikan sampai nilai maksimumnya kemudian turun kembali pada waktu tertentu, seperti yang terlihat pada gambar berikut.

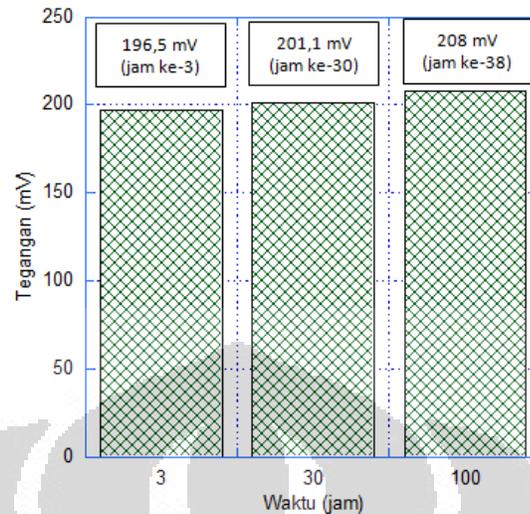


Gambar 4.12 Nilai Kuat Arus oleh *Geobacter Sulfurreducens* pada 30⁰
Sumber : Trinh (2009)

Dari gambar di atas, dapat dilihat bahwa Trinh memperoleh kuat arus maksimum sebesar 0,19 mA pada jam ke-80 dan kembali menurun dengan cepat pada jam ke-120. Bila dibandingkan, hasil penelitian ini memberikan nilai kuat arus maksimum sekitar 59% lebih besar dari Trinh, yaitu sebesar 0,302 mA. Selain itu, pada penelitian ini kuat arus maksimum lebih cepat dicapai (jam ke-40) dan berlangsung dalam waktu yang lebih lama, yaitu 50 jam, dibandingkan dengan penelitian Trinh yang hanya bertahan selama 40 jam. Dengan demikian, penelitian ini lebih unggul dalam nilai kuat arus maksimum yang dapat dicapai dan mampu bertahan lebih lama.

Menurut Trinh, penurunan kuat arus ini disebabkan oleh kehadiran hidrogen hasil metabolisme sel di anoda. Semakin lama, konsentrasi hidrogen ini akan meningkat dan akhirnya menutupi seluruh permukaan elektroda di anoda sehingga proses transfer elektron dari bakteri ke elektroda menjadi terhambat. Untuk mempertahankan kuat arus pada level yang tinggi, keberadaan hidrogen di anoda harus dihilangkan (Trinh *et al*, 2009).

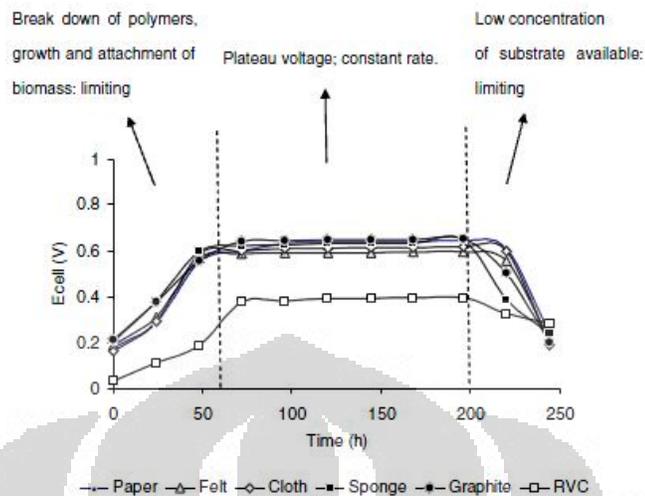
Sama halnya dengan kuat arus, tegangan maksimum juga diperoleh pada waktu operasi 100 jam. Hal ini terlihat dengan jelas pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. 13 Grafik Tegangan Maksimum pada Variasi Waktu Operasi

Sama halnya seperti kuat arus, Gambar 4.11 juga menunjukkan bahwa nilai tegangan pada waktu operasi selama 100 jam mengalami peningkatan yang signifikan di awal pengamatan. Hal ini terkait dengan fase hidup bakteri dan ketersediaan glukosa, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Tegangan terus mengalami kenaikan hingga tercapai nilai maksimum (208 mV) pada jam ke-38 dan relatif konstan sampai jam ke-90. Setelah itu, nilai tegangan mulai mengalami penurunan.

Penelitian Gurrero-Larrosa (2010) juga menunjukkan pola yang sama dengan pengukuran tegangan pada penelitian ini. Guerrero-Larrosa menggunakan *wastewater* pada MFC *dual-chamber* dan diperoleh bahwa tegangan mengalami peningkatan secara cepat pada 48 – 72 jam operasi, kemudian laju peningkatan bernilai konstan sampai jam ke-200 dan akhirnya mengalami penurunan. Hasil pengukuran tegangan ini dapat dilihat pada gambar berikut.

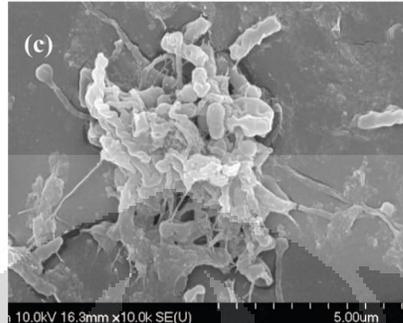


Gambar 4.14 Variasi Nilai Tegangan pada Enam Material Anoda
Sumber : Guerrero-Larrosa (2010)

Guerrero-Larrosa menjelaskan bahwa pada awal pengukuran, konsentrasi substrat masih cukup untuk menghasilkan nilai tegangan yang stabil. Kenaikan tegangan disebabkan oleh meningkatnya kecepatan proses elektrokimia pada MFC. Meningkatnya kecepatan pada awal pengukuran berhubungan dengan aktivitas pemecahan bahan – bahan organik kompleks oleh bakteri. Semakin lama, produk hasil metabolisme akan menyebabkan berkurangnya produksi energi listrik. Hal ini terjadi sampai laju metabolisme dan laju oksidasi di anoda berada pada keadaan setimbang. Keadaan ini yang membuat energi listrik terus bernilai stabil sampai konsentrasi substrat berkurang (Guerrero-Larrosa *et al*, 2010).

Bila dibandingkan dengan penelitian ini, dapat dilihat bahwa Guerrero-Larrosa mampu menghasilkan tegangan dengan nilai lebih tinggi, yaitu sekitar 0,6 V. Hal ini kemungkinan diakibatkan oleh perbedaan mikroorganisme yang digunakan, di mana Guerrero-Larrosa menggunakan *wastewater*. *Wastewater* mengandung banyak bakteri di dalamnya sehingga akan lebih banyak proton dan elektron yang dapat dihasilkan di anoda. Pada penelitian Guerrero-Larrosa, tegangan maksimum diperoleh pada jam ke-48, sedangkan penelitian ini mencapai tegangan maksimumnya pada jam ke-38. Dengan demikian, penelitian ini lebih unggul dalam waktu memperoleh tegangan maksimum.

Penurunan nilai tegangan juga dapat disebabkan oleh terbentuknya *biofilm* di membran Nafion akibat aktivitas bakteri di anoda, seperti yang terlihat pada gambar berikut.



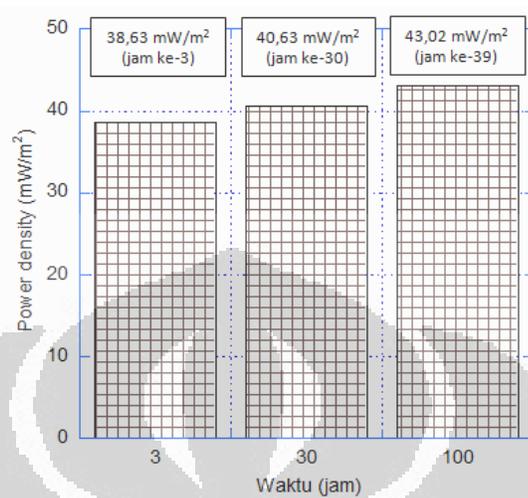
Gambar 4. 15 Hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM) Membran Nafion setelah 50 Hari
Sumber : Chae (2008)

Biofilm ini menimbulkan efek yang buruk terhadap perpindahan massa yang terjadi di membran (Chae *et al*, 2008) dan dapat menghalangi perpindahan proton dari anoda ke katoda (Li *et al*, 2010). Proton yang tertahan ini menimbulkan perubahan pH di anoda dan dapat mengganggu kehidupan bakteri (Chae *et al*, 2008). Lapisan pada membran ini juga mengakibatkan terjadinya kekurangan proton di katoda sehingga perbedaan potensial yang dihasilkan pun kecil. Selain karena *biofilm*, tertahannya migrasi proton juga diakibatkan oleh bereaksinya kation K^+ di katoda dengan grup sulfonat pada membran Nafion. Hal ini berdampak terhadap penurunan kinerja MFC (Chae *et al*, 2008).

Penurunan tegangan juga diakibatkan oleh menurunnya aktivitas kalium ferisianida sebagai akseptor elektron di katoda. Peristiwa ini terjadi sesuai dengan persamaan reaksi (4.4). Semakin lama digunakan, konsentrasi $Fe(CN)_6^{3-}$ akan menurun akibat peristiwa reoksidasi yang tidak sempurna oleh oksigen. Selain itu, konsentrasi bufer fosfat pada kedua kompartemen juga mengalami penurunan. Hal ini mengakibatkan berkurangnya kekuatan ion dan konduktivitas larutan sehingga menyebabkan menurunnya energi listrik (Min *et al*, 2008).

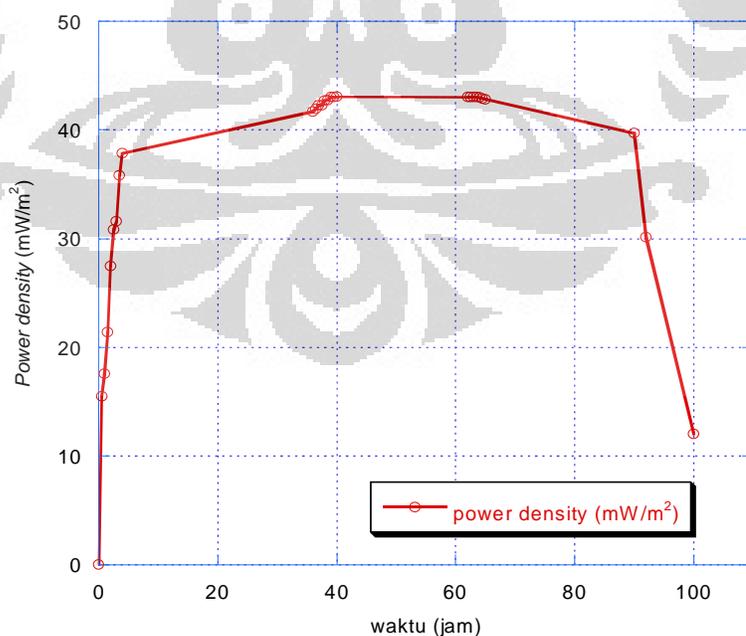
Dari percobaan ini, dihasilkan perhitungan berupa nilai *power density* untuk setiap waktu operasi MFC. Sesuai dengan data kuat arus dan tegangan sebelumnya, nilai *power density* maksimum sebesar $43,02 \text{ mW/m}^2$ juga diperoleh pada waktu operasi 100 jam. Nilai maksimum ini lebih tinggi 5,8% dari waktu

operasi 30 jam dan 11,36% dari waktu operasi 3 jam. Hal ini dapat terlihat dengan jelas pada gambar berikut.



Gambar 4. 16 Grafik *Power Density* Maksimum pada Variasi Waktu Operasi

Seiring dengan menurunnya nilai kuat arus dan tegangan, *power density* juga mengalami penurunan setelah mencapai nilai maksimumnya. Penurunan secara signifikan terjadi setelah jam ke-90. Dengan kata lain, masa operasi maksimum MFC di mana belum terjadi penurunan energi listrik yang signifikan adalah 90 jam. Hal ini dapat terlihat jelas pada gambar berikut.



Gambar 4. 17 *Power Density* pada Variasi Waktu Operasi

Penurunan *power density* terjadi sehubungan dengan aktivitas bakteri di dalam anoda yang lama kelamaan dapat membentuk *biofilm* pada permukaan elektroda (Kim *et al*, 2007; Nevin *et al*, 2008). Terbentuknya *biofilm* ini dapat mengakibatkan peningkatan hambatan dalam di anoda (Zahara, 2011) dan dapat menyebabkan penurunan nilai *power density* (Kim *et al*, 2007). Efisiensi transfer elektron dari bakteri ke elektroda sebanding dengan jumlah bakteri yang melakukan kontak dengan elektroda tersebut (Lee *et al*, 2010). Apabila permukaan elektroda ini sudah dipenuhi oleh *biofilm*, jumlah elektron yang dapat ditransfer ke elektroda akan sedikit sehingga terjadi penurunan energi listrik. Gambar 4.18 berikut menunjukkan elektroda anoda *carbon felt* yang telah dilapisi oleh *biofilm* setelah pemakaian 50 hari.



Gambar 4. 18 Lapisan *Biofilm* pada *Carbon-felt* Setelah 50 Hari

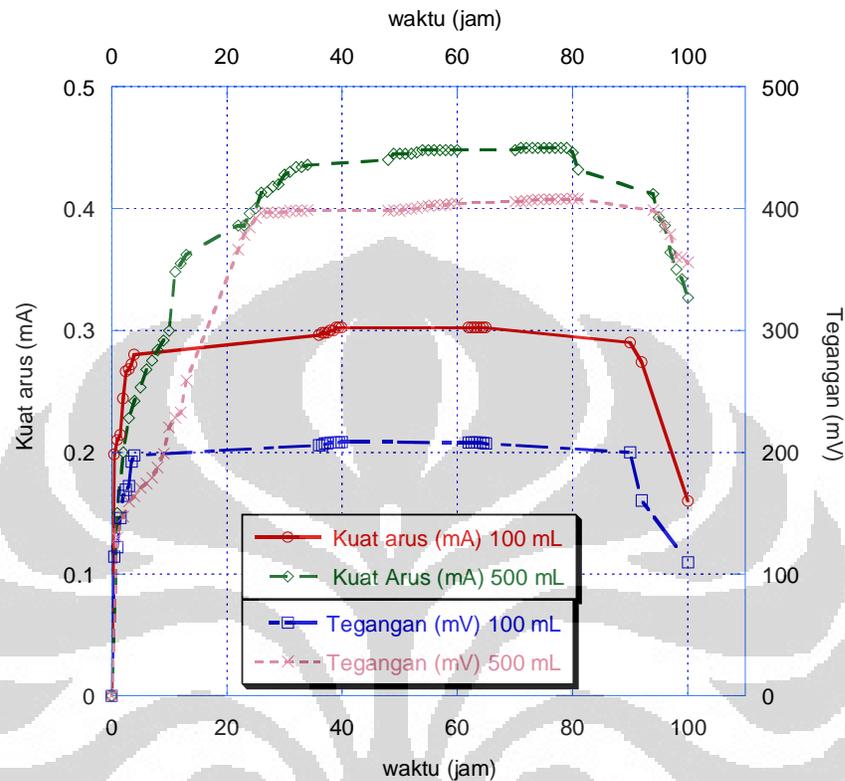
Sumber : Chae (2008)

4.5 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Volume Reaktor

Setelah penambahan waktu operasi terbukti mampu meningkatkan energi listrik, selanjutnya pengukuran energi listrik akan dilakukan dengan penambahan volume reaktor. Tujuannya adalah mengkaji pengaruh penambahan volume reaktor terhadap nilai energi listrik. Dari percobaan ini, didapatkan volume optimum yang digunakan untuk percobaan MFC selanjutnya.

Pada percobaan ini, digunakan volume reaktor 100 dan 500 mL. Pengamatan dilakukan pada OD optimum (OD 0,5) dan waktu operasi optimum (100 jam). Setelah pengamatan selesai, diperoleh data kuat arus dan tegangan maksimum pada volume 500 mL masing – masing sebesar 0,45 mA dan 408 mV. Nilai maksimum ini mengalami peningkatan signifikan dibandingkan dengan menggunakan volume 100 mL, yaitu sebesar 49% untuk kuat arus dan 96,15%

untuk tegangan. Pada Gambar 4.19 berikut terdapat grafik hasil pengukuran kuat arus dan tegangan pada variasi volume reaktor.

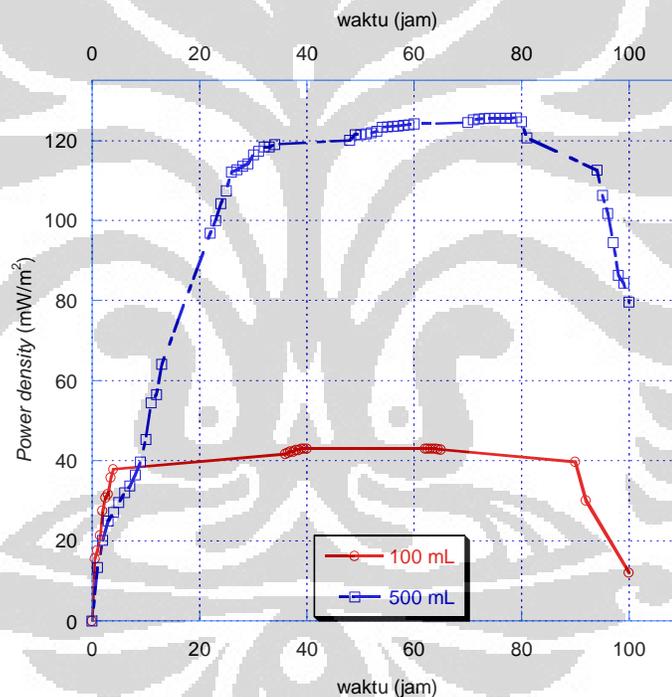


Gambar 4. 19 Perbandingan Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi Volume Reaktor

Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa saat kuat arus dan tegangan pada 100 mL sudah mulai stabil, kuat arus dan tegangan pada 500 mL masih mengalami peningkatan sampai nilai maksimumnya, baru kemudian mulai relatif stabil pada jam ke-30. Peningkatan ini terjadi karena dengan bertambahnya volume reaktor, bertambah pula volume glukosa di anoda. Walaupun bakteri yang digunakan jumlahnya tetap, penambahan jumlah glukosa menyebabkan bertambahnya jumlah makanan bagi bakteri sehingga proses metabolisme sel dapat berlangsung lebih lama. Akibatnya, energi listrik masih mengalami peningkatan karena efisiensi listrik MFC bergantung kepada proses metabolisme bakteri (Choi *et al*, 2004). Hal ini pula yang menyebabkan kuat arus dan tegangan pada 500 mL cenderung bernilai stabil pada waktu yang lebih lama dibanding 100 mL. Selain karena penambahan volume glukosa, peningkatan kuat arus dan tegangan ini juga disebabkan oleh bertambahnya luas membran yang digunakan

pada reaktor 500 mL. Penambahan luas membran ini terkait dengan bertambahnya diameter lubang sebagai tempat diletakkannya membran. Semakin luas membran, semakin banyak pula proton yang berpindah ke katoda melalui membran sehingga menghasilkan peningkatan nilai kuat arus dan tegangan.

Penambahan volume reaktor menjadi 500 mL juga berakibat pada peningkatan nilai *power density* maksimum sekitar 3 kali lebih besar dibandingkan dengan volume reaktor 100 mL. Seiring dengan meningkatnya nilai kuat arus dan tegangan, *power density* juga mengalami peningkatan pada awal pengukuran sampai mencapai titik maksimal ($125,72 \text{ mW/m}^2$). Setelah stabil, *power density* mengalami penurunan selama 6 jam terakhir. Hal ini terlihat jelas pada gambar berikut ini.



Gambar 4. 20 *Power Density* pada Variasi Volume Reaktor

Penelitian mengenai pengaruh volume reaktor terhadap produksi energi listrik juga dilakukan oleh Qian (2011). Qian membandingkan 4 reaktor dengan volume dan luas permukaan elektroda yang berbeda. Spesifikasi masing – masing reaktor dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. 1 Perbandingan Tipe Reaktor MFC

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)
chamber volume	10 mL	10 mL	4 μ L	1.5 μ L
chamber height	2 cm	2 cm	100 μ m	100 μ m
projected anode area	5 cm ²	2.25 cm ²	0.4 cm ²	0.15 cm ²
SAV ratio	0.5 cm ⁻¹	0.22 cm ⁻¹	100 cm ⁻¹	100 cm ⁻¹
anode material	carbon cloth	gold	carbon cloth	gold
catholyte	FeCN	air	FeCN	FeCN
substrate	TSB	lactate	TSB	TSB
open circuit voltage	0.61 V	0.45 V	0.56 V	0.6 V
background current	12 μ A	4 μ A	40 nA	50 nA
start-up period	3 days	N/A	6 hrs	12 hrs
max. current density	8 μ A/cm ²	N/A	10 μ A/cm ²	13 μ A/cm ²
max. power density	0.2 W/m ³	N/A	62.5 W/m ³	15 W/m ³
calculated R _{int}	13 kohm	N/A	16 kohm	30 kohm

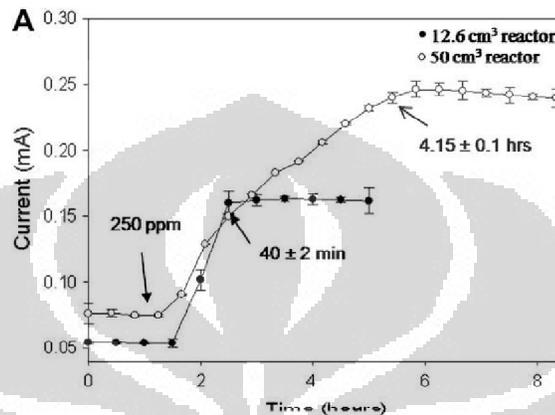
Sumber : Qian (2011)

Dari tabel di atas, dapat dilihat bahwa semakin besar volume reaktor, semakin besar pula kuat arus yang dihasilkan. Hal ini terjadi pada kedua jenis elektroda, baik *carbon cloth* maupun *gold*. Menurut Qian, peristiwa ini terjadi akibat semakin banyaknya sel bakteri yang melakukan aktivitas metabolisme. Hal ini berdampak pada semakin banyaknya jumlah elektron yang dihasilkan pada reaktor yang bervolume lebih besar sehingga kuat arus yang dihasilkan dapat lebih tinggi (Qian, 2011).

Lain halnya dengan kuat arus, penambahan volume reaktor justru menurunkan nilai *power density* (W/m³). Misalnya, pada material anoda *carbon cloth*, nilai *power density* untuk reaktor 10 mL lebih kecil daripada reaktor 4 μ L. Hal ini terjadi karena pengaruh volume reaktor sebagai pembagi nilai *power*. Apabila nilai *power density* dikalikan dengan volume reaktor, akan didapatkan nilai *power* sebesar 2000 nW untuk reaktor 10 mL dan 250 nW untuk reaktor 4 μ L. Dengan demikian, diperoleh kesimpulan bahwa penambahan volume reaktor juga dapat meningkatkan *power* yang dihasilkan.

Selain Qian, Lorenzo (2009) juga meneliti pengaruh penambahan volume terhadap kinerja MFC. Dalam penelitiannya, Lorenzo menggunakan reaktor *single-chamber* dengan volume 12,6 dan 50 cm³ sebagai perbandingan dan

didapatkan hasil seperti yang terlihat pada Gambar 4.21. Dibandingkan dengan penelitian ini, Lorenzo memberikan hasil kuat arus maksimum 44% lebih kecil yaitu sebesar 0,25 mA. Hal ini terkait dengan perbedaan volume reaktor yang digunakan, di mana penelitian ini menggunakan reaktor yang berukuran 40 kali lebih besar, yaitu 500 mL.



Gambar 4. 21 Pengaruh Volume Reaktor Terhadap Kuat Arus pada MFC *Single-chamber*

Sumber : Lorenzo (2009)

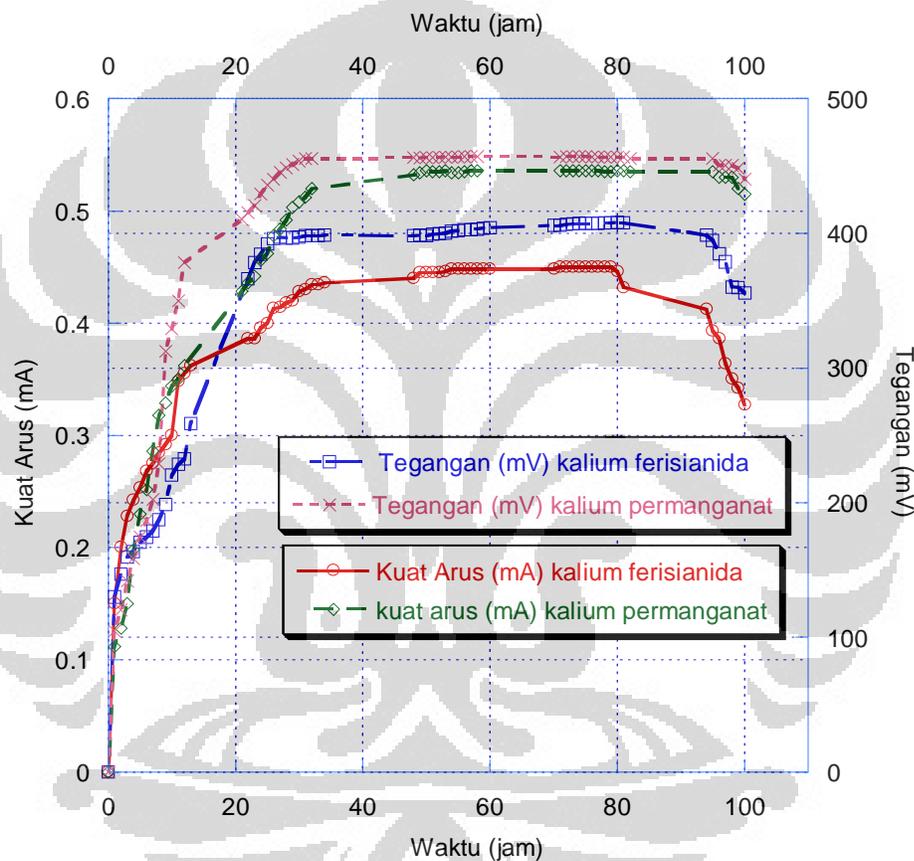
Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa kuat arus yang dihasilkan oleh reaktor 50 cm³ lebih besar dibandingkan dengan reaktor 12,6 cm³. Dari percobaan Lorenzo juga dapat disimpulkan bahwa semakin besar volume reaktor, semakin besar pula kuat arus yang dihasilkan. Lorenzo menjelaskan bahwa fenomena ini terkait dengan bertambahnya jumlah donor elektron pada penggunaan volume reaktor yang lebih besar (Lorenzo *et al*, 2009). Sama halnya seperti hasil penelitian ini, hasil penelitian Lorenzo juga menunjukkan bahwa volume reaktor yang lebih kecil membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk mencapai kestabilan kuat arus. Hal ini terjadi karena volume reaktor yang lebih besar masih mengalami peningkatan kuat arus sampai nilai maksimumnya.

4.6 Pengukuran Energi Listrik pada Variasi Larutan Elektrolit

Kinerja MFC dipengaruhi oleh banyak faktor, salah satunya adalah penggunaan larutan elektrolit sebagai akseptor elektron di katoda (Guerrero-Rangel *et al*, 2010). Untuk itu, pada penelitian ini dilakukan variasi larutan elektrolit dengan tujuan mengkaji pengaruh jenis larutan elektrolit terhadap

produksi energi listrik. Larutan elektrolit yang dibandingkan adalah kalium ferisianida ($K_3Fe(CN)_6$) dan kalium permanganat ($KMnO_4$), pada konsentrasi yang sama. Dari percobaan ini didapatkan jenis larutan elektrolit yang mampu menghasilkan energi listrik tertinggi.

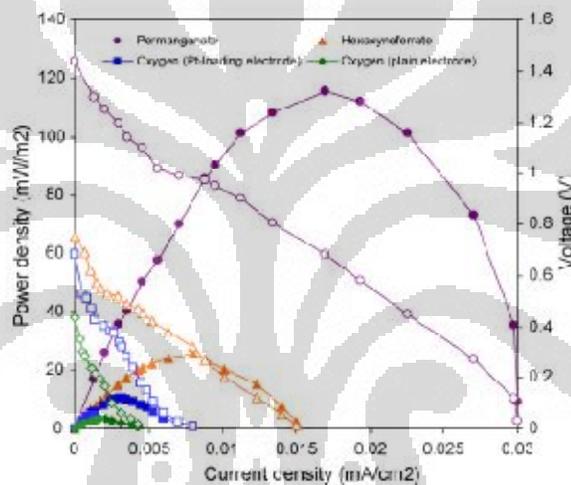
Percobaan ini dilakukan pada nilai OD 0,5 dengan menggunakan reaktor bervolume 500 mL. Setelah dilakukan pengamatan selama 100 jam, diperoleh data hasil pengukuran nilai kuat arus dan tegangan seperti pada gambar berikut.



Gambar 4. 22 Perbandingan Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi Larutan Elektrolit

Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa hasil kuat arus dan tegangan maksimum (0,536 mA dan 457 mV) dihasilkan pada penggunaan kalium permanganat sebagai larutan elektrolit. Nilai ini mengalami peningkatan dibandingkan dengan kalium ferisianida, yaitu sebesar 19% untuk kuat arus dan 12% untuk tegangan.

Hal serupa didapatkan oleh You (2006) yang juga membandingkan kinerja akseptor elektron dalam memproduksi energi listrik dengan menggunakan permanganat, *hexacyanoferrate* (ferisianida), dan oksigen. *Power density* dan tegangan maksimum diperoleh pada saat penggunaan permanganat sebagai akseptor elektron di katoda ($115,6 \text{ mW/m}^2$ dan $1,4 \text{ V}$). Tegangan yang dihasilkan You lebih besar sekitar 2 kali lipat dibanding penelitian ini. Hal ini dikarenakan penggunaan *wastewater* pada anoda oleh You sehingga dapat dihasilkan lebih banyak proton dan elektron dibandingkan dengan menggunakan kultur tunggal *Lactobacillus bulgaricus*. Hasil penelitian Lorenzo selengkapnya dapat dilihat pada gambar berikut.



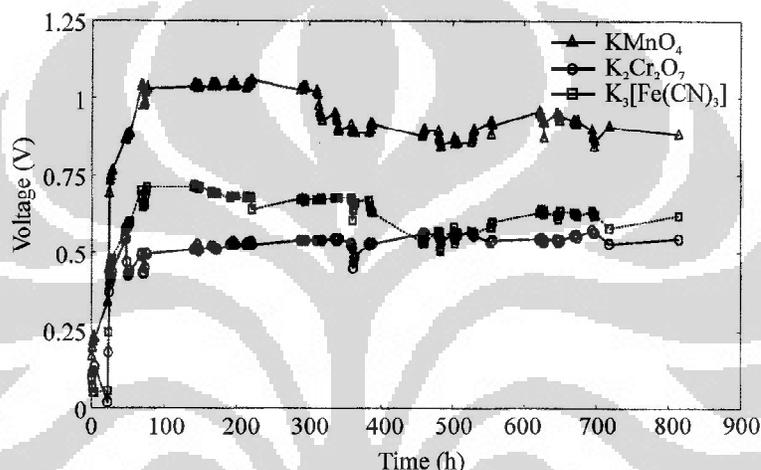
Gambar 4. 23 Energi Listrik pada MFC *Two-chamber* dengan Variasi Akseptor Elektron

Sumber : You et al (2006)

Permanganat diketahui memiliki potensial redox yang tinggi sehingga memungkinkan dihasilkannya perbedaan nilai potensial yang tinggi di antara anoda dan katoda. Nilai potensial di anoda umumnya ditentukan oleh beberapa faktor, antara lain laju konversi substrat dan laju transfer elektron dari bakteri ke permukaan elektroda di anoda. Sedangkan nilai potensial di katoda hanya ditentukan oleh jenis akseptor elektron yang digunakan. Dengan mengasumsikan potensial redox NAD^+/NADH di anoda bernilai konstan ($-0,32 \text{ V}$), nilai tegangan akan bergantung sepenuhnya kepada kinerja katoda. Karena permanganat memiliki potensial redox yang tinggi, perbedaan potensial di anoda dan katoda

akan semakin besar sehingga energi listrik yang dihasilkan akan meningkat (You *et al*, 2006).

Guerrero-Rangel (2010) juga membandingkan kinerja larutan elektrolit di katoda dengan menggunakan kalium permanganat, kalium ferisianida, dan kalium dikromat. Dari penelitian Guerrero-Rangel pun kembali diperoleh bahwa energi listrik tertinggi dihasilkan oleh kalium permanganat, yaitu sebesar 1,07 V. Nilai ini lebih besar sekitar 33% terhadap kalium ferisianida dan 48% terhadap kalium dikromat. Hasil ini dapat dilihat lebih jelas pada gambar berikut.



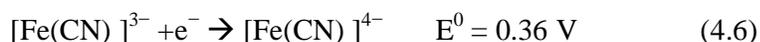
Gambar 4. 24 Perbandingan Tegangan pada *Two-chamber* MFC Menggunakan 3 Akseptor Elektron Berbeda

Sumber : Guerrero-Rangel et al (2010)

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, permanganat memiliki nilai potensial redox yang tinggi, khususnya dalam kondisi asam. Persamaan (4.5) menggambarkan reaksi reduksi yang terjadi pada permanganat (Guerrero-Rangel *et al*, 2010). Proton dan elektron yang berasal dari anoda digunakan untuk mereduksi Mn^{7+} menjadi Mn^{4+} .

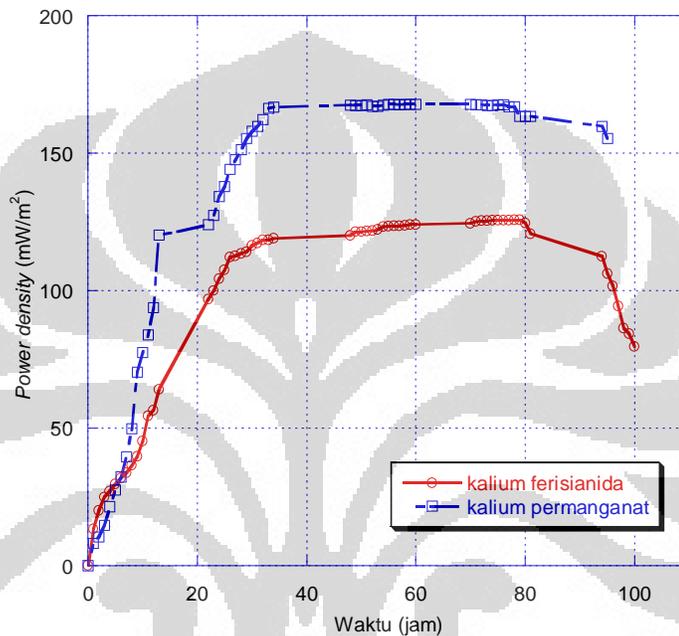


Nilai potensial reduksi standar permanganat ini lebih besar bila dibandingkan dengan ferisianida. Peristiwa reduksi ferisianida berjalan seperti reaksi berikut (Qian *et al*, 2010).



Oleh sebab itulah permanganat dapat menghasilkan perbedaan potensial anoda – katoda yang lebih besar dibanding ferisianida.

Selain kuat arus dan tegangan, penggunaan kalium permanganat sebagai larutan elektrolit juga berpengaruh terhadap kenaikan *power density*. Penggunaan kalium permanganat dapat meningkatkan *power density* sebesar 33,5% dengan nilai maksimum sebesar $167,7 \text{ mW/m}^2$, seperti yang terlihat pada gambar berikut.



Gambar 4. 25 *Power Density* pada Variasi Larutan Elektrolit

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini sesuai dengan apa yang telah dilakukan sebelumnya oleh Guerrero-Rangel (2010) sebagai berikut.

Tabel 4. 2 Energi Listrik pada MFC *Two-chamber* untuk Variasi Larutan Katodik

Cathodic acceptor	OCV (volts)	Power density (mW m^{-2})	COD removal (%)
KMnO_4	1.04	7.29	95 ± 1.5
$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	0.71	0.92	95 ± 1.5
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	0.56	0.79	95 ± 1.5

Sumber : Guerrero-Rangel et al (2010)

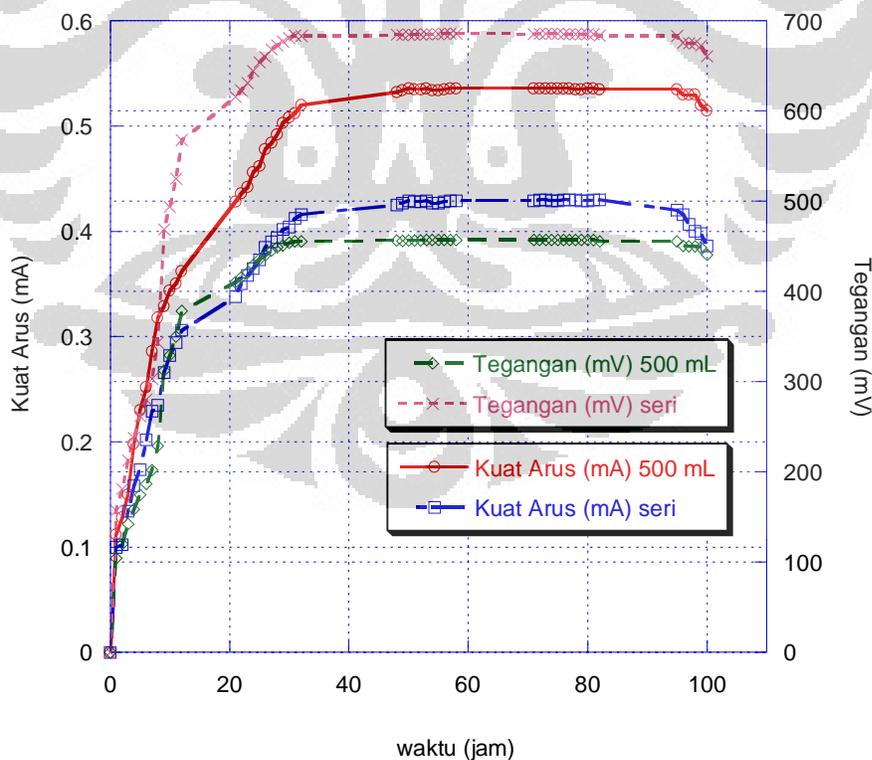
Dengan menggunakan kalium permanganat, Guerrero-Rangel memperoleh kenaikan *power density* sekitar 7 kali lebih besar terhadap kalium ferisianida dan pada penelitian ini *power density* meningkat sebesar 33,5%. Dengan demikian,

dapat ditarik kesimpulan bahwa kalium permanganat mampu menghasilkan *power density* tertinggi dibandingkan dengan jenis larutan elektrolit lainnya.

4.7 Pengukuran Energi Listrik pada Reaktor *Dual-chamber* Rangkaian Seri

Usaha peningkatan kinerja MFC terus dilakukan dalam rangka meningkatkan produksi energi listrik. Kali ini, digunakan konfigurasi reaktor yang berbeda, yaitu dengan cara merangkai kedua reaktor volume 100 dan 500 mL secara seri. Tujuan penggabungan reaktor ini adalah meninjau pengaruh konfigurasi reaktor terhadap produksi energi listrik. Diharapkan reaktor rangkaian seri ini dapat menghasilkan peningkatan energi listrik yang dihasilkan.

Pada percobaan ini, pengamatan energi listrik dilakukan dengan menggunakan reaktor volume 100 dan 500 mL yang dirangkai secara seri. Digunakan kalium permanganat sebagai larutan elektrolit dan nilai OD 0,5. Setelah pengamatan selama 100 jam, didapatkan data berupa kuat arus dan tegangan, seperti yang terlihat pada grafik berikut.



Gambar 4. 26 Perbandingan Kuat Arus pada Rangkaian Reaktor Tunggal dan Seri

Berdasarkan gambar di atas, dapat dilihat bahwa nilai kuat arus mengalami penurunan bila reaktor dirangkakan secara seri. Kuat arus maksimum pada reaktor tunggal volume 500 mL adalah sebesar 0,536 mA. Nilai ini 19,8% lebih besar dibandingkan dengan reaktor rangkaian seri yang menghasilkan kuat arus maksimum sebesar 0,430 mA. Hasil penelitian ini kemudian dibandingkan dengan penelitian Momoh (2010). Dalam penelitiannya, Momoh menggunakan reaktor *dual-chamber* yang dirangkakan secara seri. Kemudian diperoleh hasil bahwa *current density* (mA/m^2) pada reaktor seri lebih rendah daripada reaktor tunggal. Hal ini dapat terlihat lebih jelas pada tabel berikut.

Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai Kuat Arus pada Variasi Konfigurasi Reaktor

Konfigurasi	<i>Current Density</i> (mA/m^2)
Tunggal	16,09
Seri	13,125

Sumber : Momoh (2009)

Dari data pada tabel tersebut, diperoleh bahwa kuat arus maksimum pada reaktor rangkaian seri nilainya 18,5% lebih kecil dibandingkan dengan reaktor tunggal. Besarnya penurunan kuat arus pada penelitian Momoh tidak jauh berbeda dengan hasil yang didapatkan pada penelitian ini. Menurut Momoh, kecilnya nilai kuat arus pada rangkaian seri terjadi karena penambahan nilai hambatan dalam (R_{in}). Pada rangkaian seri, total R_{in} merupakan jumlah masing – masing hambatan dari sumber tegangan, dalam hal ini reaktor MFC. Nilai R_{in} ini berbanding terbalik dengan kuat arus sehingga penambahan R_{in} menyebabkan kecilnya kuat arus yang dihasilkan (Momoh *et al*, 2010).

Pada Gambar 4.26 juga terlihat perbandingan nilai tegangan antara reaktor tunggal dan rangkaian reaktor seri. Berbeda dengan kuat arus, perangkaian reaktor secara seri mampu menghasilkan peningkatan nilai tegangan dibandingkan dengan reaktor tunggal. Pada reaktor tunggal 500 mL, diperoleh tegangan maksimum sebesar 457 mV. Setelah dirangkakan secara seri dengan reaktor 100 mL, nilai tegangan maksimum mengalami peningkatan sebesar 50% menjadi 685,5 mV. Pada rangkaian seri, tegangan total merupakan jumlah tegangan dari masing – masing sumber listrik, yaitu reaktor MFC. Oleh karena itu, reaktor yang dirangkai secara seri dapat meningkatkan tegangan yang dihasilkan. Hal ini juga dibuktikan oleh Momoh bahwa nilai OCV pada rangkaian seri (*Open Circuit*

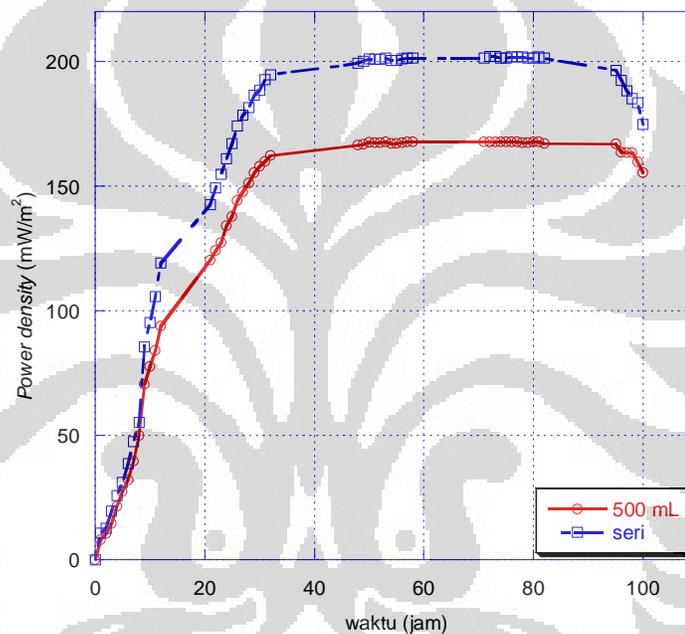
Voltage) mengalami peningkatan sekitar 85% dibanding reaktor tunggal (Momoh *et al*, 2010).

Tabel 4. 4 Perbandingan Nilai OCV pada Variasi Konfigurasi Reaktor

Konfigurasi	Nilai OCV (mV)
Tunggal	1560
Seri	2890

Sumber : Momoh (2009)

Dari data kuat arus dan tegangan, selanjutnya dapat diperoleh nilai *power density* (mW/m^2) seperti yang terdapat pada gambar berikut.



Gambar 4. 27 Perbandingan *Power Density* pada Reaktor Tunggal dan Seri

Berdasarkan gambar tersebut, rangkaian reaktor secara seri terbukti mampu meningkatkan nilai *power density* maksimum sebesar 20,3% ($201,8 \text{ mW/m}^2$) dibandingkan dengan penggunaan reaktor tunggal. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya oleh Momoh, rangkaian seri dapat meningkatkan nilai OCV. Peningkatan nilai OCV ini dapat memicu terjadinya peningkatan nilai *power density* (Momoh *et al*, 2010). Oleh karena itu, *power density* pada rangkaian seri lebih besar daripada rangkaian tunggal.

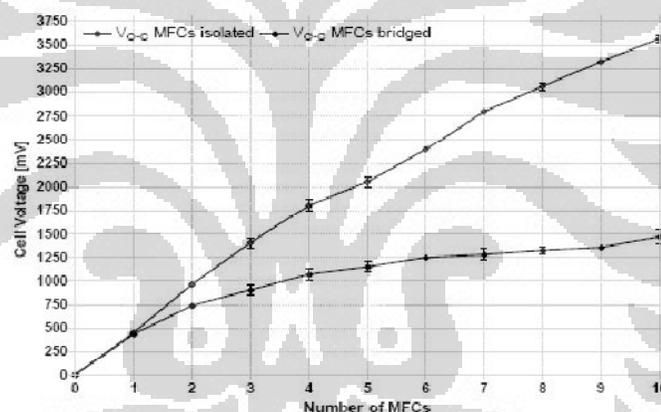
Penelitian serupa juga dilakukan oleh Ieropoulos (2008) yang membandingkan konfigurasi reaktor MFC secara seri, paralel, dan campuran.

Setiap rangkaian terdiri dari 10 buah reaktor MFC yang identik. Hasil penelitian Ieropoulos kemudian dirangkum ke dalam tabel berikut.

Tabel 4. 5 Hasil Penelitian Ieropoulos

Jenis Rangkaian Reaktor	Power density (mW/m^2)	Tegangan (mV)
Tunggal	0,41	440
Seri	4,2	1400
Paralel	7,5	440
Seri – paralel	5,2	700

Berdasarkan data tersebut, diperoleh bahwa nilai tegangan tertinggi juga dicapai saat reaktor dirangkaian secara seri, yaitu 1400 mV. Nilai ini meningkat dua kali lipat terhadap reaktor tunggal. Pada rangkaian seri, semakin banyak reaktor yang dirangkaian maka semakin besar nilai tegangannya (Ieropoulos *et al*, 2008). Hal ini dapat terlihat pada gambar berikut.



Gambar 4. 28 Nilai Tegangan pada Peningkatan Jumlah Rangkaian MFC Seri

Sumber : Ieropoulos (2008)

Tabel 4.5 juga menunjukkan hasil yang serupa dengan penelitian ini, bahwa reaktor yang dirangkaian secara seri dapat meningkatkan nilai *power density* maksimum. Ieropoulos memperoleh peningkatan *power density* sekitar 9 kali lipat dibandingkan dengan reaktor tunggal.

Pada Tabel 4.6 berikut terdapat rangkuman perbandingan hasil optimum penelitian ini dengan penelitian sebelumnya, yaitu berupa kuat arus, tegangan, dan *power density*.

Tabel 4. 6 Perbandingan Hasil Penelitian

Sumber	Mikroorganisme	Reaktor	Elektroda	Larutan elektrolit	I (mA)	V (mV)	Power density (mW/m ²)
You (2006)	Wastewater	Dual chamber, tunggal	Kertas karbon	Kalium permanganat	0,17	680	115,6
Scott (2007)	<i>Escherichia coli</i>	Dual chamber, tunggal, mediator	Kertas karbon	Air laut	-	300	180
Min (2008)	Wastewater	Dual chamber, tunggal	Kertas karbon	Ferisianida	0,422	537	70
Ieropoulos (2008)	Wastewater	Dual chamber, seri-paralel	Kertas karbon	-	-	700	5,2
Trinh (2009)	<i>G-sulfurreducens</i>	Dual chamber, tunggal	Anoda: karbon; katoda: platina (katalis)	Fumarat	0,19	-	418
Velasquez-orta (2009)	<i>Schwanella oneidensis</i>	Single chamber, tunggal, riboflavin	Lempeng grafit-Pt	-	0,230	-	117
Guerrero-Larosa (2010)	Wastewater	Dual chamber, tunggal	Grafit karbon	Bufer fosfat	-	790	30
Guerrero-Rangel (2010)	Sludge	Dual chamber, tunggal	Grafit	Kalium permanganat	-	1040	7,29
Lee (2010)	<i>Microbacterium</i> sp	Single chamber, tunggal	Grafit-Neutral Red-anoda (katalis) dan Fe(II)-carbon cathode	-	-	-	7100
	<i>Pseudomonas</i> sp			-	-	-	2300
Li (2010)	Wastewater	Dual chamber, membranless	Granular Activated Carbon	Nitrat	784 mA/m ²	431	557
Momoh (2010)	Wastewater	Dual chamber, paralel	Grafit	-	0,413	650	20,71
Zahara (2011)	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Dual chamber, tunggal, riboflavin	Batang grafit	ferisianida	0,262	228,9	-
Novitasari (2011)	<i>Lactobacillus bulgaricus</i>	Dual chamber, seri	Batang grafit	Kalium permanganat	0,430	685,5	201,8

Penelitian ini menggunakan bakteri *Lactobacillus bulgaricus* pada reaktor *dual-chamber* dengan menggunakan grafit sebagai elektroda dan kalium permanganat sebagai larutan elektrolit. Berdasarkan tabel tersebut, dapat dikatakan bahwa hasil penelitian ini cukup memiliki nilai yang besar, walaupun tetap berada di bawah penelitian Lee (2010), Li (2010), dan Trinh (2009). Keunggulan hasil Trinh ini kemungkinan besar disebabkan oleh penggunaan katalis Pt pada elektrodanya sehingga proses transfer elektron dapat terjadi lebih cepat. Selain itu, bakteri yang digunakan Trinh adalah *Geobacter sulfurreducens*, yang merupakan bakteri pereduksi Fe^{2+} dan dapat melakukan transfer elektron secara langsung ke elektroda tanpa bantuan mediator (Trinh, 2009).

Hasil *power density* yang diperoleh Lee (2010) juga menunjukkan nilai yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh penggunaan kultur campuran bakteri, di mana kultur campuran akan memberikan hasil energi listrik yang lebih besar dibandingkan kultur tunggal (Nevin, 2008). Selain bakteri, penggunaan elektroda juga berpengaruh terhadap produksi energi listrik. Lee menggunakan *Grafit-Neutral Red-anoda* dan *Fe(II)-carbon cathode* yang memiliki luas permukaan yang besar akibat permukaannya yang berpori (*porous*). Oleh karena itu, elektron yang dapat tertangkap oleh permukaan elektroda menjadi lebih banyak sehingga dapat dihasilkan energi listrik lebih besar (Lee, 2010).

Penelitian Li (2010) menghasilkan *power density* sekitar 2,5 kali lebih besar daripada penelitian ini. Kemungkinan besar hal ini disebabkan oleh penggunaan *Granular Activated Carbon (GAC)* sebagai elektroda. GAC memiliki bentuk berupa butiran karbon aktif sehingga memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan batang grafit sebagai elektroda pada penelitian ini. Selain itu, Li tidak menggunakan membran sehingga mengurangi adanya hambatan dalam yang ditimbulkan oleh keberadaan membran (Li, 2010). Oleh karena itu, dapat dihasilkan energi listrik yang lebih tinggi.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

- Bakteri *Lactobacillus bulgaricus* memiliki potensi sebagai penghasil listrik dalam sistem MFC.
- Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi produksi energi listrik, yaitu nilai *optical density* (OD) bakteri, waktu operasi MFC, volume reaktor, jenis larutan elektrolit, dan konfigurasi reaktor.
- Pada variasi nilai OD, semakin besar nilai OD bakteri maka semakin kecil produksi energi listrik. Pada OD 0,5 diperoleh energi listrik maksimum, yaitu 0,287 mA untuk kuat arus, 200,7 mV untuk tegangan, dan 39,04 mW/m² untuk *power density*.
- Pada waktu operasi 100 jam, energi listrik maksimum diperoleh setelah 38 – 40 jam pengamatan, yaitu 0,302 mA untuk kuat arus, 208 mV untuk tegangan, dan 43,02 mW/m² untuk *power density*. Kemudian energi listrik turun kembali setelah jam ke – 90.
- Penambahan volume reaktor dari 100 ke 500 mL berhasil meningkatkan energi listrik maksimum sebesar 49% untuk kuat arus, 96,15% untuk tegangan dan tiga kali lipat untuk peningkatan *power density*.
- Penggunaan kalium permanganat sebagai larutan elektrolit dapat meningkatkan energi listrik maksimum dibandingkan kalium ferisianida, dengan kenaikan kuat arus sebesar 19%, tegangan sebesar 12%, dan *power density* sebesar 33,5%.
- Konfigurasi reaktor secara seri berpengaruh terhadap peningkatan *power density* (20,3%) dan tegangan (50%), namun menyebabkan penurunan nilai kuat arus sebesar 18,5%.

5.2 Saran

Terdapat beberapa saran untuk pengembangan penelitian MFC selanjutnya, antara lain:

- Dibutuhkan penelitian lanjut mengenai cara – cara lain yang dapat meningkatkan kinerja MFC sebagai alternatif penghasil energi.
- Dilakukan pengujian terhadap kultur campuran, misalnya mikroorganisme yang berasal dari limbah (*waste*).
- Untuk konfigurasi reaktor, dilakukan tinjauan terhadap rangkaian reaktor paralel atau seri – paralel, serta penggunaan reaktor *single-chamber*.
- Dilakukan pengujian mengenai pengaruh luas permukaan elektroda terhadap energi listrik dengan menggunakan berbagai macam jenis elektroda.



DAFTAR REFERENSI

- Amirnejad .2007. Fotometri : Spektrofotometer.
http://bioingenior.org/science/analyse/photometry/page_04.htm
- Barua, Pranab K. 2010. *Electricity Generation from Biowaste Based Microbial Fuel Cell*. International Journal of Energy, Information and Communications vol. 1.
- Departement of Biology Bates College. 2002. *Use of The Spec 20*.
<http://abacus.bates.edu/~ganderso/biology/resources/spec20.html> (diakses Mei 2011)
- Biffinger, Justin C. *Electrochemically Active Soluble Mediators from Shewanella oneidensis: Relevance to Microbial Fuel Cells and Extracellular Electron Transfer*. The Electrochemical Society.
- Chae, Kyu Jung. Choi, Mijin. Ajayi, Folusho F. Park, Wooshin. Chang, In Seop. dan Kim, In S. 2008. *Mass Transport through a Proton Exchange Membrane (Nafion) in Microbial Fuel Cells*. Energy & Fuels (22):169–176
- Cheng, Ka Yu. 2009. *Bioelectrochemical Systems for Energy Recovery from Wastewater*. Enviromental Engineering, Faculty of Sustainability, Environmental, and Life Sciences. Murdoch University. Australia.
- Choi Y, Jung E, Park H, Paik SR, Jung S, dan Kim S. 2004. *Construction of Microbial Fuel Cells Using Thermophilic Microorganisms, Bacillus licheniformis and Bacillus thermoglucosidasius*. Bull. Korean Chem. Soc.(25) 6 : 813 – 818
- Dalynn Biologicals. *Peptone Yeast Glucose Broths*.
<http://www.dalynn.com/docs/AN104-5.pdf> (diakses Mei 2011)
- Gralnick, Jeffrey A. 2010. *Harnessing Bacterial Respiration*.
<http://www.bti.umn.edu/faculty/biogralnick.html> (diakses Februari 2011)
- Guerrero-Larrosa A, Scott K, Katuri KP, Godinez C, Head IM, dan Curtis T. 2010. *Open circuit versus closed circuit enrichment of anodic biofilms in MFC: effect on performance and anodic communities*. Appl Microbiol Biotechnol 87:1699–1713

- Guerrero-Rangel N, dkk. 2010. *Comparative study of three cathodic electron acceptors on the performance of mediatorless microbial fuel cell*. International Journal of Electrical and Power Engineering (4) 1 : 27 – 31
- Guo,Wei Chen. Soo, Jung Choi. Tae, Ho Lee. Gil, Young Lee. Jae, Hwan Cha. Chang, Won Kim. 2008. *Application of Biocathode in Microbial Fuel Cells: Cell Performance and Microbial Community*. Appl Microbiol Biotechnol (79):379–388
- Idham F, Halimi S, dan Latifah S. 2009. Alternatif Baru Sumber Pembangkit Listrik dengan Menggunakan Sedimen Laut Tropika Melalui Teknologi *Microbial Fuel Cell*. Teknologi Hasil Perairan Institut Pertanian Bogor.
- Ieropoulos I, Greenman J, dan Melhuish C. 2008. *Microbial fuel cells based on carbon veil electrodes: stack configuration and scalability*. International Journal of Energy Research, 32 (13). pp. 1228-1240.
- Kurnianingsih, Nia. 2009. Bakteri *Microbial Fuel Cell*. <http://www.alpensteel.com/article/65-109-energi-fuel-cell-sel-bahan-bakar/1740--bakteri-mikrobal-fuel-cell.html> (diakses Februari 2011)
- Kim, MH. 2009. *An Analysis of Anaerobic Dual-Anode Chambered Microbial Fuel Cell (MFC) Performance*. Master's Thesis, University of Tennessee.
- Lanthier, Martin. Gregory, Kelvin B. dan Lovley, Derek R. 2007. *Growth with High Planktonic Biomass in Shewanella oneidensis Fuel Cells*. Journal compilation Federation of European Microbiological Societies (278):29 – 35
- Lee, Seung Won. Jeon, Bo Young. Park, Doo Hyun. 2010. *Effect of bacterial cell size on electricity generation in a single-compartmented microbial fuel cell*. Biotechnol Lett 32 : 483–487
- Li, Fengxiang. Yogesh, Sharma. Lei, Yu. Li, Baikun. Zhou, Qixing. 2010. *Microbial Fuel Cells: The Effects of Configurations, Electrolyte Solutions, and Electrode Materials on Power Generation*. Appl Biochem Biotechnol (160) : 168–181
- Liu H dan Logan BE. 2004. *Electricity generation using an air cathode single-chamber microbial fuel cell in the presence and absence of proton exchange membrane*. J. Environmental Science Technology 38: 4040.

- Lorenzo MD, Curtis TP, Head IM, dan Scott K. 2009. *A single-chamber microbial fuel cell as a biosensor for wastewaters*. *Water Research* 43 : 3145 – 3154.
- Lovley DR. 2006. *Review Bug Juice : Harvesting Electricity with Microorganism*. *Nature Reviews Microbiology* Vol 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*.
- Masuda, Masaki. *Flavins contained in yeast extract are exploited for anodic electron transfer by Lactococcus lactis*. Division of Applied Life Sciences Kyoto University.
- Micromet. 2008. *Microbial Metabolism*. <http://biosiva.50webs.org/micromet.htm> (diakses April 2011)
- Min, Booki. Roman, Oscar Benito. Angelidaki, Irini. 2008. *Importance of temperature and anodic medium composition on microbial fuel cell (MFC) performance*. *Biotechnol Lett* (30) : 1213–1218
- Momoh, Yusuf OL, Naeyor B. 2010. *A novel electron acceptor for microbial fuel cells: Nature of circuit connection on internal resistance*. *J Biochem Tech* 2(4):216-220
- Nevin K. P, Richter H, Covalla S. F, Johnson J. P, Woodard T. L, Orloff A. L, Jia H, Zhang M, dan Lovley D. R. 2008. *Power output and columbic efficiencies from biofilms of Geobacter sulfurreducens comparable to mixed community microbial fuel cells*. *Journal compilation Society for Applied Microbiology and Blackwell Publishing Ltd, Environmental Microbiology*
- Partowidagdo, Widjajono. 2011. *Menyubstitusi BBM dengan BBG*. *Investor Daily Indonesia* 15 Maret 2011.
- Qian F, He Z, Thelen MP, dan Li Y. 2011. *A microfluidic microbial fuel cell fabricated by soft lithography*. *Bioresource Technology* 1–5.
- Qian F, Jun L, Xun Z, Qiang L, DingDing Y, dan Liang Z. *An MFC capable of regenerating the cathodic electron acceptor under sunlight*. *Sci China Tech Sci* 53: 2489–2494

- Rabaey, Korneel. 2003. *A Microbial Fuel Cell Capable of Converting Glucose to Electricity at High Rate and Efficiency*. Ghent University, Belgium. Kluwer Academic Publisher.
- Rahimnejad, M. 2009. *Low Voltage Power Generation in A Biofuel Cell Using Anaerobic Cultures*. World Applied Sciences Journal 6 (11): 1585-1588.
- Scott, Keith dan Murano, Cassandro. 2007. *Microbial Fuel Cells Utilising Carbohydrates*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology (82):92–100
- Scott, K. Cotlarciuc, I. Hall, D. Lakeman, J. B. dan Browning, D. 2008. *Power from Marine Sediment Fuel Cells: The Influence of Anode Material*. J Appl Electrochem (38):1313–131
- Sidharta ML, dkk. 2007. Pemanfaatan Limbah Cair sebagai Sumber Energi Listrik pada *Microbial Fuel Cell*. Institut Teknologi Bandung.
- Sumarsih. 2007. Pertumbuhan Mikroba Bab I. <http://sumarsih07.files.wordpress.com/2008/11/i-pertumbuhan-mikroba.pdf> (diakses April 2011)
- Sutrisna, Kadek Fendy. Indonesia Alami Lonjakan dalam Konsumsi Energi. <http://www.alpensteel.com/article/53-101-energi-terbarukan--renewable-energy/2966--indonesia-alami-lonjakan-dalam-konsumsi-energi.html> (diakses Februari 2011)
- Trinh NT, Park J H, dan Kim B. 2009. *Increased generation of electricity in a microbial fuel cell using Geobacter sulfurreducens*. Korean J. Chem. Eng., 26(3): 748-753
- Velasquez-Orta, Sharon B. 2009. *The effect of flavin electron shuttles in microbial fuel cells current production*. Springer-verlag.
- You S, Zhaoa Q, Zhang J, Jiang J, Zhao S. 2006. *A microbial fuel cell using permanganate as the cathodic electron acceptor*. Journal of Power Sources 162 : 1409–1415
- Zahara, Nova Chisilia. 2011. Pemanfaatan *Saccharomyces cerevisiae* dalam Sistem *Microbial Fuel Cell* untuk Produksi Energi Listrik. Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Medium *Glucose Yeast Protein* dan Hasil Inokulum Bakteri *Lactobacillus bulgaricus*.



Lampiran 2 Data Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi *Optical Density* (OD)

OD 0,5			OD 0,6			OD 0,7		
Waktu (jam)	kuat arus (mA)	tegangan (mV)	Waktu (jam)	kuat arus (mA)	tegangan (mV)	Waktu (jam)	kuat arus (mA)	tegangan (mV)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	0,208	143,4	0,5	0,16	111,5	0,5	0,178	109,5
1	0,28	186,5	1	0,246	167,1	1	0,23	115,7
1,5	0,281	188,8	1,5	0,282	191,5	1,5	0,238	116,1
2	0,284	200,7	2	0,248	164,1	2	0,263	151,1
2,5	0,284	198,6	2,5	0,26	172,6	2,5	0,268	177,8
3	0,287	196,5	3	0,28	200,2	3	0,261	146

Lampiran 3 Data Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi Waktu

3 JAM		
Waktu (jam)	kuat arus (mA)	tegangan (mV)
0	0	0
0,5	0,208	143,4
1	0,28	186,5
1,5	0,281	188,8
2	0,284	200,7
2,5	0,284	198,6
3	0,287	196,5

30 JAM		
30 jam	kuat arus (mA)	tegangan (mV)
0	0	0
1	0,132	105,2
2	0,156	112,4
3	0,19	120,5
4	0,206	129,8
5	0,214	133,6
6	0,222	140,8
7	0,24	148,5
8	0,248	156,8
9	0,252	168,5
10	0,26	173,7
11	0,267	179,8
12	0,27	183,2
13	0,274	184,6
24	0,283	196
25	0,285	196,8
26	0,286	198,6
27	0,287	200
28	0,287	200,7
29	0,29	201,1
30	0,295	201,1

100 JAM		
100 jam	kuat arus (mA)	tegangan (mV)
0	0	0
0,5	0,198	114,3
1	0,21	122
1,5	0,214	146
2	0,244	164,3
2,5	0,266	169,2
3	0,268	172,1
3,5	0,272	192,4
4	0,28	197,4
36	0,296	205,6
36,5	0,298	205,6
37	0,298	207
37,5	0,298	207,1
38	0,3	207,8
38,5	0,3	208
39	0,302	208
39,5	0,302	208
40	0,302	208,1
62	0,302	208
62,5	0,302	208
63	0,302	208
63,5	0,302	208
64	0,302	207,8
64,5	0,302	207,5
65	0,302	207
90	0,29	200
92	0,274	160,5
100	0,16	109,5

Lampiran 4 Data Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi Volume

100 mL		
Waktu (jam)	kuat arus (mA)	tegangan (mV)
0	0	0
0,5	0,198	114,3
1	0,21	122
1,5	0,214	146
2	0,244	164,3
2,5	0,266	169,2
3	0,268	172,1
3,5	0,272	192,4
4	0,28	197,4
36	0,296	205,6
36,5	0,298	205,6
37	0,298	207
37,5	0,298	207,1
38	0,3	207,8
38,5	0,3	208
39	0,302	208
39,5	0,302	208
40	0,302	208,1

500 mL		
Waktu (jam)	kuat arus (mA)	tegangan (mV)
0	0	0
1	0,15	130
2	0,2	146,9
3	0,228	159,8
4	0,242	163,6
5	0,253	170,8
6	0,268	174,3
7	0,275	179
8	0,284	187,5
9	0,292	198,8
10	0,3	220,6
11	0,348	228,5
12	0,355	232,6
13	0,362	258,7
22	0,386	366,5
23	0,386	378,4
24	0,396	384,5
25	0,4	392,1

62	0,302	208
62,5	0,302	208
63	0,302	208
63,5	0,302	208
64	0,302	207,8
64,5	0,302	207,5
65	0,302	207
90	0,29	200
92	0,274	160,5
100	0,16	109,5

26	0,413	396,4
27	0,414	397,3
28	0,418	396,7
29	0,42	396,8
30	0,428	397,2
31	0,43	398,2
32	0,434	398,4
33	0,434	398,4
34	0,436	398,6
48	0,44	398,4
49	0,445	398,7
50	0,445	398,4
51	0,445	399,2
52	0,445	399,8
53	0,446	400,2
54	0,448	401,8
55	0,448	402,1
56	0,448	402,6
57	0,448	402,8
58	0,448	403,4
59	0,448	404
60	0,448	404,5
70	0,448	405,7
71	0,45	406
72	0,45	406,7
73	0,45	407,1
74	0,45	407,3
75	0,45	407,4
76	0,45	407,3
77	0,45	407,5
78	0,45	407,6
79	0,45	407,9
80	0,446	408
81	0,432	407,8
94	0,412	398,8
95	0,393	394,7
96	0,386	385
97	0,364	379
98	0,35	360,2
99	0,342	360
100	0,327	355,7

Lampiran 5 Data Kuat Arus dan Tegangan pada Variasi Larutan Elektrolit

Kalium ferisianida		
Waktu (jam)	kuat arus (mA)	tegangan (mV)
0	0	0
1	0,15	130
2	0,2	146,9
3	0,228	159,8
4	0,242	163,6
5	0,253	170,8
6	0,268	174,3

Kalium Permanganat		
Waktu (jam)	kuat arus (mA)	tegangan (mV)
0	0	0
1	0,112	104,5
2	0,128	120,5
3	0,15	142
4	0,198	158,6
5	0,23	174,4
6	0,252	186,5

7	0,275	179
8	0,284	187,5
9	0,292	198,8
10	0,3	220,6
11	0,348	228,5
12	0,355	232,6
13	0,362	258,7
22	0,386	366,5
23	0,386	378,4
24	0,396	384,5
25	0,4	392,1
26	0,413	396,4
27	0,414	397,3
28	0,418	396,7
29	0,42	396,8
30	0,428	397,2
31	0,43	398,2
32	0,434	398,4
33	0,434	398,4
34	0,436	398,6
48	0,44	398,4
49	0,445	398,7
50	0,445	398,4
51	0,445	399,2
52	0,445	399,8
53	0,446	400,2
54	0,448	401,8
55	0,448	402,1
56	0,448	402,6
57	0,448	402,8
58	0,448	403,4
59	0,448	404
60	0,448	404,5
70	0,448	405,7
71	0,45	406
72	0,45	406,7
73	0,45	407,1
74	0,45	407,3
75	0,45	407,4
76	0,45	407,3
77	0,45	407,5
78	0,45	407,6
79	0,45	407,9
80	0,446	408
81	0,432	407,8
94	0,412	398,8
95	0,393	394,7
96	0,386	385
97	0,364	379
98	0,35	360,2
99	0,342	360
100	0,327	355,7

7	0,286	202,2
8	0,318	228,7
9	0,329	312,5
10	0,344	329,2
11	0,35	350,1
12	0,362	378,5
21	0,428	410,2
22	0,436	415,3
23	0,442	420,6
24	0,456	429,5
25	0,462	435,7
26	0,478	440,2
27	0,484	445,4
28	0,492	448,8
29	0,503	451
30	0,508	453,8
31	0,512	455,6
32	0,52	455,5
48	0,532	456,3
49	0,534	456
50	0,536	456,3
51	0,535	456,6
52	0,535	456,6
53	0,536	456,8
54	0,534	456,7
55	0,534	456,8
56	0,535	457
57	0,536	457
58	0,536	457
71	0,536	456,8
72	0,536	457
73	0,536	457
74	0,536	457
75	0,536	457
76	0,536	456,8
77	0,536	456,8
78	0,535	456,8
79	0,535	456,8
80	0,536	456,8
81	0,536	456,8
82	0,535	455,6
95	0,535	455,4
96	0,53	450,3
97	0,53	450,2
98	0,53	450,2
99	0,52	448,4
100	0,515	440,5

Lampiran 6 Data Kuat Arus dan Tegangan pada Reaktor Rangkaian Seri

Reaktor Seri 100 dan 500 mL		
Waktu (jam)	kuat arus (mA)	tegangan (mV)
0	0	0
1	0,1	156,75
2	0,1024	180,75
3	0,134	213
4	0,1584	237,9
5	0,174	261,6
6	0,2016	279,75
7	0,2288	303,3
8	0,235	343,05
9	0,266	468,75
10	0,282	493,8
11	0,294	525,15
12	0,306	567,75
21	0,338	615,3
22	0,35	622,95
23	0,358	630,9
24	0,3648	644,25
25	0,373	653,55
26	0,385	660,3
27	0,39	668,1
28	0,3936	673,2
29	0,4024	676,5
30	0,404	680,7
31	0,412	683,4
32	0,416	683,25
48	0,425	684,45
49	0,4272	684
50	0,4288	684,45
51	0,428	684,9
52	0,428	684,9
53	0,4288	685,2
54	0,4272	685,05
55	0,4272	685,2
56	0,428	685,5
57	0,4288	685,5
58	0,4288	685,5
71	0,4288	685,2
72	0,43	685,5
73	0,43	685,5
74	0,4288	685,5
75	0,4288	685,5
76	0,43	685,2
77	0,43	685,2
78	0,43	685,2
79	0,429	685,2
80	0,4288	685,2
81	0,43	685,2
82	0,43	683,4
95	0,42	683,1

96	0,416	675,45
97	0,407	675,3
98	0,4	675,3
99	0,398	672,6
100	0,386	660,75

