



**PRODUKSI ENERGI LISTRIK MENGGUNAKAN METODE  
*SINGLE CHAMBER MICROBIAL FUEL CELL*  
PADA PENAMBAHAN SUBSTRAT  
GLUKOSA DAN ASAM ASETAT**

**SKRIPSI**

oleh  
**NOVIN MIROTIN**  
**NIM 121810301079**

**JURUSAN KIMIA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2019**



**PRODUKSI ENERGI LISTRIK MENGGUNAKAN METODE  
*SINGLE CHAMBER MICROBIAL FUEL CELL*  
PADA PENAMBAHAN SUBSTRAT  
GLUKOSA DAN ASAM ASETAT**

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Kimia (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Sains

oleh  
**NOVIN MIROTIN**  
**NIM 121810301079**

**JURUSAN KIMIA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2019**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Allah SWT atas segala karunia serta limpahan rahmat dalam penulisan skripsi ini sehingga dapat terselesaikan dengan lancar;
2. Keluarga tercinta, Ibunda Rochmi ( Rahimahullah ), Ayahanda Kopsan, serta Kakak tercinta Achmad Zainuddin dan Susilowati Ningsih;
3. Bapak/Ibu guru RA Islamiyah Suci, MI Islamiyah Suci, SMPN 1 Sugio, MAN Lamongan, bapak/ibu dosen kimia, teknisi jurusan Kimia, dan segenap karyawan FMIPA Universitas Jember yang telah membimbing dan memberikan ilmu, serta pengalamannya;
4. Kawan seperjuangan KIMIA 2012 (LANTHANIDA), keluarga besar Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, serta almamater Universitas Jember.

**MOTTO**

“Seandainya mereka mempersekutukan Allah, niscaya lenyaplah dari mereka amalan yang telah mereka kerjakan”  
(terjemahan Surat Al An’am: 88).\*)

“Barangsiapa membuat suatu perkara baru dalam agama kami ini yang tidak ada asalnya, maka perkara tersebut tertolak”  
(HR. Bukhari no. 20 dan Muslim no. 1718).\*\*)



---

\*) Departemen Agama Proyek Pengabdian Kitab Suci Al-Qur’an. 2012. *Al Qur’an dan Terjemahannya*. Jakarta: PT. Insan Media Pustaka.

\*\*\*) Imam an – Nawawi. 2013. *Terjemah Hadist arbain Nawawi Disertai Intisari Kandungan Hadist Berdasarka Syarah Syaikh Muhammad Shalih al – Utsaimin*. Jakarta: Darul Haq.

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Novin Mirotin

NIM : 121810301079

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul: “Produksi Energi Listrik Menggunakan Metode *Single Chamber Microbial Fuel Cell* pada Penambahan Substrat Glukosa dan Asam Asetat” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 28 Mei 2019

Yang menyatakan,

Novin Mirotin

NIM 121810301079

**SKRIPSI**

**Produksi Energi Listrik Menggunakan Metode *Single Chamber Microbial Fuel Cell* Pada Penambahan Substrat Glukosa Dan Asam Asetat**

Oleh

Novin Mirotin

NIM 121810301079

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Tri Mulyono, S.Si., M.Si

Dosen Pembimbing Anggota : Drs. Zulfikar, Ph.D

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Produksi Energi Listrik Menggunakan Metode *Single Chamber Microbial Fuel Cell* pada Penambahan Substrat Glukosa dan Asam Asetat” karya Novin Mirotin telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas  
Jember

**Tim Penguji:**

Ketua,

Anggota I,

Tri Mulyono, S.Si., M.Si.  
NIP. 196810021998021001

Drs. Zulfikar Ph.D.  
NIP. 196310121987021001

Anggota II,

Anggota III,

Drs. Sudarko, Ph.D.  
NIP. 196903121992031002

Dr. Busroni, M.Si.  
NIP. 195905151991031007

Mengesahkan,  
Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,

Drs. Sujito, Ph.D.  
NIP. 196102041987111001

## RINGKASAN

**Produksi Energi Listrik Menggunakan Metode *Single Chamber Microbial Fuel Cell* pada Penambahan Substrat Glukosa dan Asam Asetat;** Novin Mirotin, 121810301079; 2019: 50 halaman; Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

*Microbial fuel cell* merupakan alat yang digunakan untuk mengonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan reaksi katalitik dari mikroorganisme (Logan, 2007). Prinsip kerja MFC umumnya memanfaatkan metabolisme mikroba terhadap suatu media sebagai katalis yang akan mengubah materi organik menjadi energi listrik dengan mentransfer elektron dari anoda melalui kabel kemudian menghasilkan arus listrik menuju katoda (Sitorus, 2010).

Penelitian ini menggunakan tipe *single chamber* MFC dengan variasi substrat dan waktu inkubasi substrat dengan media tanah pertanian organik untuk menentukan nilai dari *power density* optimum. Substrat yang digunakan dalam penelitian ini adalah substrat Glukosa dengan variasi konsentrasi 0.1 M, 0.3 M, dan 0.5 M serta Asam Asetat dengan variasi konsentrasi 600 mg/L, 800 mg/L dan 1000 mg/L. Kedua substrat ini merupakan senyawa yang mudah didegradasi oleh mikroba dan merupakan substrat yang paling umum digunakan dalam sistem MFC (Murray dkk., 2003).

Nilai *power density* optimum penambahan variasi substrat glukosa sebesar 22.53 mW/m<sup>2</sup> dalam waktu inkubasi 16 hari. Sedangkan pada substrat asam asetat nilai *power density* optimum 4.96 mW/m<sup>2</sup> dalam waktu inkubasi 14 hari. Nilai *power density* optimum yang dihasilkan substrat glukosa lebih tinggi dibandingkan dengan substrat asetat. Tingginya jumlah karbon dan hidrogen dari senyawa glukosa serta kondisi sistem yang netral menyebabkan nilai *power density* glukosa lebih tinggi dibandingkan dengan variasi asam asetat. Adanya reaksi metanogenesis menyebabkan nilai *power density* asam asetat lebih rendah. Waktu inkubasi optimum sistem MFC untuk menceapai nilai *power density* optimum mengikuti fase hidup dari sel bakteri yaitu pada fase eksponensial.

## PRAKATA

Segala puji syukur dipanjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, sehingga penulisan skripsi yang berjudul “Produksi Energi Listrik Menggunakan Metode *Single Chamber Microbial Fuel Cell* pada Penambahan Substrat Glukosa dan Asam Asetat” dapat terselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan pendidikan program sarjana strata satu (S1) pada Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penulisan skripsi ini banyak mendapatkan bantuan moril maupun materil dari berbagai pihak, sehingga ucapan terima kasih disampaikan dengan tulus kepada:

1. Drs. Sujito, Ph.D., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;
2. Dr. Bambang Piluharto, S.Si., M.Si., selaku ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;
3. Tri Mulyono, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Drs. Zulfikar, Ph.D selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
4. Drs. Sudarko, Ph.D., selaku Dosen Penguji I, dan Dr. Busroni, M.Si, selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktunya guna menguji, serta memberikan kritik dan saran demi kesempurnaan skripsi ini;
5. Dr. Bambang Piluharto, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
6. Segenap dosen pengajar Fakultas MIPA, terutama dosen-dosen Jurusan Kimia Universitas Jember yang telah memberikan banyak ilmu dan pengetahuan;
7. Keluarga tercinta yang setia mendukung baik moril maupun materil, mendoakan, mendidik, serta memberi kasih sayang dan pengorbanan yang tidak terhingga selama ini;

8. Teman-teman Kimia angkatan 2012 (Lanthanida), terima kasih atas semangat, bantuan, saran, perhatian, dan kenangan yang telah diberikan;
9. Sahabat setim dan seperjuangan Wulan Islamintari terima kasih atas segala bantuan, dukungan, semangat, kebaikan dan perhatian yang diberikan selama ini;
10. Sahabat seperjuangan Wulan Islamintari, Ines Dhara MP, Ayu Fazriyah R, Eka Suwitasari, Lia Agustin, Zulfaturrohmaniah, Dwi Purwita Utari, Nidya Imadani, Agus Wedi, Ani Fiqrotus, serta Anita Rahman, terimakasih atas segala doa, dukungan, semangat, dan perhatian yang diberikan selama ini.
11. Sahabat ukhtifillah Wulan islamintari, Anyaring Tyas Asih, astatidz STDI IMAM SYAFI'I serta jamaah kajian sunnah Jember.
12. Sahabat Kos Babi, Tyas, Rere, Sindya, Dinasty, Saila, Ekin, Kiko, Isyana, Meilia, Aini, Dinda, Nina, Bara serta Amel, terimakasih atas doa, dukungan, perhatian serta kenangan manis yang telah diberikan.
13. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Segala bentuk kritik dan saran yang bersifat membangun diharapkan dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini dan semoga skripsi ini dapat bermanfaat terhadap perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang kimia.

Jember, 28 Mei 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN SAMPUL</b> .....	i
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	ii
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN MOTO</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PEMBIMBING</b> .....	vi
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvi
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	3
<b>1.3 Tujuan Penelitian</b> .....	4
<b>1.4 Batasan Masalah</b> .....	4
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
<b>2.1 Fuel Cel</b> .....	5
<b>2.2 Microbial Fuel Cell (MFC)</b> .....	6
2.2.1 Prinsip Kerja <i>Microbial Fuel Cell</i> .....	7
2.2.2 Jenis – Jenis Sistem MFC.....	9
2.2.3 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi Sistem MFC.....	12
2.2.4 Aplikasi MFC.....	14
<b>2.3 Tanah Organik</b> .....	15
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	18
<b>3.1 Waktu dan Tempat Penelitian</b> .....	18
<b>3.2 Alat dan Bahan</b> .....	18
3.2.1 Alat.....	18
3.2.2 Bahan.....	18
<b>3.3 Diagram Alir Penelitian</b> .....	19
<b>3.4 Prosedur Penelitian</b> .....	20

3.4.1 Preparasi Substrat.....	20
3.4.2 Preparasi Eksperimen <i>Single Chamber Microbial Fuel Cell</i> .....	20
3.4.3 Eksperimen <i>Single Chamber Microbial Fuel Cell</i> .....	22
3.4.4 Pengukuran Tegangan dan Kuat Arus Sistem MFC .....	23
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>24</b>
4.1 <i>Microbial Fuel Cell</i> .....	24
4.2 <b>Kondisi Optimum Kerja Bakteri Untuk Menghasilkan Energi</b> .....	25
4.3 <b>Penentuan Nilai <i>Power Density Optimum</i></b> .....	27
4.2.1 Pengukuran Nilai Tegangan Optimum.....	27
4.2.2 Pengukuran Nilai Kuat Arus Optimum.....	30
4.2.3 Pengukuran Nilai <i>Power Density Optimum</i> .....	32
4.4 <b>Pengaruh Variasi Lama Waktu Inkubasi dengan Pengukuran <i>Power Density</i></b> .....	35
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	<b>36</b>
5.1 <b>Kesimpulan</b> .....	36
5.2 <b>Saran</b> .....	36
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>37</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>44</b>

**DAFTAR TABEL**

	Halaman
2.1 Perbandingan Kondisi <i>Fuel Cell</i> dan MFC .....	6

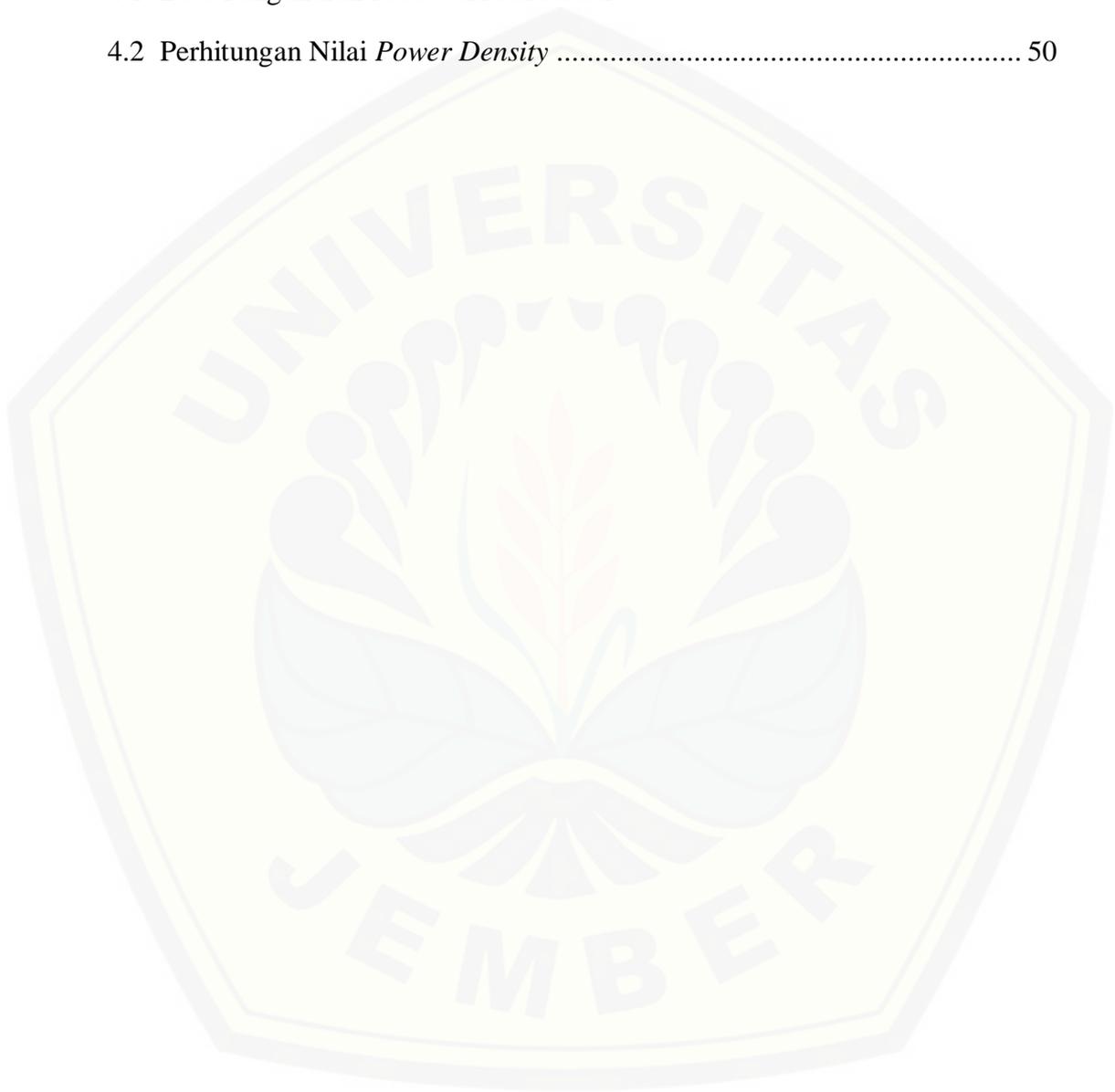


DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Mekanisme tranfer elektron melalui membran luar sel .....	8
2.2 Mekanisme tranfer elektron dengan mediator .....	8
2.3 Mekanisme transfer elektron melalui <i>bacterial nanowires</i> .....	9
2.4 Rangkaian <i>single chamber</i> MFC .....	10
2.5 Rangkaian <i>dual chamber</i> MFC.....	11
2.6 Rangkaian <i>stack</i> MFC .....	11
3.1 Desain Alat <i>Single Chamber Microbial Fuel Cell</i> .....	21
3.2 Desain <i>Hacker Board</i> .....	21
4.1 Proses Umum dalam <i>Single Chamber</i> MFC .....	24
4.2 Nilai <i>Power Density Optimum</i> variasi kontrol .....	26
4.3 Nilai tegangan variasi substrat glukosa.....	28
4.4 Nilai tegangan variasi substrat asam asetat .....	29
4.5 Nilai kuat arus pada substrat glukosa.....	30
4.6 Nilai kuat arus pada substrat asam asetat .....	31
4.7 Nilai <i>power density</i> substrat glukosa .....	32
4.8 Nilai <i>power density</i> pada substrat asam .....	33

**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
4.1 Data Pengukuran Pada Variasai Substrat .....	44
4.2 Perhitungan Nilai <i>Power Density</i> .....	50



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan zaman yang semakin modern tidak terlepas dari penggunaan energi listrik yang terlibat dalam pemenuhan kebutuhan sehari – hari. Konsumsi energi listrik yang semakin tinggi tidak sebanding dengan produksi dari energi listrik itu sendiri. Fenomena tersebut sangat dirasakan oleh negara – negara berkembang salah satunya adalah Indonesia. Menurut Rita dkk. (2013) kebutuhan listrik Indonesia akan mengalami peningkatan sebesar 4,6% pertahun, angka ini akan mengalami peningkatan sebesar tiga kali lipat jika tidak ada upaya dalam meningkatkan produksi dari energi listrik.

Berbagai upaya dilakukan dalam meningkatkan produksi dari energi listrik. Salah satunya adalah dengan mengurangi penggunaan energi berbasis fosil dan minyak bumi kemudian menggantinya dengan energi alternatif serta pemanfaatan dari biomassa. Jenis biomassa yang dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif salah satunya adalah mikroorganisme. Mikroorganisme akan melakukan aktivitas metabolisme dengan menghasilkan ATP serta menghasilkan elektron pada proses transport elektron.

Jenis mikroorganisme yang dapat menghasilkan elektron disebut sebagai mikroorganisme elektrogenik. Salah satu mikroorganisme ini termasuk dalam spesies *Shewanella* dan *Geotobacter*. Mikroorganisme ini dapat ditemukan pada semua jenis tanah dipermukaan bumi, serta dapat ditemukan di bawah laut. Menurut Lohner (2016) mikroorganisme salah satunya bakteri tanah memenuhi kebutuhan nutrisinya dengan mengonsumsi nutrisi mikroskopis serta makanan dari bahan organik. Kristin (2012) melakukan percobaan mengenai mikroorganisme yang dapat menghasilkan listrik berdasarkan pada aktivitas metabolisme dengan menggunakan prinsip *microbial fuel cell* (MFC).

MFC merupakan alat untuk mengonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan reaksi katalitik dari mikroorganisme. MFC dibedakan menjadi dua kategori yaitu, *single chamber microbial fuel cell* atau satu bejana

MFC dan *dual chamber microbial fuel cell* atau dua bejana MFC. *Single chamber* MFC terdiri dari satu bejana dengan anoda dan katoda dalam satu sistem serta tidak memerlukan membran dalam aplikasinya (Logan, 2008). *Single chamber microbial fuel cell* ini lebih sederhana jika dibandingkan dengan tipe MFC yang lain. Selain itu tipe ini membutuhkan biaya yang lebih terjangkau serta lebih mudah dalam aplikasinya.

Salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja MFC dalam menangkap elektron dari metabolisme bakteri adalah faktor substrat dan waktu inkubasi substrat. Variasi substrat menjadi hal yang penting dalam kinerja MFC. Substrat tersebut dapat berasal dari bahan organik misalnya asam asetat dan glukosa. Kiely dkk. (2011) menyebutkan bahwa substrat asetat memiliki nilai *power density* tertinggi dibandingkan dengan substrat lain seperti etanol, asam laktat, asam suksinat dan asam format. *Power density* dari asam asetat sebesar  $556 \text{ mW/m}^2$ . Liu dkk. (2005) juga melakukan penelitian mengenai pengaruh substrat asetat terhadap produksi listrik dengan menggunakan *single chamber* MFC. Pada penelitian ini asetat sebanyak 80 – 800 mg/L mampu menghasilkan beda potensial sebesar 798 mV.

Zahara (2011) melakukan penelitian untuk mengetahui kapasitas dan efisiensi produksi energi listrik dalam sistem *dual chamber* MFC menggunakan substrat glukosa. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa substrat glukosa mampu menghasilkan kuat arus sebesar  $224 \mu\text{A}$ , dan tegangan sebesar 196 mV. Liu dan Logan (2004) juga melakukan penelitian mengenai pengaruh substrat glukosa sebagai biokatalis. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan glukosa sebagai substrat mampu menghasilkan nilai *power density* sebesar  $262 \pm 10 \text{ mW/m}^2$ .

Faktor lain yang mempengaruhi kinerja MFC adalah waktu inkubasi substrat. Kristin (2012) melakukan variasi inkubasi substrat pada waktu 1 hari, 1 minggu dan 1 bulan. Waktu inkubasi 1 minggu menunjukkan nilai yang lebih tinggi yaitu dengan *power density* maksimum sebesar  $1,74 \times 10^{-6} \text{ mW/m}^2$ . Lohner (2016) dengan sistem *single chamber* MFC menyebutkan bahwa diperlukan waktu sekitar 3 minggu untuk mendapatkan nilai beda potensial yang stabil.

Dalam waktu 1 minggu elektroda akan membentuk biofilm dan menghasilkan nilai beda potensial yang rendah, sedangkan pada minggu ke 3 nilai beda potensial tersebut akan stabil.

Kinerja substrat serta waktu inkubasi substrat memegang peranan penting dalam penentuan nilai *power density*. Untuk itu perlu dilakukan penelitian mengenai variasi substrat dan waktu inkubasi substrat pada sistem *single chamber* MFC. Glukosa dan asetat digunakan sebagai substrat pada penelitian ini. Sementara waktu inkubasi substrat yang digunakan meliputi 1 minggu, 2 minggu dan 3 minggu. Kedua variasi ini diharapkan dapat menunjukkan seberapa besar energi listrik yang dihasilkan oleh sistem MFC dalam bentuk *power density*. Selain itu, hasil pada riset ini diharapkan dapat menjadi salah satu langkah kedepan untuk mendapatkan sumber energi yang murah dengan memanfaatkan tanah pada pertanian organik.

## 1.2 Rumusan Masalah

Masalah yang dikaji dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penambahan variasi konsentrasi glukosa pada tanah pertanian organik terhadap *power density* optimum yang dihasilkan oleh sistem *single chamber microbial fuel cell*?
2. Bagaimana pengaruh penambahan asam asetat pada tanah pertanian organik terhadap *power density* optimum yang dihasilkan oleh sistem *single chamber microbial fuel cell*?
3. Bagaimana pengaruh lama waktu inkubasi pada substrat terhadap *power density* optimum yang dihasilkan oleh sistem *single chamber microbial fuel cell*?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh penambahan variasi konsentrasi glukosa pada tanah pertanian organik terhadap *power density* optimum yang dihasilkan oleh sistem *single chamber microbial fuel cell*.
2. Mengetahui pengaruh penambahan asam asetat pada tanah pertanian organik terhadap *power density* optimum yang dihasilkan oleh sistem *single chamber microbial fuel cell*.
3. Mengetahui pengaruh lama waktu inkubasi pada substrat terhadap *power density* optimum yang dihasilkan oleh sistem *single chamber microbial fuel cell*.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Reaktor *Microbial Fuel Cell* menggunakan satu bejana atau *single chamber* dengan volume kompartemen sebesar 500 mL
2. Tanah yang digunakan merupakan tanah organik yang berasal dari pertanian organik Wonosari, Bondowoso
3. Penelitian ini tidak membahas mengenai identifikasi mikroba pada tanah organik
4. Variasi substrat yang digunakan adalah substrat glukosa dengan konsentrasi 0.1 M, 0.3 M, dan 0.5 M, serta asam asetat dengan konsentrasi 600 mg/L, 800 mg/L dan 1000 mg/L
5. Suhu yang digunakan pada pengukuran tegangan dan kuat arus menggunakan suhu ruangan.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah pemanfaatan tanah pertanian organik sebagai energi alternatif dengan menggunakan sistem *single chamber microbial fuel cell* sehingga dapat bermanfaat dalam produksi listrik.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 *Fuel Cell*

*Fuel cell* merupakan pembangkit yang berupa sel bahan bakar yang menghasilkan listrik melalui proses elektrokimia dengan mengombinasikan gas hidrogen ( $H_2$ ) dan oksigen ( $O_2$ ). Teknologi *fuel cell* ditemukan pertama kali oleh Sir William Robert Grover pada tahun 1839, dimana ia mendemonstrasikan mengenai pemecahan uap menjadi hidrogen dan oksigen dengan pemanasan katalis seperti platinum. Teknologi ini semakin dikembangkan industri untuk mengatasi ketergantungan terhadap bahan bakar minyak yang semakin kritis (J Larminie, 2000).

Prinsip kerja *fuel cell* merupakan kebalikan dari prinsip kerja elektrolisa, dimana hidrogen direaksikan dengan oksigen dan menghasilkan listrik. *Fuel cell* umumnya tersusun atas anoda, katoda dan elektrolit (membran). Anoda sebagai tempat terjadinya pemecahan hidrogen ( $H_2$ ) menjadi proton dan elektron (listrik). Katoda berperan sebagai tempat terjadinya penggabungan proton, elektron dan oksigen membentuk air. Elektrolit atau membran merupakan media yang berfungsi mengalirkan proton (Zahara, 2011).

*Fuel cell* memiliki keunggulan jika dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional yang meliputi : memiliki efisiensi tinggi dari 40% sampai 60%, sedangkan untuk kogenerasi mencapai 80%. Tidak menimbulkan suara bising. Memiliki rangkaian alat yang fleksibel sehingga dapat menyesuaikan dengan bahan bakar yang ada serta mampu menanggapi dengan cepat terhadap bahan bakar yang ada (Hasan, 2007).

Berbagai macam *fuel cell* yang telah dikembangkan pada era ini. Setiap jenis *fuel cell* ini membutuhkan bahan bakar yang berbeda. *Fuel cell* berbasis biologi memiliki konsep yang sangat berbeda dengan *fuel cell* pada umumnya. *Fuel cell* berbasis biologi menggunakan biokatalis untuk mengonversi bahan kimia menjadi energi listrik. *Fuel cell* jenis ini dapat diaplikasikan pada suhu dan tekanan lingkungan sehingga lebih mudah dalam aplikasinya *Fuel cell* jenis ini

dibagi menjadi dua kategori yaitu, *microbial fuel cell (MFC)* dan *enzim fuel cell*. (Kordesch dan Simader, 2001).

## 2.2 *Microbial Fuel Cell (MFC)*

*Microbial fuel cell* merupakan perangkat yang dapat mengonversi bahan organik menjadi energi (listrik atau hidrogen) menggunakan mikroorganisme sebagai katalis (Kim dkk., 2003). *Microbial fuel cell* dikenal sebagai teknologi yang dapat menghasilkan energi listrik melalui proses degradasi bahan organik oleh mikroorganisme melalui reaksi katalitik atau melalui mekanisme sistem bioelektrokimia dari mikroorganisme (Logan, 2008). Mikroorganisme yang berperan dalam MFC meliputi mikroorganisme yang bersifat aerob, anaerob fakultatif maupun anaerob obligat (Kim dkk., 2006).

MFC memiliki kelebihan dibandingkan *fuel cell*. MFC dapat menghasilkan energi listrik yang berasal dari degradasi biomassa. MFC menggunakan katalis berupa mikroorganisme yang lebih murah dibandingkan dengan katalis *fuel cell* berupa platina yang merupakan logam mahal.

Tabel 2.1 Perbandingan Kondisi *Fuel Cell* dan MFC

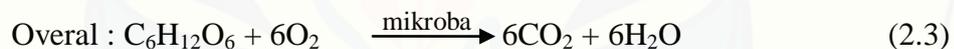
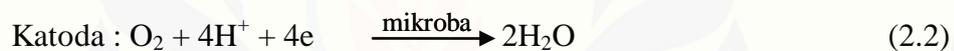
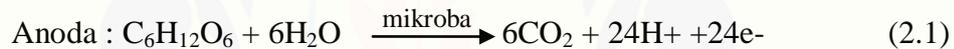
Kondisi Operasi	Jenis	
	<i>Fuel Cell</i>	MFC
Katalis	Logam mulia	Mikroorganisme / enzim
Suhu	>200 °C	22-25°C
Elektrolit	Asam fosfat	Larutan fosfat
pH	pH <1 (Larutan asam)	pH 7-9 (Larutan netral-basa)
Kapasitas	Tinggi	Rendah
Efisiensi	40-60%	>40%
Tipe Bahan Bakar	Gas alam	Karbohidrat dan hidrokarbon

(Idham dkk., 2009).

### 2.2.1 Prinsip Kerja *Microbial Fuel Cell*

Prinsip kerja MFC umumnya memanfaatkan metabolisme mikroba terhadap suatu media sebagai katalis yang akan mengubah materi organik menjadi energi listrik dengan mentransfer elektron dari anoda melalui kabel kemudian menghasilkan arus listrik menuju katoda. Anoda akan mengalami transfer elektron kemudian diterima oleh ion kompleks dari katoda yang memiliki elektron bebas. Donor elektron dalam sistem MFC merupakan zat hasil metabolisme mikroba. Metabolisme mikroba menghasilkan zat hasil yang umumnya merupakan senyawa yang mengandung hidrogen (Sitorus, 2010).

Mikroorganisme hidup pada ruangan anoda dan mengubah substrat seperti glukosa, asetat menjadi proton dan elektron. Pada kondisi aerobik, mikroorganisme menggunakan oksigen sebagai aseptor elektron akhir untuk membentuk air. Reaksi yang berlangsung pada MFC dengan substrat berupa glukosa dan oksigen sebagai elektron aseptor adalah sebagai berikut :

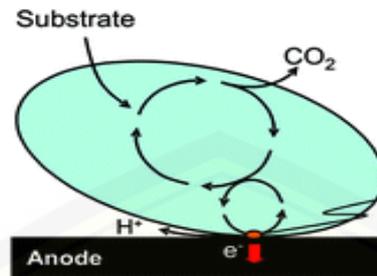


(Kristin, 2012).

Salah satu faktor yang mempengaruhi MFC adalah mengenai mekanisme transfer elektron oleh mikroorganisme. Menurut Liu (2008) mekanisme yang melibatkan transfer elektron dari bakteri ke anoda adalah sebagai berikut :

#### a. Transfer Elektron Melalui Protein Membran Luar Sel Secara Langsung

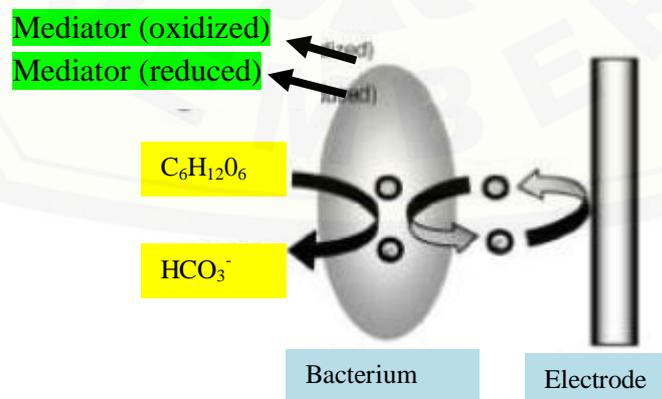
Mekanisme ini melibatkan sitokrom sebagai media untuk mentransfer elektron secara langsung menuju elektroda. Bagian sitokrom yang digunakan adalah membran luar dari sitokrom. Mekanisme transfer elektron dapat berjalan ketika terdapat kontak langsung antara sitokrom dengan elektroda. Jenis mikroba yang menggunakan cara ini yaitu *Geobacter sulfurreducens* dan *Shewanella putrefaciens* (Liu, 2008). Berikut merupakan gambar mengenai mekanisme transfer elektron melalui membran luar secara langsung.



Gambar 2.1 Mekanisme tranfer elektron melalui membran luar sel (Schroder, 2007).

#### b. Transfer Elektron Menggunakan Mediator

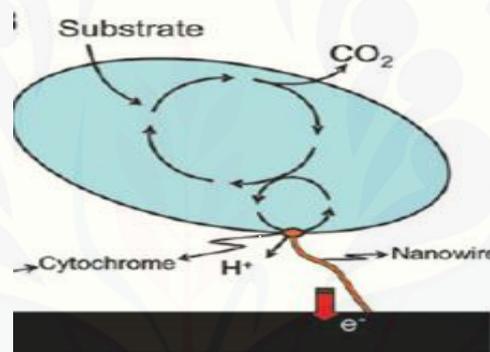
Tujuan dari transfer elektron menggunakan mediator adalah agar proses transfer elektron dapat berlangsung secara efisien. Mediator ini diharapkan mampu melewati membran sel, menerima elektron pembawa elektron intraselluler, meninggalkan sel dalam bentuk tereduksi dan kemudian mengeluarkan elektron ke permukaan elektroda. Mediator tersebut berupa senyawa kimia seperti *neutral red* dan *methylene blue*. Mikroba yang memilih cara ini adalah *Escherichia coli*. Umumnya cara ini digunakan untuk sampel berupa limbah. Mekanisme ini jarang digunakan karena memakan biaya yang tinggi serta berpotensi adanya racun dari beberapa mediator (Liu, 2008). Berikut mekanisme transfer elektron dengan mediator yang ditunjukkan pada Gambar 2.2:



Gambar 2.2 Mekanisme tranfer elektron dengan mediator (Liu, 2008).

c. Transfer Elektron Melalui *Bacterial Nanowires*

*Nanowires* merupakan struktur pada mikroba yang menyerupai pili. *Nanowires* atau pili tumbuh pada membran sel bakteri. *Nanowires* juga terlibat dalam transfer elektron ekstraseluler dan dapat membantu reduksi langsung dari akseptor elektron yang jauh. *Nanowires* yang telah diidentifikasi terdapat pada mikroorganisme seperti *G. sulfurreducens* PCA, *Pelotomaculum thermopropionicum*, *Shewanella oneidensis* MR-1, dan *Synechocystis* PCC6803 (Liu, 2008). Berikut mekanisme transfer elektron melalui *bacterial nanowires* yang ditunjukkan pada Gambar 2.3:



Gambar 2.3 Mekanisme transfer elektron melalui *bacterial nanowires* (Liu, 2008).

### 2.2.2 Jenis – jenis Sistem MFC

Menurut Kristin (2012) sistem MFC memiliki beberapa tipe sesuai dengan aplikasinya. Secara umum sistem MFC bisa dibedakan berdasarkan desain kompartemen serta ada tidaknya penggunaan membran penukar elektron.

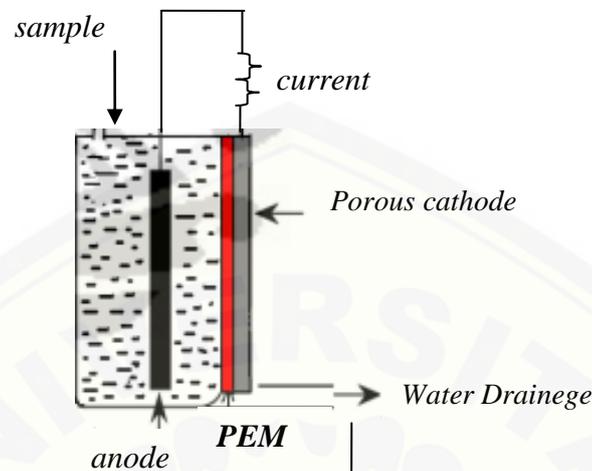
a. Sistem MFC Berdasarkan Disain Kompartemen

Sistem MFC berdasarkan pada desain kompartemennya dibagi menjadi empat jenis, yaitu *single chamber* MFC, *dual chamber* MFC, dan *stack* MFC.

1) *Single chamber* MFC

*Single chamber* MFC memiliki satu kompartemen. Pada sistem ini terdapat anoda dan katoda yang berada dalam satu kompartemen. Desain dari MFC *single chamber* lebih sederhana dibandingkan dengan desain MFC *dual*

*chamber*, dapat menghemat biaya dan daya yang dihasilkan lebih efisien (Duduk, 2007). Berikut merupakan gambar dari rangkaian *single chamber* MFC :

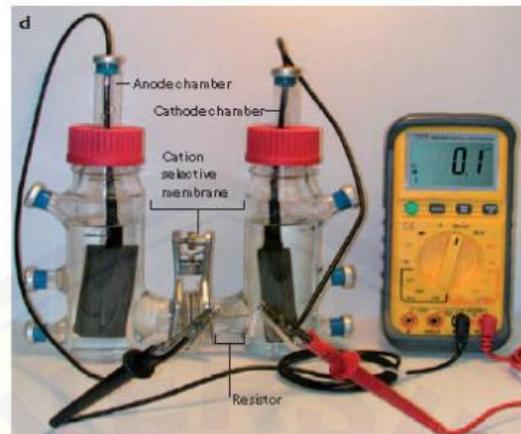


Gambar 2.4 Rangkaian *single chamber* MFC (Kristin, 2012).

Sistem *single chamber* MFC saat ini sedang dikembangkan karena bisa memanfaatkan katoda terhubung langsung dengan udara (Sun dkk., 2009). Berbagai macam bentuk dari desain MFC ini, diantaranya adalah *single chamber* dengan menggunakan *proton exchange membrane* (PEM) (Chang dkk., 2006) serta pengembangan *single chamber* menggunakan katoda yang terhubung langsung dengan udara untuk meningkatkan energi listrik yang dihasilkan (Lovley, 2006). Sistem MFC *single chamber* tanpa PEM menggunakan katoda yang terhubung langsung dengan udara menarik perhatian, karena pada model sistem ini menghasilkan listrik yang lebih besar. Sistem *single chamber* yang tidak memakai membran dapat dilakukan dengan mengonversi bahan organik yang dihasilkan oleh mikroba aktif sehingga dapat meningkatkan listrik (Zhu dkk., 2011).

## 2) *Dual chamber* MFC

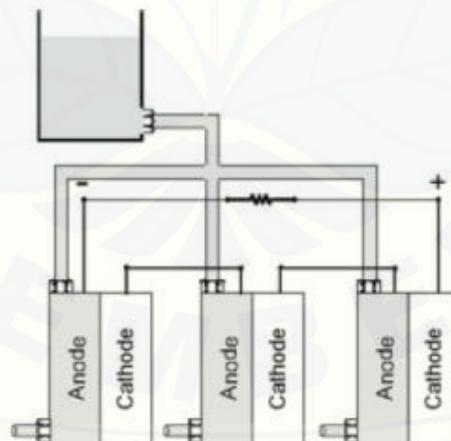
*Dual chamber* MFC memiliki dua kompartemen yang biasanya dipisahkan oleh membran atau sebuah jembatan garam. Ruang anoda berisi substrat dan bakteri sedangkan pada ruang katoda berisi larutan elektrolit. *Dual chamber* MFC memiliki kekurangan diantaranya memiliki daya yang rendah yang disebabkan oleh sistem yang kompleks. Elektron yang mudah hilang serta resisten internal yang tinggi. Berikut merupakan gambar rangkaian *dual chamber* MFC :



Gambar 2.6 Rangkaian *dual chamber* MFC (Lovley, 2006).

### 3) *Stack* MFC

*Stack* MFC menggabungkan beberapa unit dari MFC yang dimodifikasi. Pada sistem ini *single chamber* dan *dual chamber* digabungkan menjadi satu kemudian dirangkai menjadi seri dan paralel. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kapasitas daya yang bisa diproduksi. Berikut merupakan gambar dari sistem MFC berdasarkan pada disain kompartemen.



Gambar 2.7 Rangkaian *stack* MFC (Ieropoulos, 2008).

b. Sistem MFC Berdasarkan Penggunaan Membran Penukar Elektron

Membran yang biasa digunakan pada sistem MFC adalah Nafion dan Ultrex CMI-700. Membran ini biasa digunakan karena memiliki tingkat kestabilan mekanis dan termal serta memiliki konduktivitas proton yang tinggi. Membran tersebut memiliki harga yang tinggi sehingga diperlukan alternatif yang dapat menggantikan penggunaan membran tersebut, salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah tanah liat. Penggunaan membran ini berfungsi untuk memfasilitasi transfer proton atau kation menuju ruang katoda dan menghindari difusi asektor elektron yang beracun kedalam ruang katoda (Behera dkk., 2010).

Penggunaan membran yang mahal dapat dihindari dengan memanfaatkan biofilm pada permukaan anoda. Biofilm dapat meminimalisir proses difusi oksigen menuju katoda. Biofilm ini terbentuk dimulai dari beberapa bakteri yang hidup bebas melekat pada permukaan anoda, kemudian memperbanyak diri dan membentuk lapisan tipis yang disebut sebagai bofilm. Sistem MFC tanpa membran akan menghasilkan densitas yang tinggi, hal ini disebabkan oleh kemampuan sistem dalam menurunkan hambatan internal (Kristin, 2012).

### 2.2.3 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi Sistem MFC

Faktor yang mempengaruhi efisiensi dari MFC meliputi substrat, sifat kimia larutan, elektroda bahan, suhu dan waktu inkubasi.

a. Substrat

Mikroorganisme menghasilkan sumber karbon dengan memanfaatkan substrat. Substrat juga merupakan sumber bahan bakar pada sistem MFC. Substrat yang digunakan mulai dari material sederhana hingga campuran kompleks. Substrat yang berasal dari material sederhana dianggap lebih baik untuk proses produksi serta memerlukan waktu yang singkat. Substrat yang umumnya digunakan dalam sistem MFC meliputi, pati, asam lemak, asam amino, glukosa, serta asam asetat (Kristin, 2012).

Mikroorganisme memerlukan sumber energi dalam proses metabolismenya. Glukosa dipilih sebagai sumber energi dari mikroorganisme karena glukosa merupakan senyawa organik yang memiliki sumber karbon yang

paling sering digunakan dalam sistem MFC (Murray dkk., 2003). Menurut Rabaey dkk. (2003) substrat glukosa pada konsentrasi 0,5 – 3 gram/L dapat menghasilkan *power density* sebesar 3.6 W/m<sup>2</sup>.

Substrat lain yang dapat digunakan adalah asam asetat. Asam asetat merupakan senyawa organik yang paling umum digunakan sebagai sumber energi mikroba. Menurut Chae dkk. (2009) dalam penelitiannya mengkaji mengenai pengaruh dari substrat asetat, butirat, propionat dalam sistem MFC. Pengaruh substrat asetat memiliki nilai efisiensi yang tinggi jika dibandingkan dengan pengaruh substrat butirat dan propionat. Nilai efisiensi substrat asetat pada sistem *single chamber microbial fuel cell* sebesar 71%. Penelitian tersebut dilakukan pada konsentrasi 1 mM karena pada konsentrasi tersebut nilai efisiensi kolom berada pada titik stabil.

b. Sifat Kimia Larutan

Sifat kimia larutan yang mempengaruhi operasi MFC adalah tingkat keasaman. Metabolisme mikroba dipengaruhi oleh pH, selain itu pH juga berpengaruh terhadap pertumbuhan bakteri, dan transfer proton. Sistem MFC sebagian besar beroperasi pada pH mendekati netral untuk menjaga kondisi pertumbuhan optimal komunitas mikroba yang terlibat dalam pembentukan listrik. Kehadiran pH dapat meningkatkan proses difusi proton dari anoda menuju katoda (Liu, 2008).

c. Bahan Elektroda

Sistem MFC merupakan teknologi yang berbasis pada prinsip elektrokimia, sehingga material elektroda sangat penting pada nilai efisiensi MFC. Elektroda pada sistem MFC dibagi menjadi dua jenis yaitu anoda dan katoda. Material anoda pada sistem MFC merupakan material yang berbasis karbon, karena memiliki sifat konduktivitas yang tinggi, stabil, strukturnya kuat, sifat permukaan yang sesuai untuk perkembangan biofilm dan luas permukaan yang memadai. Anoda yang umumnya digunakan pada sistem MFC adalah grafit dalam bentuk lempeng, batangan, busa, granular dan karbon aktif. Bahan katoda yang biasa digunakan pada sistem MFC adalah karbon biasa yang dilengkapi dengan katalis seperti platinum. Namun, katoda ini membutuhkan biaya yang tinggi

dalam pemakaiannya sehingga dapat diganti dengan karbon biasa seperti plat grafit (Liu, 2008).

d. Suhu

Suhu menentukan kinetika bakteri dan laju reaksi oksigen pada katoda. Studi MFC umumnya dilakukan pada temperatur 28 – 35<sup>0</sup>C. Menurut Cheng dkk. (2011) suhu yang rendah berdampak pada nilai *power density* yang rendah. Hal ini ditunjukkan dalam penelitiannya mengenai operasi MFC pada variasi temperatur. Variasi suhu 4<sup>0</sup>C menghasilkan nilai *power density* sebesar 425 ± 10 mWm<sup>-2</sup>, suhu 15<sup>0</sup>C menghasilkan nilai *power density* sebesar 709 ± 10 mWm<sup>-2</sup>, suhu 20<sup>0</sup>C menghasilkan nilai *power density* sebesar 940 ± 6 mWm<sup>-2</sup>, nilai tertinggi berada pada suhu 30<sup>0</sup>C menghasilkan nilai *power density* sebesar 1260 ± 10 mWm<sup>-2</sup>.

e. Waktu Inkubasi Substrat

Inkubasi substrat ini akan mempengaruhi biofilm dari elektroda. Kristin (2012) menyebutkan bahwa diperlukan waktu selama 3 minggu atau sekitar 21 hari untuk mendapatkan nilai beda potensial yang stabil. Dalam waktu 1 minggu elektroda akan membentuk biofilm dan menghasilkan *power* yang rendah, pada minggu kedua *power* akan naik dari minggu sebelumnya, sedangkan pada minggu ke 3 nilai *power* tersebut akan stabil.

#### 2.2.4 Aplikasi MFC

Aplikasi MFC dapat digunakan dalam aplikasi dalam beberapa bidang diantaranya adalah pada pemanfaatan biomassa. Sebagai alternatif dari menggunakan biomassa misalnya pada tanah organik. Biosensor menjadi aplikasi lain dari adanya MFC. Menurut Kristin (2012) sistem MFC dengan komunitas *consortium* anaerobik bisa digunakan sebagai sensor untuk *on-line monitoring* senyawa organik.

### 2.3 Tanah Organik

Tanah merupakan tempat bermukimnya berbagai kehidupan tumbuhan, hewan, dan jasad renik dengan jumlah yang tidak dapat terhitung. Tanah merupakan tempat bagi kehidupan yang sangat beraneka ragam, berkisar dari organisme bersel tunggal yang mikroskopis sampai dengan hewan yang besar menggali liang. Masing – masing ekosistem mempunyai kombinasi makhluk hidup dan sumberdaya abiotik yang unik yang berfungsi mempertahankan aliran energi dan hara yang berkesinambungan (Forth, 1994).

Tanah organik merupakan tanah yang mengandung banyak komponen organik. Komponen organik tersebut dapat berasal dari bahan organik tanah. Bahan organik merupakan proses dekomposisi dari sisa tumbuhan, hewan dan manusia yang berada didalam tanah atau berada pada permukaan tanah (Bohn dan Connor, 1979).

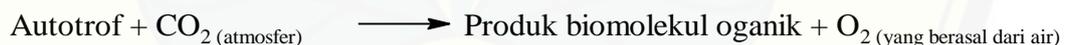
Tanah tersusun oleh tiga kelompok material, yaitu material hidup (Faktor biotik) berupa biota (jasad hayati), faktor abiotik berupa bahan organik dan faktor abiotik pasir (*sand*), debu (*silt*) dan liat (*clay*) hal tersebut dibedakan secara ekologis. Kesuburan tanah tidak hanya bergantung pada komposisi kimiawinya melainkan pada ciri alami dari mikroorganisme penghuninya. Mikroorganisme yang menghuni tanah dapat dikelompokka menjadi bakteri, aktinomisetes, jamur, alga dan protozoa (Rao, 1994).

Populasi organisme dalam tanah berbeda – beda dalam setiap jenisnya. Populasi dan habitat dalam tanah bersama – sama membentuk suatu ekosistem. Dalam suatu ekosistem tanah berbagai mikroba bertahan hidup dengan cara berkompetisi dalam memperoleh ruang, oksigen, air, hara dan kebutuhan hidup lainnya baik secara simbiotik maupun secara non simbiotik. Kompetisi tersebut menyebabkan bentuk interaksi antar mikroba (Yuliprianto, 2010).

Mikroorganisme merupakan makhluk hidup yang memiliki ukuran yang sangat kecil. Umumnya mikroorganisme sering disebut sebagai jasad renik. Mikroorganisme sangat sulit dilihat dengan mata tanpa menggunakan alat bantu. Mikroorganisme memiliki metabolisme yang lebih sederhana dibandingkan dengan organisme tingkat tinggi (Sumarsih, 2003).

Mikroorganisme tanah berperan dalam degradasi bahan organik kompleks dan pendauran unsur hara yang nantinya akan mempengaruhi sifat fisik dan sifat kimia tanah (Anas, 1989). Mikroorganisme tanah berperan dalam siklus energi yang akan menghasilkan molekul organik sebagai nutrisi dan molekul lain yang kembali ke atmosfer, sehingga siklus energi ini terus berlangsung. Siklus energi ini dilakukan oleh dua grup besar organisme (mikroorganisme) yaitu autotrof dan heterotrof.

Autotrof merupakan kelompok organisme yang dapat menggunakan  $\text{CO}_2$  dari atmosfer sebagai sumber C tunggalnya. Sedangkan heterotrof merupakan kelompok organisme yang tidak dapat menggunakan  $\text{CO}_2$  atmosfer, sehingga harus mendapat C dari lingkungan seperti glukosa. Berikut skema rangkuman *raw material* dan produk yang dihasilkan oleh mikroorganisme autotrof dan heterotrof:



Produk-produk yang dihasilkan oleh kedua mikroorganisme diatas berasal dari metabolisme yang dilakukan keduanya (Lehninger, 1994).

Aktivitas mikroorganisme pada sistem metabolisme inilah yang dimanfaatkan dalam sistem MFC. MFC memanfaatkan kemampuan mikroorganisme dalam mendegradasi bahan organik sehingga menghasilkan energi berupa listrik. Mikroorganisme yang melakukan degradasi bahan organik sehingga menjadi energi yaitu mikroorganisme golongan heterotrof. Metabolisme heterotrof terkait dengan proses katabolisme. Proses katabolisme yaitu hidrolisis (penguraian) polimer menjadi molekul sederhana seperti  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , dan  $\text{H}_2\text{O}$ .

Katabolisme glukosa tidak terjadi dalam satu reaksi kimia dan juga tidak langsung membentuk ATP. Energi glukosa akan diekstrak dan ditranfer perlahan hingga menghasilkan ATP melalui jalur metabolisme. Proses awalnya terkait dengan kondisi respirasi aerob (karena ini terjadi dalam kondisi aerob obligat). (Pommerville, 2011).



### BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Kimia Analitik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Mei 2017 sampai Desember 2017.

#### 3.2 Alat dan Bahan

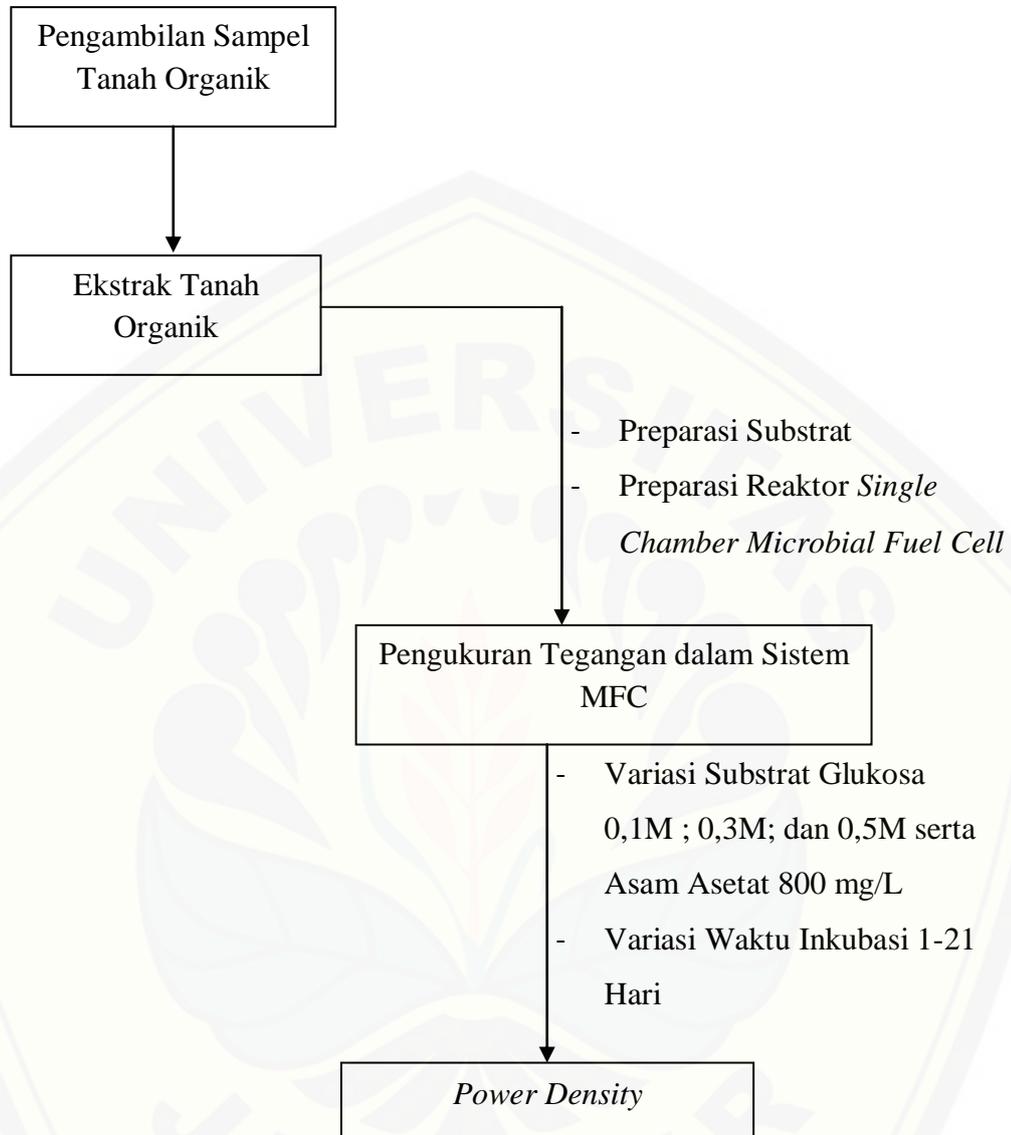
##### 3.2.1 Alat

Peralatan yang akan digunakan dalam penelitian ini antara lain : sekop tanah, gelas ukur, labu ukur, gelas *beaker*, erlenmeyer, pipet tetes, ayakan 0.5 mm, neraca analitik, *ball* pipet, pipet volume, multimeter digital, anoda, katoda, elektroda karbon, tabung *single chamber microbial fuel cell* lengkap dengan penutup, lampu *LED*, kapasitor, *stopwatch*, dan termometer.

##### 3.2.2 Bahan

Bahan yang diperlukan dalam penelitian ini antara lain : tanah organik dari perkebunan organik Wonosari Bondowoso, aquades,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  600 mg/L, 800 mg/L, dan 1000 mg/L. Glukosa ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) 0.1 M, 0.3 M dan 0.5 M.

### 3.3 Diagram Alir Penelitian



### 3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang akan dilakukan terdiri dari preparasi sampel tanah organik kemudian dilanjutkan dengan eksperimen *single chamber microbial fuel cell* dengan variasi substrat dan waktu inkubasi substrat, serta penentuan *power density*.

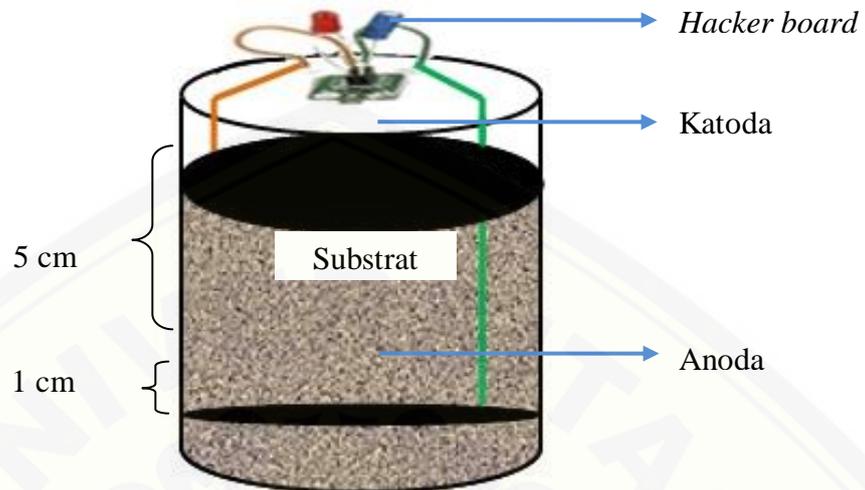
#### 3.4.1 Preparasi Substrat

Substrat yang digunakan pada penelitian ini adalah glukosa dan asetat. Glukosa dan asetat dicampurkan dengan sampel tanah sebagai substrat. Glukosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) yang digunakan terbuat dari 0.5 gram glukosa dalam 6 mL aquades. Larutan glukosa dengan konsentrasi 0,3 M dari 0.5 gram glukosa dalam 10 mL aquades. Sedangkan larutan glukosa 0,1 M dibuat dari 0.5 gram glukosa dalam 30 mL aquades. Asetat merupakan senyawa organik yang digunakan sebagai variasi jenis substrat pada penelitian ini. Asetat yang digunakan pada penelitian ini sebesar 600 mg/L, 800 mg/L dan 1000 mg/L.

#### 3.4.2 Preparasi Eksperimen *Single Chamber Microbial Fuel Cell*

##### a. Desain Alat *Single Chamber Microbial Fuel Cell*

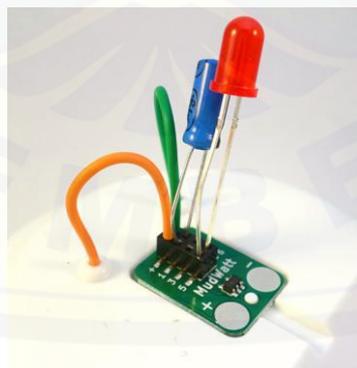
Desain *Single Chamber Microbial Fuel Cell* yang digunakan terdiri dari satu bejana (*Single Chamber*) yang memiliki volume bejana sebesar 500 mL dan dilengkapi dengan penutupnya. Anoda dan katoda terbuat dari serat grafit yang dihubungkan menggunakan kawat titanium dengan warna hijau sebagai kawat yang menghubungkan dengan anoda dan warna *orange* sebagai kawat yang menghubungkan dengan katoda. Anoda diletakkan diatas substrat, pada ketinggian 1 cm didalam bejana, sedangkan katoda diletakkan 5 cm diatas substrat dari jarak anoda. Kawat pada anoda dan katoda akan terhubung menuju *Hacker Board* yang nantinya akan menghasilkan nilai *Power Density*. Berikut adalah gambar dari desain *single Chamber Microbial Fuel Cell* :



Gambar 3.1 Desain Alat *Single Chamber Microbial Fuel Cell* (Lohner, 2016).

b. Desain *Hacker Board*

*Hacker Board* terletak pada tutup dari bejana terdiri dari 8 pin yang memiliki fungsi yang berbeda. Pin dengan tanda (+) tersambung dengan katoda dan (-) tersambung dengan anoda, pin 1 dan 2 tersambung dengan kapasitor sedangkan pin 5 dan 6 tersambung dengan lampu LED. Berikut adalah gambar desain dari *hacker board* :



Gambar 3.2 Desain *Hacker Board* (Lohner, 2016).

### 3.4.3 Ekserimen *Single Chamber Microbial Fuel cell*

#### a. Variasi Jenis dan Konsentrasi Substrat

Substrat merupakan faktor kunci pada produksi listrik yang efisien dalam sistem *Microbial Fuel Cell*. Jenis substrat yang digunakan merupakan senyawa organik yang dapat membantu pertumbuhan dari mikroba aktif (Das dan Mangwani., 2010). Tanah organik dengan variasi jenis substrat yang digunakan pada penelitian ini adalah glukosa dan asam asetat. Variasi glukosa sebesar 0.1 M, 0.3 M dan 0.5 M. Sedangkan variasi jenis substrat yang digunakan adalah asam asetat sebesar 600 mg/L, 800 mg/L dan 1000 mg/L serta adanya perlakuan terhadap tanah organik tanpa penambahan substrat yang digunakan sebagai kontrol.

Larutan glukosa 0.1 M sebanyak 10 mL ditambahkan kedalam 450 mL sampel tanah. Substrat glukosa kemudian diaduk secara mekanik hingga semua bercampur. Substrat glukosa tersebut akan dimasukkan kedalam kompartemen *single chamber microbial fuel cell* sebagai variasi konsentrasi dari substrat glukosa. Hal yang sama dilakukan pada variasi konsentrasi glukosa sebesar 0.3 M dan 0.5 M.

Jenis substrat kedua yang digunakan adalah asam asetat. Asam asetat 600 mg/L diambil sebanyak 10 mL kemudian dicampur dengan sampel tanah organik dan diaduk secara mekanik seperti halnya pada substrat glukosa. Hal yang sama dilakukan pada variasi konsentrasi 800 mg/L dan 1000 mg/L. Substrat asam asetat dan tanah kemudian dimasukkan kedalam kompartemen *single chamber microbial fuel cell*.

Tanah organik tanpa penambahan substrat digunakan sebagai kontrol. Kontrol ini berfungsi untuk membandingkan nilai dari *power density* tanpa penambahan substrat serta dengan penambahan substrat. Tanah organik dimasukkan kedalam kompartemen dengan penambahan aquades sebesar 450 mL tanpa penambahan substrat senyawa organik.

b. Variasi Lama Inkubasi Substrat

Substrat yang telah di masukkan kedalam kompartemen *single chamber microbial fuel cell* di inkubasi selama 7 hari, 14 hari dan 21 hari. Waktu yang dibutuhkan oleh mikroba membentuk biofilm pada anoda adalah sekitar 7 hari. Selama waktu tersebut pengukuran arus, dan beda potensial, dan *power output* dilakukan mulai dari hari pertama hingga 21 hari. Pada waktu 7 hari keatas diharapkan nilai kuat arus, tegangan akan meningkat, sedangkan pada waktu 21 hari diharapkan nilai pengukuran akan stabil.

#### 3.4.4 Pengukuran Tegangan dan Kuat Arus Sistem MFC

Tegangan dari sistem MFC diukur menggunakan multimeter digital. Sedangkan kuat arus dari sistem MFC diukur menggunakan mikroampere analog. Data yang berupa tegangan dan kuat arus kemudian diolah sehingga didapatkan nilai *power density* ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ), yaitu daya persatuan luas permukaan elektroda. *Power Density* dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Kristin, 2012).

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

## BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini yaitu :

1. Penambahan variasi konsentrasi glukosa pada sistem *single chamber microbial fuel cell* menghasilkan nilai *power density* optimum sebesar  $22.53 \text{ mW/m}^2$  pada variasi konsentrasi  $0.1 \text{ M}$ .
2. Penambahan variasi konsentrasi asam asetat pada sistem *single chamber microbial fuel cell* menghasilkan nilai *power density* optimum sebesar  $4.96 \text{ mW/m}^2$  pada variasi konsentrasi asam asetat  $600 \text{ mg/L}$ .
3. Nilai *power density* optimum glukosa didapatkan pada waktu inkubasi hari ke – 16 sedangkan nilai *power density* optimum asam asetat didapatkan pada waktu inkubasi hari ke – 14.

### 5.2 Saran

Terdapat beberapa saran untuk pengembangan penilitan MFC selanjutnya, yaitu :

1. Perlunya mengetahui jenis bakteri yang terkandung dalam sampel tanah. sehingga dapat memudahkan dalam mengamati nilai dari daya yang dihasilkan.
2. Perlunya perbaikan mengenai desain alat MFC terlebih dilakukan dengan merangkai bejana pada kondisi seri dan paralel

**DAFTAR PUSTAKA**

Behera, M., Jana, P.S., More, T.T., Ghangrekar, M.M. 2010. Rice Mill Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells Fabricated Using Proton Exchange Membrane and Earthen Pot at Different pH. *Bioelectrochemistry*. 79: 228-233.

Bohn, dan connor. 1979. *Soil Chemistry*. New York : John Wiley and Sons, Inc.

Chae Kyu-jung, Mi-Jin Choi, Jin-Wook Lee, Kyoung-Yeol Kim, In S. Kim. 2009. Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. 100: 3518–3525.

Chang, Seop I, Moon H, Bretschger O, Kyung JJ, Il HP, Nealson KH, Hong BK. 2006. Electrochemically Active Bacteria (EAB) And Mediator-Less Microbial Fuel Cells. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 16 (2): 163-177.

Cheng, Defeng Xing, Bruce E Logan. 2011. Electricity generation of single-chamber microbial fuel cells at low temperatures. *Biosensors and Bioelectronics*. 26: 1913 – 1917.

Das dan Mangwani. 2010. Recent developments in Microbial Fuel Cells : a review. *Scientific & Industrial Research*. 69:727-731.

- Du, Zhuwei, H. Li, and T. Gu. 2007. A State Of The Art Review on Microbial Fuel Cell; A Promising Technology for Wastewater Treatment and Bioenergy. *Journal Biotechnology Advances*. 25: 464-482.
- Hasan, achmad. 2007. Aplikasi sistem *fuel cell* sebagai energy ramah lingkungan di sektor transportasi da pembangkit. *Jurnal Teknik Lingkungan*. 8(3): 277-286.
- Idham F., Halimi, S., dan Latifah S. 2009. *Alternatif Baru Sumber Pembangkit Listrik dengan Menggunakan Sedimen Laut Tropika Melalui Teknologi Microbial Fuel Cell*. Bogor : Teknologi Hasil Perairan Institut Pertanian Bogor.
- Ieropoulos, I, J. Greenman. 2008. Microbial fuel cell based on carbon veil electrodes: stack configuration and salability. *International Journal Of Energy Research*. 32: 1228-1240.
- J. Larminie, A.L. Dicks. 2000. *Fuel Cell Systems Explained*. New York: Wiley.
- Kiely D Patrick, Geoffrey rader, John M. Regan, Bruce E. Logan. 2011. Long-term cathode performance and the microbial communities that develop in microbial fuel cells fed different fermentation endproducts. *Bioresource Technology*. 102 : 361 -366.
- Kim B.H, Chang I.S, Gil, G.C, Park H.S, Kim H.J, Novel. 2003. BOD sensor using mediator-less microbial fuel cell. *Biotechnol*. 25: 541–545.

- Kim G.T., Webster G., Wimpenny J.W.T., Kim B.H., Kim H.J., Weightman A.J. 2006. Bacterial Community Structure, Compartmentalization and Activity in a Microbial Fuel Cell. *J. Appl. Microbiology*.
- Kordesch, K. V. dan Simader, G. 1996. *Fuel cell and their application*. Weinheim: VCH.
- Kristin, E. 2012. Produksi Energi Listrik melalui Microbial Fuel Cell Menggunakan Limbah Industri Tempe. *Skripsi*. Depok: Universitas Indonesia.
- Liu, Cheng, Logan. 2005. Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell. *Environmental Science Technology*. 39: 658 – 662.
- Liu, H. 2008. Microbial fuel cell: Novel anaerobic bioteknologi for energy generation from wastesater. Anaerobic bioteknologi for bioenergy production : principles and application. S. K. Khanal. Iowa, Blackwell Publishing:221-234.
- Liu, Logan. 2004. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environmental Science Technology*. 38: 4040 – 4046.
- Lee, Seung Won. Jeon, Bo Young. Park, Doo Hyun. 2010. *Effect of bacterial cell size on electricity generation in a single-compartmented microbial fuel cell*. *Biotechnol Lett* 32: 483-487.

Logan and Regan. 2006. Electricity-producing Bacterial communities in Microbial Fuel Cells. *Trends in Microbiology*.

Logan Bruce E. 2008. *Microbial Fuel Cell*. Canada: WILEY.

Lohner, Svenja. 2016. *How Do Bacteria Produce Power in a Microbial Fuel Cell?*.  
<http://www.sciencebuddies.org/science-fairprojects/projectideas/MicroBiop032/microbiology/bacteria-microbial-fuel-cell.shtml#procedure>.  
[Diakses pada 20 November 2016].

Lovely, DR. 2006. Microbial Fuel Cells: Novel Microbial Physiologies And Engineering Approaches. *Curr Opin Biotech*. 17:327-32.

Murray R. K., Granner D. K., Mayes P.A., and Rodwell. 2003. *Harper's Illustrated Biochemistry*. 26th ed. USA : Appleton & Lange.

Novitasari, D. 2011. Optimasi Kinerja Microbial Fuel Cell (MFC) untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Bakteri *Lactobacillus Bulgaricus*. *Skripsi*. Depok: Universitas Indonesia.

Park HS, Kim BH, Kim HS, Kim HJ, Kim GT, Kim M, Chang IS, Park YK, dan Chang HI. 2001. A Novel electrochemically active and Fe (III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Clostridium butyricum* isolated from microbial fuel cell. *J. Anaerobe*

Pommerville, J. C. 2011. *Alcamo's fundamentals of microbiology*. 9th ed. USA: Jones and Bartlett Publishers, LLC.

Rabaey Korneel, Geert Lissens, Steven D. Siciliano & Willy Verstraete. 2003. A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology Letters* 25: 1531–1535.

Rabaey, Korneel., Lissens, Geert., Siciliano, Steven., Verstraete. 2003. A microbial Fuel Cell Capable of Converting Glucose to Electricity at High Rate and Efficiency. *Biotechnology Letters*. 25:1531-1535

Rao, Suba N.S. 1994. *Mikrobiologi Tanah dan Pertumbuhan Tanaman*. Diterjemahkan oleh Herawati Susilo. Jakarta: UI Press.

Rita arbianti, Tania Surya Utami, Heri Hermansyah, Deni Novitasari, Ester Kristin, Ira Trisnawati. 2013. Performance optimization of microbial fuel cell using lactobacillus bulgaris. *Makara Journal Of Technology*. 17(1): 32-38.

Schroder, U. 2007. *Anodic Electrone Transfer Mechanisms in Microbial Fuel Cells and Their Energy Efficiency*. German: Institut for Biochemie.

Schroder, U. 2007. *Anodic Electrone Transfer Mechanisms in Microbial Fuel Cells and Their Energy Efficiency*. German: Institut for Biochemie.

- Sharon B. Velasquez-Orta, Eileen Yu. Krishna P. Katuri. Ian M. Head. Tom P. Curtis, Keith Scot. 2011. Evaluation of Hydrolysis and Fermentation Rates in Microbial Fuel Cell. *Microbial Biotechnol.* 90:789-798.
- Sirinutsombon, Bunpot. 2014. Modeling of a membraneless single-chamber microbial fuel cell with molasses as an energy sources. *International Journal Energy Environment* 5:93.
- Sitorus B. 2010. Diversifikasi sumber energi terbarukan melalui penggunaan air buangan dalam sel elektrokimia berbasis mikroba. *Jurnal ELKHA* 2 (1): 10-15.
- Sumarsih, S. 2003. *Mikrobiologi Dasar*. Yogyakarta : Fakultas Pertanian UPN Veteran.
- Sun Guotao, Thygesen Anders, Meyer Anne. 2015. Acetate is a superior substrate for microbial fuel cell initiation preceding bioethanol effluent utilization. *Microbiol Biotechnol* 99: 4905-4915
- Sun J, Hu Y, Bi Z, Cao Y. 2009. Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology* 100: 3185-3192.
- Utomo, B. S., Nuraini, Y., da Widiyanto. 2015. Kajian Kemantapan Agregat Tanah pada Pemberian beberapa Jenis Bahan Organik di Perkenbunan Kopi Robusta. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan.* 2 (1): 111-117.

Yanti, N. 2011. *Pengaruh Penambahan Volume Bakteri Pseudomonas flourescens Terhadap Voltase Sel Bahar Mikroba*. Skripsi. Surabaya. Universitas Negeri Surabaya.

Yuliprianto, H. 2010. *Biologi Tanah dan Strategi Pengolahannya*. Yogyakarta : Graha Ilmu.

Zahara, N. C. 2011. *Pemanfaatan Saccharomyces Cerevisiae dalam Sistem Microbial Fuel Cell untuk Produksi Energi Listrik*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia.

Zhu N, Chen X, Zhang T, Wu P, Li P, Wu J. 2011. Improved Performance of Membrane Free Single-Chamber Air-Cathode Microbial Fuel Cell with Nitric Acid and Ethylenediamine Surface Modified Activated Carbon Fiber Felt Anodes. *Bioresource Technology*. 102: 422-426.

## LAMPIRAN

## Lampiran 4.1. Data Pengukuran Pada Variasi Substrat

## 4.1.1 Nilai Tegangan

## A. Nilai Tegangan Substrat Glukosa

Waktu (Hari)	Kontrol (V)	0.1 M (V)	0.3 M (V)	0.5 M (V)
1	0.55	0.29	0.54	0.75
2	0.56	0.33	0.64	0.73
3	0.57	0.37	0.76	0.73
4	0.6	0.56	0.77	0.77
5	0.69	0.69	0.78	0.77
6	0.7	0.72	0.79	0.78
7	0.71	0.73	0.79	0.78
8	0.71	0.73	0.79	0.79
9	0.71	0.74	0.8	0.79
10	0.71	0.75	0.8	0.77
11	0.71	0.75	0.8	0.75
12	0.71	0.76	0.81	0.71
13	0.72	0.76	0.81	0.7
14	0.72	0.78	0.81	0.69
15	0.73	0.8	0.82	0.67
16	0.74	0.8	0.82	0.67
17	0.76	0.8	0.83	0.67
18	0.74	0.79	0.84	0.66
19	0.74	0.74	0.84	0.65
20	0.74	0.7	0.79	0.65
21	0.74	0.68	0.77	0.61
22	0.7	0.64	0.72	0.58
23	0.68	0.58	0.67	0.55
24	0.64	0.56	0.63	0.52
25	0.59	0.52	0.61	0.49
26	0.57	0.47	0.58	0.48
27	0.55	0.44	0.56	0.45
28	0.4	0.4	0.53	0.43
29	0.39	0.32	0.49	0.41
30	0.39	0.3	0.48	0.4

## B. Nilai Tegangan Substrat Asam Asetat

Waktu (Hari)	Kontrol (V)	600 mg/L (V)	800 mg/L (V)	1000 mg/L (V)
1	0.55	0.01	0.01	0.01
2	0.56	0.02	0.02	0.03
3	0.57	0.03	0.06	0.03
4	0.6	0.1	0.12	0.13
5	0.69	0.12	0.15	0.14
6	0.7	0.16	0.19	0.17
7	0.71	0.2	0.25	0.21
8	0.71	0.22	0.29	0.25
9	0.71	0.25	0.32	0.33
10	0.71	0.27	0.38	0.45
11	0.71	0.39	0.5	0.52
12	0.71	0.53	0.64	0.65
13	0.72	0.63	0.74	0.77
14	0.72	0.68	0.78	0.81
15	0.73	0.71	0.8	0.88
16	0.74	0.66	0.75	0.83
17	0.76	0.53	0.62	0.79
18	0.74	0.32	0.41	0.66
19	0.74	0.14	0.23	0.45
20	0.74	0.08	0.17	0.22
21	0.74	0.03	0.08	0.13
22	0.7	0.03	0.08	0.12
23	0.68	0.03	0.07	0.11
24	0.64	0.02	0.06	0.08
25	0.59	0.01	0.03	0.08
26	0.57	0	0.01	0.04
27	0.55	0	0	0
28	0.4	0	0	0
29	0.39	0	0	0
30	0.39	0	0	0

## 4.1.2 Nilai Kuat Arus

## A. Nilai Kuat Arus Substrat Glukosa

Waktu (hari)	Kontrol (mA)	0.1 M (mA)	0.3 M (mA)	0.5 M (mA)
1	0.016	0.116	0.116	0.098
2	0.016	0.123	0.117	0.129
3	0.015	0.124	0.18	0.129
4	0.016	0.137	0.18	0.129
5	0.015	0.137	0.18	0.129
6	0.04	0.163	0.182	0.13
7	0.046	0.181	0.183	0.131
8	0.047	0.183	0.184	0.131
9	0.047	0.186	0.19	0.132
10	0.048	0.187	0.191	0.133
11	0.049	0.196	0.191	0.134
12	0.049	0.204	0.192	0.134
13	0.05	0.205	0.193	0.136
14	0.051	0.206	0.193	0.136
15	0.052	0.217	0.194	0.136
16	0.052	0.221	0.195	0.138
17	0.052	0.221	0.195	0.138
18	0.051	0.126	0.195	0.138
19	0.043	0.124	0.196	0.139
20	0.042	0.119	0.187	0.14
21	0.028	0.114	0.186	0.141
22	0.028	0.112	0.183	0.141
23	0.026	0.111	0.179	0.143
24	0.023	0.108	0.171	0.144
25	0.02	0.107	0.144	0.144
26	0.017	0.107	0.124	0.116
27	0.016	0.104	0.117	0.111
28	0.015	0.102	0.109	0.088
29	0.012	0.102	0.083	0.073
30	0.012	0.076	0.064	0.065

## B. Nilai Kuat Arus Substrat Asam Asetat

Waktu (Hari)	Kontrol (mA)	600 mg/L (mA)	800 mg/L (mA)	1000 mg/L (mA)
1	0.016	0.0143	0.0142	0.0145
2	0.016	0.015	0.0143	0.0151
3	0.015	0.015	0.015	0.0152
4	0.016	0.0151	0.0152	0.0152
5	0.015	0.0154	0.016	0.0152
6	0.04	0.0159	0.0163	0.0158
7	0.046	0.016	0.0185	0.0159
8	0.047	0.016	0.0195	0.0162
9	0.047	0.016	0.02	0.0165
10	0.048	0.016	0.0212	0.0168
11	0.049	0.0163	0.024	0.0174
12	0.049	0.0164	0.03	0.018
13	0.05	0.017	0.035	0.018
14	0.051	0.0183	0.05	0.018
15	0.052	0.0185	0.0266	0.0188
16	0.056	0.0187	0.0181	0.019
17	0.052	0.02	0.018	0.0191
18	0.051	0.0212	0.018	0.02
19	0.043	0.0266	0.0177	0.0208
20	0.042	0.0266	0.0173	0.0218
21	0.028	0.03	0.0166	0.03
22	0.028	0.053	0.0164	0.05
23	0.026	0.02	0.015	0.0025
24	0.023	0.0166	0.0144	0.0024
25	0.02	0.015	0.0144	0.002
26	0.017	0	0.0143	0.001
27	0.016	0	0	0
28	0.015	0	0	0
29	0.012	0	0	0
30	0.012	0	0	0

4.1.3 Nilai *Power Density*A. Nilai *Power Density* Substrat Glukosa

Waktu (Hari)	Kontrol [ (mW/m <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup> ]	0.1 M [ (mW/m <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup> ]	0.3 M [ (mW/m <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup> ]	0.5 M [ (mW/m <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup> ]
1	1.09	4.28	7.97	9.36
2	1.12	5.17	9.53	11.5
3	1.12	5.84	17.43	11.59
4	1.23	9.77	17.65	11.6
5	1.31	12	17.88	11.6
6	3.56	14.9	18.31	11.77
7	4.16	16.83	18.31	11.77
8	4.25	17	18.51	11.95
9	4.25	17.5	19.36	12
10	4.34	17.86	19.46	12
11	4.43	18.72	19.46	12.11
12	4.43	19.75	19.81	12.12
13	4.58	19.84	19.91	12.65
14	4.67	20.46	19.91	12.65
15	4.83	22.11	20.26	12.8
16	4.9	22.53	20.36	12.8
17	5.03	22.53	20.61	12.91
18	4.8	12.68	20.86	13
19	4.05	11.68	20.97	13.18
20	3.95	10.16	18.81	13.28
21	2.64	9.87	18.24	10.95
22	2.49	9.13	16.78	10.41
23	2.25	8.2	15.27	10.01
24	1.87	7.7	13.72	9.53
25	1.5	7.08	11.18	8.98
26	1.23	6.4	9.16	7.09
27	1.12	5.83	8.34	6.36
28	0.76	5.19	7.36	4.82
29	0.59	0.41	5.18	3.81
30	0.59	0.29	3.91	3.31

B. Nilai *Power Density* Substrat Asam Asetat

Waktu (Hari)	Kontrol [(mW/m <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup> ]	600 mg/L [(mW/m <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup> ]	800 mg/L [(mW/m <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup> ]	1000 mg/L [(mW/m <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-3</sup> ]
1	1.09	0.018	0.018	0.0182
2	1.12	0.036	0.057	0.038
3	1.12	0.114	0.058	0.057
4	1.23	0.232	0.25	0.192
5	1.31	0.306	0.27	0.23
6	3.56	0.394	0.342	0.32
7	4.16	0.589	0.42	0.4
8	4.25	0.72	0.51	0.44
9	4.25	0.815	0.69	0.5
10	4.34	1.02	1.1	0.55
11	4.43	1.52	1.15	0.8
12	4.43	2.44	1.49	1.22
13	4.58	3.29	1.76	1.36
14	4.67	4.96	1.85	1.58
15	4.83	2.71	2.1	1.67
16	4.9	1.72	2	1.57
17	5.03	1.42	1.93	1.35
18	4.8	0.94	1.68	0.86
19	4.05	0.51	1.19	0.47
20	3.95	0.37	0.76	0.27
21	2.64	0.169	0.61	0.2
22	2.49	0.167	0.49	0.11
23	2.25	0.13	0.03	0.07
24	1.87	0.11	0.002	0.04
25	1.5	0.05	0.002	0.019
26	1.23	0.01	0.001	0
27	1.12	0	0	0
28	0.76	0	0	0
29	0.59	0	0	0
30	0.59	0	0	0

**Lampiran 4.2 Perhitungan Nilai Power Density**

## 4.3.1 Substrat Glukosa 0.1 M

Persamaan *Power Density* =

$$\text{Power Density} \left( \frac{mW}{m^2} \right) = \frac{I (mA) \times V (Volt)}{A (m^2)}$$

- Waktu Inkubasi hari ke - 16

$$\begin{aligned} \text{Power Density} \left( \frac{mW}{m^2} \right) &= \frac{0.221 \text{ mA} \times 0.8 \text{ Volt}}{7.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2} \\ &= 22.53 \text{ mW/m}^2 \end{aligned}$$

Perhitungan nilai *power density* dilakukan dengan menggunakan persamaan yang sama untuk variasi konsentrasi substrat yang berbeda.