

**PENGARUH VARIASI VOLUME JEMBATAN GARAM TERHADAP
MICROBIAL FUEL CELL PERFORMANCE MEMANFAATKAN
LIMBAH KULIT BUAH PISANG**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

**ADI REKOTOMO
NIM. 0610620008 - 62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2012**

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH VARIASI VOLUME JEMBATAN GARAM TERHADAP
MICROBIAL FUEL CELL PERFORMANCE MEMANFAATKAN
LIMBAH KULIT BUAH PISANG**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

ADI REKOTOMO
NIM. 0610620008 - 62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Slamet Wahyudi, ST.,MT.

NIP. 19720903 199702 1 001

Putu Hadi Setyarini, ST.,MT.

NIP. 19770806 200312 2 001



LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH VARIASI VOLUME JEMBATAN GARAM TERHADAP
MICROBIAL FUEL CELL PERFORMANCE MEMANFAATKAN
LIMBAH KULIT BUAH PISANG**

SKRIPSI KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

**ADI REKOTOMO
NIM. 0610620008 – 62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada tanggal 01 Februari 2012

Penguji Skripsi I

Penguji Skripsi II

Fmiana Gapsari Madhi Fitri, ST., MT.
NIP. 19820704 200812 2 002

Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT., MET.
NIP. 19551117 1986001 1 001

PengujiKomprehensif

Ir. Suharto, MT.
NIP.19531030 198212 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.
NIP. 19720903 199702 1 001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena hanya dengan limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Pengaruh Variasi Volume Jembatan Garam Terhadap *Microbial Fuel Cell Performance* Memanfaatkan Limbah Kulit Buah Pisang".

Penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu menyelesaikan skripsi ini, terutama kepada:

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin dan pembimbing I skripsi atas bantuan, saran dan nasihat dalam menyelesaikan selama ini.
2. Bapak Dr.Eng Anindito Purnowidodo, ST. M.Eng. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin.
3. Bapak Dr. Eng Denny Widhiyanuriawan, ST.,MT. selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Konversi Energi.
4. Ibu Putu Hadi Setyarini, ST., MT. selaku pembimbing II skripsi atas bantuan, moral, saran dan nasihat dalam menyelesaikan selama ini.
5. Seluruh Staf pengajar dan Administrasi Jurusan Teknik Mesin.
6. Ayahanda tercinta bapak Yusuf Adianto, Ibunda tercinta ibu Dining A.S, kakak-kakakku Rosalynn Indrasari, S.Sos. dan Astrid Widayawati, ST. serta adikku Ari Rekotomo terima kasih atas segala doa dan motivasinya.
7. Saudara-saudara *KBMM* (khususnya Mesin angkatan 2006), semoga kita selalu kompak, dan tetap menjunjung namanya kebersamaan.
8. Rekan- rekan seperjuangan yakni I Putu Putra dan Ika Istiana terima kasih atas kritikan, saran, dan motivasinya.

Dengan keterbatasan ilmu yang dimiliki penulis, tentunya skripsi ini banyak membutuhkan masukan. Untuk itu penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang bersifat membangun. Semoga skripsi ini bisa bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Januari 2012

Penulis

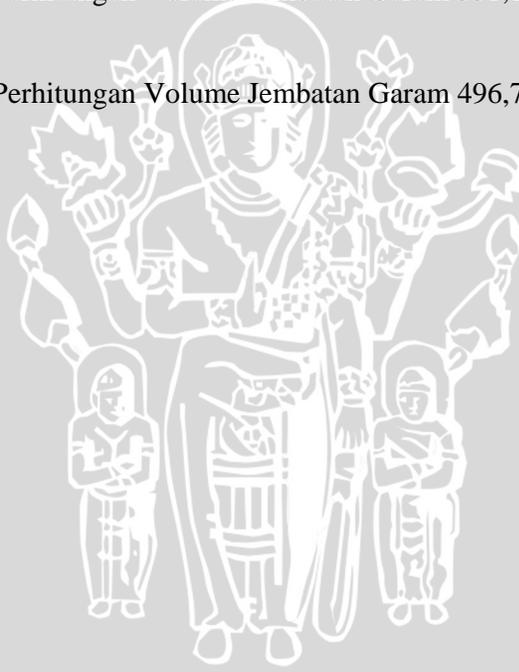
DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vii
DAFTAR SIMBOL	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	5
2.2 Reaksi Elektrokimia.....	5
2.3 <i>Fuel Cell</i>	6
2.4 Struktur Dasar dan Cara Kerja <i>Fuel Cell</i> Pada Umumnya	6
2.5 Jenis – Jenis <i>Fuel Cell</i>	9
2.6 Bio – <i>Fuel Cell</i>	10
2.7 <i>Microbial Fuel Cell</i> (MFC).....	10
2.8 Mekanisme dari Perpindahan Elektron pada MFC tanpa Mediator.....	13
2.8.1 <i>Microbial Fuel Cell</i> dengan Mediator.....	13
2.8.2 <i>Microbial Fuel Cell</i> tanpa Mediator.....	13
2.9 Reaksi Bioenergi.....	15
2.10 Bakteri <i>Pseudomonas putida</i>	15
2.11 Biofilm pada Mikroorganisme.....	17
2.12 Jembatan Garam (<i>Salt Bridge</i>).....	18
2.13 Limbah Kulit Buah Pisang.....	19
2.14 Pembangkitan Daya	20
2.14.1 Voltage dan Arus	20
2.14.2 Menghitung Daya.....	21

2.14.3	Faktor yang Mempengaruhi Tegangan Sel.....	22
2.15	Efisiensi Sel	25
2.16	Hipotesa	27
BAB III METODE PENELITIAN		
3.1	Metode Penelitian	28
3.2	Waktu dan Tempat Penelitian.....	28
3.3	Variabel Penelitian.....	28
3.4	Instalasi Penelitian	29
3.5	Alat dan Bahan.....	30
3.6	Prosedur Penelitian	39
3.6.1	Studi Literatur.....	39
3.6.2	Perancangan Instalasi.....	40
3.6.3	Pembuatan Alat.....	40
3.6.4	Metode Pengambilan Data.....	40
3.7	Rancangan Penelitian.....	40
3.8	Diagram Alir Penelitian	41
BAB IV HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN		
4.1	Pengolahan dan Analisa Data	42
4.1.1	Data Hasil Penelitian.....	42
4.1.2	Perhitungan Data.....	45
4.1.3	Data Hasil Perhitungan.....	46
4.2	Grafik dan Pembahasan	48
4.2.1	Analisa Grafik Hubungan Volume Jembatan Garam terhadap Produksi Voltage Sel Rata-Rata.....	48
4.2.2	Analisa Grafik Hubungan Volume Jembatan Garam terhadap Arus yang Dihasilkan.....	49
4.2.3	Analisa Grafik Hubungan Volume Jembatan Garam terhadap Efisiensi Sel	51
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran	53
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

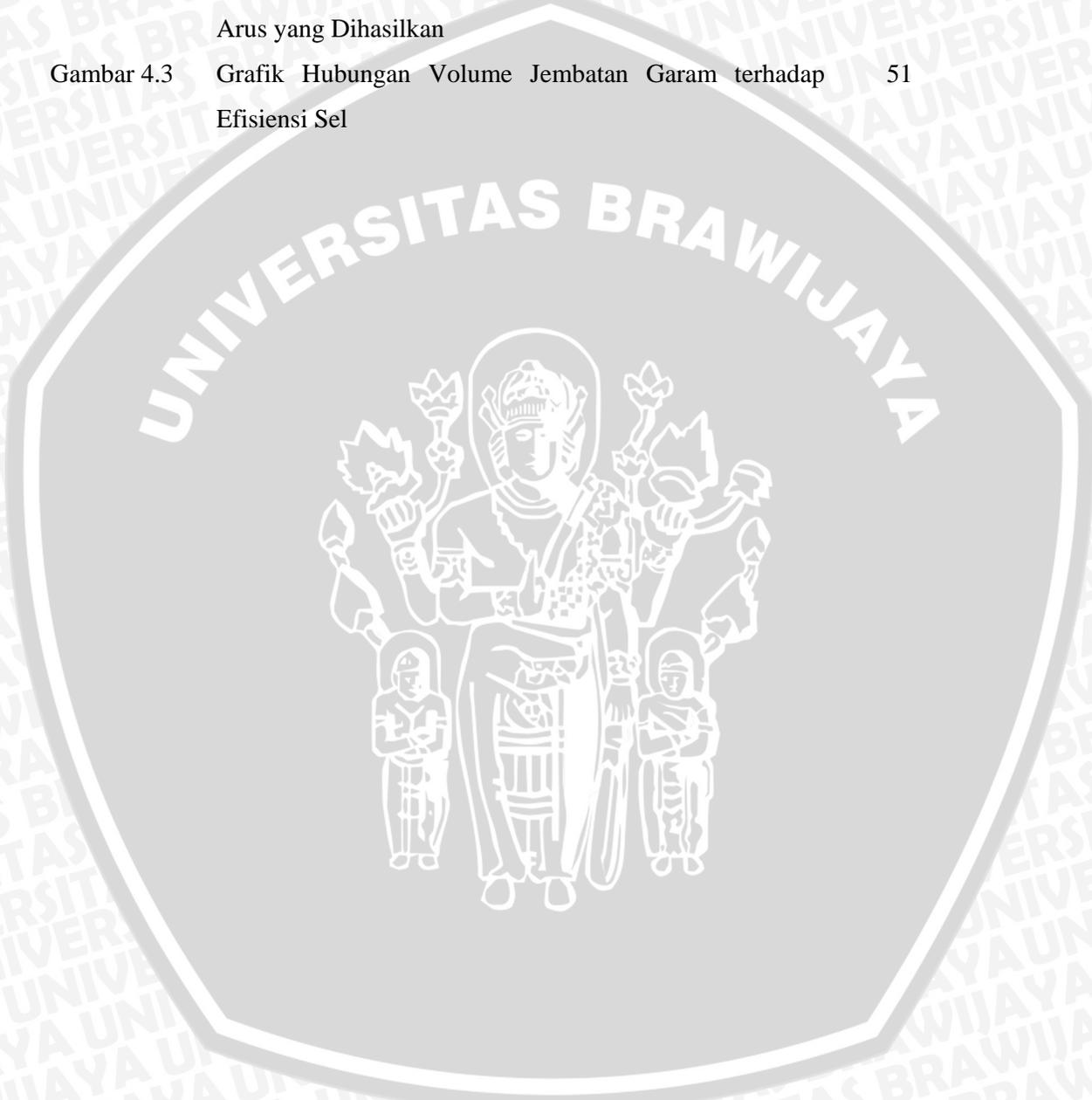
No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Karakteristik Umum Fuel Cell Kimiawi dan Biologis	14
Tabel 2.2	Energi Teoritis Kandungan Metanol, Etanol, dan Glukosa	15
Tabel 2.3	Kandungan Kulit Buah Pisang Kepok	20
Tabel 4.1	Data Hasil Pengujian pada Variasi Volume Jembatan Garam	44
Tabel 4.2	Data Hasil Perhitungan Volume Jembatan Garam 310,5 cm ³ (15 cm)	46
Tabel 4.3	Data Hasil Perhitungan Volume Jembatan Garam 331,172 cm ³ (30 cm)	47
Tabel 4.4	Data Hasil Perhitungan Volume Jembatan Garam 496,75 cm ³ (45 cm)	47



DAFTAR GAMBAR

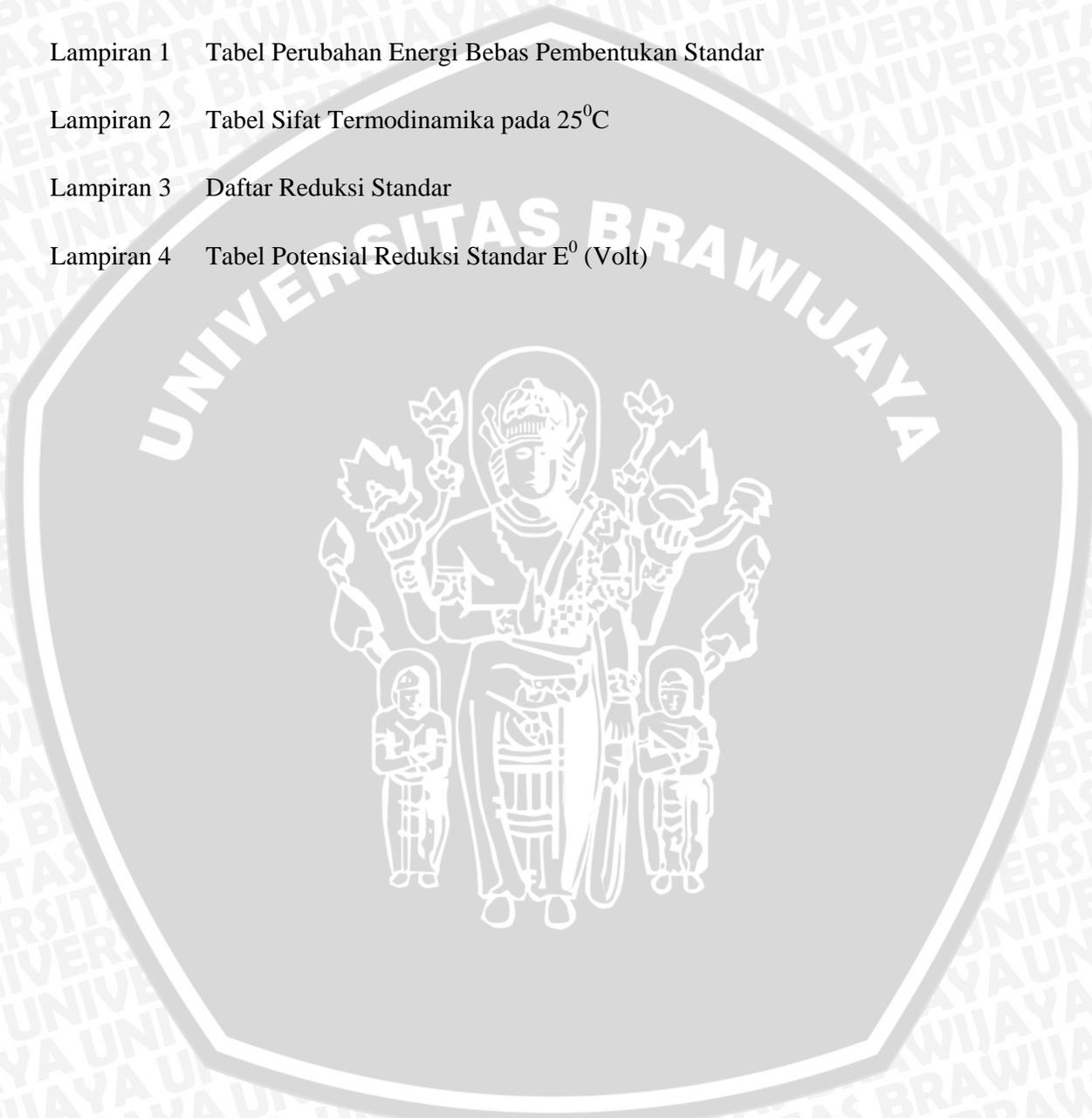
No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Struktur dasar <i>Fuel Cell</i>	7
Gambar 2.2	Skema aliran <i>Fuel Cell</i>	8
Gambar 2.3	<i>Microbial Fuel Cell</i>	11
Gambar 2.4	<i>Microbial Fuel Cell</i> tanpa mediator	14
Gambar 2.5	Bakteri <i>Pseudomonas putida</i> sederhana	16
Gambar 2.6	Jembatan Garam	19
Gambar 2.7	Kulit Pisang Kepok	19
Gambar 3.1	Skema Instalasi	29
Gambar 3.2	Instalasi alat uji yang akan digunakan dalam penelitian	30
Gambar 3.3	Limbah kulit pisang pada kontainer anoda	30
Gambar 3.4	Larutan <i>Buffer</i> K_2HPO_4	31
Gambar 3.5	Dimensi jembatan garam yang digunakan	32
Gambar 3.6	Jembatan garam	32
Gambar 3.7	Bakteri <i>Pseudomonas putida</i>	33
Gambar 3.8	Aerasi udara (<i>blower</i>)	34
Gambar 3.9	Multimeter Digital	35
Gambar 3.10	Laptop	35
Gambar 3.11	Batang <i>ferrit</i>	36
Gambar 3.12	Sabut <i>stainless steel</i>	36
Gambar 3.13	Alat akuisisi pencatat tegangan dan temperatur	37
Gambar 3.14	Tahanan Luar	37
Gambar 3.15	Solder timah	38
Gambar 3.16	Plastisin	39
Gambar 3.17	Kawat Ose	39
Gambar 3.18	Indikator pH <i>universal</i>	39
Gambar 3.19	Diagram Alir	41

Gambar 4.1	Grafik Hubungan Volume Jembatan Garam terhadap Produksi Tegangan Sel Rata-Rata	48
Gambar 4.2	Grafik Hubungan Volume Jembatan Garam terhadap Arus yang Dihasilkan	40
Gambar 4.3	Grafik Hubungan Volume Jembatan Garam terhadap Efisiensi Sel	51



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Tabel Perubahan Energi Bebas Pembentukan Standar
Lampiran 2	Tabel Sifat Termodinamika pada 25 ⁰ C
Lampiran 3	Daftar Reduksi Standar
Lampiran 4	Tabel Potensial Reduksi Standar E ⁰ (Volt)



DAFTAR SIMBOL

Besaran dasar	Satuan dan Singkatannya	Simbol
Voltage MFC	Voltage atau V	E_{MFC}
Arus	miliAmpere atau mA	I
Hambatan Luar	Ohm	R_{Ext}
Daya	mW	P
Efisiensi	%	η
Beda Potensial Standar	Volt	E^0
Perubahan Entalpi	-	ΔH
Perubahan energy bebas Gibbs	-	ΔG



RINGKASAN

Adi Rekotomo, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Januari, 2012, *Pengaruh Variasi Volume Jembatan Garam Terhadap Microbial Fuel Cell Performance Memanfaatkan Limbah Kulit Buah Pisang*, Dosen Pembimbing I: Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. Dosen Pembimbing II: Putu Hadi Setyarini, ST., MT.

Sebuah penelitian tentang sel bahan bakar *Microbial Fuel Cell* (MFC) Tipe H dengan menggunakan *Proton Exchange Membrane* (PEM) dari jembatan garam dan bio-katalis pada kontainer anoda berupa bakteri *Pseudomonas putida* digunakan dalam penelitian ini untuk tujuan mengetahui *voltage* listrik maksimal yang dihasilkan pada arus searah dengan memanfaatkan limbah kulit buah pisang. Limbah kulit buah pisang memiliki kandungan karbohidrat yang mengandung glukosa yang digunakan untuk memperkaya mikroba pengoksidasi donor elektron di anoda. Oksigen dialirkan di katoda yang merupakan larutan penyangga K_2HPO_4 dengan pH 7.

Penelitian tentang *Microbial Fuel Cell* (MFC) ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi volume jembatan garam terhadap *Microbial Fuel Cell Performance* menggunakan limbah kulit buah pisang. Pada penelitian ini membahas pengaruh volume jembatan garam terhadap unjuk kerja alat *Microbial Fuel Cell* (MFC) dengan ukuran volume jembatan garam $310,5 \text{ cm}^3$, $331,172 \text{ cm}^3$ dan $496,75 \text{ cm}^3$.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil volume jembatan garam, maka semakin meningkatkan nilai *voltage* yang dihasilkan dari alat MFC, begitu pula dengan rapat arus dan efisiensi sel. Hal ini disebabkan volume jembatan garam semakin besar dengan diameter jembatan yang sama mengakibatkan jarak antara katoda dan anoda akan semakin bertambah sehingga mempengaruhi jarak yang dilalui elektron dari anoda menuju katoda dan juga mempengaruhi transfer ion H^+ dari anoda menuju katoda. Besarnya *voltage* rata-rata maksimal yang dihasilkan yaitu pada volume jembatan $310,5 \text{ cm}^3$ sebesar 150,52 mV. Dengan nilai rapat arus dan daya masing-masing sebesar $0,15 \text{ mA/cm}^2$ dan $1603,42 \text{ mW/m}^2$.

Kata kunci: *microbial fuel cell*, *proton exchange membrane*, jembatan garam, kulit buah pisang

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permasalahan energi bagi kelangsungan hidup manusia merupakan masalah besar yang dihadapi oleh hampir seluruh negara di dunia ini. Bahan bakar fosil, terutama minyak bumi masih menjadi konsumsi energi utama. Penelitian mengenai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil terus dilakukan. Parameter keberhasilan bahan bakar alternatif ini adalah dapat diperbarui (*renewable energy*), ramah lingkungan, dan biaya yang murah. Konsumsi dunia terhadap energi listrik kian meningkat seiring pesatnya teknologi elektronika. Alternatif yang menarik datang dari *fuel cell*, yang diharapkan dapat menghasilkan energi listrik dengan efisiensi tinggi dan gangguan lingkungan yang minimal (Arsana, 2010).

Fuel cell menggunakan reaksi kimia, lebih baik daripada mesin pembakaran, untuk memproduksi energi listrik. Istilah *fuel cell* sering dikhususkan untuk hidrogen-oksigen *fuel cell*. Prosesnya merupakan kebalikan dari elektrolisis. Pada elektrolisis, arus listrik digunakan untuk menguraikan air menjadi hidrogen dan oksigen. Dengan membalik proses ini, hidrogen dan oksigen direaksikan dalam *fuel cell* untuk memproduksi air dan arus listrik (Wiens, 2003).

Keuntungan *fuel cell* yaitu efisiensi tinggi dapat mencapai 80%, tidak bising dan gas buang yang bersih bagi lingkungan.

Kendala yang masih membatasi penggunaan *fuel cell* adalah:

1. Apabila digunakan bahan bakar hidrogen, maka dibutuhkan tanki pengaman yang berdinding tebal dan memiliki katup pengaman. Selain itu diperlukan kompresor untuk memasukan ke dalam tanki.
2. Apabila yang dibawa adalah hidrogen cair, maka akan timbul kesulitan karena harus dipertahankan pada temperatur $-253,15^{\circ}\text{C}$ pada tekanan 10^5Pa .
3. Apabila digunakan metanol sebagai pengganti hidrogen, maka dibutuhkan reformer. Tetapi efisiensi menjadi menurun.
4. Temperatur yang cukup tinggi saat pengoperasian antara 60°C - 120°C

Teknologi baru menggunakan prinsip mirip *fuel cell* untuk menghasilkan energi listrik menggunakan sumber alami, yaitu *biofuel cell*. *Biofuel cell* adalah alat untuk

mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan biokatalis dari enzim atau mikroorganisme.

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

Salah satunya produk pangan yang menghasilkan glukosa adalah pisang. Tumbuhan pisang adalah suatu tumbuhan yang dapat tumbuh secara potensial di Indonesia (Saroso, 1998). Tumbuhan pisang dapat tumbuh di daerah pantai maupun di daerah pegunungan. Hampir semua wilayah yang ada di Indonesia dapat ditumbuhi tumbuhan pisang. Selama ini, masyarakat selalu mengkonsumsi buah dari tumbuhan pisang. Konsumen pada umumnya setelah makan buah pisang lalu membuang kulitnya karena menganggap sampah (limbah buah pisang). Hal ini akan menimbulkan kerugian, karena kulit pisang akan terbuang sia-sia dan bahkan hanya menjadi limbah yang akan mengganggu masyarakat. Alangkah baiknya jika kulit buah pisang dapat dimanfaatkan lebih berguna seperti menjadi media dalam *Microbial Fuel Cell*.

Berangkat dari latar belakang seperti yang tertulis di atas, pada penelitian ini penulis akan mengetahui apakah limbah kulit buah pisang dapat digunakan sebagai bahan bakar *Microbial Fuel Cell* (MFC). Untuk menghasilkan listrik, dengan pengaruh variasi bentuk anoda terhadap beda tegangan, arus listrik dan daya listrik yang dihasilkan *Microbial Fuel Cell* (MFC). Hal ini diharapkan memberikan pengetahuan serta hasil berupa peningkatan mutu bidang rekayasa khususnya pada *Fuel Cell*.

1.2 Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang di atas dapat dirumuskan sebuah permasalahan yaitu bagaimana pengaruh variasi volume jembatan garam terhadap *Microbial Fuel Cell Performance* memanfaatkan limbah kulit pisang.

1.3 Batasan masalah

Agar permasalahan tidak meluas, maka perlu dilakukan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Kapasitas tangki maksimal reaktor 15 liter pada kontainer anoda dan katoda.
2. Injeksi aliran udara dimasukkan dengan menggunakan aerasi udara dengan difusivitas udara yang konstan dan terus menerus pada kontainer katoda.
3. Elektroda pada anoda menggunakan batang *ferrit* dengan densitas yang homogen.
4. Bio-katalis bakteri pada anoda yang digunakan adalah bakteri *Pseudomonas putida*.
5. *Proton Exchange Membrane* (PEM) yang digunakan yaitu jembatan garam (*salt bridge*) KCl 2M dengan variasi volume yang digunakan adalah 310,5 cm³ (15 cm), 331,172 cm³ (30 cm) dan 496,75 cm³ (45 cm).
6. Diameter jembatan garam (*salt bridge*) yang digunakan adalah 1¹/₂ inchi.
7. Temperatur yang digunakan adalah 22 - 27°C.
8. Bahan substrat yang digunakan pada kontainer anoda sebagai bahan dasar adalah limbah kulit pisang jenis pisang kepok yang telah diolah.
9. Fraksi berat substrat limbah kulit pisang pada kontainer anoda 15 liter adalah 2 kg dengan 10 liter aquades.
10. Fraksi berat sabut *stainless steel* yang konstan pada kontainer katoda.
11. *Microbial Fuel Cell* (MFC) *performance* yang diuji meliputi: *Voltage*, arus (*Current Density*), dan efisiensi alat.
12. Penelitian dilakukan dalam waktu 168 jam.

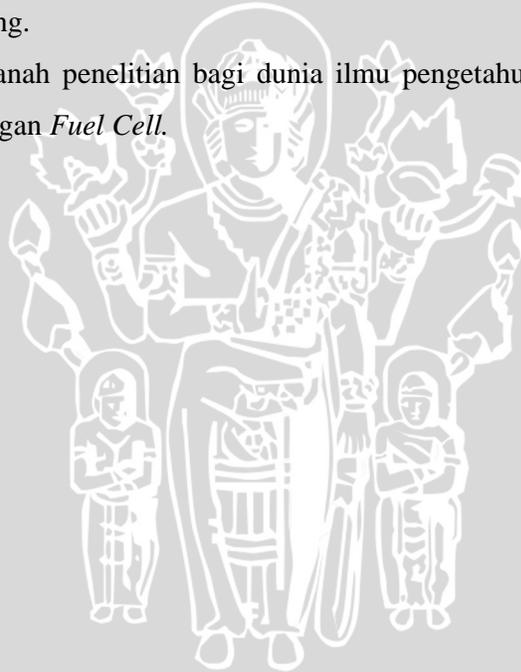
1.4 Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi volume jembatan garam terhadap *Microbial Fuel Cell Performance* memanfaatkan limbah kulit buah pisang.

1.5 Manfaat penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

1. Dapat dijadikan sebagai referensi tambahan bagi mahasiswa teknik mesin pada khususnya dalam penelitian–penelitian selanjutnya tentang *Microbial Fuel Cell*.
2. Menghasilkan alat konversi energi listrik alternatif sekaligus pengolah limbah cair yang ramah lingkungan.
3. Memberikan cara alternatif dalam menghasilkan energi listrik memanfaatkan limbah kulit pisang.
4. Menambah khasanah penelitian bagi dunia ilmu pengetahuan khususnya yang berhubungan dengan *Fuel Cell*.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Arsana(2010) meneliti tentang potensi konsorsium mikroba dalam sampel limbah cair untuk menghasilkan listrik menggunakan MFC dengan macam sampel yakni limbah kelapa sawit, limbah cair tahu dan rumen sapi. Dari tiga jenis limbah cair yang diuji, limbah cair rumen memberikan tegangan listrik terbesar dibandingkan dua macam limbah cair lain yang diuji. Besar tegangan maksimal limbah cair rumen yang terukur dengan sistem MFC bejana sepasang adalah 810mV dan yang terukur dengan sistem MFC seri adalah 575mV.

Susanto (2011) meneliti tentang pengaruh jumlah takik pada anoda terhadap karakteristik MFC. Hasilnya untuk arus, tegangan dan efisiensi terbesar yang dihasilkan terjadi pada elektroda yang memiliki takik terbanyak yakni 6 takik dengan tegangan maksimal yang dihasilkan adalah 257.48mV.

2.2 Reaksi Elektrokimia

Reaksi oksidasi-reduksi atau redoks adalah suatu reaksi serah terima elektron dan reaksi yang disertai perubahan bilangan oksidasi, melibatkan perubahan dalam keadaan oksidasi pereaksi-pereaksi. Dalam kebanyakan contoh sederhana terdapat kehilangan elektron yang sesungguhnya oleh satu pereaksi dan perolehan elektron padanannya oleh pereaksi yang lain. Bila aliran elektron yang menyertai suatu reaksi membentuk arus listrik, maka perubahan kimia itu disebut sebagai elektrokimia (Resty, 2010).

Reaksi elektrokimia dapat dibagi menjadi dua kelas, yang pertama dapat menghasilkan arus listrik (proses yang terjadi dalam aki dan baterai) dan yang kedua reaksi kimia dihasilkan oleh arus listrik (proses elektrolisis). Pada tipe pertama reaksi bersifat *spontan*, dimana energi bebas energi kimianya berkurang (energi kimia berubah menjadi energi listrik), sistem itu dapat melakukan kerja, misalnya kerja motor. Tipe kedua harus dipaksa agar terjadi (energi listrik berubah menjadi energi kimia), sehingga energi bebas sistem kimia bertambah.

Sel volta merupakan satu sel yang menggunakan prinsip elektrokimia. Sel volta adalah penataan bahan kimia dan penghantar listrik yang memberikan aliran elektron lewat rangkaian luar dari suatu zat kimia yang teroksidasi ke zat kimia yang direduksi.

Dalam sel volta, reaksi oksidasi berarti dilepaskannya elektron oleh atom, atau molekul. Sedangkan reaksi reduksi berarti diperolehnya elektron dari atom, atau molekul lain.

2.3 Fuel Cell

Fuel cell adalah perangkat yang menghasilkan listrik arus searah melalui reaksi kimia (Smithsonian, 2008). Alat ini terdiri dari dua buah elektroda, yaitu anoda dan katoda yang dipisahkan oleh sebuah membran polimer yang berfungsi sebagai elektrolit. Membran ini sangat tipis, ketebalannya hanya beberapa mikrometer saja. Hidrogen dialirkan ke dalam *fuel cell* yaitu ke bagian anoda, sedang oksigen atau udara dialirkan ke bagian katoda, dengan adanya membran, maka gas hidrogen tidak akan bercampur dengan oksigen. Membran dilapisi oleh platina tipis yang berfungsi sebagai katalisator yang mampu memecah atom hidrogen menjadi elektron dan proton. Proton mengalir melalui membran, sedang elektron tidak dapat menembus membran, sehingga elektron akan menumpuk pada anoda, sedang pada katoda terjadi penumpukan ion bermuatan positif. Apabila anoda dan katoda dihubungkan dengan sebuah penghantar listrik, maka akan terjadi pengaliran elektron dari anoda ke katoda, sehingga terdapat arus listrik. Elektron yang mengalir ke katoda akan bereaksi dengan proton dan oksigen pada sisi katoda dan membentuk air.

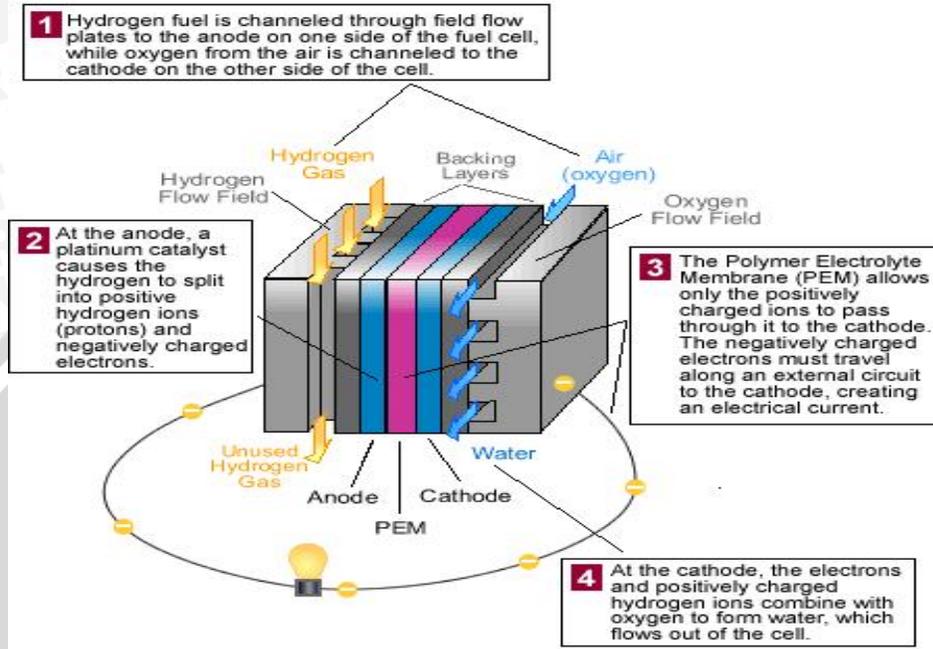
2.4 Struktur Dasar dan Cara Kerja Fuel Cell Pada Umumnya

Struktur fisik dari sebuah *fuel cell* secara mendasar terdiri dari:

- Sebagai kutub negatif *fuel cell* adalah anoda. Anoda merupakan elektroda yang mengalirkan elektron yang lepas dari molekul hidrogen sehingga elektron tersebut dapat digunakan di luar sirkuit. Pada materialnya terdapat saluran-saluran agar gas hidrogen dapat menyebar ke seluruh permukaan katalis.
- Katoda sebagai kutub elektroda positif *fuel cell* yang juga memiliki saluran yang akan menyebarkan oksigen ke seluruh permukaan katalis. Katoda juga berperan dalam mengalirkan elektron dari luar sirkuit ke dalam sirkuit sehingga elektron-elektron tersebut dapat bergabung dengan ion hidrogen dan oksigen untuk membentuk air.
- Katalis yang digunakan untuk memfasilitasi reaksi oksigen dan hidrogen. Katalis umumnya terbuat lapisan tipis dari lembaran kertas karbon yang diberi bubuk platina. Permukaan katalis selalu berpori dan kasar sehingga

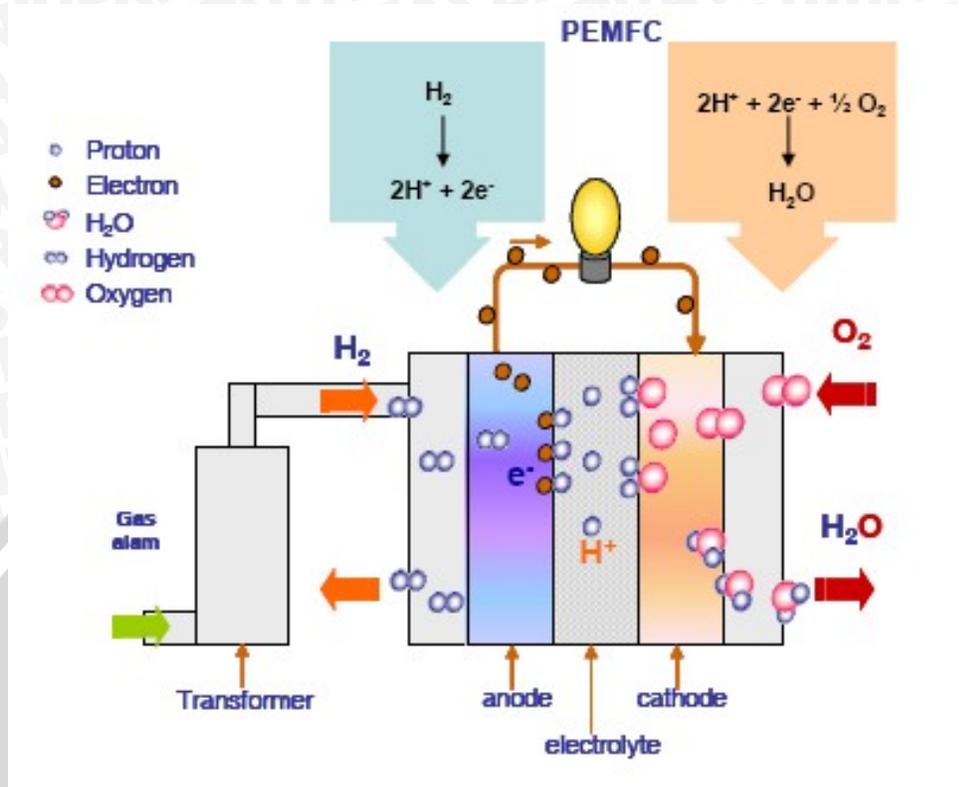
seluruh area permukaan platina dapat dicapai hidrogen dan oksigen (Smithsonian, 2008).

Untuk lebih jelasnya, struktur dasar *fuel cell* dapat dilihat pada gambar 2.1



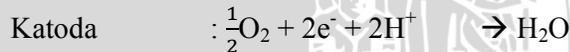
Gambar 2.1 Struktur dasar *Fuel Cell*
Sumber: Anynomous A (2010).

Secara umum cara kerja *fuel cell* adalah bahan bakar, biasanya hidrogen mengalir melalui permukaan anoda. Bahan bakar ini mengalami oksidasi menjadi ion bermuatan positif (H^+) dan negatif (listrik elektron). Pada katoda dialirkan oksigen (udara), dengan adanya membran, maka gas hidrogen tidak akan bercampur dengan oksigen. Membran dilapisi oleh platina tipis yang berfungsi sebagai katalisator yang mampu memecah atom hidrogen menjadi elektron dan proton. Proton mengalir melalui membran, sedang elektron tidak dapat menembus membran, sehingga elektron akan menumpuk pada anoda, sedang pada katoda terjadi penumpukan ion bermuatan positif. Apabila anoda dan katoda dihubungkan dengan sebuah penghantar listrik, maka akan terjadi pengaliran elektron dari anoda ke katoda, sehingga terdapat arus listrik. Elektron yang mengalir ke katoda akan bereaksi dengan proton dan oksigen pada sisi katoda, sehingga dapat membentuk air.

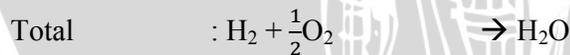


Gambar 2.2 Skema aliran *Fuel Cell*
 Sumber: Eniya (2007)

Reaksi ini dapat ditulis:



dan reaksi totalnya adalah



Reaksi di atas adalah reaksi spontan yang dipercepat dengan bantuan katalis seperti logam platina, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.

Ion yang melewati elektrolit dapat berupa ion muatan positif atau negatif tergantung pada elektrolit dan bahan bakar yang digunakan. Secara teori, bahan bakar yang digunakan dapat berupa gas ataupun cairan yang dapat dibakar secara galvanik pada anoda. Bahan bakar tersebut seperti hidrogen, alkohol dan glukosa. Oksidan berupa oksigen yang bisa diperoleh dari udara direduksi pada aliran yang cukup.

Elektrolit merupakan bagian paling penting pada *fuel cell*. Elektrolit adalah substansi yang memiliki konduktivitas ion tinggi dan berfungsi untuk melewatkan ion tertentu hasil oksidasi bahan bakar pada anoda sehingga memungkinkan terjadinya

aliran elektron melalui rangkaian luar, karena elektron ditolak oleh elektrolit pada *Proton Exchange Membrane* (PEM).

Bagian lain yang tidak kalah pentingnya adalah elektroda yang terdiri dari anoda dan katoda. Berbeda dengan sel kimia lain, elektroda ini tidak ikut bereaksi dan tidak akan habis selama proses elektrokimia berlangsung dan menyebabkan proses dapat berlangsung secara kontinyu. Pada umumnya bahan yang digunakan adalah elektroda berpori.

Untuk mempercepat terjadinya reaksi reduksi-oksidasi tersebut, maka diperlukan katalis. Katalis adalah bahan yang digunakan untuk mempercepat atau memperlambat suatu reaksi kimia tanpa mengubah komposisi kimia pada akhir reaksi tersebut (Resty, 2010). Pada umumnya katalis adalah mempercepat reaksi, namun jika memperlambat maka disebut sebagai katalis negatif atau *inhibitor*. Katalis yang digunakan dalam penelitian ini berjenis katalis organik berupa mikroorganisme (bakteri).

2.5 Jenis – Jenis *Fuel Cell*

Dari perbedaan elektrolit, reaktan dan oksidan yang digunakan, maka telah berhasil dibuat beberapa jenis *fuel cell* (Anonymous B, 2011). Masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda-beda, jenis *fuel cell* ditentukan oleh material yang digunakan sebagai elektrolit yang mampu menghantar proton. Pada saat ini ada 2 jenis sel bahan bakar (*fuel cell*) yaitu:

- a. *Hydrogen Fuel Cell* (HFC)
 1. *Phosphoric Acid Fuel Cell* – PAFC
 2. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* – PEMFC
 3. *Molten Carbonate Fuel Cell* – MCFC
 4. *Solide Oxide Fuel Cell* – SOFC
 5. *Alkaline Fuel Cell* – AFC
 6. *Direct Alcohol Fuel Cell* – DAFC
- b. *Bio Fuel Cell* (BFC)
 1. *Enzymatic Fuel Cell* – EFC (*mediator*)
 2. *Microbial Fuel Cell* – MFC (*mediatorless*)

2.6 Bio – Fuel Cell

Biofuel cell adalah sebuah peralatan yang mengubah secara langsung energi biokimia menjadi energi listrik. Energi penggerak *biofuel cell* adalah reaksi redoks dari substrat karbohidrat seperti glukosa dan methanol menggunakan mikroorganisme atau enzim sebagai katalis, yang menggunakan mikroorganisme disebut *Microbial Fuel Cell* (MFC), sedangkan yang menggunakan enzim disebut *Enzymatic Fuel Cell* (EFC). Prinsip kerjanya mirip dengan *fuel cell*. Perbedaan utamanya adalah katalis pada *biofuel cell* adalah mikroorganisme atau enzim, oleh karena itu logam mulia tidak diperlukan dan kondisi kerja dilakukan pada larutan netral dan temperatur kamar. Sebagai contoh, oksidasi sempurna satu gram metanol dengan bantuan enzim secara teoritis memberi energi listrik 5000mAh. Oksidasi sempurna satu mol glukosa akan melepaskan 24 mol elektron.



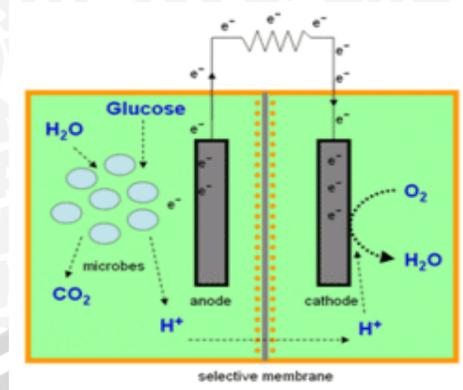
Oleh karena itu muatan $2,32 \times 10^6$ C per mol glukosa berpotensi untuk disambungkan melalui sirkuit elektronik. Besarnya arus yang dihasilkan dari proses oksidasi ini akan bergantung pada besarnya:

1. Angka metabolisme.
2. Efisiensi transfer elektron menuju elektroda.

2.7 Microbial Fuel Cell (MFC)

Microbial fuel cell (MFC) adalah peralatan untuk merubah energi kimia menjadi energi listrik melalui aktivitas *catalytic* dari mikroorganisme (Chang et al. 2009). Sebagai sebuah peralatan sistem *bio-electrochemical* yang menggunakan bakteri untuk merubah (energi kimia) material organik menjadi energi listrik, maka *fuel cell* ini dibuat dengan konstruksi anoda, katoda, *Proton Exchange Membrane* (PEM), dan rangkaian listrik luar.

Pada gambar 2.3 dapat dilihat anoda dikondisikan di lingkungan dimana bakteri anaerob dan material organik yang dikonsumsi ditempatkan di anoda. Bahan bakar dioksidasi oleh mikroorganisme, sebagai bagian dari proses *digestive* maka bakteri akan menghasilkan ion positif (H^+) dan elektron (e^-). Hal ini juga diketahui sebagai proses oksidasi.



Gambar 2.3 Microbial Fuel Cell
Sumber: Christinemerrick (2007)

Reaksi yang terjadi di anoda:



Elektron akan ditarik keluar dari larutan atau ditransfer menuju elektroda di anoda. Selanjutnya untuk mengalirkan elektron tersebut diperlukan rangkaian listrik luar dengan tahanan, serta disambungkan dengan elektroda pada sisi katodanya.

Pada katoda kemudian akan terjadi reaksi reduksi yaitu kombinasi ion positif dan elektron dan oksigen akan membentuk air. Elektron dan ion positif berkumpul di katoda bergabung dengan oksigen yang berasal dari udara.

Reaksi yang terjadi di katoda:



Sedangkan ion positifnya (H^+) akan mengalir melalui *proton exchange membran* kemudian akan bertemu dengan elektron (e^-) di katoda.

Penelitian tentang *Microbial Fuel Cell* (MFC) tanpa mediator, pada umumnya menggunakan membran. Membran yang dimaksud adalah *Proton Exchange Membrane* (PEM). *Proton Exchange Membrane* (PEM) tersebut adalah jembatan garam yang terdiri dari susunan protein yang hanya mengijinkan ion positif yang dapat melaluinya, bergerak dari anoda menuju katoda tetapi tetap memisahkan kedua larutannya.

Pada *Microbial Fuel Cell* (MFC) sebagaimana diketahui bahwa daya hantar air juga dapat menyalurkan ion positif, jadi membran tidak benar-benar dibutuhkan pada

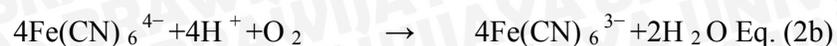
komponen sistem. Tetapi untuk membangkitkan lebih banyak listrik. Liu dan Logan (2004) menunjukkan efektifitas penggunaan membran pada *Microbial Fuel Cell* (MFC). Terutama untuk membran seperti *Nafion* yang daya larut ion positifnya dapat menghasilkan pH yang rendah, akan tetapi konsentrasi ion positif dalam air akan dibatasi oleh toleransi pH oleh bakteri pada *circum-neutral*.

Material anoda yang diperlukan adalah material yang mempunyai konduktifitasnya tinggi, tidak korosif, daerah permukaan yang sangat spesifik (*area per volume*), porositas tinggi, tidak mencemari lingkungan (bakteri tidak tercemar), tidak mahal dan mudah dibuat dengan skala yang lebih besar. Adapun sifat yang sangat penting adalah elektrode harus mampu menghantar listrik, sehingga perlu dilakukan pengujian dengan voltmeter untuk mengukur tahanan materialnya.

Kesulitan terbesar adalah mengatur reaksi kimia di katoda, dimana untuk mengatur elektron, ion positif dan oksigen agar berkumpul di katalis pada reaksi tiga fasa (katalis padat, udara dan air) sangatlah sulit. Katalis harus berada pada permukaan konduksi, tetapi harus terbuka terhadap udara dan air sehingga ion positif dan elektron pada fasa yang berbeda dapat bersatu. Kesulitan yang lain adalah penyebaran udara atau oksigen di air yang diketahui sangat kecil jika dibandingkan di udara, yaitu (berdasarkan fraksi mol) daya larut oksigen di air adalah sebesar 4.6×10^{-6} (25°C), sedangkan di udara nilainya 0.21.

Beberapa material yang dapat digunakan sebagai anoda dan katoda yang mengikuti karakteristik di atas adalah *carbon paper*, *cloth*, *graphite*, *woven graphite*, *graphite granules*, *brushes* dan lain-lain. Elektroda MFC yang paling efisien adalah menggunakan *Platinum* dan *Titanium* yang sangat mahal. Tetapi alternatif *zinc* memiliki pendekatan transfer energi yang efektif namun korosif.

Mediator elektron berperan selama proses transportasi elektron, membawa elektron dari membran plasma bakteri ke anoda. Elektron-elektron ini bergerak melewati sirkuit elektrik dan setelah itu mereduksi ion ferisianida menjadi ion ferosianida pada katoda. Proton dipompakan dari bakteri ke lingkungan anoda melewati membran penukar proton (PEM) ke ruang katoda. Ferisianida dioksidasi kembali menjadi *ferisianida*. Sedangkan ion hidrogen beraksi dengan oksigen membentuk air.



Berdasarkan pada pengetahuan pada fungsi *biofuel cell*, usaha-usaha sudah banyak dilakukan untuk memaksimalkan arus dan daya keluaran pada MFC, antara lain:

1. Membandingkan dan menggunakan kombinasi berbeda bakteri dan mediator elektron
2. Menggunakan kultur bakteri campuran
3. Menggunakan lingkungan anaerobik di anoda
4. Meningkatkan angka suplai bahan bakar
5. Modifikasi elektroda
6. Memompakan oksigen melewati ruangan katoda

2.8 Mekanisme dari Perpindahan Elektron pada MFC

Menurut (Logan, 2008) ada dua tipe *Microbial Fuel Cell* (MFC) yaitu *Microbial Fuel Cell* (MFC) dengan mediator dan *Microbial Fuel Cell* (MFC) tanpa mediator.

2.8.1. *Microbial Fuel Cell* dengan Mediator

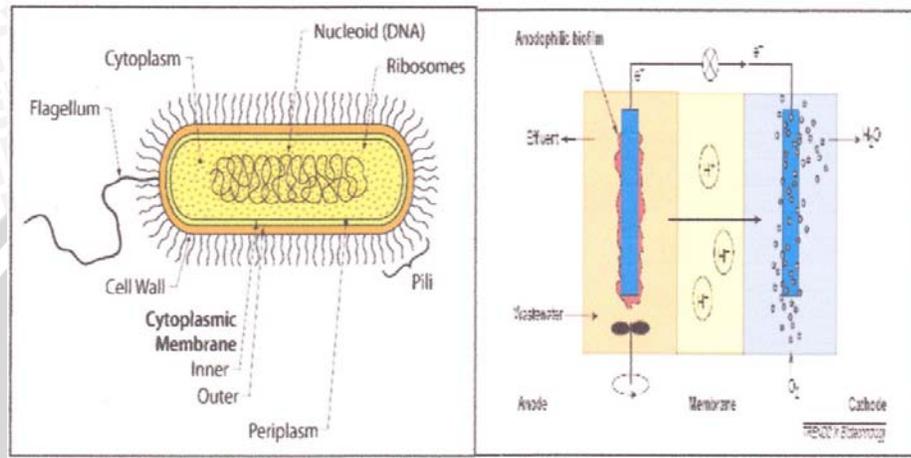
Elektron dipindahkan dari *microbial cell* ke elektroda dengan menggunakan mediator seperti *thionine*, *methyl viologen*, *methyl blue*, *humic acid*, *neutral red* dan lain-lain. Biasanya mediator tersebut harganya yang cukup mahal dan beracun sehingga mediator menjadi beban biaya bagi pengembangan MFC.

2.8.2. *Microbial Fuel Cell* tanpa Mediator

MFC tanpa mediator inilah yang sedang berkembang dimana elektron dipindahkan dari *microbial cell* ke elektroda dengan memanfaatkan *Electrochemically Active Bacteria* (EAB). Contoh dari EAB adalah bakteri *Geobacter sulfurreducens*, *Xanthomonas sp*, *Shewanella putrefaciens*, *Aeromonas hydrophilia* dan lain-lain (Chang et al. 2006).

Mekanisme dari perpindahan elektron menuju elektroda tersebut pada MFC tanpa penambahan zat mediator selama ini diketahui melalui dua mekanisme yaitu; penghantaran elektron melalui mediator yang dihasilkan sendiri, seperti bakteri *pyocyanin* dan *Pseudomonas aeruginosa* (Rabaey et al. 2005) dan bakteri pada MFC tanpa mediator yang memiliki *electrochemically active redox enzymes* seperti *cytochromes* pada membran terluarnya yang dapat memindahkan elektron keluar material bakteri dengan nanowires atau pili yang dihasilkan.

Beberapa bakteri jenis ini adalah *Geobacter* dan *Shewanella* species (Chang et al. 2006). Memiliki *pili* (*electrochemically-active redox enzymes*) seperti *cytochromes* di membran terluarnya, dan dapat memindahkan elektron yang dihasilkan melalui *pili* ini pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Microbial fuel cell* tanpa mediator
 Sumber : Anonymous C (2011)

Tabel 2.1. Karakteristik Umum Fuel Cell Kimiawi dan Biologis

No	Karakter Umum	Fuel Cell Kimiawi	Fuel Cell Biologis
1	Katalis	Logam mulia	Mikroorganisme/enzim
2	pH	Larutan asam (pH<1)	Larutan netral pH 7.0-9.0
3	Temperatur	Lebih dari 200°C	Temperatur 22-25°C
4	Elektrolit	Asam Fosfat	Larutan fosfat
5	Kapasitas	Tinggi	Rendah
6	Efisiensi	40-60%	Lebih dari 40%
7	Tipe Bahan Bakar	Gas alam, H ₂ , dll	Karbohidrat dan hidrokarbon

Sumber : Chemiawan (2006:93)

Tabel 2.2. Energi Teoritis Kandungan Metanol, Etanol, dan Glukosa

No.	Pembanding	Methanol (1g/10ml H ₂ O)	Etanol (1g/10ml H ₂ O)	Glukose (3g/10ml H ₂ O)
1	Kapasitas (mAb)	5025 (2512*)	3500(1750*)	893(446*)
2	H ₂ O yang terbentuk (g)	1,125	0,391	0,300
3	CO ₂ yang terbentuk (g)	1.375	0,956	2,97 gluconolactone

*angka konversi 50%

Sumber : Chemiawan (2006:93)

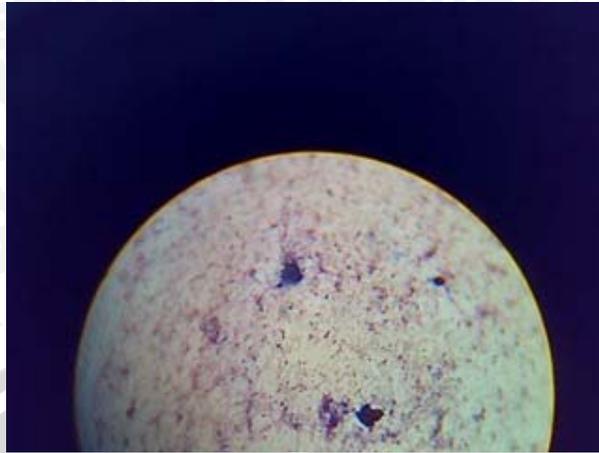
2.9 Reaksi Bioenergi

Reaksi bioenergi dapat dibagi menjadi tiga jenis fermentasi, respirasi aerob dan respirasi anaerob. Pembagian ini didasarkan pada perbedaan akseptor elektron. Dalam fermentasi, tidak ada akseptor dari luar sistem yang berperan sehingga senyawa organik berfungsi sebagai donor elektron sekaligus juga sebagai akseptor elektron. Pada respirasi aerob, oksigen bebas merupakan satu-satunya akseptor elektron, karbondioksida merupakan hasil akhir oksidasi. Respirasi anaerob menggunakan senyawa anorganik sebagai akseptor elektron, misalnya nitrit, sulfat atau karbonat. Berdasarkan hal ini, mikroba dapat digolongkan menjadi mikroba aerob, mikroaerofilik, dan anaerob (Madigan et al, 1997).

2.10 Bakteri *Pseudomonas putida*

Di dalam *Microbial Fuel Cell* (MFC), banyak sekali bakteri yang bekerja sebagai agen bioremediasi, ini disebut sebagai konsorsium. Tidak hanya satu atau dua jenis bakteri, tetapi banyak. Salah satu dari bakteri tersebut adalah *Pseudomonas sp.*

Spesifikasi bakteri, *Pseudomonas sp* adalah golongan bakteri dari *Genus Geobacter* yang unik karena dapat memproduksi fili-mirip filamen yang berfungsi sebagai kabel nano untuk mentransfer elektron dari luar sel kepada akseptor elektron yang tidak larut seperti mineral besi dan yang paling mungkin kepada elektroda, dapat dilihat pada gambar 2.5.

10 μ m

Gambar 2.5 Bakteri *Pseudomonas putida* sederhana
Sumber : Ratih (2010)

Filamen ini lebarnya hanya 3-5 nanometer (10.000 kali lebih tipis daripada rambut manusia) dan panjangnya bisa mencapai 20 mikrometer (10 kali panjang selnya). Selain itu, bakteri ini juga dapat mengeluarkan flagel yang berfungsi sama seperti fli tersebut. Padahal, biasanya flagel dan fli merupakan alat gerak, tetapi tidak bagi bakteri ini karena bakteri ini bersifat imotil atau tidak bergerak.

Formasi fli dan flagel ini bisa muncul jika bakteri tumbuh dalam lingkungan yang kaya akan oksida besi dan mangan, bentuk ini merupakan suatu bentuk adaptasi kemotaktik. Dengan demikian, bakteri akan mentransfer elektron, terutama ketika terjadi proses bioremediasi air tanah yang terkontaminasi oksida-oksida tersebut.

Para peneliti mengatakan bahwa sebelumnya bakteri golongan *Geobacter* tidak pernah berenang atau bergerak dalam larutan, tetapi ketika dia berada dalam larutan yang mengandung logam tidak larut, bakteri ini dengan leluasa bergerak. Para peneliti menyebut bakteri ini bergerak melalui rel yang menunjuk ke arah logam tidak larut itu berada. Sehingga, ketika proses bioremediasi itu terjadi, limbah yang tercemar dapat dimurnikan dari pencemarnya karena pencemarnya bisa diekstraksi dari sifat ketidaklarutannya itu.

Bakteri golongan *Geobacter* bersifat anaerob, artinya dia tidak membutuhkan oksigen bebas dalam berespirasi, itu sebabnya bakteri ini banyak dijumpai pada sedimen-sedimen yang ada di dasar danau, laut, ataupun sungai. Kemudian bakteri ini juga bersifat termofilik yang hidup di tempat bersuhu tinggi.

Dalam hal ini bakteri berperan sebagai agen fermentasi air limbah yang mampu mentransfer elektron dalam *Microbial Fuel Cell* (MFC) sehingga selain dihasilkan gas hidrogen didapat juga produk air bersih. Pada *Microbial Fuel Cell* (MFC), bakteri *Pseudomonas sp* dan bakteri lainnya berperan sebagai biokatalis yang dapat membentuk biofilm pada permukaan elektroda dan menggunakannya sebagai bagian dari sistem respirasinya. Ini artinya, elektron akan melalui anoda tanpa menggunakan mediator apapun, baik mediator alami maupun buatan. Di dalam *Microbial Fuel Cell* (MFC), bakteri dapat memfermentasi substrat limbah menjadi hidrogen yang 4 kali lebih banyak daripada fuel cell biasa yang tanpa bakteri dan air bersih. Kita tahu hidrogen saat ini sudah menjadi sumber energi atau bahan bakar untuk beberapa alat yang ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi yang berbahaya dan tidak mencemari lingkungan

Ryan (2011) menemukan bakteri yang bisa mendegradasi kafein, dengan mengisolasi bakteri pendegradasi kafein *Pseudomonas putida CBB5* yang bisa mengubah kafein menjadi CO₂ dan ammonia. Bakteri itu bisa hidup dalam lingkungan dengan kadar kafein 2,5 gram/liter, yang bagi banyak bakteri sudah tergolong toksik.

Dengan mendegradasi kafein yang terdiri atas unsur karbon, oksigen, nitrogen dan hidrogen, *Pseudomonas putida CBB5* mendapatkan nutrisi penting yang dibutuhkan untuk hidupnya. Menurut Summers, proses degradasi sendiri dibantu oleh 3 macam enzim yang dimiliki bakteri itu. Kafein sebenarnya juga berkaitan dengan limbah cair rumah tangga dan limbah industri.

2.11 Biofilm pada Mikroorganisme

Biofilm merupakan salah satu contoh dari hubungan kompleks antara berbagai mikroba yang seringkali berasal dari spesies yang berbeda. Biasanya menempel pada permukaan gigi (plak gigi), kerak dalam aliran air, tirai kamar mandi (buih sabun juga merupakan biofilm), alat medis yang ditanam dalam tubuh (pipa dalam saluran tubuh) dan lapisan lendir sistem pencernaan. Para ilmuwan memperkirakan bahwa biofilm merupakan habitat mikroba yang alami.

Biofilm berkembang dari suatu matriks ekstraseluler yang terdiri atas DNA, protein, dan serabut polisakarida dari glikokaliks sel. Matriks melekat satu sel dengan yang lain dan juga pada permukaan substrat. Biofilm merupakan lingkungan mikro yang mengandung nutrisi dan melindungi koloni bakteri (dari tekanan lingkungan, radiasi sinar ultraviolet, obat antimikroba, pH, suhu, dan kelembaban).

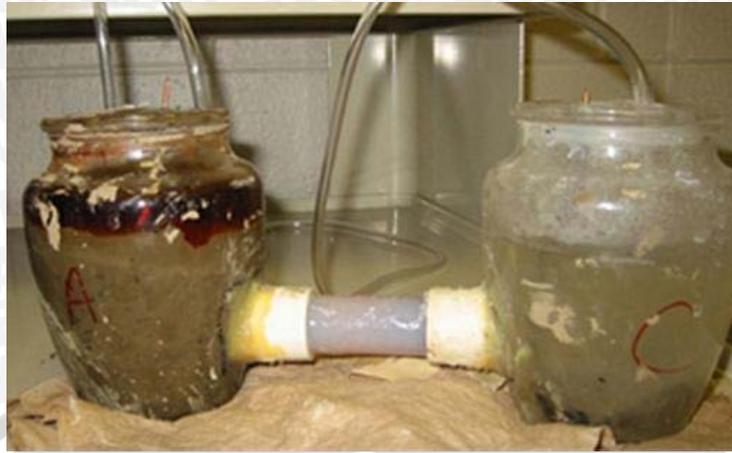
Penelitian terbaru menunjukkan bahwa bakteri dalam biofilm menunjukkan perbedaan yang mencolok dari individu, bakteri yang berenang bebas. Contohnya suatu sel yang berenang bebas, bakteri tanah *Pseudomonas putida* bergerak dengan flagel. Ketika menjadi suatu bagian dari biofilm maka akan kehilangan gen protein pembentuk flagel dan sebagai gantinya memulai sintesis pili. Sebagai tambahan, gen yang menjadikan ketahanan terhadap antibiotik pada *Pseudomonas putida* akan menjadi lebih aktif saat berada dalam biofilm.

Bakteri dalam biofilm berkomunikasi melalui pesan kimia untuk membantu mengatur dan membentuk struktur tiga dimensi. Arsitektur suatu biofilm menyediakan perlindungan daripada bakteri yang berenang bebas. Sebagai contohnya pada saat kadar oksigen rendah di bagian dalam biofilm maka akan lebih mengaktifkan zat antibiotik. Lebih dari itu, kehadiran begitu banyak jenis bakteri dalam biofilm akan meningkatkan kemungkinan bakteri dalam komunitas biofilm dalam melawan dan menjadi kebal terhadap pemberian antibiotik.

2.12 Jembatan Garam (Salt Bridge)

Jembatan garam biasanya berupa pipa yang diisi dengan agar-agar yang dijenuhkan dengan KCl. Jembatan garam berfungsi untuk menjaga kenetralan muatan listrik pada larutan, menjaga agar larutan elektrolit di satu bagian elektroda tidak mengalir ke bagian elektroda lainnya saat permukaan kedua larutan elektrolit di kedua elektrolit berbeda dan mentransfer ion dari anoda menuju katoda (Logan, 2008). Karena konsentrasi larutan elektrolit pada jembatan garam lebih tinggi daripada konsentrasi elektrolit di kedua bagian elektroda, maka ion negatif dari jembatan garam masuk ke salah satu setengah sel yang kelebihan muatan positif dan ion positif dari jembatan garam berdifusi ke bagian lain yang kelebihan muatan negatif.

Dengan adanya jembatan garam terjadi aliran elektron yang kontinu melalui kawat pada rangkaian luar dan aliran ion-ion melalui larutan sebagai akibat dari reaksi redoks yang spontan yang terjadi pada kedua elektroda seperti yang terlihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Jembatan Garam
Sumber : Abbie Groff's (2009)

2.13 Bahan Limbah Kulit Buah Pisang

Pisang dengan nama Latin *Musa paradisiacal* merupakan jenis buah-buahan tropis yang sangat banyak dihasilkan di Indonesia. Pulau Jawa dan Madura mempunyai kapasitas produksi kira-kira 180.153 ton pertahun (Saroso, 1998). Dari keseluruhan jumlah tersebut terdapat jenis buah pisang kepok yang sering diolah dalam bentuk gorengan. Kulit dari buah pisang kepok biasanya oleh masyarakat hanya dibuang seperti gambar 2.7 dan hal itu menjadi permasalahan limbah di alam karena akan meningkatkan keasaman tanah dan mencemarkan lingkungan. Berdasarkan permasalahan itulah penelitian tentang pengolahan limbah kulit pisang kepok ini dilakukan agar lebih berguna untuk masyarakat.



Gambar 2.7 Kulit Pisang Kepok
Sumber : Ed Merritt (2010)

Komposisi kandungan kulit pisang dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Kandungan Kulit Buah Pisang Kepok

Unsur	Komposisi
Air	69,80 %
Karbohidrat	18,50%
Lemak	2,11%
Protein	0,32%
Kalsium	715mg/100gr
Pospor	117mg/100gr
Besi	0,6mg/100gr
Vitamin B	0,12mg/100gr
Vitamin C	17,5mg/100gr

Sumber : *Saroso (1998)*

Berdasarkan tabel 2.3, komposisi terbanyak kedua pada kulit pisang kepok adalah karbohidrat. Mengingat akan hal tersebut dan prospek yang baik di masa yang akan datang, maka penyusun mencoba mencari peluang untuk memanfaatkan kulit pisang sebagai bahan baku dalam anoda *fuel cell*.

2.14 Pembangkitan Daya

2.14.1 Voltage dan Arus

Microbial Fuel Cells saat diketahui bahwa *voltage* maksimum yang baru dicapai adalah berkisar dari 0.3-0.7 V. *Voltage* merupakan fungsi dari tahanan luar atau beban rangkaian, dan arus I hubungan kedua variabel tersebut dinyatakan dalam persamaan:

$$E = I R_{\text{Ext}} \quad (\text{Logan, 2008: 29}) \quad (2.1)$$

dengan :

$$E_{\text{MFC}} = \text{voltage sel [V]}$$

$$I = \text{arus [mA]}$$

$$R_{\text{Ext}} = \text{hambatan luar [Ohm]}$$

Dimana digunakannya simbol E untuk *voltage* sendiri agar tidak membingungkan dengan simbol dari satuannya (Volt). Produksi arus dari *single Microbial Fuel Cell* (MFC) adalah kecil sehingga sebagai gantinya (apalagi yang dikonstruksi di

Laboratorium sehingga jarang diukur) dihitung berdasarkan penurunan *voltage* yang melewati tahanan sebagai $I = E / R_{ext}$. sedangkan produksi tegangan terukur yang lebih tinggi pada *Microbial Fuel Cell* (MFC) adalah *open circuit voltage* atau OCV yang mana *voltage* diukur dengan memutuskan rangkaian listriknya (tahanan tanpa batas, arus nol). Dayanya dihitung berdasarkan perumusan $P = I E$.

2.14.2 Menghitung Daya

Daya yang dibangkitkan MFC dihitung dari *voltage* dan arus, dapat dilihat pada persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$P = I \cdot E_{MFC} \quad (\text{Logan, 2008: 44}) \quad (2.2)$$

dengan :

P = daya yang dihasilkan [mW]

I = arus [mA]

E_{MFC} = *voltage* sel [V]

Sedangkan untuk skala Laboratorium, arus listrik didapat dari hasil pengukuran *voltage* diantara beban yang diberikan. (Tahanan dari rangkaian luar yang diberikan R_{ext} dengan hubungan $I = E_{MFC}/R_{ext}$) sehingga daya outputnya menjadi:

$$P = \frac{E_{MFC}^2}{R_{Ext}} \quad (\text{Logan, 2008: 44}) \quad (2.3)$$

atau berdasarkan hubungan tersebut juga diperoleh:

$$P = I_{MFC}^2 \times R_{Ext} \quad (\text{Logan, 2008: 44}) \quad (2.4)$$

Jika ingin mengetahui sebenarnya seberapa besar daya yang dihasilkan oleh *Microbial Fuel Cell* (MFC) maka perlu memperhatikan struktur arsitektur dari reaktor. Sebagai contoh, jumlah anoda akan menentukan luas permukaan yang tersedia untuk mikroba tumbuh sehingga akan dapat mempengaruhi jumlah daya yang dihasilkan. Selanjutnya *Power output normalized by surface area* dinyatakan dalam rumusan *Power density* sebagai berikut:

$$P_{an} = \frac{E_{MFC}^2}{A_{An} R_{Ext}} \quad (\text{Logan, 2008: 44}) \quad (2.5)$$

Dimana :

A_{An} = luas permukaan anoda [m^2]

R_{ext} = tahanan luar [Ohm]

E_{mfc}^2 = *voltage* yang dibangkitkan oleh MFC [V]

2.14.3 Faktor yang Mempengaruhi Tegangan Cell

Nilai maksimum tegangan OCV (*open circuit voltage*) terukur pada *Microbial Fuel Cell* (MFC) dapat diperoleh dari sistem dengan pembatasan dari kumpulan spesifik bakterinya dan diperoleh dari OCP (*open circuit potensial*) di katoda. Untuk *Microbial Fuel Cell* (MFC) seperti pada sumber daya apapun, tujuannya adalah untuk memaksimalkan daya *output* dengan mendapatkan kerapatan arus tertinggi di bawah kondisi potensial maksimumnya. OCV hanya dapat dicapai pada kondisi di mana ada perlawanan dari tahanan. Jika akan mengurangi tahanan tersebut, maka menurunkan tegangan dan akan mendapatkan penurunan terkecil pada tegangan sebagai arus yang meningkat dalam rangka memaksimalkan produksi daya di atas kisaran arusnya.

OCV yang diproduksi oleh *Microbial Fuel Cell* (MFC) selalu kurang dari yang diperkirakan oleh perhitungan *voltage* maksimum untuk sel. Sejauh ini, OCV maksimum adalah 0,8 V diperoleh dengan menggunakan oksigen di katoda, dan maksimumnya diperoleh 0,83 V (Cheng dan Logan, 2007). Dapat dilihat bahwa ada tiga karakteristik daerah penurunan *voltage* di MFC:

- 1) Jatuh *voltage* yang cepat sebagai arus mengalir melalui rangkaian (tahanan eksternal yang tinggi)
- 2) Penurunan *voltage* yang hampir linear
- 3) Penurunan cepat kedua tegangan pada kerapatan arus tinggi.

Voltage sel yang dihasilkan pada saat tertentu dianggap merupakan hasil dari tegangan akibat elektroda *overpotentials* dan kerugian *Ohmic* atau dimana ΣOP_{An} dan $|\Sigma OP_{cat}|$ adalah *overpotentials* dari masing-masing anoda dan katoda, dan istilah $I R_{\Omega}$ memuat segala kerugian *Ohmic* yang sebanding dengan arus dihasilkan (I) dan tahanan *Ohmic* dari sistem (R_{Ω}).

$$E_{\text{emf}} = E^0 - (\sum \text{OP}_{\text{An}} + |\sum \text{OP}_{\text{Cat}}| + \text{IR}_{\Omega}) \quad (\text{Logan, 2008: 52}) \quad (2.8)$$

Overpotentials (kerugian *voltage*) dari elektroda yang paling jelas pada kerapatan arus yang rendah di mana tegangan cepat berkurang, tetapi harus diakui bahwa besarnya *magnitude* pada tiap titik yang spesifik adalah tergantung arus yaitu, *overpotentials* ini berubah dengan arus yang spesifik. Elektroda *overpotentials* diperkirakan muncul dari tiga kerugian dasar (i) aktivasi; (ii) bakteri metabolisme, dan (iii) transportasi massa.

- 1 Kerugian aktivasi yang disebabkan oleh energi yang hilang (sebagai panas) yang digunakan untuk memulai oksidasi atau reaksi reduksi, dan energi yang hilang melalui transfer elektron dari sel terminal protein atau enzim ke permukaan anoda. Kerugian ini terlihat pada kerapatan arus rendah. Kerugian ini dapat dikurangi dengan peningkatan penggunaan katalis pada katoda, bakteri yang berbeda pada anoda, atau dengan meningkatkan transfer elektron antara bakteri dan anoda.
- 2 Kerugian *voltage* akibat metabolisme bakteri tidak dapat dihindari karena kerugian ini berasal dari akibat energi bakteri digunakan untuk oksidasi substrat. Pada prinsipnya, bakteri membutuhkan energi yang cukup hanya untuk memompa satu ion positif melintasi membran menggunakan siklus CAC, atau untuk membuat 1 ATP melalui metode fosforilasi substrat. Akan tetapi, kecuali bakteri yang direkayasa (atau baru ditemukan) berfungsi terbatas untuk produksi ion positif dengan cara oksidasi per substrat, sehingga sebagian besar bakteri yang menggunakan siklus CAC mampu memompa banyak ion positif melintasi membran per NADH teroksidasi. Demikian pula, bakteri yang memfermentasi substrat dapat membuat beberapa ATP dari oksidasi asetat. Dari perspektif memaksimalkan daya puluh dalam *Microbial Fuel Cell* (MFC) tersebut, kita berharap di anoda dapat untuk membuat muatan senegatif mungkin, namun tetap memungkinkan transfer elektron.
- 3 Konsentrasi, atau kerugian perpindahan massa, muncul ketika aliran reaktan ke elektroda atau aliran produk dari elektroda tidak mencukupi dan karena itu membatasi laju reaksi. Pada anoda, substrat fluks ke anoda menjadi masalah yang belum jelas dan pengoperasi *Microbial Fuel Cell* (MFC) karena hanya ada sedikit bukti bahwa telah mencapai kerapatan daya maksimum yang mungkin berdasarkan substrat fluks ke permukaan. Namun, fluks ion positif dari anoda dapat menjadi masalah sebagai akumulasi ion positif yang akan menurunkan pH lokal, dipengaruhi

kinetika bakteri yang merugikan. Peningkatan pH telah diamati sebagian besar di cairan dekat anoda (Kim et al, 2007), dan pH di dalam biofilm bisa lebih rendah. Perpindahan massa yang terbatas pada transfer ion positif di katoda juga dapat membatasi pembangkitan daya, dan mengakibatkan pH tinggi pada katoda (Kim et al, 2007). Oleh karena itu penting untuk menjaga kapasitas *buffer* yang cukup dalam sistem dan untuk meminimalkan timbulnya penimbunan bakteri pada katoda yang dapat menghalangi difusi ion positif ke katoda. Bisa menjadi bagian terbesar tahanan dari fase perpindahan massa yaitu difusi ion positif melalui larutan dan membran jika ada dan ini dinyatakan sebagai *Ohmic resistensi*.

- 4 Kerugian *Ohmic*, adalah kerugian yang paling penting yang harus diatasi untuk mengoptimalkan desain arsitektur *Microbial Fuel Cell* (MFC). Kerugian ini muncul dari tahanan ion (ion positif) akibat konduksi larutan dan membran, dan aliran elektron melalui elektroda menuju ke titik kontak (misalnya, dimana elektroda terhubung ke kawat), dan semua sambungan internal yang relevan. Kerugian *ohmic* dapat dibatasi dengan mengurangi jarak elektroda, memilih membran atau lapisan elektroda dengan tahanan yang rendah, sehingga menjamin kontak yang baik antara rangkaian dan elektroda, dan meningkatkan konduktivitas larutan dan kapasitas *buffering*.

Kerugian *Ohmic* karena konduktivitas larutan antara elektroda referensi dan membran bipolar dapat hitung menurut persamaan 2.9.

$$\Delta V_{\Omega} = \frac{\delta \cdot w \cdot I}{\sigma} \quad (\text{Logan, 2008: 53}) \quad (2.9)$$

Dimana :

ΔV_{Ω} = kerugian *ohmic* [V]

δ = jarak di dalam air [m]

I = kerapatan arus [A/m^2]

σ = konduktivitas larutan [S/m]

Setiap 1-cm jarak dalam larutan 2,5 mS / cm pada kerapatan arus 0,2 mA/cm² menyumbang 0,08 V tahanan *Ohmic*. Dengan demikian kita melihat bahwa menjaga elektroda sedekat mungkin, dan meningkatkan konduktivitas larutan, seharusnya akan meningkatkan produksi daya akibat penurunan tahanan *Ohmic*. Tantangan teknik untuk MFCs untuk produksi daya yang lebih besar, bagaimanapun juga tidak selalu

diperoleh peningkatan daya dengan hanya mengurangi besarnya tahanan *Ohmic*. Sebagai contoh, jika elektroda terlalu dekat justru dapat menurunkan produksi listrik walaupun terjadi penurunan tahanan *Ohmic* (Cheng et al, 2006). Bakteri dapat tumbuh hanya dalam batas-batas salinitas tertentu, dan dengan demikian konduktivitas larutan tidak dapat ditingkatkan melebihi rentang tertentu (Logan, 2006). PEM seperti membran Nafion, memiliki resistensi rendah tetapi ketika terikat kepada katoda dapat mengurangi produksi listrik (Liu dan Logan, 2004). Menggunakan membran pertukaran anion, yang sejauh ini telah ditemukan yang mempunyai resistansi internal yang lebih tinggi dari pada Nafion, dapat meningkatkan daya akibat penggunaan konduksi ion positif yang bermuatan negatif seperti golongan fosfat (Kim et al, 2007). Tentu saja biaya bahan yang dapat digunakan untuk meminimalkan resistensi internal juga harus merupakan faktor penting dalam mendesain *Microbial Fuel Cell* (MFC).

2.15 Efisiensi Sel

Efisiensi termal dari konversi energi didefinisikan sebagai jumlah energi berguna yang dihasilkan dibandingkan dengan perubahan energi kimia tersimpan (umumnya ditunjukkan sebagai energi termal) yang dibebaskan saat bahan bakar direaksikan oksidan.

$$\eta = \frac{\text{energi berguna}}{\Delta H} \quad (\text{Anonymous D, 2004:69}) \quad (2.10)$$

Proses pada mesin termal adalah proses perubahan energi termal, sedangkan pada *fuel cell* adalah proses elektrokimia. Perbedaan pada kedua metode tersebut yang menggambarkan perbandingan efisiensi kedua jenis mesin tersebut.

Pada kasus ideal, mesin elektrokimia seperti *fuel cell*, perubahan energi bebas Gibbs, ΔG , pada reaksi dinyatakan sebagai energi listrik berguna pada temperatur tertentu. Efisiensi ideal dari *fuel cell* adalah

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (\text{Anonymous D, 2004:69}) \quad (2.10)$$

Efisiensi *full cell* didasarkan pada perubahan energi bebas Gibbs standar (ΔG°) pada reaksi sel.



$$\Delta G^0 = 6 G^0_{\text{H}_2\text{O}(\text{l})} + 6G^0_{\text{CO}_2(\text{g})} - G^0_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} - 6G^0_{\text{O}_2} \quad (2.11)$$

ΔH total dapat dianalogikan dengan rumus ΔG^0 di atas. Pada kondisi standar (25°C/298 K dan 1 atm), maka ΔH didapat dari tabel potensial reduksi standar (Lampiran B) yaitu reaksi pembentukan uap air dan gas VO_2 yang besarnya:

$$\Delta H_{\text{H}_2\text{O}(\text{l})} = -285,83 \text{ kJ/mol,}$$

$$\Delta H_{\text{CO}_2(\text{g})} = -393,52 \text{ kJ/mol,}$$

$$\Delta H_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{l})} = -60 \text{ kJ/mol,}$$

$$\Delta H_{\text{O}_2(\text{g})} = 0 \text{ kJ/mol,}$$

$$\Delta G_{\text{H}_2\text{O}(\text{l})} = -237,18 \text{ kJ/mol,}$$

$$\Delta G_{\text{HCO}_2(\text{g})} = -394,4 \text{ kJ/mol,}$$

$$\Delta G_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{l})} = -900 \text{ kJ/mol,}$$

$$\Delta G_{\text{O}_2(\text{g})} = 0 \text{ kJ/mol,}$$

Sehingga η_{ideal} dari reaksi di atas adalah:

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{(6(-237,18)) + 6(-394,4) - (-900)}{(6(-285,83)) + 6(-393,52) - (-60)} = 0,72$$

Efisiensi aktual dari *fuel cell* dapat ditunjukkan sebagai perbandingan *voltage* sel operasi dengan *voltage* sel ideal. Tentunya *voltage* sel aktual lebih kecil dari pada kondisi ideal karena adanya rugi-rugi seperti yang telah dibahas sebelumnya.

$$\eta = \frac{\text{energi berguna}}{\Delta H} = \frac{\text{tenaga berguna}}{\Delta G/0,72} = \frac{\text{Volt}_{\text{act. arus}}}{\text{Volt}_{\text{id. arus}}/0,72} = \frac{0,72(\text{V}_{\text{act}})}{\text{V}_{\text{id}}}$$

Dimana:

V_{act} adalah voltase sel aktual (V)

V_{id} adalah voltase sel ideal (V)

Potensial standar dari H_2/O_2 fuel cell (reduksi : $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$) adalah 1,229 V dengan buangan berupa air. Berdasarkan tabel potensial reduksi standar

dimana terjadi reaksi reduksi pada katoda ($6\text{O}_2(\text{g}) + 24\text{H}^+ + 24\text{e}^- \rightarrow 12\text{H}_2\text{O}(\text{g})$) maka untuk reaksi tersebut memiliki nilai yang sama dengan H_2/O_2 dalam hal potensial reduksi standarnya pada proses reduksi. Berdasarkan tabel potensial reduksi standar, potensial reduksi standar untuk reaksi $6\text{CO}_2 + 24\text{H}^+ + 24\text{e}^- \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{H}_2\text{O}$ adalah -0,43 V. Sesuai dengan rumus bahwa $V_{\text{sel}} = \Delta E_e$ dan $\Delta E_e = E_{\text{katoda}} - E_{\text{anoda}}$, maka V_{sel} atau V_{id}

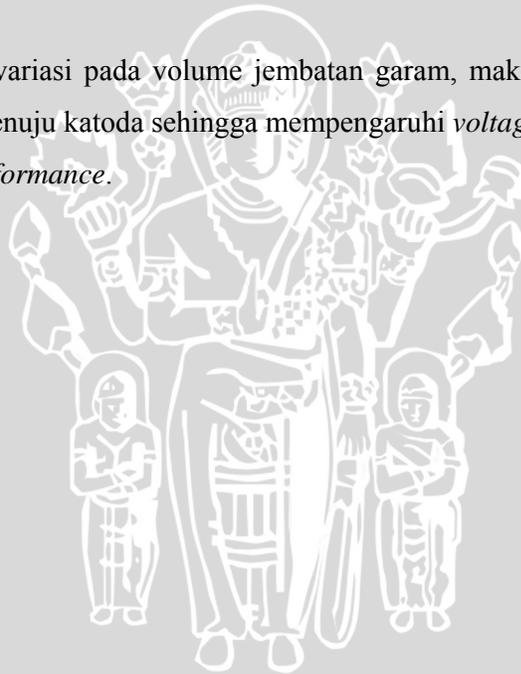
$$V_{\text{id}} = 1.229 - (-0,43) = 1,659 \text{ Volt} \quad (\text{Anonymous D, 2004:69})$$

Dapat diperoleh η dari *fuel cell* aktual adalah:

$$\eta_{\text{act}} = \frac{0,72(V_{\text{act}})}{V_{\text{id}}} = \frac{0,72.V_{\text{act}}}{1,659} = 0.434 \times V_{\text{act}}. \quad (\text{Anonymous D, 2004:69}) \quad (2.12)$$

2.16 Hipotesa

Dengan adanya variasi pada volume jembatan garam, maka akan berpengaruh pada jarak dari anoda menuju katoda sehingga mempengaruhi *voltage* dan efisiensi pada *Microbial Fuel Cell Performance*.



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian eksperimental (*experimental research*). Jenis penelitian ini digunakan untuk menguji pengaruh dari suatu perlakuan atau desain baru terhadap proses. Pengaruh dari beberapa perlakuan yang berbeda terhadap suatu percobaan akan dibandingkan sehingga diperoleh suatu kejadian yang saling berhubungan. Dengan cara ini akan di uji pengaruh variasi volume jembatan garam *microbial fuel cell performance* memanfaatkan limbah kulit pisang.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan November 2011 sampai selesai. Tempat yang digunakan dalam penelitian ini adalah Laboratorium Riset, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Variabel bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan oleh peneliti dan ditentukan sebelum penelitian dilakukan. Dalam penelitian ini variabel bebasnya adalah: volume jembatan garam dengan diameter yang sama yaitu $310,5 \text{ cm}^3$, $331,172 \text{ cm}^3$ dan $496,75 \text{ cm}^3$ yang akan mempengaruhi jarak antara anoda dan katoda.

2. Variabel terikat (*Dependent Variable*)

Variable terikat adalah variabel yang nilainya tergantung dari varibael bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat yang diamati pada penelitian ini adalah:

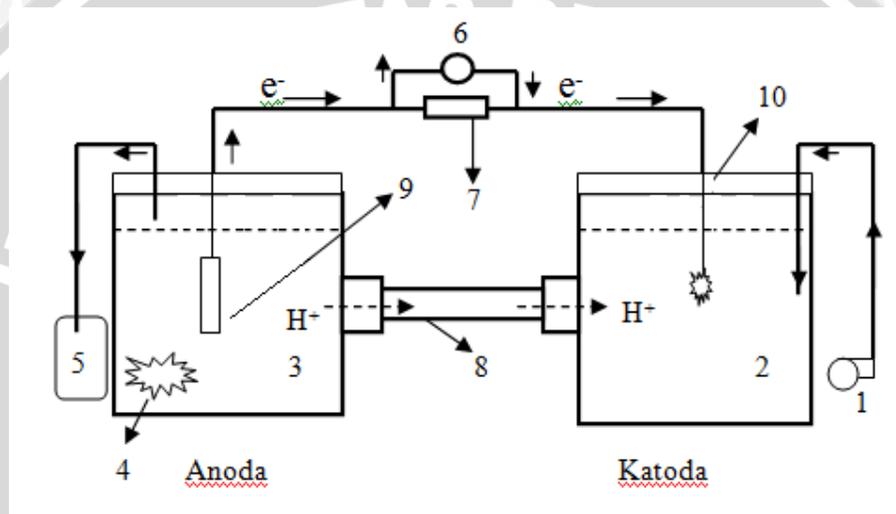
- Arus (*Current Density*) [mA]
- Voltage sel MFC [V]
- Efisiensi sel MFC [%]

3. Variabel terkontrol (*Controlled Variable*)

Variable terkontrol adalah variabel yang nilainya ditentukan peneliti dan dikondisikan konstan. Dalam penelitian ini variabel terkontrol adalah fraksi berat kulit buah pisang yang di haluskan yaitu 2 kg dan diameter dari volume jembatan garam yaitu 1½ inci.

3.4 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian yang digunakan pada penelitian ini terlihat seperti skema pada gambar 3.1 dan gambar 3.2



Keterangan Gambar:

1. Aerasi udara
2. Kotak plastik (kontainer katoda) berisi larutan penyangga K_2HPO_4 1M pH 7 (netral).
3. Kotak plastik (kontainer anoda) berisi limbah kulit buah pisang.
4. Bio-katalis bakteri *Pseudomonas putida*.
5. Kotak plastik berisi air pelepas biogas.
6. Alat ukur akusisi beda tegangan terhubung pada seperangkat *laptop*.
7. Tahanan (*resistor*) R 1k Ω
8. Jembatan Garam dengan variasi volume yang digunakan adalah 310,5 cm^3 cm, 331,172 cm^3 dan 496,75 cm^3 dengan diameter 1½ inci
9. Elektroda pada anoda menggunakan batang ferrit berbentuk silinder pejal.
10. Elektroda pada katoda menggunakan sabut *stainless steel*.

Gambar 3.1 Skema Instalasi



Gambar 3.2 Instalasi alat uji akan digunakan dalam penelitian

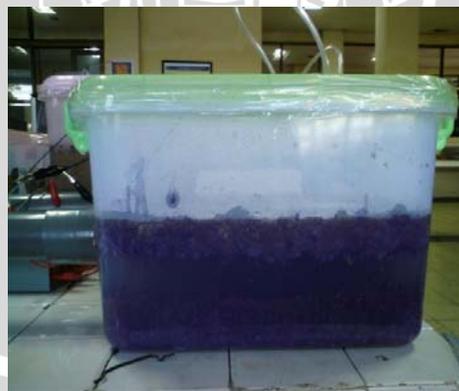
3.5 Alat dan Bahan Penelitian

Pengujian terhadap aktivitas bakteri anaerob pada limbah air kelapa sebagai medianya, dengan membuat *prototype reactor* MFC tipe H. (Berdasarkan prinsip kerja peralatan penelitian yang digunakan oleh Bruce Logan dan tim nya dari Penn State University).

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah:

1. Limbah kulit pisang

Cairan ini digunakan untuk bahan bakar yang akan dioksidasi pada anoda kontainer, dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Limbah kulit pisang pada anoda container

2. Larutan penyangga K_2HPO_4 1M dengan pH 7 (netral)

Larutan ini digunakan sebagai larutan elektrolit pengisi kontainer katoda sekaligus menjaga derajat keasaman tetap netral ($pH = 7$), dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.4 Larutan Buffer K_2HPO_4

Prosedur pembuatan larutan penyangga K_2HPO_4 :

- Melarutkan garam KOH seberat 1,12 gr ke dalam 100 mL aquades untuk mendapatkan 100 mL larutan KOH 0,2M.
- Mengencerkan larutan 6,66 mL H_2PO_4 15 M kedalam 100 mL aquades untuk mendapatkan larutan H_2PO_4 1 M.
- Mengencerkan larutan H_2PO_4 1 M kedalam 10 mL aquades untuk mendapatkan 100 mL larutan H_2PO_4 0,1 M.
- Mencampurkan larutan H_2PO_4 0,1 M dan KOH 0,2M kedalam wadah.
- Mengencerkan larutan penyangga K_2HPO_4 sesuai volume yang dibutuhkan.

3. Jembatan garam KCl 2M sebagai PEM (*Proton Exchange Membrane*)

Pipa digunakan untuk menukar ion positif dari kontainer anoda ke kontainer katoda. Pada penelitian ini, digunakan 3 macam bentuk variasi volume jembatan garam dengan diameter $1\frac{1}{2}$ inchi. Variasi volume yang digunakan adalah $310,5 \text{ cm}^3$ (15 cm), $331,172 \text{ cm}^3$ (30 cm), dan $496,75 \text{ cm}^3$ (45 cm). Dapat dilihat pada gambar 3.5 dan 3.6.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Gambar 3.5 Dimensi jembatan garam yang digunakan



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.6 Jembatan garam (salt bridge) dengan variasi volume (a) 310,5 cm³, (b) 331,172 cm³, (c) 496,75 cm³

Prosedur pembuatan jembatan garam:

- Menimbang garam KCl seberat 37 gr, 74 gr dan 111 gr (sesuai dengan volume jembatan garam).
 - Menimbang *powder* agar, seberat 1,9 gr, 3,8 gr dan 5,7 gr.
 - Mendapatkan aquades sebanyak 250 mL, 500 mL dan 750 mL.
 - Mengencerkan larutan agar *powder* dan garam KCl ke dalam aquades yang telah ditentukan.
 - Memanaskan larutan agar *powder* dan garam KCl hingga mendidih.
 - Menuangkan cairan jembatan garam ke dalam pipa jembatan garam.
 - Mendinginkan beberapa saat hingga agar jembatan garam mengeras.
4. Bio-katalis yang digunakan adalah bakteri *Pseudomonas Putida*

Mikroorganisme yang digunakan sebagai katalis yang untuk mempercepat proses oksidasi substrat bahan bakar pada kontaine anoda, dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Bakteri *pseudomonas putida*

Prosedur pengembangbiakan bakteri *pseudomonas*:

- Menimbang ekstrak *nutrient agar* (NA) seberat 5 gr
- Melarutkan NA yang telah ditimbang ke dalam 250 mL aquades.
- Memanaskan larutan NA hingga mendidih.
- Menuangkan cairan NA ke dalam media yang disediakan.
- Mendinginkan beberapa saat hingga agar NA mengeras.
- Mensterilisasi kawat *Ose* dengan memanaskan ujung kawat ke bara api lilin.

- Memindahkan isolat bakteri dari medium asal ke medium NA yang baru menggunakan kawat *Ose*.
- Menutup rapat media yang digunakan untuk pengembangbiakan bakteri

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Reaktor MFC tipe H

Reaktor kontainer terbuat dari plastik tertutup, kedap udara dimana antara bagian anoda dan katoda dihubungkan oleh jembatan garam. Dengan kapasitas volume tangki adalah 15 liter.

2. Aerasi udara

Alat ini digunakan sebagai pensuplai udara untuk membantu pelarutan udara (oksigen) di dalam larutan elektrolit pada katoda kontainer, dapat dilihat pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Aerasi udara (*blower*)

- | | |
|-------------------|--------------------------|
| a. Model : SE-303 | d. Kapasitas: 3,5 L /min |
| b. Merk : Amara | e. Arus : 2,5 A |
| c. Buatan : Japan | f. Tegangan : 220 Volt |

3. Multimeter Digital

Alat ini digunakan untuk mengukur beda tegangan yang keluar secara manual guna kalibrasi alat ukur akusisi, dapat dilihat pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Multimeter Digital

4. Komputer/laptop

Alat ini digunakan untuk pengolahan data *voltage* dari software data logger serta pengolahan data dengan program Microsoft Excel, sehingga didapatkan gambar-gambar grafik hubungan waktu dengan variabel terikat yang telah ditentukan, dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Laptop

5. Elektroda pada anoda

Batang elektroda ini terbuat dari grafit homogen dengan diameter 1cm dan panjang 18 cm. digunakan sebagai kutub negatif pada instalasi MFC, dapat dilihat pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Batang ferrit

- Diameter batang : 10 mm
- Panjang batang : 180 mm
- Bahan : Carbon
- Peletakan pada kontainer anoda

6. Elektroda pada katoda berupa sabut *stainless steel*

Sabut ini digunakan sebagai kutub positif pada kontainer katoda yang dapat menggantikan platina dengan biaya lebih terjangkau. Sabut yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 Sabut *stainless steel*

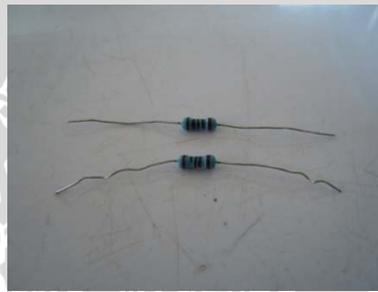
7. Alat ukur data Akusisi

Alat ukur ini digunakan untuk mengukur tegangan pada MFC dan temperatur pada kontainer anoda menggunakan *sensor lm35* dan *lv25p*, dapat dilihat pada gambar 3.13.



Gambar 3.13 Alat akusisi pencatat tegangan dan temperatur

8. Hambatan Luar



Coklat Emas
Hitam Orange

Gambar 3.14 Tahanan Luar

Hambatan yang digunakan adalah jenis hambatan tetap dengan warna gelang seperti di atas, dengan mengetahui kode warna dalam bentuk gelang warna dan cara pembacaannya pada *resistor* dimulai dari kiri, besarnya nilai kode warna sebagai berikut:

Hitam	: 0	Hijau	: 5
Cokelat	: 1	Biru	: 6
Merah	: 2	Ungu	: 7
Orange	: 3	Abu-abu	: 8
Kuning	: 4	Putih	: 9

Untuk kode warna toleransi pada gelang ke-4 dapat dilihat sebagai berikut:

Cokelat	: 1%
Merah	: 2%

Emas	: 5%
Perak	: 10%
Tanpa Gelang	: 20%

Cara Membaca nilai resistor pada 4 gelang ini, pada gelang pertama mewakili angka depan, gelang kedua mewakili angka selanjutnya, gelang ketiga mewakili nilai pengali, dan gelang keempat merupakan nilai toleransinya. Apabila kita menjumpai resistor yang mempunyai 4 gelang dengan warna di atas, maka membaca nilai hambatan pada resistor tersebut adalah:

- Pada gelang 1 berwarna merah ini berarti bernilai 0.
- Pada gelang 2 berwarna hijau ini berarti bernilai 1.
- Pada gelang 3 berwarna orange ini berarti bernilai 3, jadi faktor pengali 10 pangkat 3 = 1000.
- Pada gelang 4 berwarna emas berarti toleransi 5 persen.

sehingga nilai hambatan yang dapat dilihat pada gambar 3.14, diperoleh sebesar 1000 Ohm dengan toleransi 5%, dan berdasarkan pengukuran secara aktual besar hambatan tetap sebesar 995 Ohm.

9. Selang kapiler.

Selang ini digunakan untuk menghubungkan instalasi saluran buang biogas maupun saluran masuk udara dari *blower* terhadap tangki reaktor.

10. Solder.

Alat ini digunakan untuk menyambung dua komponen elektronik menggunakan timah. Solder yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.15.



Gambar 3.15 Solder timah

11. Plastisin.

Alat ini digunakan untuk menyekat dan menutup celah pada instalasi reaktor guna mendapatkan kondisi anaerob. Plastisin yang digunakan seperti pada gambar 3.16.



Gambar 3.16 Plastisin

12. Kawat Ose

Kawat ini digunakan untuk memindahkan bakteri dari media satu ke media yang lain. Alat yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.17.



Gambar 3.17 Kawat Ose

13. Indikator pH *universal*

Alat ini digunakan untuk derajat keasaman pada substrat anoda dan larutan katoda kontainer. Alat yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.18.



Gambar 3.18 Indikator pH *universal*

3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mempelajari hal-hal yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan sehingga dapat menguatkan dalam pengambilan hipotesa serta memperjelas hasil penelitian.

3.6.2 Perancangan Instalasi

Perancangan instalasi dimulai dengan membuat dudukan dari alat-alat yang akan dirakit.

3.6.3 Pembuatan Alat

Proses pembuatan alat yaitu:

1. Membuat reaktor MFC tipe H
2. Melakukan perlakuan terhadap elektroda ferrit.
3. Membuat larutan penyangga (*buffer*) sebagai pengisi katoda.
4. Membuat jembatan garam KCl 2M sebagai membrane penukar proton.
5. Membuat alat ukur akusisi beda tegangan dan temperatur serta penguat arus.
6. Mengisolasi bakteri *Pseudomonas Putida* pada medium NA.

3.6.4 Metode Pengambilan Data

Cara atau urutan metode pengambilan data yaitu:

1. Untuk mendapatkan data yang diinginkan maka reaktor dipasang sedemikian rupa seperti gambar skema instalasi gambar 3.1
2. Pemasangan alat ukur akusisi dan mengatur posisinya untuk mengukur tegangan yang dihasilkan *microbial fuel cell*.
3. Dilakukan pengamatan pada hari ke 1 sampai hari ke 7 hingga MFC menghasilkan arus yang optimum.
4. Pengambilan data dimulai dengan memasukkan batang elektroda pada bak penampung (anoda dan katoda) kemudian menyalakan pompa udara. Catat angka yang ditunjukkan alat ukur beda tegangan terhadap waktu.

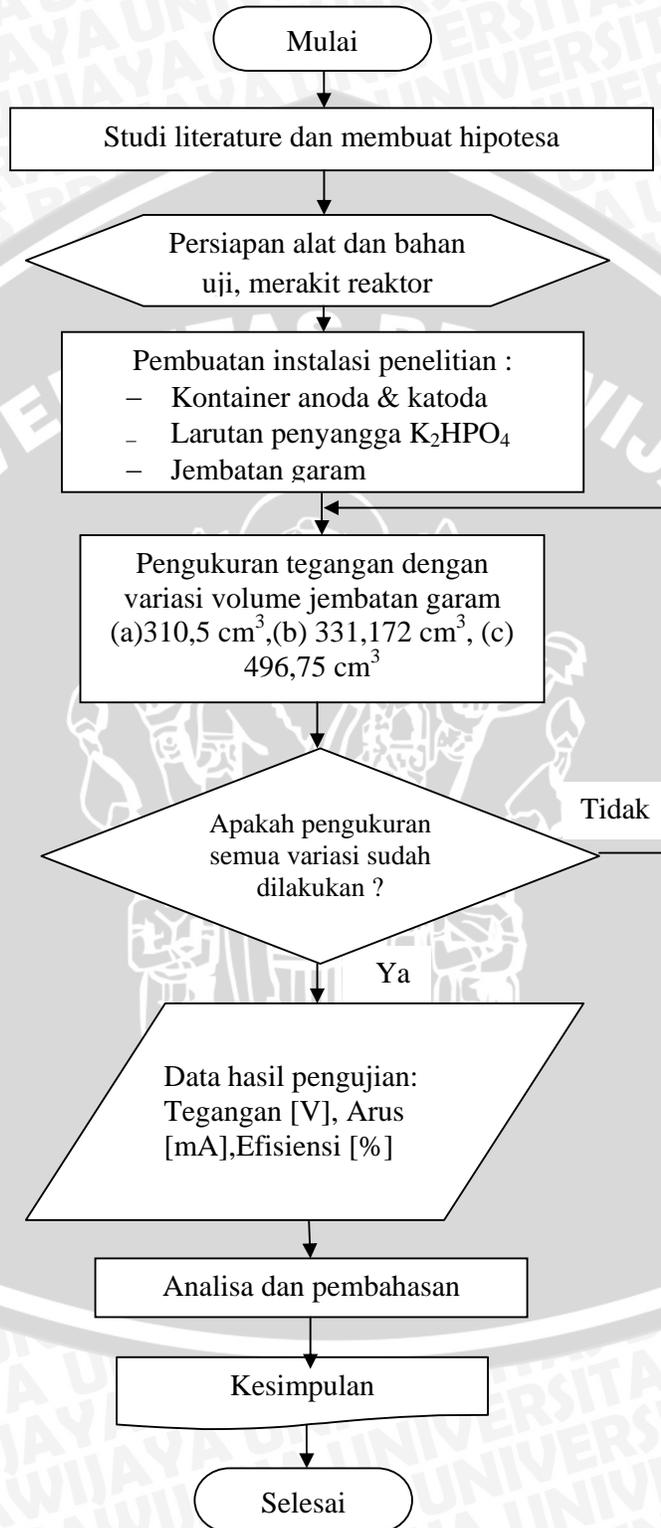
3.7 Rancangan Penelitian

Model rancangan penelitian dilakukan terlebih dahulu untuk mengetahui hubungan pengaruh variasi panjang jembatan garam terhadap unjuk kerja *Microbial Fuel Cell* agar hasil data yang diperoleh dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah yang dihadapi. Dalam penelitian ini diketahui data awal suhu ruang, perubahan energi bebas gibbs tiap senyawa yang mengalami reaksi, dan derajat keasaman (pH) pada anoda dan katoda kontainer.

Rancangan penelitian ini merupakan cara untuk menentukan keberhasilan suatu penelitian atau eksperimen dan juga menentukan analisa yang tepat sehingga didapat suatu analisa dan kesimpulan yang tepat.

3.8 Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah diagram alir penelitian yang dilakukan:



Gambar 3.19 Diagram alir penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengolahan dan Analisa Data

4.1.1 Data Hasil Penelitian

Pada penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah lama waktu pengoperasian dengan variasi 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7 hari. Sedangkan variabel bebasnya adalah volume jembatan garam dengan diameter yang sama. variasi yaitu ukuran volume jembatan garam $310,5 \text{ cm}^3$ (15 cm), $331,172 \text{ cm}^3$ (30 cm) dan $496,75 \text{ cm}^3$ (45 cm).

Data yang digunakan merupakan hasil pembangkitan *voltage* sel *Microbial Fuel Cell* (MFC) selama penelitian, yang dicatat dengan menggunakan alat ukur akuisisi (data aquisisi) tegangan 3 channel & suhu. Selanjutnya alat tersebut dihubungkan dengan kabel *personal* komputer melalui *port* LPT- pada *input-output* interfacenya. Kalibrasi dilakukan dengan mengukur tahanan yang dihasilkan pada *input* alat ukur akuisisi menggunakan digital sebelum proses pengambilan data dilakukan.

Data hasil penelitian ditampilkan dalam format program *Microsoft Excel* di computer dengan demikian penampilan grafik juga menggunakan software tersebut. Tegangan yang terukur kemudian dikonversi menjadi arus dengan menggunakan hukum Ohm persamaan 2.1 dan *power density* dihitung dengan persamaan 2.4. Pengambilan data dilakukan selama 7 hari dengan frekwensi pencatatan 30 data per-menit setiap kali pengambilan data dilakukan dan nilai rata-ratanya digunakan untuk memplot grafik hasilnya. Data hasil penelitian bisa di lihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian pada Variasi Volume Jembatan Garam

No.	Waktu(Jam)	Voltage Sel (mV)		
		Volume jembatan garam 310,5 cm ³	Volume jembatan garam 331,172 cm ³	Volume jembatan garam 496,75 cm ³ .
1	2	0,3	0,3	0,3
2	4	0,4	0,2	0,4
3	6	0,4	0,4	0,4
4	8	0,37	0,5	0,45
5	10	0,43	0,55	0,49
6	12	0,38	0,42	0,51
7	14	0,4	0,5	0,53
8	16	0,43	0,44	0,45
9	18	0,45	0,48	0,48
10	20	0,5	0,5	0,47
11	22	0,42	0,45	0,39
12	24	0,5	0,57	0,4
13	26	0,5	0,34	0,44
14	28	0,6	0,4	0,4
15	30	0,5	0,5	0,49
16	32	1,02	0,41	0,41
17	34	1,44	0,39	0,38
18	36	1,5	0,57	0,48
19	38	1,07	0,49	0,4
20	40	1,45	0,58	0,55
21	42	1,2	0,61	0,64
22	44	1,59	0,61	0,61
23	46	1,55	0,7	0,63
24	48	2,07	0,66	0,66
25	50	1,89	0,65	0,65
26	52	1,7	0,66	0,61
27	54	2,5	0,72	0,69
28	56	2,60	0,7	0,7
29	58	2,1	0,75	0,75
30	60	1,89	0,73	0,78
31	62	2,65	0,76	0,76
32	64	2,7	0,8	0,77
33	66	3,03	0,74	0,74
34	68	4,8	0,82	0,9
35	70	5,5	0,8	0,81
36	72	10,1	0,84	0,87
37	74	39,65	0,86	0,85
38	76	39,76	0,79	0,77
39	78	40,12	0,87	0,84

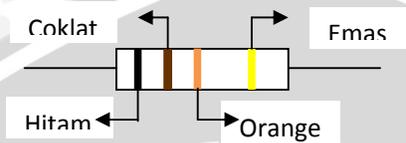
40	80	37,78	0,9	0,5
41	82	38,65	0,92	1,02
42	84	39,76	0,87	1,44
43	86	38,71	0,94	1,5
44	88	39,56	0,91	1,07
45	90	40,7	1,02	1,45
46	92	39,8	1,07	1,2
47	94	40,6	1,15	1,59
48	96	39,5	34,35	1,55
49	98	40,76	39,78	2,07
50	100	38,71	38,65	1,89
51	102	41,1	39,76	2,00
52	104	39,4	38,71	2,5
53	106	40,25	39,8	2,60
54	108	42,75	38,65	3,1
55	110	52,59	39,76	6,07
56	112	59,20	40,03	10,1
57	114	58,25	41,25	15,8
58	116	65,75	40,32	16,44
59	118	69,35	41,19	18,5
60	120	75,8	45,03	39,56
61	122	102,6	48,25	38,71
62	124	100,2	47,32	39,8
63	126	104,4	47,19	39,6
64	128	109,5	49,4	39,5
65	130	105,6	50,31	38,9
66	132	105,6	52,31	39,7
67	134	100,2	51,24	39,95
68	136	109,4	50,31	38,35
69	138	115,24	52,31	39,78
70	140	120,4	51,24	38,65
71	142	120,72	52,53	39,76
72	144	123,82	55,04	38,71
73	146	130,56	63,23	39,8
74	148	129,2	67,16	40,22
75	150	131,77	69,10	40,5
76	152	135,88	72,09	39,95
77	154	139,12	78,06	39,46
78	156	145,12	77,88	39,77
79	158	144,44	79,02	39,68
80	160	142,82	75,5	40,35
81	162	150,52	80,22	40,5
82	164	145,88	76,74	39,7
83	166	147,22	77,32	40,25
84	168	149,24	78,63	40,12



4.1.2. Perhitungan Data

Perhitungan data dilakukan untuk mencari nilai besaran-besaran yang diperlukan untuk menentukan unjuk kerja *Microbial Fuel Cell* tipe H. Berikut ini adalah contoh perhitungan data hasil penelitian untuk volume jembatan garam C (Volume jembatan garam = 496,75 cm³) dan pada hari ke-7. Contoh perhitungan untuk data terbesar dengan volume jembatan terbesar

a. Hambatan Luar



Hambatan yang digunakan adalah jenis hambatan tetap dengan warna gelang seperti di atas, dengan mengetahui kode warna dalam bentuk gelang warna dan cara pembacaannya pada resistor dimulai dari kiri, besarnya nilai kode warna sebagai berikut:

Hitam	=	0	Hijau	=	5
Cokelat	=	1	Biru	=	6
Merah	=	2	Ungu	=	7
Orange	=	3	Abu-abu	=	8
Kuning	=	4	Putih	=	9

Untuk kode warna toleransi pada gelang ke-4 dapat dilihat sebagai berikut:

Cokelat	=	1%
Merah	=	2%
Emas	=	5%
Perak	=	10%
Tanpa Gelang	=	20%

sehingga nilai hambatan yang diperoleh sebesar 1000 Ohm dengan toleransi 5%, dan berdasarkan pengukuran secara aktual besar hambatan tetap sebesar 995 Ohm.

b. Arus

Arus didapat dari:

$$I = \frac{V}{R}$$

$$I = \frac{40,5 \text{ mvolt}}{1000 \text{ ohm}} = 0,0405 \text{ mili Ampere}$$

c. Daya MFC yang dibangkitkan dapat dihitung dengan:

$$P = \frac{E^2_{MFC}}{A_{An} R_{Ext}}$$

$$P = \frac{40,5^2 \text{ mili ampere}}{0,01413 \text{ mm}^2 \times 1000 \text{ ohm}} = 116,082 \text{ miliWatt} / \text{m}^2$$

d. Efisiensi Ideal dan voltage sel ideal dapat diperoleh dengan:

$$\eta_{id} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

$$\eta_{id} = \frac{(6(-237,18)+6(-394,4)-(-900))}{(6(-285,83)+6(-393,52)-(-60))} = 0,72$$

$$V_{sel} = \Delta E_e \text{ dan } \Delta E_e = E_{kat} - E_{an}$$

$$V_{id} = 1.229 - (-0,43) = 1,659 \text{ Volt}$$

e. Sehingga efisiensi turbin dapat diperoleh dengan:

$$\eta = \frac{\text{energi berguna}}{\Delta H} = \frac{\text{tenaga berguna}}{\Delta G / 0,72} = \frac{\text{Volt}_{act. arus}}{\text{Volt}_{id. arus} / 0,72}$$

$$\eta = \frac{0,72(V_{act})}{V_{id}} = \frac{0,72 \cdot V_{act}}{1,659} = 0,434 \times 0,0405 = 0,0176 = 1,76\%$$

4.1.3 Data Hasil Perhitungan

Tabel 4.2 Data Hasil Perhitungan Volume Jembatan Garam 310,5 cm³ (15 cm)

no	waktu (hari)	Voltage Sel (mV)	Rapat Arus (mA)	Efisiensi Sel (%)	Daya Sel (mW/m ²)
1	1	0,41	0,00	0,02	0,02
2	2	1,20	0,00	0,09	0,30
3	3	3,45	0,01	0,44	7,22
4	4	39,55	0,04	1,76	117,23
5	5	51,99	0,07	3,29	406,63
6	6	109,81	0,12	5,37	1085,02
7	7	152,85	0,15	6,53	1603,42

Tabel 4.3 Data Hasil Perhitungan Volume Jembatan Garam 331,172 cm³ (30\ cm)

no	waktu (hari)	Voltage Sel (mV)	Rapat Arus (mA)	Efisiensi Sel (%)	Daya Sel (mW/m ²)
1	1	0,44	0,00	0,02	0,02
2	2	0,52	0,00	0,03	0,03
3	3	0,75	0,00	0,04	0,05
4	4	3,72	0,03	1,49	83,50
5	5	40,24	0,04	1,95	143,50
6	6	50,62	0,05	2,38	214,39
7	7	68,13	0,08	3,48	455,43

Tabel 4.4 Data Hasil Perhitungan Volume Jembatan Garam 496,75 cm³ (45 cm)

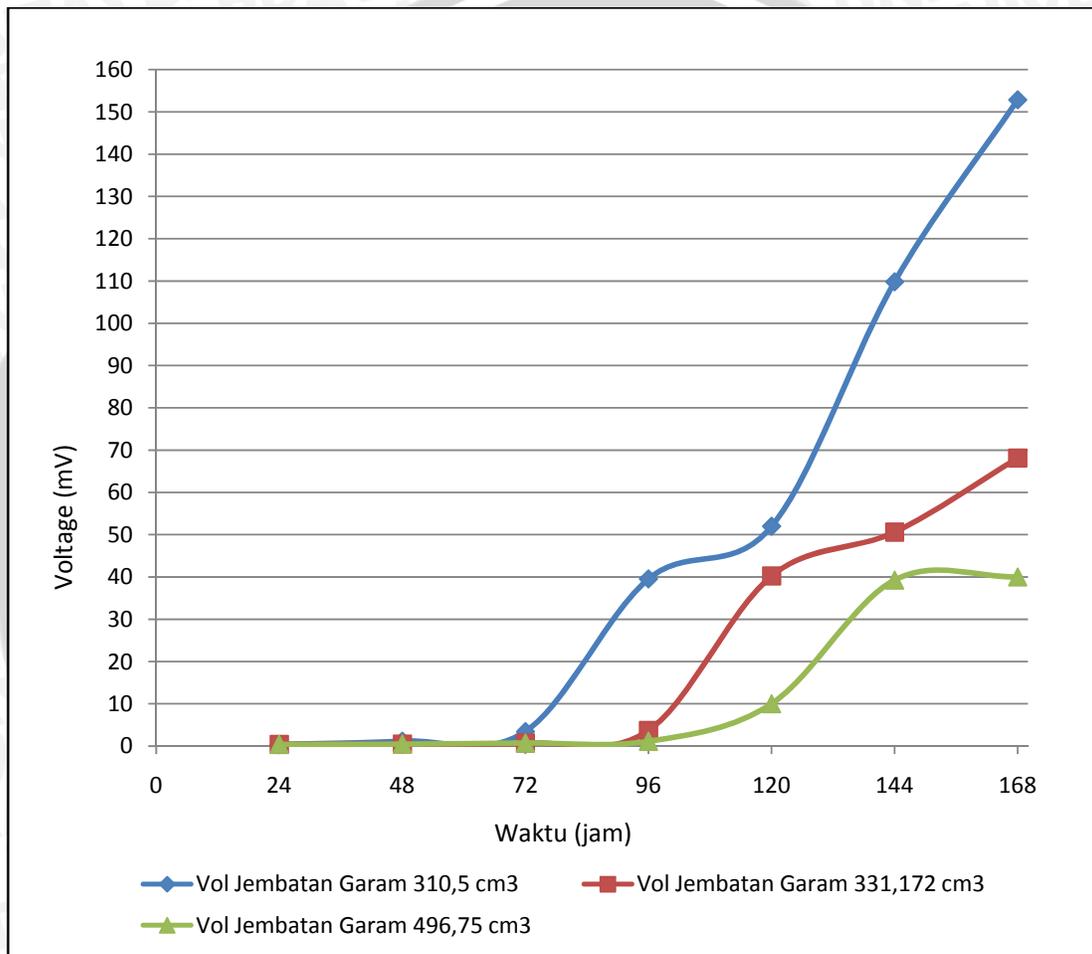
no	waktu (hari)	Voltage Sel (mV)	Rapat Arus (mA)	Efisiensi Sel (%)	Daya Sel (mW/m ²)
1	1	0,44	0,00	0,02	0,02
2	2	0,51	0,00	0,03	0,03
3	3	0,75	0,00	0,04	0,06
4	4	1,15	0,00	0,07	0,18
5	5	10,05	0,03	1,72	110,75
6	6	39,28	0,04	1,73	112,95
7	7	40,02	0,04	1,76	116,08

4.2 Grafik dan Pembahasan

Data perhitungan dalam tabel 4.2, 4.3 dan 4.4 disajikan dalam bentuk grafik untuk menganalisa masalah dalam penelitian ini. Berikut disajikan grafik dan pembahasannya seperti pada gambar 4.1, 4.2, 4.3 dan 4.4.

4.2.1 Analisa Grafik Hubungan Volume Jembatan Garam terhadap Produksi

Voltage Sel Rata-Rata.

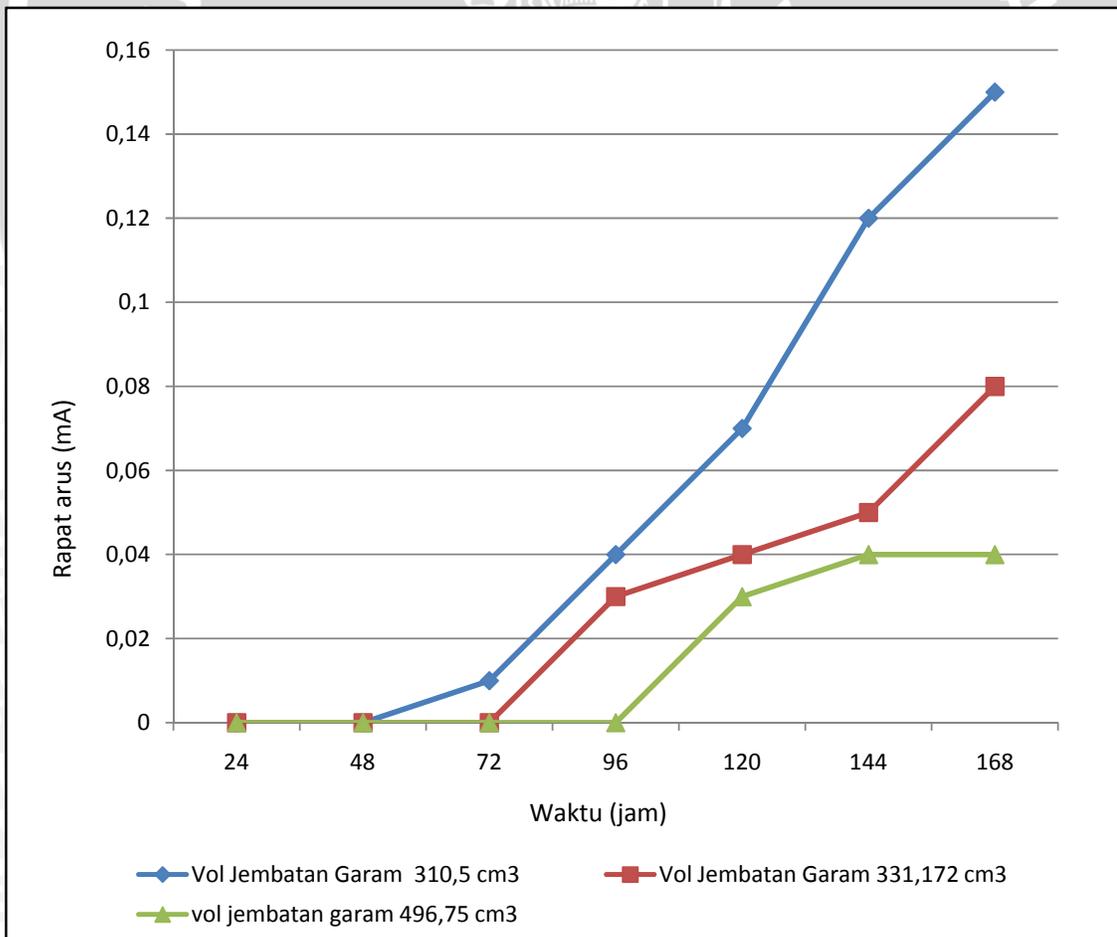


Gambar4.1 Grafik Hubungan antara Volume Jembatan Garam terhadap Produksi *Voltage* Sel

Hubungan antara volume jembatan garam terhadap produksi *voltage* sel rata – rata (mV) ditunjukkan pada gambar 4.1 yang dihasilkan dengan variasi volume jembatan garam. *Voltage* yang dihasilkan oleh sebuah sel elektrokimia pada kondisi standar adalah harga rata-ratanya, seperti baterai tertera *voltage* 1,5 Volt. Karena *fuel cell* juga merupakan sebuah sel elektrokimia, maka dapat diambil harga rata-rata *voltage* pengoperasiannya tiap 24 jam.

Pada grafik terlihat bahwa volume jembatan garam juga berpengaruh terhadap voltage sel rata-rata yang dihasilkan. Pada volume jembatan garam 496,75 cm³, voltage sel rata-rata yang dihasilkan paling rendah dibandingkan volume jembatan garam yang lain, begitu pula pada volume jembatan garam 331,172 cm³ nilainya masih di bawah volume jembatan garam 310,5 cm³. Hal ini disebabkan semakin besarnya volume jembatan garam dengan diameter jembatan yang sama mengakibatkan jarak antara katoda dan anoda akan semakin bertambah sehingga mempengaruhi jarak yang dilalui elektron dari anoda menuju katoda dan juga mempengaruhi transfer ion H⁺ dari anoda menuju katoda. Oleh karena itu meskipun elektron yang mampu dibangkitkan oleh mikroorganismenya semakin besar tiap satuan waktu tetapi jika jarak pemisah anoda dan katoda semakin renggang maka *voltage* yang dihasilkan akan menurun dikarenakan adanya hambatan *ohmic* pada jarak tersebut (Cheng et al, 2006).

4.2.2 Analisa Grafik Hubungan Volume Jembatan Garam terhadap Arus yang Dihasilkan



Gambar4.2 Grafik Hubungan antara Volume Jembatan Garam terhadap Rapat Arus

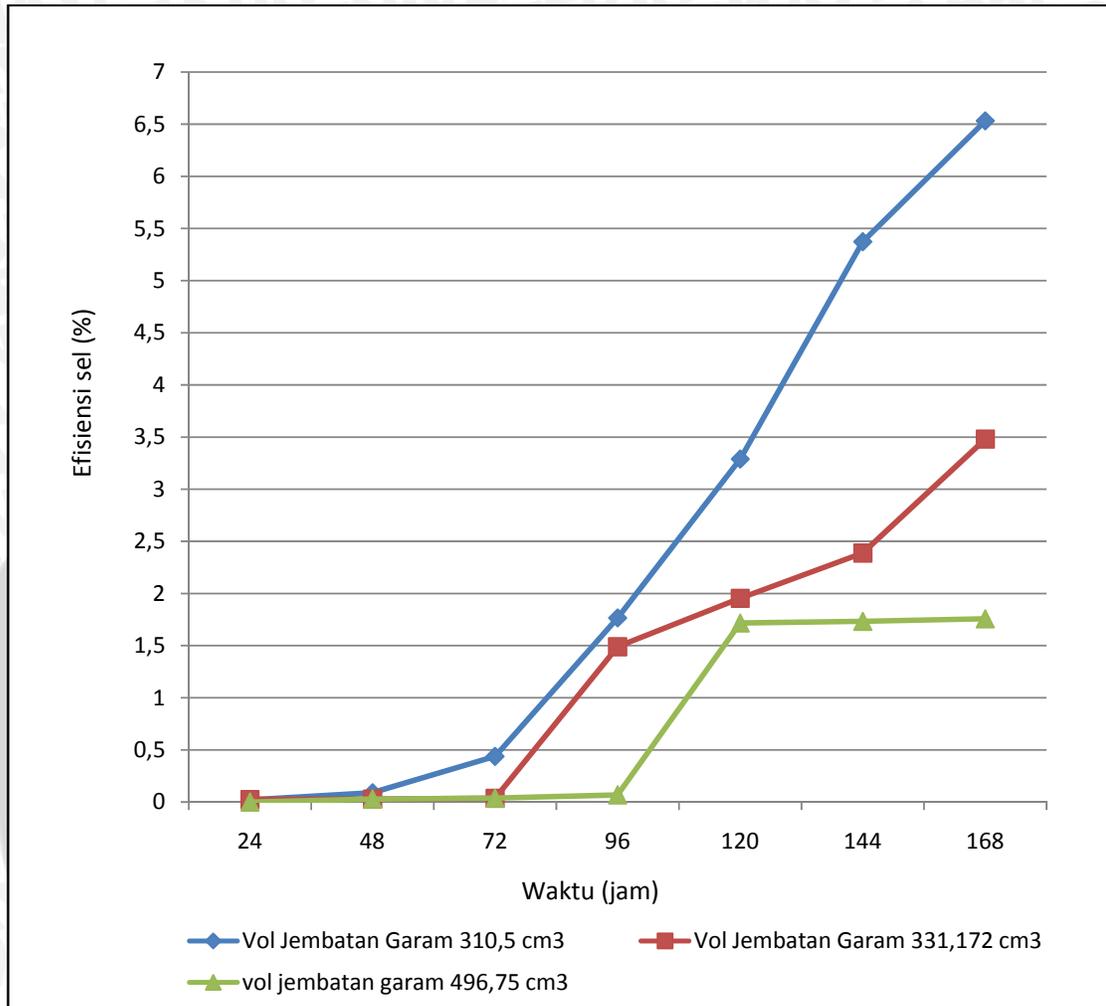
Hubungan antara volume jembatan garam akan berpengaruh terhadap rapat arus (mA/m^2) ditunjukkan pada gambar 4.2 dan terjadi pada semua variasi volume jembatan garam. Rapat arus yang didapatkan ini dikonversi dari *voltage* yang terukur dengan menggunakan hukum Ohm dijelaskan melalui persamaan:

$$E = I \times R_{\text{Ext}} \quad (\text{Logan, 2008: 29}) \quad (2.1)$$

Dimana besar hambatan luar yang digunakan sebesar 1k Ohm. Semakin besar nilai *voltage* sel yang terukur maka semakin besar pula rapat arus yang dihasilkan, dengan nilai hambatan luar dibuat konstan.

Pada grafik terlihat bahwa volume jembatan garam juga berpengaruh terhadap rapat arus yang dihasilkan. Pada volume jembatan garam $496,75 \text{ cm}^3$, rapat arus yang dihasilkan paling rendah dibandingkan volume jembatan garam yang lain, begitu pula pada volume jembatan garam $331,172 \text{ cm}^3$ nilainya masih di bawah volume jembatan garam $310,5 \text{ cm}^3$. Hal ini disebabkan karena jarak antar anoda katoda semakin rentang maka akan mempengaruhi transfer elektron dan ion H^+ sehingga menyebabkan kerugian tahanan *ohmic* yang berpengaruh pada rapat arus dengan tahanan dalam 1k ohm (Cheng et al, 2006).

4.2.3 Analisa Grafik Hubungan Volume Jembatan Garam terhadap Efisiensi Sel.



Gambar4.3 Grafik Hubungan antara Volume Jembatan Garam terhadap Efisiensi Sel

Berdasarkan perhitungan efisiensi sel seperti yang ditunjukkan pada subbab 4.1.3, Seperti terlihat pada grafik 4.4 bahwa semakin besar volume jembatan garam akan berpengaruh pada peningkatan efisiensi sel dan peningkatan itu terjadi pada semua variasi volume jembatan garam, namun besarnya efisiensi yang dihasilkan berbeda – beda sesuai dengan masing – masing volume jembatan garam. Semakin besar volume jembatan garam maka akan semakin lama transfer ion H^+ yang mengalir dari anoda menuju katoda yang mengakibatkan *voltage* sel yang dihasilkan rendah kemudian akan berpengaruh pada efisiensi sel. Adapun hubungan antara *voltage* yang dihasilkan dengan efisiensi yang didapatkan terlihat pada persamaan:

$$\eta = \frac{0,72(V_{act})}{V_{id}} = \frac{0,72 \cdot V_{act}}{1,659} = 0,434 \times V_{act} \quad (\text{Anonymous D, 2004:69}) \quad (2.12)$$

Dengan kata lain *voltage* listrik berpengaruh langsung terhadap efisiensi sel yaitu dari persamaan (2.12) di atas, sehingga terdapat kecenderungan yang hampir sama antara grafik hubungan volume jembatan garam dengan *voltage* sel rata-rata dan volume jembatan garam dengan efisiensi sel.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa volume jembatan garam berpengaruh terhadap performansi *Microbial Fuel Cell* tipe-H, dimana:

- Untuk volume jembatan garam yang bervariasi maka akan mempengaruhi *voltage* sel dan produksi listrik pada performansi *Microbial Fuel Cell* (MFC).
- *Voltage* sel terbesar adalah 150,52 mV dengan tahanan 1k Ohm dan daya terbesar yang diperoleh adalah 1603,42 mWatt pada *Microbial Fuel Cell* (MFC) dengan volume jembatan garam 310,5 cm³.
- Limbah kulit buah pisang dapat digunakan untuk bahan bakar MFC dengan memanfaatkan isolat murni bakteri *Pseudomonas putida*.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan disarankan untuk:

1. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh jenis bakteri aerob pada kontainer anoda terhadap unjuk kerja.
2. Dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh diameter jembatan garam terhadap kemampuan *Voltage generation self starting* secara eksperimental.
3. Dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap material elektroda pada anoda.
4. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh perkembangbiakan bakteri aerob pada kontainer anoda terhadap unjuk kerja.

DAFTAR PUSTAKA

Abbie Groff's; 2011: *Microbial Fuel Cell project (PA, USA)*;

http://www.engr.psu.edu/ce/enve/logan/bioenergy/mfc_make_cell.html

(diakses 25 November 2011)

Anonymous A; 2010: *Energy Efficiency & renewable Energy. Us Department of Energy*;

http://www.fueleconomy.gov/feg/fc_pics/fuel_cell_still.gif

(diakses 25 November 2011)

Anonymous B; 2011: *Fuel Cell*; http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell

(diakses 25 November 2011)

Anonymous C; 2011: *Microbial Energy Solution*;

<http://microbialenergysolutions.weebly.com/our-solution.html>

(diakses 25 November 2011)

Anonymous D; 2004: *Fuel Cell Handbook 8th Ed*; EG&G Technical Services Inc, West Virginia.

Arsana, Made Ery; 2010: *Use The Microbial Fuel Cell Technology to Create Electricity From*

Coconut Wastewater; Thesis ; Universitas Brawijaya, Malang

Anonymous; 2004: *Fuel Cell Handbook 8th Ed*; EG&G Technical Services Inc, West Virginia

Chang et al; 2006: *Electrochemically Active Bacteria (EAB) and Mediator-Less Microbial Fuel*

Cells. J. Microbial Biotechnol: 163-177

Cheng S, Liu H, dan Logan BE; 2006^b: *Power densities using different cathode catalysis (Pt and*

CoTMPP) and polymer binders (Nation and PTFE) in single chamber microbial fuel

cell. J. Environ. Science Technology 40: 364-369.

Christinemerrick; 2007: *Microbial fuel cells*; iGEM 2007 Wiki.

Eniya D; 2007: Mass Transfer Study on Polymer Electrolyte Fuel Cell;

<http://teknologi.kompasiana.com/terapan/2010/01/12/serial-otak-indonesia-6-fuel-cell-ala-indonesia/>

(diakses 21 November 2011)

Liu et al; 2004: *Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell* 2004: 38, 2281-2285

Liu H, Cheng S, dan Logan BE; 2005: *power generation in fed-batch microbial fuel cell as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration*. J. Environmental Science and Technology 39: 5488-5493

Logan BE; 2004: *Extracting hydrogen and electricity from renewable resources [review]*. J. Environmental Science and Technology 38:160A-167A.

Logan BE; 2008. *Microbial Fuel Cell*. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd: 29, 44

Logan BE & Liu, Hong; 2004: *Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell*; The Penn State Hydrogen Energy Center, Pennsylvania

Madigan, Thomas D., Michael T. Madigan, John M. Martinko & Jack Parker; 1997: *Biology of Microorganisms*; 8th Edition. Prentice Hall International Inc, New Jersey.

Merrit, Ed; 2010: *Sainssagansa*;

<http://majalahpendidikanmerahputih.wordpress.com/category/sainssagansa/>

(diakses 21 November 2011)

Min B dan Logan BE; 2004: *Continous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell*. J. Environmental Science and Technology 38: 5809-5814.

Rabaey et al; 2005: *Microbial ecology meets electrochemistry*; International Society for Microbial Ecology Inc, USA

Resty T.; 2010: *Penyetaraan Reaksi Redoks dan Aplikasinya*; <http://www.slideshare.net/kimiaunib/reaksi-redoks>
(diakses 21 November 2011)

Saroso Hadi; Desember 1998: *Pemanfaatan Kulit Pisang dengan Cara Fermentasi untuk Membuat Alkohol*. Teknik Kimia Politeknik Universitas Brawijaya. Majalah Bestek edisi 06/TH.VI/, 1998

Summers, Ryan; 2011: *Bakteri juga Doyan Kopi*; <http://ranisuhanda9.blogspot.com/2011/05/bakteri-juga-doyan-kopi.html>.
(diakses 29 juni 2011)

Smithsonian; 2008: *Fuel Cell Basics*; <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/basics.htm>

Wiens, Ben; 2003: *The Future of Fuel Cells*; Ben Wiens Energy Science Inc, USA

Susanto, Yunan Oka; 2011: *Pengaruh Variasi Bentuk Anoda Terhadap Karakteristik Microbial Fuel Cell Memanfaatkan Limbah Cair Tahu*; Universitas Brawijaya, Malang.



LAMPIRAN



Lampiran 1. Tabel Perubahan Energi Bebas Pembentukan Standar

Tabel Perubahan Energi Bebas Pembentukan Standar:

Senyawa	ΔG_f^0		Senyawa	ΔG_f^0	
	Kkal/mol	KJ/mol		Kkal/mol	KJ/mol
H ₂ O(l)	-56,7	-237,0	CH ₃ Cl(g)	-19,6	-82,0
HCl(g)	-22,7	-95,0	CCl ₄ (c)	-33,3	-139
H ₂ S(g)	-7,89	-33,0	C ₆ H ₁₂ O ₆	-215	-900
NO ₂ (g)	12,4	51,9	Al ₂ O ₃ (p)	-376,8	-1577
NH ₃ (g)	-3,97	-16,6	BaO(p)	-350,2	-1465



Lampiran 2. Tabel Sifat Termodinamika pada 25⁰C

Unsur atau senyawaan	ΔH_f° kJ/mol	ΔG_f° kJ/mol	S° kJ/(mol \times K)
Br ₂ (l)	0	0	0.1522
Br ₂ (g)	30.91	3.14	0.2454
BrCl(g)	14.6	-0.96	0.2400
C(s)	0	0	0.005694
CH ₄ (g)	-74.81	-50.84	0.1863
C ₂ H ₂ (g)	226.7	209.2	0.2008
C ₂ H ₄ (g)	52.26	68.24	0.2192
C ₂ H ₆ (g)	-84.68	-32.9	0.2295
C ₆ H ₆ (l)	48.99	124.3	0.1733
CH ₃ NH ₂ (g)	-23.0	32.3	0.2426
CH ₃ OH(l)	-239.0	-166.8	0.1272
CH ₃ OH(g)	-201.1	-162.4	0.2317
CO(g)	-110.52	-137.3	0.1979
CO ₂ (g)	-393.52	-394.40	0.2137
CS ₂ (g)	117.1	66.90	0.2378
Cl ₂ (g)	0	0	0.2230
ClF(g)	-54.48	-55.94	0.2178
F ₂ (g)	0	0	0.2027
H ₂ (g)	0	0	0.1306
HBr(g)	-36.4	-53.51	0.1986
HCl(g)	-92.31	-95.30	0.1868
HF(g)	-271.1	-273.2	0.1737
HI(g)	26.5	1.7	0.2065
HCN(g)	135	125	0.2017
HN ₃ (g)	294	328	0.2389
H ₂ O(l)	-285.83	-237.18	0.06991
H ₂ O(g)	-241.82	-228.59	0.1887
H ₂ S(g)	-20.2	-33.1	0.2058
Hg(l)	0	0	0.07602
Hg(g)	61.32	31.85	0.1748
HgO(s)	-90.83	-58.57	0.07029
I ₂ (s)	0	0	0.1161
I ₂ (g)	62.44	19.36	0.2606
ICl(g)	17.8	-5.44	0.2474
N ₂ (g)	0	0	0.1915
NH ₃ (g)	-46.11	-16.49	0.1923
NO(g)	90.25	86.57	0.2107
NO ₂ (g)	33.2	51.30	0.2400
N ₂ O ₄ (g)	9.16	97.82	0.3042
NaCl(s)	-411.0	-384.0	0.07238
NaCl(aq) ^a	-407.1	-393.0	0.115
O ₂ (g)	0	0	0.2050
O ₃ (g)	143	163	0.2388
S(s)	0	0	0.0319
S(g)	277.4	236.9	0.1677
SO ₂ (g)	-296.83	-300.19	0.2481
SO ₃ (g)	-395.7	-371.1	0.2566

a Larutan ini larutan 1 molal ideal.



Lampiran 3. Daftar Reduksi Standar

Half reaction	Eo [V]
$6\text{CO}_2 + 24\text{H}^+ + 24\text{e}^- = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{H}_2\text{O}$	-0.43
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	-0.41
$\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- = \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	-0.38
$\text{NAD}^+ + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{NADH} + \text{H}^+$	-0.32
$\text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{e}^- = \text{CH}_3\text{COO}^- + 3\text{H}_2\text{O}$	-0.29
$\text{CO}_{2(\text{g})} + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{CH}_{4(\text{g})} + 2\text{H}_2\text{O}$	-0.25
$\text{S}_{(\text{s})} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{S}_{(\text{g})}$	-0.24
$\text{SO}_4^{2-} + 9\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	-0.22
pyruvate + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- =$ lactate	-0.19
$\text{FeOOH}_{(\text{s})} + \text{HCO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{FeCO}_{3(\text{s})} + 2\text{H}_2\text{O}$	-0.05 ^a
$\text{CH}_3\text{SOCH}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{CH}_3\text{SCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	0.16
$\text{NO}_3^- + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{NH}_4^+ + 3\text{H}_2\text{O}$	0.36
$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	0.42
$\text{MnO}_{2(\text{s})} + \text{HCO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{MnCO}_{3(\text{s})} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.52 ^a
$\text{CHCl}_3 + \text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{CH}_2\text{Cl}_2 + \text{Cl}^-$	0.56
$\text{CCl}_4 + \text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{CHCl}_3 + \text{Cl}^-$	0.67
$2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10\text{e}^- = \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	0.74
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$	0.76
$\text{O}_{2(\text{g})} + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	0.82
$\text{CCl}_3\text{CCl}_3 + 2\text{e}^- = \text{CCl}_2\text{CCl}_2 + 2\text{Cl}^-$	1.13
$2\text{HOCl} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Cl}^{2-} + \text{H}_2\text{O}$	1.18

^abased on $[\text{HCO}_3^-] = 10^{-3}\text{ M}$; $[\text{H}^+] = 1\text{ M}$

Sumber : Daniel P. Y. Chang, 2004
 (www.cape.canterbury.ac.nz/courses/contrlnz/Design4.ppt)



Lampiran 4. Tabel Potensial Reduksi Standar E⁰ (Volt)

Pasangan (oks/red)	Reaksi katode (reduksi)	E ⁰ _{red} , Volt
N ₂ /HN ₃	3N ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → 2HN ₃	-3.09
Li ⁺ /Li	Li ⁺ + e ⁻ → Li	-3.04
K ⁺ /K	K ⁺ + e ⁻ → K	-2.92
Rb ⁺ /Rb	Rb ⁺ + e ⁻ → Rb	-2.92
Cs ⁺ /Cs	Cs ⁺ + e ⁻ → Cs	-2.92
Ra ²⁺ /Ra	Ra ²⁺ + 2e ⁻ → Ra	-2.92
Ba ²⁺ /Ba	Ba ²⁺ + 2e ⁻ → Ba	-2.91
Sr ²⁺ /Sr	Sr ²⁺ + 2e ⁻ → Sr	-2.89
Ca ²⁺ /Ca	Ca ²⁺ + 2e ⁻ → Ca	-2.87
Na ⁺ /Na	Na ⁺ + e ⁻ → Na	-2.71
Ac ³⁺ /Ac	Ac ³⁺ + 3e ⁻ → Ac	-2.6
La ³⁺ /La	La ³⁺ + 3e ⁻ → La	-2.52
Ce ³⁺ /Ce	Ce ³⁺ + 3e ⁻ → Ce	-2.48
Nd ³⁺ /Nd	Nd ³⁺ + 3e ⁻ → Nd	-2.43
Sm ³⁺ /Sm	Sm ³⁺ + 3e ⁻ → Sm	-2.41
Eu ³⁺ /Eu	Eu ³⁺ + 3e ⁻ → Eu	-2.41
Gd ³⁺ /Gd	Gd ³⁺ + 3e ⁻ → Gd	-2.40
Y ³⁺ /Y	Y ³⁺ + 3e ⁻ → Y	-2.37
Mg ²⁺ /Mg	Mg ²⁺ + 2e ⁻ → Mg	-2.37
Lu ³⁺ /Lu	Lu ³⁺ + 3e ⁻ → Lu	-2.26
H ₂ /H ⁻	H ₂ + 2e ⁻ → 2H ⁻	-2.25
H ⁺ /H	H ⁺ + e ⁻ → H	-2.11
Sc ³⁺ /Sc	Sc ³⁺ + 3e ⁻ → Sc	-2.08
Be ²⁺ /Be	Be ²⁺ + 2e ⁻ → Be	-1.85
U ³⁺ /U	U ³⁺ + 3e ⁻ → U	-1.79
Al ³⁺ /Al	Al ³⁺ + 3e ⁻ → Al	-1.66
Ti ²⁺ /Ti	Ti ²⁺ + 2e ⁻ → Ti	-1.63
V ²⁺ /V	V ²⁺ + 2e ⁻ → V	-1.19
Mn ²⁺ /Mn	Mn ²⁺ + 2e ⁻ → Mn	-1.18
TiO ₂ ⁺ /Ti	TiO ₂ ⁺ + 2H ⁺ + 4e ⁻ → Ti + H ₂ O	-0.88
SiO ₂ /Si	SiO ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ → Si + 2H ₂ O	-0.86
Zn ²⁺ /Zn	Zn ²⁺ + 2e ⁻ → Zn	-0.76
Cr ³⁺ /Cr	Cr ³⁺ + 3e ⁻ → Cr	-0.74
Ga ³⁺ /Ga	Ga ³⁺ + 3e ⁻ → Ga	-0.53
Fe ²⁺ /Fe	Fe ²⁺ + 2e ⁻ → Fe	-0.44
Eu ³⁺ /Eu ²⁺	Eu ³⁺ + e ⁻ → Eu ²⁺	-0.43
Cr ³⁺ /Cr ²⁺	Cr ³⁺ + e ⁻ → Cr ²⁺	-0.41
Ti ³⁺ /Ti ²⁺	Ti ³⁺ + e ⁻ → Ti ²⁺	-0.37
PbSO ₄ /Pb	PbSO ₄ + 2e ⁻ → Pb + SO ₄ ²⁻	-0.36
In ³⁺ /In	In ³⁺ + 3e ⁻ → In	-0.34
Tl ⁺ /Tl	Tl ⁺ + e ⁻ → Tl	-0.34
Co ²⁺ /Co	Co ²⁺ + 2e ⁻ → Co	-0.28
V ³⁺ /V ²⁺	V ³⁺ + e ⁻ → V ²⁺	-0.26
V(OH) ₄ ⁺ /V	V(OH) ₄ ⁺ + 4H ⁺ + 5e ⁻ → V + 4H ₂ O	-0.25
Ni ²⁺ /Ni	Ni ²⁺ + 2e ⁻ → Ni	-0.25
N ₂ /N ₂ H ₅ ⁺	N ₂ + 5H ⁺ + 4e ⁻ → N ₂ H ₅ ⁺	-0.23
AgI/Ag	AgI + e ⁻ → Ag + I ⁻	-0.15
Sn ²⁺ /Sn	Sn ²⁺ + 2e ⁻ → Sn	-0.14
Pb ²⁺ /Pb	Pb ²⁺ + 2e ⁻ → Pb	-0.13
D ⁺ /D ₂	2D ⁺ + 2e ⁻ → D ₂	-0.003
H ⁺ /H ₂	2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂	±0.00

Lampiran 5. Lanjutan

Pasangan (oks/red)	Reaksi katode (reduksi)	E°_{red} , vol
AgBr/Ag	$AgBr + e^- \rightarrow Ag + Br^-$	+0.07
TiO ²⁺ /Ti ³⁺	$TiO^{2+} + 2H^+ + e^- \rightarrow Ti^{3+} + H_2O$	+0.10
Sn ⁴⁺ /Sn ²⁺	$Sn^{4+} + 2e^- \rightarrow Sn^{2+}$	+0.15
Cu ²⁺ /Cu ⁺	$Cu^{2+} + e^- \rightarrow Cu^+$	+0.15
BiOCl/Bi	$BiOCl + 2H^+ + 3e^- \rightarrow Bi + H_2O + Cl^-$	+0.16
AgCl/Ag	$AgCl + e^- \rightarrow Ag + Cl^-$	+0.22
Hg ₂ Cl ₂ /Hg	$Hg_2Cl_2 + 2e^- \rightarrow 2Hg + 2Cl^-$	+0.27
BiO ⁺ /Bi	$BiO^+ + 2H^+ + 3e^- \rightarrow Bi + H_2O$	+0.32
Cu ²⁺ /Cu	$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	+0.34
SO ₄ ²⁻ /S	$SO_4^{2-} + 8H^+ + 6e^- \rightarrow S + 4H_2O$	+0.36
VO ²⁺ /V ³⁺	$VO^{2+} + 2H^+ + e^- \rightarrow V^{3+} + H_2O$	+0.36
Fe(CN) ₆ ³⁻ /Fe(CN) ₆ ⁴⁻	$Fe(CN)_6^{3-} + e^- \rightarrow Fe(CN)_6^{4-}$	+0.36
Ag ₂ CrO ₄ /Ag	$Ag_2CrO_4 + 2e^- \rightarrow 2Ag + CrO_4^{2-}$	+0.46
Cu ⁺ /Cu	$Cu^+ + e^- \rightarrow Cu$	+0.52
I ₂ /I ⁻	$I_2 + 2e^- \rightarrow 2I^-$	+0.54
MnO ₄ ⁻ /MnO ₄ ²⁻	$MnO_4^- + e^- \rightarrow MnO_4^{2-}$	+0.56
Ag ₂ C ₂ H ₃ O ₂ /Ag	$Ag_2C_2H_3O_2 + e^- \rightarrow Ag + C_2H_3O_2^-$	+0.64
Ag ₂ SO ₄ /Ag	$Ag_2SO_4 + 2e^- \rightarrow 2Ag + SO_4^{2-}$	+0.65
Au(CNS) ₄ ⁻ /Au	$Au(CNS)_4^- + 3e^- \rightarrow Au + 4CNS^-$	+0.66
PtCl ₆ ²⁻ /PtCl ₄ ²⁻	$PtCl_6^{2-} + 2e^- \rightarrow PtCl_4^{2-} + 2Cl^-$	+0.68
O ₂ /H ₂ O ₂	$O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_2$	+0.68
HN ₃ /NH ₄ ⁺	$HN_3 + 11H^+ + 8e^- \rightarrow 3NH_4^+$	+0.70
PtCl ₆ ²⁻ /Pt	$PtCl_6^{2-} + 2e^- \rightarrow Pt + 4Cl^-$	+0.73
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	+0.77
Hg ₂ ²⁺ /Hg	$Hg_2^{2+} + 2e^- \rightarrow 2Hg$	+0.79
Ag ⁺ /Ag	$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$	+0.80
NO ₃ ⁻ /N ₂ O ₄	$2NO_3^- + 4H^+ + 2e^- \rightarrow N_2O_4 + 2H_2O$	+0.80
AuBr ₄ ⁻ /Au	$AuBr_4^- + 3e^- \rightarrow Au + 4Br^-$	+0.87
Hg ₂ ²⁺ /Hg ₂ ²⁺	$2Hg^{2+} + 2e^- \rightarrow Hg_2^{2+}$	+0.92
NO ₃ ⁻ /NO	$NO_3^- + 4H^+ + 3e^- \rightarrow NO + 2H_2O$	+0.96
HNO ₂ /NO	$HNO_2 + H^+ + e^- \rightarrow NO + H_2O$	+1.00
AuCl ₄ ⁻ /Au	$AuCl_4^- + 3e^- \rightarrow Au + 4Cl^-$	+1.00
V(OH) ₄ ⁺ /VO ²⁺	$V(OH)_4^+ + 2H^+ + e^- \rightarrow VO^{2+} + 3H_2O$	+1.00
N ₂ O ₄ /NO	$N_2O_4 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2NO + 2H_2O$	+1.03
Br ₂ /Br ⁻	$Br_2 + 2e^- \rightarrow 2Br^-$	+1.07
ClO ₄ ⁻ /ClO ₃ ⁻	$ClO_4^- + 2H^+ + 2e^- \rightarrow ClO_3^- + H_2O$	+1.19
ClO ₃ ⁻ /HClO ₂	$ClO_3^- + 3H^+ + 2e^- \rightarrow HClO_2 + H_2O$	+1.21
O ₂ /H ₂ O	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	+1.23
MnO ₂ /Mn ²⁺	$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	+1.23
Tl ³⁺ /Tl ⁺	$Tl^{3+} + 2e^- \rightarrow Tl^+$	+1.25
N ₂ H ₅ ⁺ /NH ₄ ⁺	$N_2H_5^+ + 3H^+ + 2e^- \rightarrow 2NH_4^+$	+1.28
ClO ₂ /HClO ₂	$ClO_2 + H^+ + e^- \rightarrow HClO_2$	+1.28
HNO ₂ /N ₂ O	$2HNO_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow N_2O + 3H_2O$	+1.29
Cr ₂ O ₇ ²⁻ /Cr ³⁺	$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- \rightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$	+1.33
NH ₃ OH ⁺ /NH ₄ ⁺	$NH_3OH^+ + 2H^+ + 2e^- \rightarrow NH_4^+ + H_2O$	+1.35
Cl ₂ /Cl ⁻	$Cl_2 + 2e^- \rightarrow 2Cl^-$	+1.36
Au(OH) ₃ /Au	$Au(OH)_3 + 3H^+ + 3e^- \rightarrow Au + 3H_2O$	+1.45
PbO ₂ /Pb ²⁺	$PbO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Pb^{2+} + 2H_2O$	+1.46
Au ³⁺ /Au	$Au^{3+} + 3e^- \rightarrow Au$	+1.50
Mn ³⁺ /Mn ²⁺	$Mn^{3+} + e^- \rightarrow Mn^{2+}$	+1.51
MnO ₄ ⁻ /Mn ²⁺	$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	+1.51

Lampiran 6. Lanjutan

Pasangan (oks/red)	Reaksi katode (reduksi)	E°_{red} , vol
$\text{BrO}_3^-/\text{Br}_2$	$2\text{BrO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10e^- \rightarrow \text{Br}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	+1.52
$\text{Bi}_2\text{O}_4/\text{BiO}^+$	$\text{Bi}_2\text{O}_4 + 4\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow 2\text{BiO}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.59
$\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$	$\text{Ce}^{4+} + e^- \rightarrow \text{Ce}^{3+}$	+1.61
HClO/Cl_2	$2\text{HClO} + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.63
$\text{HClO}_2/\text{HClO}$	$\text{HClO}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{HClO} + \text{H}_2\text{O}$	+1.64
$\text{NiO}_2/\text{Ni}^{2+}$	$\text{NiO}_2 + 4\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.68
$\text{PbO}_2/\text{PbSO}_4$	$\text{PbO}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.68
Au^+/Au	$\text{Au}^+ + e^- \rightarrow \text{Au}$	+1.69
$\text{MnO}_4^-/\text{MnO}_2$	$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 3e^- \rightarrow \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.70
$\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.78
XeO_3/Xe	$\text{XeO}_3 + 6\text{H}^+ + 6e^- \rightarrow \text{Xe} + 3\text{H}_2\text{O}$	+1.8
$\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$	$\text{Co}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Co}^{2+}$	+1.81
$\text{HN}_3/\text{NH}_4^+, \text{N}_2$	$\text{HN}_3 + 3\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{N}_2$	+1.96
$\text{Ag}^{2+}/\text{Ag}^+$	$\text{Ag}^{2+} + e^- \rightarrow \text{Ag}^+$	+1.98
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{SO}_4^{2-}$	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2e^- \rightarrow 2\text{SO}_4^{2-}$	+2.01
F_2/F^-	$\text{F}_2 + 2e^- \rightarrow 2\text{F}^-$	+2.87
$\text{H}_4\text{XeO}_6/\text{XeO}_3$	$\text{H}_4\text{XeO}_6 + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{XeO}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$	+3.0
F_2/HF	$\text{F}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow 2\text{HF}$	+3.06

Sumber : Keenan, Kleinfelter, dan Wood, 1986

