



SKRIPSI – TK091383

**DEGRADASI *STILLAGE* DENGAN MENGGUNAKAN
TEKNOLOGI *MICROBIAL FUEL CELLS* (MFCs)
YANG MEMANFAATKAN LUMPUR LAPINDO
SEBAGAI *CULTURE SOURCE* DAN PENGARUHNYA
PADA *POWER DENSITY* YANG DIHASILKAN**

Oleh:

**Wangsit Aria Kirana
NRP. 02211645000001
Sandra Sopian
NRP. 02211645000005**

**Dosen Pembimbing
Dr. Eng. R. Darmawan, S.T.,M.T.
NIP. 19780506 200912 1 001**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**



FINAL PROJECT – TK141581

**DEGRADATION OF STILLAGE USING MICROBIAL
FUEL CELLS (MFCs) TECHNOLOGY THAT
UTILIZE LAPINDO MUD AS CULTURE SOURCE
AND THE EFFECT ON POWER DENSITY**

By:

WANGSIT ARIA KIRANA

NRP. 02211645000001

SANDRA SOPIAN

NRP. 02211645000005

Lecturer

Dr. Eng. R. Darmawan, S.T., M.T.

NIP. 19780506 200912 1 001

**DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**

LEMBAR PENGESAHAN

Degradasi *Sililage* dengan Menggunakan Teknologi *Microbial Fuel Cells* (MFCs) yang Memanfaatkan Lumpur Lapindo sebagai *Culture Source* dan Pengaruhnya pada *Power Density* yang Dihasilkan

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Departemen
Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Oleh :

Wangsit Aria Kirana

NRP. 02211645000001

Sandra Sopian

NRP. 02211645000005

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. R. Darmawan, S.T.,M.T.
(Pembimbing)
2. Ir. Nuniek Hendrianie, M.T.
(Penguji I)
3. Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti M.Eng
(Penguji II)
4. Siti Zulakha, S.T.,M.T.,Ph.D.
(Penguji III)



[Handwritten signatures of the examiners]

**DEGRADASI *STILLAGE* DENGAN MENGGUNAKAN
TEKNOLOGI *MICROBIAL FUEL CELLS* (MFCs) YANG
MEMANFAATKAN LUMPUR LAPINDO SEBAGAI
CULTURE SOURCE DAN PENGARUHNYA PADA *POWER
DENSITY* YANG DIHASILKAN**

Nama Mahasiswa : 1. Wangsit Aria K (02211645000001)
2. Sandra Sopian (02211645000005)

Dosen Pembimbing : Dr. Eng. R. Darmawan, S.T.,M.T.

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknologi Industri

ABSTRAK

Kebutuhan akan energi alternatif khususnya energi listrik pada saat ini semakin meningkat. dengan berkurangnya jumlah bahan bakar yang tidak dapat diperbaharui seperti minyak bumi dan gas alam mendorong para ilmuwan untuk melakukan penelitian dalam menemukan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. *Microbial fuel cells* (MFCs) merupakan salah satu teknologi sel bahan bakar alternatif yang dapat diperbaharui. MFCs memanfaatkan proses oksidasi senyawa kimia oleh bakteri untuk menghasilkan energi listrik. Selain mampu menghasilkan listrik, sistem MFCs ini juga menjadi alternatif sistem pengolahan air limbah secara anaerob, karena kemampuannya untuk mendegradasi kandungan organik yang terdapat dalam medium. Saat ini, produksi etanol sebagai *biofuel* semakin meningkat seiring dengan tuntutan bahan bakar alternatif yang berasal dari sumber daya hayati khususnya dari molasses. Namun, dalam prosesnya menghasilkan produk samping yang masih kaya akan sumber organik baik makro maupun mikro N, P, K, Ca, Mg, dan S yang nilainya berkisar 0,04-6,5 g/L. Produk samping tersebut dikenal sebagai *stillage*. Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan teknologi *Microbial fuel cells* (MFCs) dalam menghasilkan listrik

sekaligus mendegradasi *stillage* dari proses metabolisme mikroba/bakteri secara alami. Berdasarkan kandungan total karbon organik sebesar 54,75 – 55,47%, maka dimungkinkan di dalam lumpur lapindo terdapat kehidupan bakteri *electricigens* yang bisa dimanfaatkan sebagai *culture source*. Material elektroda yang digunakan adalah *Carbon cloth* dengan sambungan menggunakan tembaga dan titanium. Adapun dari hasil penelitian selama 9 minggu per fase penelitian, disimpulkan bahwa rasio terbaik berat lumpur/*stillage* untuk menghasilkan *power density* yang terbesar dengan jumlah bakteri yang relatif konstan adalah pada rasio 98,75% : 1,25% dengan penambahan nutrient MMY yang menghasilkan listrik sebesar 0,99 watt/m². Degradasi parameter organik yang meliputi COD, BOD dan TOC dari *Stillage* dengan menggunakan teknologi MFCs pada minggu keenam secara berturut-turut sebesar 99,73 %, 84,29 % dan 99,44 %.

Kata kunci : *Degradasi, Stillage, MFCs, Lumpur Lapindo, Carbon Cloth.*

**DEGRADATION OF STILLAGE USING MICROBIAL
FUEL CELLS (MFCs) TECHNOLOGY UTILIZING
LAPINDO MUD AS A CULTURE SOURCE AND THE
EFFECT ON POWER DENSITY**

Name : 1. Wangsit Aria Kirana (02211645000001)
2. Sandra Sopian (02211645000005)
Advisors : Dr.Eng. R. Darmawan, S.T., M.T.
Department : Chemical Engineering
Faculty : Industrial Technology

ABSTRACT

Nowadays, the necessity and human dependence on electrical energy is very high. However on the other hand, fossil fuels as a limited energy source can not be updated. Up to now, the amount of fossil fuel continuously consumed, it caused some environmental problems such as global warming, air pollution, ozone layer depletion, forest degradation and emissions of radioactive elements. Alternative energy sources to replace fossil-based energy is desirable, especially fossil energy reserves dwindling every day. One way to overcome this problem is to utilize the technology of MFCs. Microbial fuel cells (MFCs) are one of the renewable alternative fuel cell technologies. MFCs utilize the oxidation process of chemical compounds by bacteria to generate electrical energy. In addition to being able to generate electricity, the MFCs system is also an alternative to anaerobic wastewater treatment systems, due to its ability to degrade organic content contained in the medium.

Currently, ethanol production as biofuel is increasing in line with the demands of alternative fuels derived from biological

resources especially from molasses. However, in the process of producing a by-product that is still rich in both macro and micro organic sources of N, P, K, Ca, Mg, and S whose value ranges from 0.04-6.5 g / L. These by-products are known as stillage. This study aims to utilize Microbial Fuel Cells (MFCs) technology in generating electricity as well as degradation stillage from microbial / bacterial metabolism processes naturally. In addition, Lapindo mud is used as a culture source because it is possible to contain bacteria electricigen (bacteria that play an important role in generating electrons/electricity). Electrode material used is Carbon cloth with Cu and Ti wires.

As for the results of the research for 9 weeks, it is concluded that the best weight ratio of sludge / stillage to produce the largest power density with a relatively constant amount of bacteria is at a ratio of 1.25% with the addition of minimum medium yeast (MMY) which produces 0.99 watts / m² of electricity. Degradation of organic parameters including COD, BOD and TOC from Stillage using MFCs technology of 99.73%, 84.29% and 99.44% respectively in the sixth week.

Keywords : *degradation, stillage, MFCs, lapindo mud, carbon cloth.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya yang kepada kami semua. Sehingga kami dapat menyelesaikan laporan skripsi dengan judul :

“Degradasi *Stillage* dengan Menggunakan Teknologi *Microbial Fuel Cells* (MFCs) yang Memanfaatkan Lumpur Lapindo sebagai *Culture Source* dan Pengaruhnya pada *Power Density* yang Dihasilkan”

Laporan Skripsi merupakan salah satu persyaratan yang harus dilalui mahasiswa Teknik Kimia FTI-ITS guna memperoleh gelar sarjana. Laporan skripsi ini kami susun berdasarkan aplikasi ilmu pengetahuan yang terdapat dalam literatur buku maupun data internet, khususnya di Laboratorium Pengolahan Limbah Industri Teknik Kimia FTI-ITS.

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan skripsi ini tidak akan selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini kami ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa
2. Orang tua dan keluarga atas segala kasih sayang, kesabaran, doa dan pengorbanan dalam mendidik dan membesarkan kami.
3. Bapak Dr. Eng. R. Darmawan, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing kami.
4. Bapak Juwari, S.T., M.Eng., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Kimia FTI-ITS.

5. Ibu Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng selaku kepala Laboratorium Pengolahan Limbah Industri Departemen Teknik Kimia FTI-ITS
6. Ibu Siti Zulaikah S.T., M.T., Ph.D, Ibu Ir. Nuniek Hendriani, M. T., dan Ibu Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng sebagai dosen penguji skripsi kami.
7. Seluruh dosen dan karyawan yang ada di lingkup Departemen Teknik Kimia FTI-ITS
8. Rekan-rekan di Laboratorium Pengolahan Limbah Industri yang telah memberikan saran, motivasi, serta ilmu yang tidak putus-putusnya kepada kami
9. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan laporan skripsi ini.

Surabaya, Juli 2018

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR NOTASI DAN SATUAN.....	xv
BAB I.....	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Perumusan Masalah.....	4
I.3 Tujuan Penelitian.....	4
I.4 Manfaat Penelitian.....	4
I.5 Batasan Penelitian.....	5
BAB II.....	6
II.1 Sejarah Teknologi <i>Microbial Fuel Cells</i> (MFCs).....	6
II.2 Jenis-jenis <i>Fuel Cell</i>	8
II.3 Teknologi <i>Microbial Fuel Cells</i>	10
II.3.1 Prinsip Kerja.....	11
II.3.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja <i>Microbial Fuel Cells</i> (MFCs).....	13
II.3.3 Material Anoda.....	13
II. 3.4 Material Katoda.....	16

II.4 Prinsip Kerja Microbial Fuel Cells (MFCs).....	17
II.4.1 Kurva Pertumbuhan Bakteri	25
II.4.2 Karakteristik Lumpur Lapindo	27
II.4.3 Stillage	28
II.4.4 BOD, COD dan TOC	29
II.4.5 Penelitian Terdahulu	30
BAB III	31
III.1 Penentuan Variabel Terbaik	31
III.1.1 Variabel Penelitian.....	31
III.1.2 Bahan Penelitian	32
III.1.3 Peralatan yang Digunakan	33
III.1.4 Rangkaian Peralatan <i>MFCs</i>	33
III.1.5 Prosedur Penelitian	33
III.1.6 Tahap Pengukuran Potensi Listrik	36
III.1.7 Tahap Analisa dan Pengukuran.....	36
III.2 Menganalisa Degradasi <i>Stillage</i>	38
III.2.1 Variabel Penelitian.....	38
III.2.2 Bahan dan Alat Penelitian.....	38
III.2.3 Prosedur Penelitian	38
III.2.4 Tahap Analisa dan Pengukuran.....	39
III.3 Diagram Alir Penelitian	39
BAB IV	41
IV.1 Hasil Fase Pertama.....	41
IV.2 Hasil Penelitian Fase Kedua	47
IV.3 Pengaruh Penambahan <i>Stillage</i>	49

IV.4 Pengaruh Penambahan Nutrien MMY	54
IV.5 Degradasi BOD, COD dan TOC terhadap waktu pada proses MFCs	57
IV.6 Hasil Uji SEM-EDX	59
BAB V	65
V.1 Kesimpulan	65
V.2 Saran dan Rekomendasi	65
DAFTAR PUSTAKA	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema diagram dua elektroda yang dilengkapi dengan PEM.....	18
Gambar 2.2 Sistem <i>Microbial Fuel Cells</i>	21
Gambar 2.3 Mikroba pada Elektroda	23
Gambar 2.4 Kurva Pertumbuhan Bakteri	25
Gambar 3.1 Rangkaian Peralatan MFCs	21
Gambar 3.2 Contoh Perhitungan Alat Haemocytometer	24
Gambar 4.1 <i>Power Density</i> yang dihasilkan pada Penelitian Fase Pertama	41
Gambar 4.2 Pertumbuhan Bakteri pada Percobaan Fase Pertama	42
Gambar 4.3 <i>Power Density</i> yang Dihasilkan Selama 9 Minggu pada Variabel Terbaik	48
Gambar 4.4 Pertumbuhan Bakteri pada Percobaan Variabel Terbaik	48
Gambar 4.5 Diagram Degradasi untuk Penambahan <i>Current</i> Circuit	57
Gambar 4.6 Diagram Degradasi tanpa Penambahan <i>Current</i> Circuit	58
Gambar 4.7 Hasil Analisa SEM dan EDX Elektroda <i>Carbon Cloth</i>	

pada t0. A, B, C, dan D menunjukkan Hasil Analisa SEM pada perbesaran 100x , 500x, 1500x dan 3000x. E menunjukkan Spektrum EDX pada Perbesaran 3000x 60

Gambar 4.8 Hasil Analisa SEM dan EDX Elektroda *Carbon Cloth* dengan 1,25% *Stillage* pada Minggu ke-9. A, B, C, dan D menunjukkan Hasil Analisa pada Perbesaran 75x, 150x, 2500x, dan 5000x. E menunjukkan Hasil Spektrum EDX pada Perbesaran 150x..... 62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Jenis-Jenis <i>Fuel Cell</i>	
Tabel 2.2 Daftar Bahan Elektroda yang Umum Digunakan dan Sifat-Sifatnya.....	8
Tabel 2.3 Penggunaan Berbagai Jenis Substrat dan Mikroorganisme pada <i>Microbial Fuel Cells</i>	10
Tabel 2.4 Bakteri yang Berperan di MFCs.....	11
Tabel 2.5 Karakteristik Lumpur Lapindo	16
Tabel 2.6 Karakteristik Stillage	17
Tabel 2.7 Penelitian Terdahulu.....	18
Tabel 4.1 Karakteristik Stillage	33
Tabel 4.2 Hasil Uji BOD ₅ , COD, dan TOC Lumpur Lapindo pada t ₀ hingga t ₆ dalam mg/L.....	37
Tabel 4.3 Hasil Pengujian SEM-EDX pada <i>carbon cloth</i> berkawat Ti-Wire untuk Penambahan <i>Stillage</i> 1,25% dan MMY pada Minggu ke-0 hingga minggu-9.....	41

DAFTAR NOTASI DAN SATUAN

Notasi

- A : Luas Permukaan Elektroda (m^2)
I : Arus (Ampere)
P : *Power Density* (Watt)
R : Tahanan (Ω)
 R_{ext} : Tahanan Eksternal (Ω)
 R_{int} : Tahanan Internal (Ω)
V : Tegangan (Volt)

Satuan

- cm : centimeter
 cm^2 : centimeter persegi
 cm^3 : centimeter kubik
g : gram
kg : kilogram
 $k\Omega$: kiloOhm
L : liter
m : meter
 m^2 : meter persegi
mA : miliAmpere
me : miliekivalen
mW : miliWatt
 Ω : Ohm
V : Volt

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan energi alternatif khususnya energi listrik pada saat ini semakin meningkat. dengan berkurangnya jumlah bahan bakar yang tidak dapat diperbaharui seperti minyak bumi dan gas alam mendorong para ilmuwan untuk melakukan penelitian dalam menemukan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. *Microbial fuel cells* (MFCs) merupakan salah satu teknologi sel bahan bakar alternatif yang dapat diperbaharui. MFCs memanfaatkan proses oksidasi senyawa kimia oleh biokatalis untuk menghasilkan energi listrik daya rendah (Permana, 2013). Bakteri yang terdapat dalam medium organik mampu mengubah bahan organik menjadi energi listrik. Sifat bakteri yang dapat mendegradasi medium organik pada MFCs ini menghasilkan ion elektron dan proton. Ion-ion inilah yang menghasilkan perbedaan potensial listrik sehingga dapat dihasilkan energi. Selain mampu menghasilkan listrik, sistem MFCs ini juga menjadi alternatif sistem pengolahan air limbah secara anaerob, karena kemampuannya untuk mendegradasi kandungan organik yang terdapat dalam medium.

Microbial fuel cells atau MFCs merupakan salah satu teknologi alternatif pengolahan air limbah secara anaerob dengan konsep dasar bioenergi, yang berpotensi menghasilkan energi listrik dari sumber bahan organik dengan menggunakan katalis mikroba. MFCs juga mampu mengolah air limbah yang mengandung bahan pencemar organik tinggi seperti COD maupun BOD. Bahan pencemar organik ataupun kontaminan organik yang terdapat didalam air limbah dapat dimanfaatkan sebagai sumber karbon oleh mikroorganisme. Hal ini sangat menguntungkan

dalam proses pengolahan air limbah karena dapat mengurangi parameter pencemar khususnya pencemar organik (Ekowati, 2013).

Teknologi MFCs telah dikembangkan pada aplikasi bioremediasi, pengolahan limbah cair dan bioenergi. Modifikasi sistem MFCs telah banyak dilakukan untuk meningkatkan kinerja MFCs. Efisiensi dan kerapatan daya yang dihasilkan pada MFCs dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, diantaranya proses transfer elektron dari membran sel mikroorganisme ke permukaan elektrode (Schröder, 2007), material elektroda yang digunakan, substrat, dan lain sebagainya. Beberapa bakteri diketahui dapat mentransfer elektron secara langsung, seperti *Rhodospirillum rubrum* (Chaudhuri dan Lovley, 2003).

Disisi lain, produksi etanol sebagai *biofuel*, di industri telah meningkat dalam beberapa tahun belakangan ini. Pada tahun 2008, produksi global mencapai 79 juta liter dan hampir 95% dari produksi ini dihasilkan oleh proses fermentasi-distilasi (Krzywonos dkk, 2008). Dalam produksi etanol, dihasilkan limbah dalam kuantitas yang besar yang diketahui sebagai vinase, *stillage*, molasses atau *spent wash*. Dalam suatu kolom distilasi yang ideal, produk overheadnya berupa etanol, sementara *stillage* akan menjadi produk utama di *bottom product* (Lu dan Mosier, 2008). *Stillage* merupakan hasil samping dari pengolahan etanol. *Stillage* termasuk limbah berupa cairan encer berwarna coklat kehitaman dengan massa jenis yang lebih besar dari air sekitar $1,3896 \text{ g/cm}^3$.

Karakteristik *stillage* dari PT. Enero Agro Nusantara yang digunakan pada penelitian ini mempunyai pH sebesar 4,28 dengan nilai BOD₅ sebesar 1701,99 mg/L, COD sebesar 242.474,5 mg/L dan TOC sebesar 63.040 mg/L. Tingginya kandungan organik *stillage* memungkinkannya untuk menjadi substrat MFCs yang akan dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi bagi bakteri. Sementara

kegunaan *vinasse* atau *stillage* lainnya semisal di bidang pupuk hayati cair dengan proses digester, seperti yang telah diteliti selama tujuh tahun berturut-turut pada *alergis dystrophic*, *latosol* kuning berpasir merah (Penatti, 2005) menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam jumlah nutrisi yang tersedia untuk suatu tanaman.

Namun, untuk bisa menghasilkan listrik, MFCs membutuhkan *culture source* sebagai sumber mikroba. Salah satu komponen yang potensial adalah lumpur Lapindo. Lumpur Lapindo yang terletak di Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur, tersusun atas 70% air dan 30% padatan (Usman dkk, 2006). Kadar garam (salinitas) lumpur sangat tinggi (38-40 %), sehingga bersifat asin (Arisandi, 2006). Berdasarkan hasil penelitian pada parameter kimia lumpur lapindo, diketahui bahwa nilai pH berkisar 6,6-7, kapasitas tukar kation (KTK) sebesar 3,89-35,42 (me/100g), kadar air sebesar 40,41-60,73% dan kandungan total organik karbon sebesar 54,75-55,47% (Juniawan, 2013). Dengan adanya kandungan bahan organik yang cukup tinggi, maka dimungkinkan terdapat mikroorganisme yang mampu membantu untuk menghasilkan biolistrik, dimana organisme ini dikenal sebagai *electricigens*. Mikroorganisme ini dapat mengoksidasi bahan-bahan atau komponen organik secara sempurna menjadi karbondioksida dengan elektroda sebagai penerima elektron dan mampu membantu untuk menghasilkan energi listrik dari terjadinya transfer elektron (Reddy dkk, 2010).

Berdasarkan hal-hal tersebut maka dilakukan penelitian mengenai pemanfaatan lumpur lapindo dan *stillage* sebagai biolistrik dengan menggunakan *Microbial Fuel Cells* (MFCs). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi terbaik rasio *stillage* dan lumpur lapindo serta pengaruh pada *power density* yang dihasilkan, dan juga sebagai alternatif pengolahan limbah *stillage* menjadi energi terbarukan.

I.2 Perumusan Masalah

Dengan memperhatikan latar belakang di atas, maka dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana rasio terbaik *stillage* yang digunakan terhadap potensi energi biolistrik yang dihasilkan dengan perbandingan berat *stillage* / lumpur Lapindo.
- b. Bagaimana degradasi (BOD, COD dan TOC) *stillage* dengan teknologi *microbial fuel cells* (MFCs) dengan lumpur Lapindo sebagai *culture source* dan pengaruhnya terhadap *power density* yang dihasilkan.

I.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Mengetahui rasio terbaik *stillage* dengan perbandingan berat *stillage* / lumpur Lapindo pada MFCs.
- b. Mengetahui degradasi (BOD, COD dan TOC) *stillage* pada *microbial fuel cells* (MFCs) dengan lumpur Lapindo sebagai *culture source* dan pengaruhnya terhadap *power density* yang dihasilkan.

I.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini diharapkan sebagai berikut :

1. Mampu memberikan data terkait seperti rasio *stillage* dan lumpur Lapindo, degradasi *stillage* untuk parameter organik (COD, BOD dan TOC), dan pengaruhnya terhadap *power density* yang dihasilkan dari pemanfaatan lumpur Lapindo sebagai *culture source* dan *stillage* sebagai sumber karbon pada rangkaian *Microbial Fuel Cells* (MFCs).

2. Membantu dalam pengembangan pemanfaatan lumpur Lapindo ke depan sebagai sumber alternatif untuk menghasilkan listrik sebagai pemenuhan alternatif kebutuhan listrik.

I.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Substrat yang digunakan berasal dari bahan organik/anorganik yang berasal dari *stillage* serta dengan penambahan nutrisi MMY (Minimum Medium Yeast).
2. Mikroba yang terlibat merupakan *indigenous microbes* yang terdapat dalam lumpur Lapindo.
3. Elektroda yang digunakan berupa material *carbon cloth* dengan sambungan tembaga dan titanium.
4. Total reaktor MFCs *single chamber* sebesar 1 kg.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Sejarah Teknologi *Microbial Fuel Cells* (MFCs)

Telah diketahui selama bertahun-tahun bahwa sangat mungkin untuk menghasilkan listrik secara langsung dengan menggunakan bakteri untuk menguraikan substrat organik. Lebih dari satu abad yang lalu, Potter adalah yang pertama menunjukkan bahwa arus listrik dapat dihasilkan dari degradasi senyawa organik oleh bakteri atau ragi (Potter, 1911). Dua dekade kemudian, Cohen mengkonfirmasi hasil Potter dan menghasilkan tegangan total sebesar 35 V pada arus 0,2 mA menggunakan tumpukan MFCs (Cohen, 1931). Publikasi ini umumnya dianggap sebagai kasus pertama yang dilaporkan terkait teknologi MFCs, tetapi hasil ini tidak menimbulkan banyak minat untuk dikembangkan lebih lanjut karena *power density* dan output daya yang dinilai sangat kecil.

Baru pada tahun 1960-an gagasan untuk membuat pembangkit listrik dari mikroba dicetuskan kembali sebagai metode potensial untuk mengubah limbah kotoran manusia menjadi listrik selama penerbangan jarak jauh (Canfield, 1963). Disadari bahwa proses *bioelectrochemical* sangat rumit yang mendasari operasi MFCs sehingga membutuhkan upaya penelitian yang sistematis dan jangka panjang (Cohn, 1963; Lewis, 1966). Sebelum penelitian MFCs dapat dimulai, kemajuan pesat dalam teknologi energi lainnya (misalnya panel surya) memaksa penelitian MFCs harus tersingkir sementara waktu (Schroder, 2007).

Tonggak lain dari teknologi MFCs adalah penemuan bahwa kerapatan arus dan output daya sangat mungkin untuk dapat ditingkatkan dengan penambahan mediator elektron yang

ditemukan pada tahun 1980 (Delaney dkk., 1984; Roller dkk., 1984). Banyak pewarna buatan dan metalorganik seperti *Neutral red* (NR), Methylen blue (MB), Thionine, Meldola blue (MelB), 2-Hydroxy-1,4 Naphthoquinone (HNQ), dan Fe(III)EDTA bisa digunakan sebagai mediator eksogen (Vega dan Fernandez, 1987; Allen dan Bennetto, 1993; Park dan Zeikus, 2000; Tokuji dan Kenji, 2003; Ieropoulos dkk., 2005).

Sayangnya, senyawa sintesis ini biasanya cenderung *sitotoksik*, tidak stabil dan mahal, sehingga membatasi kegunaannya di luar uji laboratorium (Du dkk., 2007). Terobosan terbaru dan paling luar biasa dari teknologi MFCs dikerjakan menjelang akhir abad ke-20 ketika beberapa mikroba ditemukan mampu mentransfer elektron secara langsung ke anoda (Kim dkk., 1999). Contoh dari jenis bakteri aktif *bioelectrochemical* ini adalah *Shewanella putrefaciens* (Kim dkk., 2002), *Geobacteraceae sulfurreducens* (Bond dan Lovley, 2003), *Geobacter metallireducens* (Min dkk., 2005) dan *Rhodospirillum rubrum* (Chaudhuri dan Lovley, 2003).

Mikroba-mikroba yang telah diisolasi itu mampu membentuk biofilm pada permukaan anodik dan mentransfer elektron melalui membran sel atau pili konduktif khusus (juga dikenal sebagai *nano-wires*). Karena mediator tidak diperlukan dalam MFCs jenis ini, akibatnya biaya operasional dapat dikurangi dan fokus terhadap pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh mediator buatan akhirnya dapat dihilangkan (Ieropoulos dkk., 2005).

Dalam dekade terakhir, kemajuan pesat telah dibuat dalam penelitian MFCs dan banyak peningkatan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir dalam jumlah publikasi tentang teknologi MFCs dalam literatur. Sebagian besar penelitian berfokus pada desain MFCs, bakteri *exoelectrogenic*, dan bahan elektroda yang

ekonomis (Logan dkk., 2006 ; Rozendal dkk., 2008 ; Logan dan Regan, 2006). *Power density* yang dihasilkan oleh MFCs telah meningkat dari mulai 0,1 hingga 6860 mW/m² selama dekade terakhir (Kim dkk., 1999 ; Fan dkk., 2008). Peningkatan *power density* yang bisa dihasilkan oleh sistem MFCs pada akhirnya akan dibatasi oleh laju transfer elektron yang dihasilkan dari metabolisme bakteri yang berperan dalam MFCs. Dalam MFCs, campuran organisme metabolik serbaguna biasanya hadir di dalam sistem, sehingga pemahaman yang lebih baik dan mendalam terkait interaksi bakteri yang beragam dalam komunitas biofilm dan mekanisme transfer elektron ke anoda oleh bakteri dominan sangat penting untuk meningkatkan *power density* yang mampu dihasilkan oleh sistem MFCs (Logan dan Regan, 2006).

II.2 Jenis-jenis *Fuel Cell*

Jenis dari pada *fuel cell* ditentukan oleh material yang digunakan sebagai elektrolit yang mampu menghantar proton. Pada saat ini ada 8 jenis *fuel cell* yaitu:

- a. *Alkaline* (AFC)
- b. *Proton exchange membrane*, juga disebut *proton electrolyt membrane* (PEM)
- c. *Phosphoric Acid* (PAFC)
- d. *Molten carbonate* (MCFC)
- e. *Solid oxide* (SOFC)
- f. *Direct methanol fuel cells* (DMFCs)
- g. *Regenerative fuel cells*
- h. *Microbial fuel cells*

Dapat diketahui bahwa masing-masing jenis *fuel cell* memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Tabel 2.1 menunjukkan perbandingan dari karakteristik jenis-jenis *fuel cell*.

Tabel 2.1 Karakteristik Jenis-Jenis *Fuel Cell*

Jenis	Elektrolit	Suhu Operasi (°C)	Karakteristik	Penggunaan
<i>Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)</i>	Elektrolit Polymer (H ⁺)	60-120	Efisiensi Sistem Tinggi peka terhadap hasil oksidasi di anoda	Kendaraan
Alkaline (AFC)	KOH	60-120	Efisiensi Energi Tinggi memiliki kepekaan terhadap CO ₂	Pesawat Luar Angkasa, Kendaraan
<i>Polymer Exchange Membrane (PEM)</i>	<i>Polymer Electrolyte</i> (H ⁺)	60-100	Kerapatan energi tinggi memiliki kepekaan terhadap CO (<100ppm)	Kendaraan (sedan,bis, minivan), stasiun pembangkit panas
<i>Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)</i>	<i>Phosphoric Acid</i> (H ⁺)	160-200	Efisiensi Energi terbatas, peka terhadap CO (<1,5% Vol)	Stasiun Pembangkit Panas, Kendaraan
<i>Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)</i>	<i>Molten Carbonate</i> (CO ₃ ²⁻)	500-650	Masalah Korosi	Stasiun Pembangkit Energi Panas, Pembangkit Energi Listrik

<i>Solid Oxyde Fuel Cell</i> (SOFC)	Lapisan Keramik (O ₂)	800-1000	Efisiensi sistem tinggi, temperatur operasi perlu diturunkan	Pembangkit Energi Panas, Penggabungan Stasiun pembangkit dengan turbin gas
-------------------------------------	-----------------------------------	----------	--	--

(Hendrata Sudaha, 2001)

II.3 Teknologi Microbial Fuel Cells

Microbial Fuel Cells (MFCs) adalah bioreaktor yang mengubah energi kimia yang tersimpan dalam ikatan materi organik menjadi listrik melalui biokatalisis mikroorganisme (Potter, 1911; Cohen, 1931; Davis dan Yarbrough, 1962; Bulan dkk., 2006). *Microbial fuel cells* ini merupakan salah satu teknologi alternatif pengolahan air limbah yang mengandung bahan pencemar organik tinggi oleh bakteri yang bisa menghasilkan listrik dari aktivitas metabolismenya. Bahan pencemar organik ataupun kontaminan organik yang terdapat didalam air limbah dapat dimanfaatkan sebagai sumber karbon oleh mikroorganisme. Hal ini sangat menguntungkan dalam proses pengolahan air limbah karena dapat mengurangi parameter pencemar khususnya pencemar organik (Ekowati, 2013).

Umumnya modifikasi sistem MFCs telah banyak dilakukan untuk meningkatkan kinerja MFCs. Efisiensi dan kerapatan daya yang dihasilkan pada MFCs dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya proses transfer elektron dari membran sel mikroorganisme ke permukaan elektrode (Schröder, 2007). Beberapa bakteri diketahui dapat mentransfer elektron secara

langsung, seperti *Rhodospirillum rubrum* (Chaudhuri dan Lovley, 2003).

II.3.1 Prinsip Kerja

Fuel cell merupakan suatu instrumen yang mengkonversi secara langsung energi kimia menjadi energi listrik. Prinsip kerja *fuel cell* yaitu hidrogen di dalam sel dialirkan pada sisi anoda, sedangkan oksigen dari udara dialirkan pada sisi katoda. Pada anoda terjadi pemisahan gas hidrogen menjadi elektron dan proton (ion hidrogen). Kemudian ion hidrogen ini menyeberang bertemu dengan oksigen dan elektron di katoda dan menghasilkan air. Elektron yang mengandung muatan listrik tidak bisa melewati membran, akan mengalir menuju katoda melalui jaringan eksternal. Dengan adanya aliran elektron inilah maka akan menyebabkan adanya arus listrik. Elektron-elektron bebas yang terjadi harus dialirkan keluar melalui penghantar menuju ke anoda, agar proses listrik-kimiawi dapat berlangsung (Darmin, 2013).

Tegangan listrik, arus listrik, dan *power density* memiliki hubungan dalam menghasilkan listrik. Sesuai dengan hukum Ohm, besar arus listrik (I) yang mengalir pada sebuah penghantar akan berbanding lurus dengan beda potensial atau tegangan listrik (V).

$$V = I \times R$$

Dimana,

V = Tegangan Listrik (Volt)

I = Arus Listrik (Ampere)

R = Resistansi (Ohm)

(Miroliaei, 2014)

Tegangan listrik dan potensial elektroda diukur secara memadai dengan multimeter dan sistem akuisisi data yang tersedia secara umum yang terhubung dengan rangkaian secara paralel

(Logan dkk, 2006). *Power density* merupakan perkalian dari tegangan listrik dengan arus listrik dibagi dengan luas permukaan. Secara matematis persamaan *power density* ditulis sebagai berikut :

$$P = V \times I / A$$

Dengan :

- P = *Power density* (Watt)
V = Tegangan Listrik (Volt)
I = Arus listrik (Ampere)
A = Luas permukaan elektroda (m²)

(Miroliaei, 2014)

Eksternal resistansi berhubungan dengan internal resistansi yang merupakan hambatan yang muncul karena dipengaruhi massa jenis, panjang kawat, serta luas penampang. Dimana pada penelitian oleh Campo dkk (2014) menyatakan arus dan *power density* dapat dihitung melalui hukum ohm yaitu,

$$I = \frac{V}{R_{ext} + R_{int}}$$

$$P = I^2 \times R_{ext} = \frac{V^2}{(R_{ext} + R_{int})^2} \times R_{ext}$$

$$= \frac{V^2}{R_{in}^2 / R_{ext} + 2R_{in} + R_{ext}} \cdot R_{ext}$$

Dari rumus diatas dapat disimpulkan bahwa ketika sistem diberikan hambatan atau eksternal resistansi yang semakin besar akan berbanding terbalik dengan *power density* yang dihasilkan.

Power density atau kerapatan daya yang dihasilkan dihitung berdasarkan data potensial dan kuat arus yang dibaca dengan multimeter dengan persamaan (1), kerapatan daya dihitung melalui persamaan (2) (Rabaey dkk, 2003) ;

II.3.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja *Microbial Fuel Cells* (MFCs)

Optimasi dari konfigurasi MFCs yang bertujuan untuk mengurangi *internal resistance* sangat dipertimbangkan sebagai alternatif untuk meningkatkan output daya listrik selnya, seperti rangkaian *MFC single-chambered*, jarak antar elektrode, ukuran *membran proton exchange* (jika ada), katalis elektrode dan kekuatan elektrolit (Gil dkk., 2003; Jang dkk., 2004; Liu dkk., 2005; Oh dkk., 2004). Meskipun demikian, dalam kebutuhannya untuk mencari performa terbaik dari sistem MFCs ini, penting untuk memahami komunitas bakteri dan kontribusi dari spesies dominan terhadap perpindahan *exoelektron* di lapisan biofilm anoda, berdasarkan analisis *16S rDNA sequencing*, komunitas bakteri dan spesies yang dominan akan bervariasi tergantung pada kondisi operasional, seperti inokulum dan tipe substrat (Jung dan Regan, 2007; Kim dkk., 2004, 2006, 2007; Logan dkk., 2005; Logan and Regan, 2006; Phung dkk., 2004). Selain hal-hal itu, faktor-faktor lainnya yang mempengaruhi kinerja dari sistem MFCs adalah konsentrasi substrat yang ditambahkan, elektroda dan sambungannya yang digunakan, sehingga dalam penelitian ini berupaya untuk melihat faktor seperti penambahan *stillage* terhadap *power density* yang dihasilkan dan degradasi dari parameter organik yang terdapat dalam *stillage* juga diteliti yang meliputi kandungan BOD, COD dan TOCnya selama penelitian.

II.3.3 Material Anoda

Dalam MFCs, anoda adalah tempat bakteri penghasil listrik untuk membentuk biofilm sebagai reseptor elektron. Oleh karena itu, bahan anoda yang ideal harus sangat konduktif, *non-korosif*, memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, *non-*

fouling, murah dan mudah dibuat Logan (2008). Berbagai bahan telah digunakan sebagai elektroda anodik, termasuk bahan karbon, bahan grafit, polimer konduktif, dan logam.

Untuk meningkatkan kinerja anoda, beberapa metode dapat dilakukan, seperti perlakuan dengan gas amoniak, perlakuan elektrokimia, perlakuan panas, dan penambahan mediator. Cheng dan Logan (2007) memperlakukan *Carbon cloth* menggunakan gas NH_3 5% dalam gas *carrier* helium pada suhu 700 °C selama 60 menit. Perlakuan ini mengurangi waktu start up MFC sebesar 50% dan meningkatkan *power density* dari 1640 mW/m² hingga 1970 mW/m². Analisis mereka menunjukkan bahwa hal ini dapat dikaitkan dengan peningkatan muatan permukaan positif *carbon cloth* dari 0,38 hingga 3,99 me/m².

Tabel 2.2 Daftar Bahan Elektroda yang Umum Digunakan dan Sifat-Sifatnya.

Material	Kelebihan	Kekurangan
<i>Carbon paper</i>	Konduktifitas yang tinggi	Luas area permukaan spesifik rendah, mahal, rapuh
<i>Carbon cloth</i>	Konduktifitas yang tinggi, fleksibel, luas permukaan spesifik besar	Mahal
<i>Reticulated vitreous carbon</i>	Konduktifitas yang tinggi, porositas tinggi, luas permukaan spesifik yang besar	Rapuh

<i>Graphite rod</i>	Konduktifitas yang tinggi, luas permukaan terdefinisi	Luas permukaan spesifik rendah, mahal
<i>Graphite felt</i>	Konduktifitas yang tinggi, porositas tinggi, luas area permukaan spesifik yang besar, fleksibel	Lemah
<i>Graphite granules bed</i>	Harga rendah, porositas tinggi, luas area besar	Tahanan kontak tinggi
<i>Graphite fiber brush</i>	Konduktifitas tinggi, porositas tinggi, luas area permukaan spesifik besar, fleksibel	Mahal
<i>Conductive polymers</i>	Luas permukaan yang besar	Konduktifitas yang lemah
<i>Stainless steel</i>	Konduktifitas yang tinggi, harga rendah	Bakteri sulit untuk menempel, daya yang dihasilkan rendah

(K. Guo, 2012)

Wang dkk (2009) menemukan bahwa perlakuan panas pada *carbon mesh* pada suhu 450 °C selama 30 menit menurunkan rasio atom O/C dan menghilangkan kontaminan yang bisa mengganggu transfer muatan, sehingga mampu meningkatkan kinerja anoda.

Park dan Zeikus (2002) mengikat *neutral red* (NR) ke elektroda grafit tenunan yang meningkatkan daya hingga 9,1 mW/m² dibandingkan tanpa NR yang hanya menghasilkan daya sebesar 0,02 mW/m², dengan menggunakan kultur murni *S. putrefaciens* dan laktat sebagai bahan bakar atau substratnya. Tang dan rekan kerjanya memberikan perlakuan secara elektrokimia terhadap *grafit-felt* yang menghasilkan *power density* konstan (30 mA/cm² berdasarkan area proyeksi anoda) selama 12 jam, dan ini menghasilkan arus 1,13 mA yang 39,5% lebih tinggi daripada anoda yang tidak diberi perlakuan. Analisis mereka menunjukkan bahwa gugus karboksil yang baru dihasilkan bertanggung jawab dalam meningkatkan transfer elektron, karena ikatan hidrogen yang kuat dengan ikatan peptida dalam sitokrom bakteri (Tang dkk, 2010).

II. 3.4 Material Katoda

Bahan yang digunakan untuk anoda juga dapat digunakan untuk katoda. Jika *ferricyanide* atau MnO₂ digunakan sebagai akseptor elektron akhir, maka tidak diperlukan katalis untuk reaksi katodik (Logan, 2008). Tetapi jika oksigen digunakan sebagai akseptor elektron terakhir, maka katalis harus digunakan karena bahan grafit dan karbon merupakan katalis yang buruk untuk reduksi oksigen (misalnya reaksi katodik). Platinum atau logam yang dilapisi dengan platinum biasanya digunakan sebagai katalis katoda karena kemampuan katalitiknya yang sangat baik, tetapi harga platinum cukup mahal terlebih bila ingin digunakan untuk aplikasi berskala besar seperti untuk pengolahan air limbah (skala plant). Oleh karena itu, serangkaian logam dan ion kompleksnya telah diteliti untuk menggantikan platinum dalam katoda di MFCs, seperti Fe(III) (Park dan Zeikus 2002, 2003; Heijne dkk., 2006), kompleks kobalt (Cheng dkk., 2006; Zhao dkk., 2005), mangan

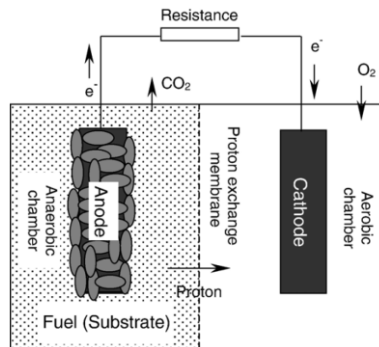
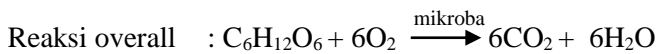
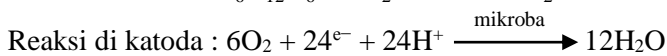
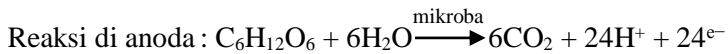
oksida (Mao dkk., 2003 ; Rhoads dkk., 2005), timbal dioksida (Morris dkk., 2007), dan mangan dioksida (Li dkk., 2010). Beberapa dari katalis tidak murni ini dapat menghasilkan *power density* pada tingkat yang sebanding dengan yang dicapai oleh katoda berbasis Platina.

Untuk menghindari penggunaan katalis logam yang mahal, bakteri bisa digunakan sebagai biokatalis dalam ruang katoda. Katoda jenis ini dikenal sebagai *biocathode* (He dan Angenent., 2006; Huang dkk., 2011). *Biocathode* dapat berupa aerobik atau anaerobik. Biokathoda aerobik mengandalkan bakteri aerob untuk mengkatalisis oksidasi senyawa logam transisi, seperti Mn(II) atau Fe(II) oleh oksigen. Sementara biokathoda anaerobik memanfaatkan bakteri anaerob atau anaerob fakultatif yang mampu mengurangi oksidan non-oksigen seperti nitrat, nitrit, sulfat, besi, mangan, selenat, arsenat, urinat, fumarat dan karbon dioksida (Lefebvre dkk., 2008). Oksidan non-oksigen ini berfungsi sebagai penerima elektron terminal.

II.4 Prinsip Kerja Microbial Fuel Cells (MFCs)

Microbial Fuel Cells (MFCs) merupakan alat untuk mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan energi katalitik dan mikroorganisme (Allan dan Benneto, 1993). Berbagai mikroorganisme dapat berperan dalam MFCs, mulai dari yang bersifat aerob, anaerob fakultatif dan anaerob obligat (Kim dkk, 2007). Bagian utama dari rangkaian MFCs adalah anoda, katoda, dan peralatan elektronik (Logan dkk, 2006). Kelebihan dari MFCs adalah dapat menghasilkan listrik dari sampah organik dan biomassa terbarui. Bakteri berperan sebagai katalis dan mampu beradaptasi dengan baik terhadap bahan organik berbeda yang terdapat pada limbah sehingga menghasilkan elektron (Lovley, 2006).

Mikroba di *chamber* anoda mengoksidasi substrat dan menghasilkan elektron dan proton selama proses berlangsung. Karbondioksida dikeluarkan sebagai produk oksidasi. Setelah melewati *proton exchange membrane* (PEM) atau jembatan garam, proton masuk ke *chamber* katoda, dimana mereka bereaksi dengan oksigen menjadi air (H₂O) (Reddy dkk, 2010). Mikroba yang ada di *chamber* anoda memaksa elektron dan proton saat proses disimilasi dengan mengoksidasi substrat-substrat organik. Substratnya berupa glukosa, maka reaksi yang terjadi di anoda dan katoda adalah sebagai berikut :



Gambar 2.1 Skema diagram dua elektroda yang dilengkapi dengan PEM (Du dkk, 2007)

Dalam *microbial fuel cells*, berbagai bentuk bahan organik dapat digunakan sebagai substrat diantaranya glukosa, pati, asam lemak, asam amino dan protein, serta air limbah dari manusia dan hewan (Idham, 2009).

Tabel 2.3 Penggunaan berbagai Jenis Substrat dan Mikroorganisme pada *microbial fuel cells*

Jenis Substrat	Mikroorganisme	Referensi
Galaktosa, maltose, sukrisa, trehalosa	<i>Proteus vulgaris</i>	Kim dkk (2000)
Pati (<i>starch</i>)	<i>Clostridium butyricum</i> atau <i>C. Beijerinckii</i>	Niessen dkk (2004)
Asetat	<i>E. coli</i> , <i>Shewanella oneidensis</i> , <i>Geobacter sulfurreducens</i>	Park dkk (2000), Debabov (2008)
Rumen sapi	<i>E. coli</i> K12	Liu dkk (2004)
Glukosa	<i>Rhodospirillum rubrum</i>	Chaudhuri dan Lovley (2003)

(Idham, 2009)

Glukosa sebagai sumber karbon dapat meningkatkan elektrisitas hingga mencapai 89%. Glukosa akan terurai secara enzimatik sehingga menghasilkan dua molekul piruvat yang memiliki tiga atom karbon (Ravaey, 2011). Proses tersebut dikenal dengan glikolisis (Zahra, 2011).

Efisiensi dan kinerja dari *microbial fuel cells* dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kecepatan degradasi substrat, kecepatan transfer elektron bakteri dari anoda ke katoda, dan transfer proton dalam larutan (Liu dkk, 2004). Kinerja *microbial fuel cells* dipengaruhi oleh aktivitas mikroba dan substrat yang digunakan (Lovley, 2003). Beberapa bakteri yang dominan dalam sistem MFCs adalah *Shewanella putrefaciens*, *Geobacteraceae sulfurreducens*, *Geobacter metallireducens* dan *Rhodospirillum rubrum* (Du dkk, 2007). Selain itu salah satu bakteri yang juga dapat menghasilkan hidrogen adalah *Escherichia coli* atau *E. coli*. Banyak mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk

mentransfer elektron yang dihasilkan dari metabolisme kandungan organik ke anoda seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3 beserta substratnya (Reddy dkk, 2010).

Mekanisme transfer elektron di dalam sistem MFCs oleh mikroba dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu *indirect* dan *direct*. Pada mekanisme *indirect*, mikroba memerlukan beberapa bentuk mediator untuk transfer elektron ke anoda yang dapat diperoleh dari luar.

Di sisi lain, mekanisme *direct*, mikroba dapat menyumbangkan elektron langsung ke anoda yang dikenal sebagai bakteri elektroaktif. Bakteri-bakteri itu juga dikenal sebagai *anodofil* atau *exoelectrogen* dan mampu membentuk biofilm konduktif pada anoda. *C-type cytochromes* (CTCs) memainkan peran paling berguna dalam teknik transfer elektron untuk menghasilkan listrik. *C-type cytochromes* pada dasarnya adalah protein *heme* yang tersebar luas yang tersedia di sebagian besar *archaea* dan *eubacteria*. Teknik mikrobial atau *bacteria nanowire* dianggap sebagai cara baru untuk mentransfer elektron ke elektroda. *Nanowire* bakteri adalah pili-elektrik yang konduktif yang ditemukan sekaligus mampu mendegradasi Fe (III) oksida oleh *G.sulfurreducens* (Pandit dan Das, 2018).

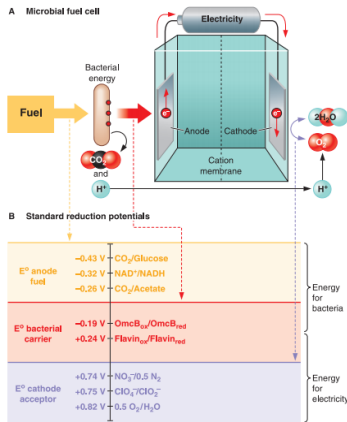
Tabel 2.4 Bakteri yang berperan di MFCs

Mikroba	Substrat	Aplikasi
<i>Actinobacillus Succinogenes</i>	<i>Glucose</i>	<i>Neutral red</i> atau <i>Thionin</i> sebagai mediator elektron
<i>Aeromonas hydrophila</i>	<i>Acetate</i>	Mediator-less MFCs
<i>Alcaligenes faecalis enterococcus</i>	<i>Glucose</i>	<i>Self-mediate</i> konsorsium maksimum sebesar 4,31 W/m ²

<i>Escherichia Coli</i>	<i>Glucose, Sucrose</i>	Mediator seperti <i>methylene blue</i>
<i>Geobacter Metallireducens</i>	<i>Acetate</i>	Mediator-less MFCs
<i>Shewanella Putrefaciens</i>	<i>Lactat, Piruvate, Glucose, acetate</i>	Mediator-less MFC dan berfungsi sebagai anoda yang meningkatkan produksi listrik
<i>Shewanella Oneidensis</i>	<i>Lactate</i>	Mediator

(K Guo, Hasset dkk, 2012)

Shewanella sp. dan *Escherichia coli* adalah dua contoh mikroorganisme dimana bakteri awal dapat menyumbangkan elektron langsung ke akseptor elektron yang tidak larut sementara bakteri akhir membutuhkan mediator buatan untuk mentransfer elektron secara tidak langsung ke anoda (Miroliaei dkk, 2014).



(Sumber gambar :
Gambar 2,1 A. Kelly C.
Wrighton and John D.
Coates, 2009

Gambar 2.1 B :
References: redox
potential of *Shewanella*
produced flavin [Marsili,
2008] and a *Geobacter*
(OmcB) outer membrane
cytochrome [Mahadevan,
2006]).)

Gambar 2.2 Sistem *Microbial Fuel Cells*

Pada gambar 2.1 A diplihatkan elektron (panah merah) yang dihasilkan dari aliran oksidasi mikrobial dari anoda melalui sambungan eksternal ke katoda untuk menghasilkan arus listrik,

sementara proton (panah hijau) menjelajah ke seluruh membran kation. Bersama keduanya berfungsi untuk mengurangi akseptor elektron terminal, yang dalam hal ini adalah oksigen, di katoda.

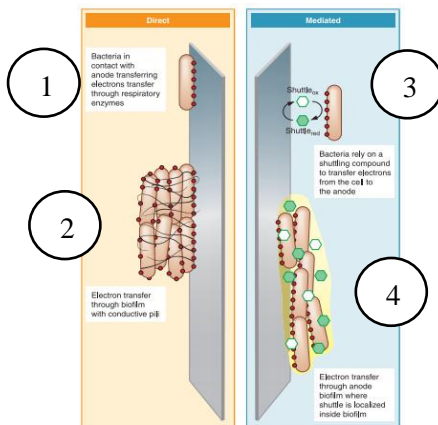
Sementara pada gambar 2.1 B, terdapat menara *redoxs* untuk komponen yang signifikan terhadap produksi arus listrik dalam MFCs. Untuk pasangan redoks, donor elektron harus memiliki potensi negatif yang lebih besar daripada akseptor elektron, perbedaan potensial ini sebanding dengan jumlah energi yang dihasilkan dari reaksi. Generasi arus listrik dalam MFCs didasarkan pada reaksi redoks berurutan. Pertama, bakteri mengoksidasi bahan bakar (potensi yang dicatat dalam warna biru) dan mentransfer elektron-elektron ini ke pembawa elektron pada potensi yang lebih positif (dicatat dalam warna merah), sehingga menghasilkan energi untuk bakteri. Listrik (*power density*) akhir yang dihasilkan oleh MFCs didasarkan pada produksi arus listrik dan pasangan redoks antara enzim respirasi bakteri atau shuttle elektron dan potensi pada anoda, yang ditentukan oleh akseptor elektron terminal di katoda dan setiap *loss sistem* (kehilangan energi).

Elektron dan proton yang keluar dari rantai transport elektron biasanya berpindah ke akseptor elektron terminal seperti oksigen, nitrat, atau Fe(III). Namun, tanpa adanya akseptor seperti itu dalam suatu MFCs, beberapa mikroorganisme akan melewatkan elektron ke permukaan anoda.

Perbedaan potensi redoks (yaitu kemampuan senyawa untuk menyumbangkan atau menerima elektron, dilambangkan dengan E° dan diukur dalam volt) antara donor elektron dan akseptor elektron adalah penentu energi potensial yang tersedia untuk mikroorganisme untuk proses anabolik. Dalam MFCs perbedaan potensial redoks elektrokimia dari anoda dan katoda menentukan berapa banyak energi yang bisa dihasilkan.

Elektron yang dihasilkan dalam aliran MFCs dari anoda melalui sirkuit listrik eksternal ke katoda untuk menghasilkan arus listrik. Sementara elektron bergerak secara eksternal, proton mengalir dari anoda ke katoda melalui membran kation untuk menyelesaikan sirkuit internal (Gambar 2.1 A). Pada katoda, elektron dan proton bergabung untuk mengurangi akseptor elektron terminal, yang dalam banyak aplikasi adalah oksigen.

Oleh karena itu bakteri di anoda secara fisik dipisahkan dari akseptor elektron terminal mereka di kompartemen katoda. Daya listrik (diukur dalam watt) yang dihasilkan oleh MFCs didasarkan pada laju elektron yang bergerak melalui sirkuit (arus, diukur dalam ampere) dan perbedaan potensial elektrokimia (volt) di seluruh bagian elektroda. Banyak faktor yang mempengaruhi produksi arus listrik, termasuk konsentrasi-substrat, tingkat oksidasi substrat bakteri, kehadiran akseptor elektron alternatif, dan pertumbuhan mikroba. Potensi elektrokimia, di sisi lain, tergantung pada pasangan redoks antara enzim respirasi bakteri



Ket gambar :

Direct :

1. Bakteri kontak dengan anoda untuk mentransfer elektron melalui enzim respiratory
2. Transfer elektron melalui pili konduktif biofilm.

Mediated :

3. Bakteri mengandalkan suatu senyawa *shuttle* untuk transfer elektron dari sel ke anoda
4. Transfer elektron melalui biofilm anoda dimana senyawa *shuttle* berada di dalam biofilm

Gambar 2.3 Mikroba pada Elektroda

atau pembawa elektron dan potensi pada anoda, yang ditentukan oleh akseptor elektron terminal di katoda dan setiap kerugian sistem.

Untuk bakteri yang menghasilkan listrik dalam MFCs, sel perlu mentransfer elektron yang dihasilkan di sepanjang membrannya ke permukaannya. Namun, sangat sedikit yang diketahui tentang interaksi bakteri dengan elektroda. Sedangkan anoda dan katoda bisa berfungsi dalam respirasi bakteri, penelitian terbaru telah difokuskan untuk memahami transfer elektron anoda oleh mikroba. *Anode-respiring bacteria* mengkatalisis transfer elektron dalam substrat organik ke anoda sebagai pengganti untuk akseptor ekstraseluler alami (misalnya, oksida besi atau zat humat) oleh berbagai mekanisme ditunjukkan oleh gambar 2.2 yang terdiri dari dua mekanisme, yaitu *direct* dan *mediated*.

Direct :

1. Bakteri kontak dengan anoda untuk mentransfer elektron melalui enzim respiratory
2. Transfer elektron melalui pori konduktif biofilm.

Mediated :

3. Bakteri mengandalkan suatu senyawa *shuttle* untuk transfer elektron dari sel ke anoda
4. Transfer elektron melalui biofilm anoda dimana *shuttle* berada di dalam biofilm).

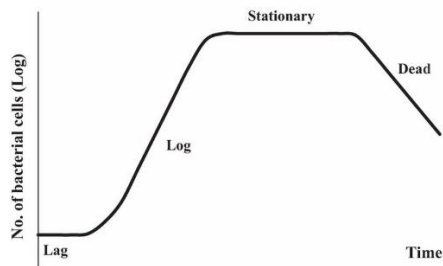
Bakteri mentransfer elektron ke anoda baik secara langsung atau melalui mekanisme mediasi. Dalam transfer elektron langsung, bakteri memerlukan kontak fisik dengan elektroda untuk produksi arus listrik. Titik kontak antara bakteri dan permukaan anoda membutuhkan sitokrom membran-terikat luar atau pori putatif konduktif yang disebut *nanowires*.

Meskipun kontak langsung dari membran sitokrom luar ke permukaan anodik akan membutuhkan mikroorganisme yang terletak di atas elektroda itu sendiri, mekanisme transfer elektron

langsung tidak terbatas pada interaksi jarak pendek, seperti nanowires yang dihasilkan oleh *Geobacter sulfurreducens* yang terlibat dalam konduksi elektron melalui anoda biofilm dengan ketebalan lebih dari 50 m. Dalam mekanisme transfer elektron termediai, bakteri menghasilkan atau memanfaatkan senyawa redoks larut alami seperti kuinon dan flavin untuk shuttle elektron antara enzim respirasi terminal dan permukaan anoda.

II.4.1 Kurva Pertumbuhan Bakteri

Pertumbuhan sel bakteri biasanya mengikuti suatu pola pertumbuhan tertentu berupa kurva pertumbuhan bakteri yang terlihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Kurva Pertumbuhan Bakteri (Wang dkk, 2015)

Kurva pertumbuhan adalah suatu informasi mengenai fase hidup suatu bakteri yang digunakan untuk mengetahui kecepatan pertumbuhan sel dan pengaruh lingkungan terhadap kecepatan pertumbuhan. Langkah awal untuk mengetahui kurva pertumbuhan bakteri adalah dengan isolasi bakteri.

Pembuatan kurva pertumbuhan bakteri merupakan bagian penting dalam suatu penelitian karena menggambarkan karakteristik kolonisasi bakteri. Perhitungan waktu generasi diperlukan untuk mengetahui prediksi populasi setiap mikroorganisme dalam jangka waktu yang sama dengan

keaktifannya dalam proses metabolisme. (Sharah dkk, 2015)

Kurva pertumbuhan bakteri dapat dipisahkan menjadi empat fase utama yaitu fase lag (fase lamban atau *lag phase*), fase pertumbuhan eksponensial (fase pertumbuhan cepat atau *log phase*), fase stasioner (*stationary phase*) dan fase penurunan populasi atau kematian (*decline*). Fase-fase tersebut mencerminkan keadaan bakteri dalam kultur pada waktu tertentu. Di antara setiap fase terdapat suatu periode peralihan dimana waktu dapat berlalu sebelum semua sel memasuki fase yang baru.

- Fase Lag
Fase ini, ditandai dengan peningkatan komponen makromolekul, aktivitas metabolik, dan kerentanan terhadap zat kimia dan faktor fisik. Selama fase lag bakteri tidak menunjukkan pertumbuhan - meskipun sel meningkat dalam ukuran - namun mulai mempersiapkan reproduksi sintesis DNA dan enzim seluler tersebut (Garbutt, 1997).
- Fase log / pertumbuhan eksponensial.
Pada fase eksponensial atau logaritmik, sel berada dalam keadaan pertumbuhan dimana laju pertumbuhan lebih besar daripada laju kematian. Selama fase log, biomassa bakteri meningkat secara linear seiring waktu, dengan jumlah sel bakteri dua kali lipat dengan setiap satuan waktu. Fase ini didefinisikan sebagai tahap pertumbuhan yang seimbang karena komposisi rata-rata sel tetap konstan dengan sifat kultur bakteri (yaitu, protein dan DNA) yang meningkat pada tingkat yang sama.
- Fase stasioner.
Tidak ada lagi peningkatan pada jumlah sel bakteri yang dapat bertahan dan aktivitas metabolik seluler menurun sehingga tingkat pertumbuhannya sama dengan tingkat

kematian

- Fase penurunan populasi atau fase kematian. Pada saat medium kehabisan nutrien maka populasi bakteri akan menurun jumlahnya. Pada saat ini jumlah sel yang mati lebih banyak daripada sel yang hidup.

(Al-qadiri dkk, 2007)

II.4.2 Karakteristik Lumpur Lapindo

Lumpur panas Sidoarjo merupakan hasil luapan semburan lumpur di daerah Porong, Sidoarjo. Luapan lumpur panas Sidoarjo terletak pada 10 km timur laut dari Gunung Penanggungan, di dekat sumur eksplorasi Banjarpanji-1, di Desa Reno Kenongo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Lumpur Lapindo di Sidoarjo tersusun atas 70% air dan 30% padatan (Usman E., 2006). Kadar garam (salinitas) lumpur sangat tinggi (38-40 %), sehingga bersifat asin (Arisandi, 2006).

Tabel 2.5 Karakteristik Lumpur Lapindo

No	Parameter	Hasil
1	Fisik :	
	- Berat jenis (g/cm ³)	1,25 – 2,35
2	Kimia :	
	- pH	6,6 - 7
	- KTK (NH ₄ OAC 1 N pH 7) (me/100g)	3,89-35,42
	- Pb (mg/L)	0,19-0,34
	- Cu (mg/L)	0,19-0,85
	- Kadar air (%)	40,41-60,7
	- C-Organik total (%)	54,75-55,47

(Alvin Juniawan, 2013)

II.4.3 Stillage

Stillage merupakan produk bawah distilasi dari proses pembuatan etanol. Cairan *stillage* ini mengandung gula reduksi (fruktosa dan glukosa) dan asam lemak volatil termasuk asam asetat, asam propionate dan asam butirat. 1,48 g/L gula reduksi terdapat dalam *stillage*. Karakteristik *stillage* tergantung dari bahan baku utama yang digunakan dalam produksi bioetanol. Biasanya *stillage* mempunyai kandungan padatan terlarut yang sangat tinggi, 9 hingga 14 L limbah dihasilkan untuk setiap liter etanol yang diproduksi. Wastewater ini sangat asam (pH : 4 – 5), berwarna coklat kehitaman dan mempunyai kandungan organik yang tinggi dengan COD dari 50 – 150 g/L (Beltran dkk, 2005; Jimenez dkk, 2006 ; Pant dan Adholeya, 2007). *Stillage* ini dapat digunakan sebagai pupuk hayati cair karena kandungan nutrisinya, khususnya kalsium, potassium dan kandungan material organiknya yang tinggi. Tetapi bila dibuang langsung ke lingkungan dapat mencemari tanah dan air tanah karena tingginya kandungan organik dan padatan terlarut (Prasad dkk, 2008).

Tingginya kandungan organik ini lah yang menyebabkan masalah terhadap air tanah melalui peningkatan suplai *nutrient*. *Nutrient* yang kaya ini (eutrofikasi) dapat membuat perubahan yang tidak diinginkan terhadap struktur dan fungsi ekosistem.

Tabel 2.6 Karakteristik *Stillage*

Parameter	Nilai
Total Solid	20-25%
Acidity	0,8-1,5%
pH	4,2-4,5
SG	1,07-1,1

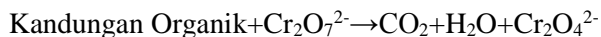
(Elia dan Nakahodo, 1995)

II.4.4 BOD, COD dan TOC

Karakteristik dari air limbah dapat mempengaruhi lingkungan dari berbagai aspek. Organik terlarut dapat mengurangi kandungan oksigen pada aliran dan menimbulkan bau pada air. Organik terlarut ada yang *biodegradable* adapula yang non-*Biodegradable*. *Biodegradable* diantaranya kandungan protein, karbohidrat, dan lipid dengan kandungan tertinggi yaitu protein berkisar antara 40-60%. Terdapat beberapa parameter untuk mengukur kandungan organik yang terdapat pada air limbah tersebut. Salahsatunya adalah *Biological Oxygen Demand* (BOD).

BOD adalah kebutuhan oksigen mikroba untuk mengdegradasi kandungan organik yang *biodegradable*. Metode pengukurannya adalah sampel ditanam bakteri dan kemudian diinkubasi selama 5 hari. Setelah 5 hari, dilakukan pengukuran perubahan oksigen terlarut pada sampel yang kemudian disajikan data BOD(BOD₅) dalam mg/L. Namun, BOD hanya mengukur kandungan organik yang dapat terurai saja, ada parameter lain yang bisa digunakan untuk mengukur kandungan organik non-*biodegradable*. Parameter tersebut adalah *Chemical Oxygen Demand* (COD).

COD *test* dilakukan dengan menggunakan kalium dikromat sebagai pengoksidasi. Sampel yang diuji, direfluks menggunakan kalium dikromat selama 2-3 jam dan dilakukan pengukuran perubahan konsentrasinya. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



Selain kedua uji tersebut, terdapat juga metode lain untuk mengukur kandungan organik dengan mengukur CO₂ karena karbon adalah sumber utama dari kebutuhan oksigen. Parameter itu adalah *Total Organic Carbon* (TOC).

II.4.5 Penelitian Terdahulu

Tabel 2.7 Penelitian Terdahulu

Nama Peneliti	Hasil Penelitian
Mohammad Reza Miroliaei dkk, 2015	Dihasilkan <i>power density</i> untuk <i>E.coli</i> dengan konsentrasi mediator MB 0,025 dihasilkan <i>power density</i> sebesar 46,14 mW/m ² , dengan <i>Shewanella sp.</i> tidak ditambahkan dengan MB menghasilkan 26,91 mW/m ² , dan untuk campuran kedua bakteri dengan konsentrasi MB 0,01 dihasilkan 24,88 mW/m ² .
Dessy Rosita Sari dan Chanifah Hidayat, 2016	Disimpulkan bahwa potensial energi listrik yang dihasilkan dengan penambahan MMY adalah yang paling baik diantara nutrisi MM, MSM, dan MSMY.
Arungovind. M dkk, 2017	Disimpulkan bahwa substrat dari berbagai sumber seperti limbah ternak, molasses, air pencuci beras, dan limbah cair industri, secara individu dan juga dalam kombinasi dapat digunakan dalam sel MFC untuk menghasilkan listrik. Dengan hasil tegangan listrik pada campuran air cucian beras dan <i>molasses</i> sebesar 222 mV pada 60 jam waktu operasi.
Hudha dan Ibnu, 2017	Dihasilkan tegangan listrik pada elektroda Ti 100 mesh dengan MMY sebesar 86,63 V/m ² dan pada elektroda 100 mesh tanpa MMY sebesar 65,50 V/m ² . Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa potensi energi listrik yang dihasilkan dengan penambahan nutrisi MMY lebih besar daripada tanpa MMY.
Kelita dan Veby, 2018	Disimpulkan bahwa eksternal resistansi paling terbaik adalah 1 K Ω diantara resistansi 10 K Ω , 100 K Ω , dan 5100 K Ω .

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Penentuan Variabel Terbaik

Kondisi operasi yang digunakan:

1. Berat total reaktor : 1 kg
2. Suhu : 30 °C (suhu kamar)
3. Tekanan : 1 atm
4. pH : 7 – 8
5. Ketinggian penanaman : - Anoda : 3 cm dan 5 cm dari dasar

– Katoda diatas permukaan

III.1.1 Variabel Penelitian

Variabel Penelitian terdiri dari:

1. Eksternal Resistor 1 k Ω
2. Jenis Medium
 - a. 987,5 gr Lumpur Lapindo + *Stillage* 1,25% (12,5 gr)
 - b. 975 gr Lumpur Lapindo + *Stillage* 2,5% (25 gr)
 - c. 950 gr Lumpur Lapindo + *Stillage* 5% (50 gr)
 - d. 925 gr Lumpur Lapindo + *Stillage* 7,5% (75 gr)
 - e. 900 gr Lumpur Lapindo + *Stillage* 10% (100 gr)
 - f. Lumpur Lapindo + *Stillage* 1,25% + 5 mL MMY
 - g. Lumpur Lapindo + *Stillage* 2,5% + 5 mL MMY
 - h. Lumpur Lapindo + *Stillage* 5% + 5 mL MMY
 - i. Lumpur Lapindo + *Stillage* 7,5% + 5 mL MMY
 - j. Lumpur Lapindo + *Stillage* 10% + 5 mL MMY
 - k. Lumpur Lapindo 100%
3. Waktu Penanaman
Lama penanaman elektroda di dalam medium dilakukan selama : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 minggu.

III.1.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan untuk penelitian terdiri dari lumpur lapindo, *stillage* dari PT. Enero Mojokerto yang telah disterilisasi, dan bahan-bahan berikut ini :

III.1.2.1 Bahan Pembuatan Elektroda

1. Carbon cloth
2. Cu-Wire
3. Ti-Wire

III.1.2.2 Bahan Pembuatan MMY (Minimum Medium + Yeast)

1. NH_4NO_3
2. KH_2PO_4
3. $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
4. $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
5. $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
6. CaCl_2
7. Aquadest

Cara pembuatannya adalah sebagai berikut : 1 g NH_4NO_3 ; 1 g KH_2PO_4 ; 1,3 g $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; 0,1 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,1 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 0,008 g CaCl_2 ditimbang lalu dilarutkan dalam 1 liter aquadest. Media ditambah dengan 0,1% (*w/v*) dari *ekstrak yeast* dan glukosa. Media di tambahkan larutan NaOH 0,5 mol/L hingga mencapai pH 7. Media yang telah dibuat disterilkan menggunakan autoklaf dengan suhu 121°C dan 15 psig selama 15 menit.

III.1.2.3 Bahan Pembuatan NaCl 0,3 M

1. Aquadest
2. NaCl

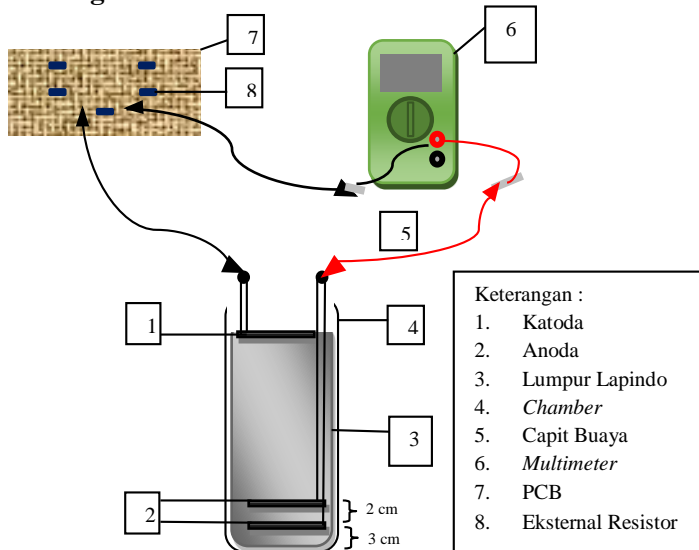
III.1.2.4 Bahan Pembuatan NaOH 1N

1. Aquadest
2. NaOH

III.1.3 Peralatan yang Digunakan

1. Chamber
2. Solder
3. Beaker glass
4. Spatula
5. Water bath
6. Oven
7. Lem epoxy
8. Alat Multimeter
9. AVOMeter

III.1.4 Rangkaian Peralatan MFCs



Gambar 3.1 Rangkaian peralatan MFCs

III.1.5 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini memiliki prosedur penelitian yang terdiri dari tahap persiapan, tahap penanaman elektroda di dalam chamber, tahap pengukuran potensi listrik dan tahap analisa.

III.1.5.1 Tahap Persiapan

III.1.5.2 Tahap Persiapan Anoda-Katoda

1. Katoda Cu-wire diukur 15 cm sebanyak 22 buah
2. Anoda A Cu-wire diukur 10 cm sebanyak 11 buah
3. Anoda B Cu-wire diukur 10 cm sebanyak 11 buah
4. Carbon cloth dipotong 2 cm x 5 cm sebanyak 44 buah
5. Cu-wire dan carbon cloth disatukan dengan menganyam
6. Kawat tembaga direkatkan pada *carbon cloth* dengan lem besi

III.1.5.3 Tahap Persiapan Larutan NaCl 0,3 M

1. NaCl dilarutkan sebanyak 17,55 gr ke dalam 1000 ml aquadest

III.1.5.4 Tahap Persiapan Resistor

1. Eksternal resistor 1k Ω disolder pada PCB

III.1.5.5 Tahap Persiapan Variabel I

1. Lumpur lapindo ditimbang 987,5 gram
2. *Stillage* ditimbang 12,5 gram
3. Membuat Larutan NaOH 1N
4. Larutan NaOH 1 N 20 ml ditambahkan ke dalam 1,25 gram *stillage*
5. Lapindo dicampur dengan campuran *stillage*

III.1.5.6 Tahap Persiapan Variabel II

1. Lumpur lapindo ditimbang 975 gram
2. *Stillage* ditimbang 25 gram
3. Membuat Larutan NaOH 1N
4. Larutan NaOH 1 N 40 ml ditambah ke dalam 2,5 gram *stillage*
5. Lumpur Lapindo dicampur dengan campuran *stillage*

III.1.5.7 Tahap Persiapan Variabel III

1. Lumpur lapindo ditimbang 950 gram
2. *Stillage* ditimbang 50 gram
3. Membuat Larutan NaOH 1N
4. Larutan NaOH 1 N 60 ml ditambah ke dalam 50 gram *stillage*
5. Lumpur Lapindo dicampur dengan campuran *Stillage*

III.1.5.8 Tahap Persiapan Variabel IV

1. Lumpur lapindo ditimbang 925 gram
2. *Stillage* ditimbang 75 gram
3. Membuat Larutan NaOH 1N
4. Larutan NaOH 1 N 60 ml ditambah ke dalam 75 gram *stillage*
5. Lumpur Lapindo dicampur dengan campuran *Stillage*

III.1.5.9 Tahap Persiapan Variabel V

1. Lumpur lapindo ditimbang 900 gram
2. *Stillage* ditimbang 100 gram
3. Membuat Larutan NaOH 1N
4. Larutan NaOH 1 N 80 ml ditambah ke dalam 100 gram *stillage*
5. Lumpur Lapindo dicampur dengan campuran *Stillage*

III.1.5.10 Tahap Persiapan Chamber I

1. *Carbon cloth* dicelupkan pada larutan NaCl 0,3 M
2. Kedua anoda (anoda dan b) dipasang pada chamber dengan ketinggian 3 cm dan 5 cm dari dasar chamber
3. Memasukkan variabel I pada chamber
4. Kedua katoda dipasang pada ketinggian dimana carbon cloth menyentuh permukaan lumpur

III.1.5.11 Tahap Persiapan Chamber II

1. *Carbon cloth* dicelupkan pada larutan NaCl 0,3 M
2. Kedua anoda dipasang pada chamber dengan ketinggian 3 cm dan 5 cm dari dasar chamber
3. Memasukkan variabel II pada chamber
4. Kedua katoda dipasang pada ketinggian dimana carbon cloth menyentuh permukaan lumpur.

III.1.5.12 Tahap Persiapan Chamber III

1. *Carbon cloth* dicelupkan pada larutan NaCl 0,3 M
2. Kedua anoda dipasang pada chamber dengan ketinggian 3 cm dan 5 cm dari dasar chamber
3. Variabel III dimasukkan pada chamber

4. Kedua katoda dipasang pada ketinggian dimana carbon cloth menyentuh permukaan lumpur.

III.1.5.13 Tahap Persiapan Chamber IV

1. *Carbon cloth* dicelupkan pada larutan NaCl 0,3 M
2. Kedua anoda dipasang pada chamber dengan ketinggian 3 cm dan 5 cm dari dasar chamber
3. Memasukkan variabel IV pada chamber
4. Kedua katoda dipasang pada ketinggian dimana carbon cloth menyentuh permukaan lumpur.

III.1.5.14 Tahap Persiapan Chamber V

1. *Carbon cloth* dicelupkan pada larutan NaCl 0,3 M
2. Kedua anoda dipasang pada chamber dengan ketinggian 3 cm dan 5 cm dari dasar chamber
3. Variabel V dimasukkan pada chamber
4. Kedua katoda dipasang pada ketinggian dimana *carbon cloth* menyentuh permukaan lumpur.

III.1.6 Tahap Pengukuran Potensi Listrik

1. Mempersiapkan alat *Multimeter* untuk mengukur tegangan (V) dan arus listrik (I).
2. Eksternal Resistor dihubungkan pada alat *Multimeter* dan katoda/anoda dengan konektor (capit buaya)
3. Setelah semua rangkaian terhubung dengan alat pengukur, maka proses pengukuran bisa dimulai
4. Hasil pengukuran didapatkan saat angka pada lat ukur stabil

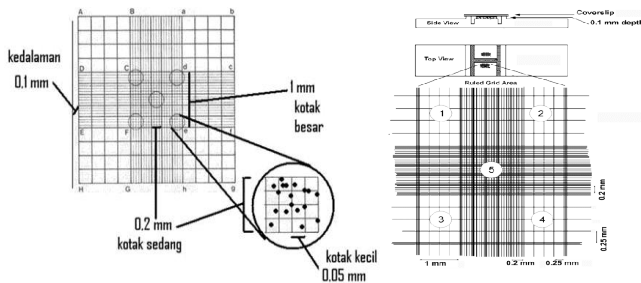
III.1.7 Tahap Analisa dan Pengukuran

Pada tahap analisa ini dilakukan dengan mengukur dan menghitung parameter-parameter sebagai berikut :

III.1.8 Analisa Jumlah Bakteri

1. Sampel tanah sebanyak 1 gram ditimbang.

2. Sampel diencerkan di dalam tabung reaksi dengan penambahan aquades hingga 10 ml (pengenceran 10 kali)
3. Lakukan pengenceran sesuai dengan tingkat pengenceran yang diinginkan.
4. Sampel diambil tetes dengan menggunakan pipet tetes untuk diteteskan diatas permukaan *haemocytometer*.
5. Kemudian *haemocytometer* diletakkan dibawah lensa mikroskop untuk dihitung jumlah selnya.
6. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan mikroskop dengan pembesaran 400x.



Gambar 3.2 Contoh perhitungan alat *haemocytometer*

Cara perhitungan populasi bakteri :

- a. Hitung jumlah sel yang terlihat di masing-masing bagian *haemacytometer*
- b. Hitung volume kotak :

$$\text{Volume kotak} = \text{luas kotak} \times \text{kedalaman kotak}$$

- c. Hitung jumlah sel per mm^3 dengan rumus :

$$\text{Jumlah sel per } \text{mm}^3 = \frac{\text{jumlah sel/kotak}}{\text{volume kotak } (\text{mm}^3)} \times \text{konversi}$$

- d. Hitung jumlah sel sebenarnya :

$$\text{Jumlah sel sebenarnya} = \text{jumlah sel per } \text{mm}^3 \times \text{faktor pengenceran}$$

III.2 Menganalisa Degradasi *Stillage*

Kondisi operasi yang digunakan:

1. Berat total reaktor : 1 kg
 2. Suhu : 30 °C (suhu kamar)
 3. Tekanan : 1 atm
 4. pH : 7 – 8
- Ketinggian penanaman : - Anoda : 3 cm dan 5 cm dari dasar
- Katoda diatas permukaan

III.2.1 Variabel Penelitian

Variabel Penelitian terdiri dari:

1. Eksternal Resistor 1 k Ω
2. Jenis Medium
 - a. Lumpur Lapindo + *Stillage* 1,25% + MMY + elektroda
 - b. Lumpur Lapindo + *Stillage* 1,25% + MMY
 - c. Lumpur Lapindo 100%
3. Waktu Penanaman
Lama penanaman elektroda di dalam medium dilakukan selama 3, 6, dan 9 minggu

III.2.2 Bahan dan Alat Penelitian

Bahan dan alat yang digunakan untuk penelitian sama dengan pada saat penentuan rasio yang terbaik dari *stillage* dengan lumpur lapindo namun, Cu-Wi diganti dengan Ti-Wi sebagai konduktor listrik yang lebih baik.

III.2.3 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini memiliki prosedur penelitian yang terdiri dari tahap persiapan, tahap penanaman elektroda di dalam *chamber*, tahap pengukuran potensi listrik dan tahap analisa.

III.2.3.1 Tahap Persiapan

III.2.3.2 Tahap Persiapan Anoda-Katoda

1. Katoda Ti-wire diukur 15 cm sebanyak 6 buah

2. Anoda A Ti-wire diukur 10 cm sebanyak 3 buah
3. Anoda B Ti-wire diukur 10 cm sebanyak 3 buah
4. Carbon cloth dipotong 2 cm x 5 cm sebanyak 24 buah
5. Ti-wire dan carbon cloth disatukan dengan menganyam
6. Ti-Wi direkatkan pada carbon cloth dengan lem besi

III.2.3.3 Tahap Persiapan Larutan NaCl 0,3 M

1. NaCl sebanyak 17,55 gr dilarutkan ke dalam 1000 ml aquadest

III.2.3.4 Tahap Persiapan Resistor

1. Eksternal resistor $1k\Omega$ disolder pada PCB

III.2.3.5 Tahap Persiapan Variabel

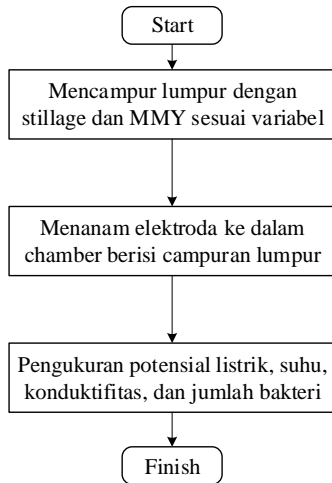
1. Lumpur lapindo ditimbang 987,5 gram
2. *Stillage* ditimbang 12,5 gram
3. Membuat Larutan NaOH 1N
4. Larutan NaOH 1 N 20 ml ditambahkan ke dalam 1,25 gram *stillage*
5. Lapindo dicampur dengan campuran *stillage*

III.2.4 Tahap Analisa dan Pengukuran

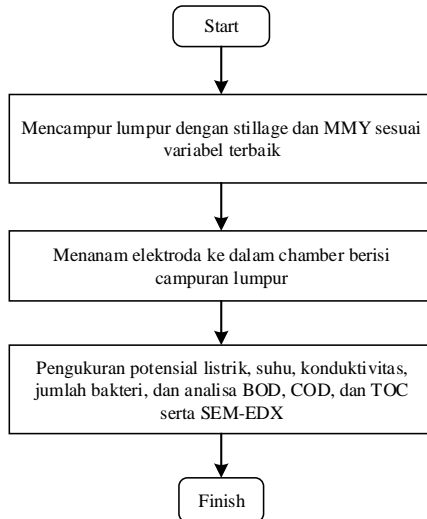
Pengukuran yang dilakukan sama dengan sebelumnya namun, pada tahap ini dilakukan analisa COD, BOD, dan juga TOC pada minggu 3, 6, dan 9 untuk melihat degradasinya.

III.3 Diagram Alir Penelitian

- A. Untuk menentukan rasio terbaik antara *stillage* dan lumpur lapindo



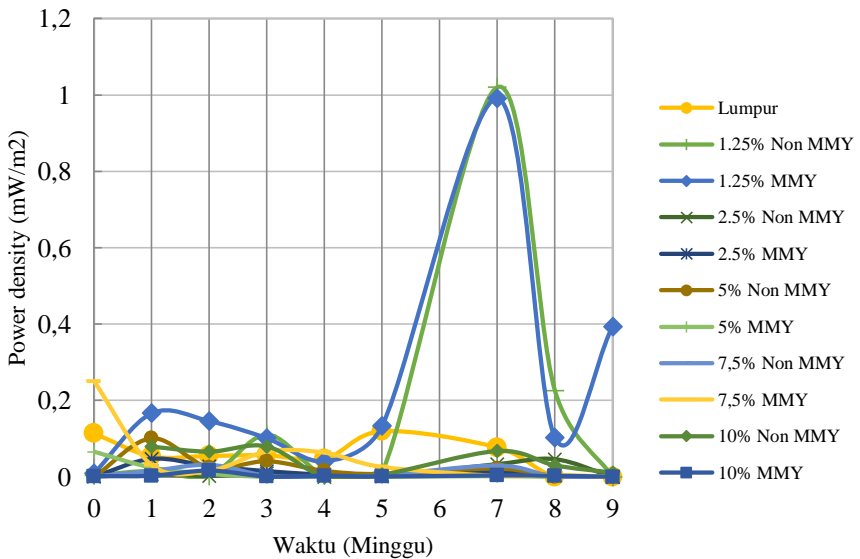
B. Untuk mengetahui degradasi *stillage*



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Hasil Fase Pertama

Berikut adalah hasil pengukuran *power density* setiap minggunya untuk berbagai variabel pada fase pertama yang menggunakan elektroda carbon cloth dengan sambungan tembaga :

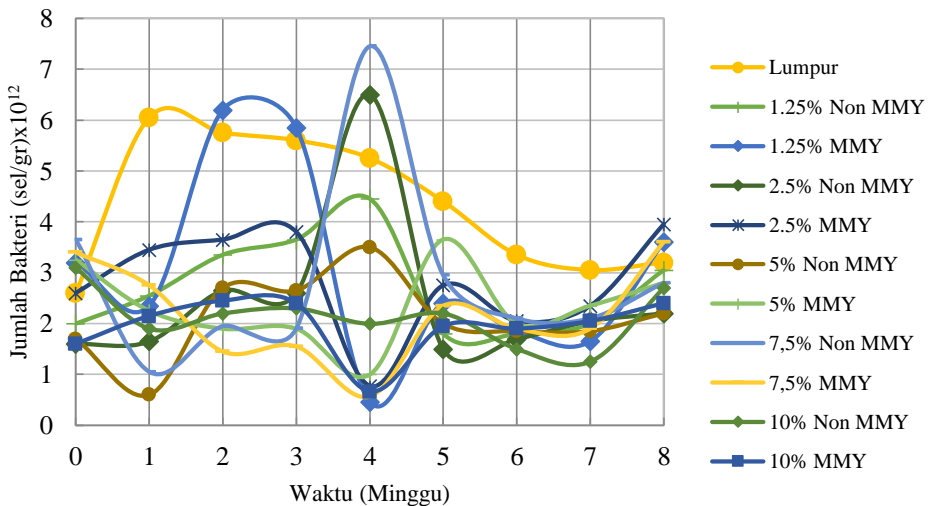


Gambar 4.1 *Power Density* yang dihasilkan pada Penelitian Fase Pertama

Dari gambar 4.1 diketahui bahwa *power density* terbesar dari *mix culture* lumpur dengan *stillage* terjadi pada rasio 1,25% dengan penambahan MMY, menggunakan elektrode *carbon cloth* dengan Cu-wire sebesar 99,068 mW/m² pada minggu ke-7, setelah

itu listriknya mengalami penurunan dan bersifat fluktuatif hingga semua kandungan organiknya telah habis atau komunitas bakterinya yang berkurang dan menuju pada fase kematian yang menyebabkan *power density*nya terus menerus menurun.

Gambar 4.2 menunjukkan grafik jumlah bakteri terhadap waktu untuk semua variabel. Perhitungan jumlah bakteri ini menggunakan metode *counting chamber* dengan pengenceran sebanyak 6 x dan perbesaran mikroskop 400 x di grafik tersebut terlihat bahwa *mix culture* lumpur dengan 1,25% *stillage* yang ditambahkan MMY menunjukkan jumlah bakteri yang terbanyak dan stabil setelah melalui fase lag-nya dibanding variabel lainnya dan sedikit lebih banyak dibanding variabel lumpur saja.



Gambar 4.2 Pertumbuhan Bakteri pada Percobaan Fase Pertama

Bakteri yang terdapat di variabel lumpur menunjukkan jumlah yang relatif banyak dibanding bakteri dalam *mix culture stillage*, baik yang diberi nutrisi MMY ataupun tidak. Hal ini

dikarenakan penambahan *stillage* berpengaruh negatif terhadap bakteri yang terdapat dalam lumpur, karena didalam *stillage* mengandung senyawa fenol yang bersifat inhibisi. Kandungan lengkap *stillage* terdapat di tabel 4.1 dan dijelaskan di bagian IV.3 terkait dengan pengaruh penambahan *stillage*.

Bakteri yang terdapat di variabel lumpur menunjukkan jumlah yang relatif banyak dibanding bakteri dalam *mixed culture*, baik yang diberi nutrisi MMY ataupun tidak. Hal ini dikarenakan penambahan *stillage* berpengaruh negatif terhadap bakteri yang terdapat dalam lumpur, karena di dalam *stillage* mengandung senyawa fenol yang bersifat inhibisi. Kandungan lengkap *stillage* terdapat di tabel 4.1 dan dijelaskan di bagian IV.3 terkait dengan pengaruh penambahan *stillage*.

Sementara untuk variabel tanpa penambahan MMY paling tinggi pada variabel 2,5%, namun untuk variabel lainnya yang tanpa MMY cenderung fluktuatif. Penentuan variabel terbaik ini berdasarkan jumlah bakteri dan kestabilan.

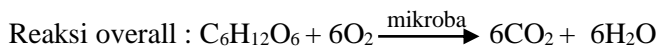
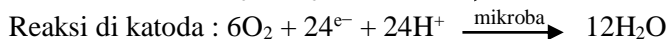
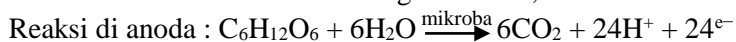
Dari kedua variabel tersebut, indikasi variabel terbaik dilihat berdasarkan stabilitas pertumbuhan bakteri yang terjadi pada variabel rasio 1,25% dengan penambahan MMY.

Penelitian fase pertama dilakukan untuk setiap variabel yang diteliti terhadap penggunaan eksternal resistansi mulai dari 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1000 k Ω dan 5100 k Ω . Dari berbagai eksternal resistansi tersebut yang diukur *power density* terhadap waktu (minggu) menggunakan elektroda *carbon cloth* dan sambungan tembaga, menghasilkan listrik sebesar 0,99 watt/m² yang dicapai oleh variabel rasio 98,75% : 1,25% lumpur/*stillage* dengan penambahan MMY untuk penggunaan eksternal resistor sebesar 1 k Ω .

Daya hantar listrik adalah kemampuan suatu penghantar untuk memindahkan muatan listrik. Pada penelitian ini

menggunakan material *carbon cloth* sebagai elektroda. Kecenderungan arus dan tegangan yang fluktuatif pada penelitian fase pertama diduga karena setiap variabel tidak diberi sambungan resistor sehingga menyebabkan aliran elektron tidak berjalan efektif yang menyebabkan fluktuatifnya listrik yang diukur setiap minggunya. Berbeda dengan penelitian fase pertama, pada penelitian fase kedua perlakuan untuk variabelnya diberi sambungan resistor yang memungkinkan terjadinya aliran elektron efektif yang mengalir terus menerus dari anoda menuju katoda. Hal ini menyebabkan bakteri yang tidak menghasilkan listrik akan terdegradasi dan berkurang, sementara bakteri yang menghasilkan listrik akan lebih adaptif. Hal ini dimungkinkan karena adanya interaksi atau persaingan antar bakteri dalam mendekomposisi kandungan senyawa organik.

Didalam sistem MFCs, terdapat reaksi oksidasi dan reduksi di anoda dan katoda sebagai berikut ;



Mikroba yang terdapat di anoda akan mengoksidasi substrat dan menghasilkan elektron dan proton selama proses berlangsung. Karbondioksida dikeluarkan sebagai produk oksidasi. Proton dan elektron mengalir ke katoda, elektron tersebut akan menghasilkan arus listrik yang diukur oleh multimeter, sementara proton H^+ akan bereaksi dengan OH^- membentuk H_2O , yang menyebabkan selama proses berlangsung tidak mengalami perubahan pH.

Biofilm yang terbentuk lebih stabil pada substrat dengan waktu inkubasi yang paling lama diperkirakan membuat MFCs lebih lama memproduksi listrik. Mikroba membutuhkan waktu untuk beradaptasi di lingkungan sekitarnya dan untuk bereproduksi

sehingga dibutuhkan waktu yang cukup lama agar terbentuk konsorsium mikroba yang stabil. Biofilm yang stabil akan mendegradasi senyawa organik dengan sempurna sehingga produksi listrik hasil metabolisme mikroba yang terbentuk kecil di minggu-minggu awal penelitian namun cenderung stabil seiring dengan berjalannya waktu hingga masuk ke minggu-minggu akhir penelitian yang merupakan fase kematian dari komunitas bakterinya. Hal ini disebabkan karena kestabilan mikroba yang mendegradasi senyawa organik dalam substrat. Namun jika terlalu lama, maka senyawa organik yang terdapat dalam lumpur akan terus terdegradasi. Logan (2006) menyatakan jika tidak ada senyawa organik yang tersisa maka akan menyebabkan produksi listrik turun karena tidak ada lagi senyawa yang bisa dioksidasi. Selain itu, menurut Kim dan Nevin (2009) biofilm yang terus berkembang seiring berjalannya waktu akan menutupi elektroda dan meningkatkan hambatan internal anoda sehingga menyebabkan penurunan nilai *power density*.

Power density dari MFCs ini menggunakan satuan dalam Watt/m² dan dihitung menggunakan persamaan $P = V \times I$. Pada eksternal resistansi sebesar 1 k Ω , *power density* maksimum adalah 0,9907 Watt/m². *Power density* digunakan sebagai parameter listrik yang dihasilkan karena dari data tersebut bisa diketahui luas permukaan dari elektroda yang digunakan. Ketiga parameter yaitu tegangan listrik, arus listrik dan *power density* memiliki hubungan dalam menghasilkan energi listrik. Dimana sesuai Hukum Ohm, bahwa besar arus listrik (I) yang mengalir melalui sebuah penghantar atau konduktor akan berbanding lurus dengan beda potensial/tegangan (V) yang diterapkan kepadanya dan berbanding terbalik dengan hambatannya (R).

$$\boxed{V = I \times R}$$

dimana :

V = Tegangan Listrik (Volt)

I = Arus Listrik (Ampere)

R = Resistansi (Ohm)

Mikroorganisme yang berperan penting dalam sistem MFCs merupakan bakteri penghasil listrik yang umumnya meliputi *Geobacter sp*, *Shewanella sp*, dan *Escherichia coli* (Januarita dkk, 2016). Dalam penelitian ini bakteri yang berperan dalam produksi listrik dihitung (jumlah sel/gram) dengan menggunakan *haemocytometer*.

Dari grafik pertumbuhan bakteri pada gambar 4.5 dapat dilihat bahwa pada minggu ketujuh terdapat jumlah sel mikroorganisme yang paling tinggi. Namun, hasil tertinggi *power density* yang dihasilkan terjadi pada minggu ke-4 (gambar 4.4). Secara teoritis jumlah bakteri berbanding lurus dengan *power density* yang dihasilkan, tetapi itu mengasumsikan bahwa bakteri yang dalam sistem adalah bakteri *electricigen*. Namun, dalam sistem MFCs pada penelitian ini, bakteri yang terhitung tidak dapat dibedakan antara bakteri *electricigen* dan *non-electricigen*.

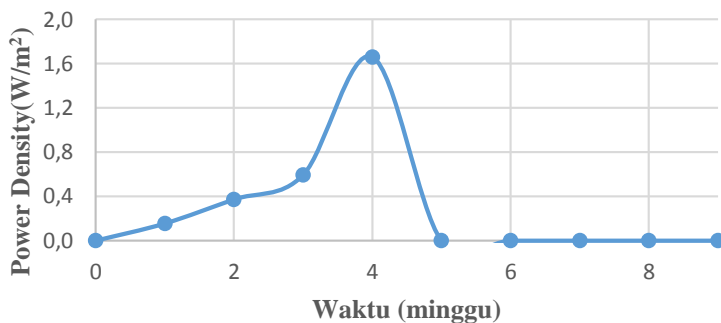
Puig dkk (2010), mengemukakan bahwa dalam dual *chamber* MFCs, produksi listrik menurun secara signifikan ketika pH akhir turun menjadi 5,2 karena produk asam fermentasi, namun akan kembali normal ketika pH kembali 7. Tetapi pada katoda, pH mempengaruhi baik pada reaksi anodik dan katodik dimana pH tinggi (8-10) menghambat aktifitas bakteri anodik sampai batas tertentu, tapi mungkin menguntungkan untuk reaksi katodik, sehingga meningkatkan kinerja keseluruhan. Sementara di penelitian ini, pH cenderung netral dan tidak mengalami penurunan atau kenaikan yang signifikan. Nilai pH berkisar di rentang angka 6,7 – 7,5 yang artinya pH tersebut optimal untuk sistem.

Berdasarkan kinetika bakteri, transfer massa proton melalui elektrolit dan laju reaksi oksigen pada katoda yang akan menentukan performa MFCs dan semuanya secara tidak langsung akan tergantung pada temperatur. Biasanya konstanta reaksi biokimia meningkat setiap kenaikan temperatur 10°C sampai tercapai temperatur optimal. Sebagian besar penelitian MFCs dilakukan pada temperatur 27-35 °C (Liu, 2008). Sementara pada penelitian ini, baik pada fase pertama maupun kedua, suhu sistem berada di dalam rentang 27 – 33 °C yang artinya suhu sistem tidak terlalu mempengaruhi kinerja MFCs secara keseluruhan.

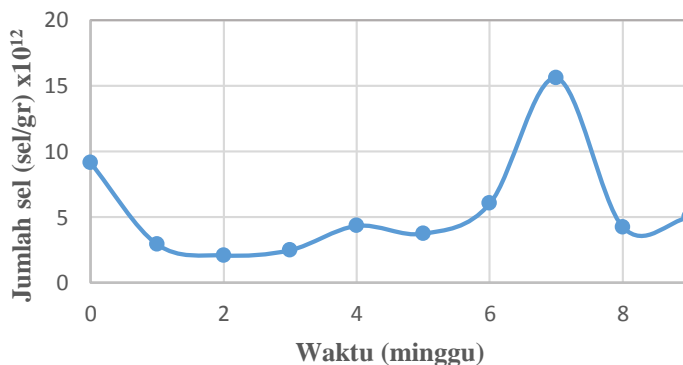
IV.2 Hasil Penelitian Fase Kedua

Pada penelitian fase kedua, melanjutkan fase pertama, penelitian diarahkan pada variabel degradasi *stillage* untuk parameter BOD, COD dan TOCnya dengan memilih rasio lumpur/*stillage* yang terbaik yaitu pada rasio 98,75% : 1,25% dengan penambahan MMY. Dari penelitian fase pertama diketahui bahwa penambahan *stillage* terhadap lumpur menyebabkan parameter-parameter organik tersebut berkurang dengan indikasi adanya pengurangan jumlah bakteri *electricigen* setiap minggunya hingga benar-benar habis di minggu setelah ke-6.

Perbedaan penelitian fase pertama dan kedua terletak pada sambungan anoda dan katoda yang menggunakan *Titanium-wire*. Sementara elektroda yang digunakan adalah *carbon cloth* dengan luas permukaan yang sama seperti penelitian fase pertama yaitu $2 \times 5 \text{ cm}^2$. Penggunaan *Titanium-wire* lebih optimal dibanding tembaga-wire karena konduktifitasnya.



Gambar 4.3 *Power Density* yang Dihasilkan Selama 9 Minggu pada Rasio Lumpur / Stillage (98,75% : 1,25%)



Gambar 4.4 Pertumbuhan Bakteri pada Rasio Lumpur / Stillage (98,75% : 1,25%)

Pada gambar 4.3 dan 4.4 merupakan hasil penelitian fase kedua untuk power density yang dihasilkan dan pertumbuhan bakteri pada rasio lumpur / stillage (98,75% : 1,25%) dengan menggunakan sambungan Ti-wires. Power density terbesar terjadi pada minggu ke-4 sebesar 1,62 watt/m² sementara jumlah bakterinya terbanyak pada minggu ke-7. Hal ini mengindikasikan bahwa power density tidak sesuai dengan jumlah bakteri karena berbagai faktor seperti jenis bakteri yang adaptif, akumulasi nutrisi, bakteri oligotrofik, dan tidak adanya spesies bakteri tunggal dominan dalam sistem MFCs (Phung, 2004).

IV.3 Pengaruh Penambahan *Stillage*

Stillage merupakan *bottom product* dari evaporator pada proses *recovery* etanol dari *molasses broth*. Dengan kata lain, *stillage* merupakan produk samping dari proses produksi etanol. Dalam penelitian ini *stillage* berfungsi sebagai substrat yang menyediakan kebutuhan karbon organik untuk perkembangan dan pertumbuhan bakteri sehingga dengan membuat *mix culture* antara lumpur lapindo dan *stillage* diharapkan akan memperbesar listrik yang bisa diproduksi oleh mikroba.

Pada penelitian pertama, *stillage* tidak sebanding dengan *power density* yang dihasilkan. Penambahan *stillage* justru membuat bakteri terus berkurang. Hal ini dimungkinkan *stillage* mematikan mikroba karena selain karbon organik di dalam *stillage* juga terkandung senyawa fenol dan 2,3-Butanediol yang bersifat inhibisi terhadap mikroba karena kandungan dari *stillage* seperti yang tertera di tabel berikut :

Tabel 4.1 Karakteristik *Stillage*

Parameter	Nilai
Fenol (mg/L)	971,26
Fosfor (mg/L)	< 0,07
Fe(mg/L)	16,7
Gula Total(%)	1,32
Gula Pereduksi(%)	0,66
Mg(mg/L)	3108

(PT Enero Mojokerto, 2018)

Senyawa fenol memiliki kemampuan antiseptik yang bagus meskipun tanpa kandungan agen antiseptik. Senyawa butanediol inilah yang dimungkinkan mempunyai efek negatif terhadap bakteri-bakteri *electricigens* sehingga berpengaruh terhadap perolehan *power density*-nya.

Pada penelitian kedua *stillage* yang ditambahkan ke dalam lumpur disterilisasi sebanyak dua kali untuk memastikan tidak terdapat kandungan antiseptik di dalamnya dan dari tabel penelitian kedua diatas, dengan sterilisasi dua kali membuat *power density* yang dihasilkan relatif lebih besar dan stabil dibanding pada penelitian pertama.

Perbandingan grafik antara jumlah bakteri dengan *power density* untuk penelitian pada fase pertama dan kedua menimbulkan beberapa hipotesa. Pertama, grafik bakteri yang naik pada minggu-minggu akhir pengamatan namun *power density* yang dihasilkan justru menurun. Hal ini disebabkan karena terdapat macam-macam jenis bakteri yang terdapat di dalam lumpur, yaitu bakteri *electricigens (indigeneous)* dan bakteri *non-electricigens*.

Nguyet Thu Phung (2004) menjelaskan bahwa di dalam suatu lumpur yang digunakan untuk *Microbial Fuel Cells* dengan penambahan substrat dan nutrient tertentu bisa menyebabkan efek ganda yaitu menumbuhkan satu jenis bakteri dan mematikan jenis bakteri lain. Di awal penelitian grafik *power density* atau aktivitas bakteri *electricigens* cenderung naik yang mengindikasikan pertumbuhan bakteri jenis ini, terlebih di awal-awal penelitian tersebut jumlah nutrien yang ditambahkan sebagai basis perlakuan belum terlalu banyak. Di jurnal tersebut disebutkan bahwa mikroba yang diperkaya dengan cara ini diyakini melakukan metabolisme kontaminan organik dalam *stillage* untuk mentransfer elektron langsung ke elektroda. Karena arus yang dihasilkan dari MFCs berbanding lurus dengan konsentrasi kontaminan organik, maka sistem ini secara tidak langsung bisa digunakan sebagai sensor BOD. Untuk pemantauan nilai BOD yang lebih rendah dari 10 mg/L, bakteri oligotrofik yang aktif secara elektrokimia telah diperkaya menggunakan limbah cair berupa *stillage* yang mengandung glukosa dan glutamat sebagai donor elektron. Oligotrof adalah mikroorganisme yang tumbuh di lingkungan dengan nutrisi organik rendah seperti lautan, danau yang jernih dan akuifer air tanah. Mikroorganisme yang ada di lingkungan dengan tingkat nutrisi rendah tumbuh di bawah kondisi yang tampaknya optimal. Namun, tidak mudah untuk mensintesis oligotrof di bawah kondisi laboratorium dan kebanyakan dari bakteri-bakteri tersebut diklasifikasikan sebagai bakteri yang belum teridentifikasi. Jadi inilah yang menyebabkan grafik bakteri meningkat di akhir penelitian dengan fakta bahwa jumlah listrik yang dihasilkan cenderung turun (hingga mendekati 0,01 mμ dan 0,1 mV). Bakteri penghasil listrik dimungkinkan mengalami fase kematian dan digantikan oleh komunitas mikroba *non-electricigens* yang bertambah karena kandungan organik yang

masih tersisa. Perlakuan setiap minggu untuk setiap sampel dengan penambahan nutrient berupa MMY menyebabkan jenis mikroba *non-electrigens* ini tumbuh subur berkembang, tetapi tidak bisa menghasilkan listrik. Jadi tidak bisa disimpulkan bahwa jumlah bakteri akan sebanding dengan jumlah arus listrik yang dihasilkan karena hal ini melibatkan jenis bakteri dominan yang ada di dalam sampel lumpur dan *stillage*.

Kemudian yang kedua, tidak adanya spesies bakteri dominan tunggal dalam sistem MFCs. Kyu-Jung Cae (2009), telah meneliti 4 sistem MFCs dengan inokulasi bakteri lumpur dan pemberian substrat yang berbeda-beda (asetat, butirat, propionate dan glukosa) selama 1 tahun. Hasilnya menunjukkan bahwa tidak ada spesies bakteri dominan tunggal dalam MFCs. Dengan menggunakan teknik *16S rDNA sequencing*, hasilnya mengindikasikan diversitas *filogenetik* dalam semua komunitas bakteri di lapisan biofilm. Substrat glukosa menghasilkan CE (efisiensi kolombik) terendah karena sifatnya yang difermentasikan menyiratkan konsumsinya oleh beragam bakteri termasuk jenis bakteri yang tidak menghasilkan listrik.

Glukosa dianggap substrat dengan CE yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan senyawa molekul yang lebih rendah, seperti asetat, karena sifat fermentasi (Cheng dkk., 2006; Freguia dkk., 2007; Rabaey dkk., 2003). Sebaliknya, Chaudhuri dan Lovley (2003) justru melaporkan CE yang tinggi sebesar 83% pada MFCs yang diberi substrat glukosa dengan menggunakan *Rhodoferax ferrireducens*, sebuah spesies bakteri pereduksi logam yang berbeda.

Selanjutnya, berkaitan dengan penjelasan *stillage* yang di proses oleh bakteri *electricigens*, terdapat beberapa hipotesa, yang jelas bahwa proses degradasi dan respirasi bakteri yang memanfaatkan *stillage* tidak menghasilkan reaksi lain seperti

fermentasi atau methanogenesis pada suhu ruang, artinya prosesnya itu sendiri cenderung tidak menghambat bakteri.

Hipotesa yang pertama, bahwa diketahui dalam banyak penelitian tentang MFCs, asetat umumnya digunakan sebagai substrat untuk bakteri agar dapat menghasilkan listrik. Senyawa kimia ini lebih mudah diproses oleh bakteri dibanding memproses limbah cair seperti *stillage*. Asetat tergolong senyawa kimia sederhana yang berfungsi sebagai sumber karbon untuk bakteri. Kelebihan lain dari asetat adalah senyawa ini tidak menimbulkan reaksi lain terhadap bakteri seperti fermentasi dan metanogenesis pada temperatur ruang.

Terlebih lagi, beberapa jenis mikroorganisme dapat menghasilkan gas oksigen melalui reaksi fotosintesis, sehingga mengurangi pemakaian oksigen dari luar. Meskipun biokatoda dapat memperpanjang umur MFCs karena menghilangkan masalah kemungkinan rusaknya platinum oleh sulfur pada mediator elektron. Selain itu, metabolisme mikroba pada biokatoda dapat dipergunakan untuk menghasilkan produk yang bermanfaat serta menghilangkan senyawa kimia yang tidak diperlukan. Beberapa mikroba yang dapat dijadikan biokatoda di antaranya adalah *Acetobacter aceti cathode*.

Pada penelitian fase dua, digunakan logam titanium sebagai penghubung antara anoda dan katoda di sistem MFCs, namun pada *chamber MFCs-Stillage* terjadi kerusakan atau korosi pada resistor penghubung. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh sulfur pada mediator elektron. Penempatan katoda diatas permukaan chamber menyebabkan tidak adanya mikroba yang menghasilkan listrik. Tidak adanya metabolisme mikroba di katoda menyebabkan terjadinya penumpukan senyawa kimia yang tidak diperlukan.

Sistem MFCs yang baik akan sangat tergantung beberapa faktor, apabila bakteri tersebut tidak dapat menghasilkan biokatalis sendiri maka perlu adanya penambahan suatu zat berupa mediator. Penambahan katalis berupa mediator digunakan untuk meningkatkan kinerja reactor MFCs. Apabila elektron yang ditangkap semakin banyak maka arus dan voltase yang dihasilkan akan lebih tinggi, sehingga *power density* juga meningkat.

Stillage yang diolah oleh MFCs dalam suatu sistem anaerob memang sudah lama diketahui dan dipelajari, khususnya untuk pengembangan proses pengolahan air limbah. Pengolahan air limbah dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu secara aerob dan anaerob. Sistem anaerob dipilih karena memiliki beberapa keuntungan salah satunya yaitu dapat digunakan pada air limbah yang mengandung parameter pencemar organik yang tinggi. Pengolahan air limbah anaerob secara konvensional yang dilakukan saat ini, memerlukan biaya cukup besar dan energi yang dipakai selama proses pengolahan tidak sedikit. Diketahui bahwa penggunaan energi yang semakin bertambah akan menyebabkan kebutuhan sumber energi semakin bertambah pula (Aelterman dkk, 2006). Dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi dimasa ini diharapkan dapat ditemukan teknologi alternatif untuk mengolah air limbah sekaligus menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan manusia.

IV.4 Pengaruh Penambahan Nutrien MMY

MMY atau *minimum media yeast* adalah media yang berisi nutrisi sebagai bahan organik tambahan bagi mikroorganisme untuk dikonsumsi. Nutrien itu sendiri akan mendukung mikroorganisme dalam memproduksi listrik, nutrisi ini menyediakan kebutuhan unsur N, P dan K bahkan logam-logam seperti Mg dan Fe bagi mikroorganisme.

Tipe substrat atau nutrisi merupakan faktor penting dalam MFCs, substrat akan berpengaruh pada *power density* walaupun menggunakan mikroba konsorsium yang sama. Biolistrik sangat bergantung dari konsentrasi substrat, dimana pada konsentrasi substrat tinggi maka hasil daya yang dihasilkan akan tinggi (Park dan Zeikus, 2003).

Pada gambar 4.1, pada chamber lumpur lapindo dan *stillage* dengan penambahan (MMY) memiliki tegangan paling besar yaitu 0,9907 watt/m² pada minggu ke-7 dan cenderung terjadi penurunan perlahan pada minggu selanjutnya. Hal ini membuktikan bahwa penambahan nutrisi berpengaruh terhadap kebutuhan bahan organik yang dikonsumsi oleh mikroorganisme terhadap kestabilan tegangan yang dihasilkan dibanding chamber lumpur lapindo dengan *stillage* tanpa penambahan MMY.

Menurut Waluyo (2005), peran utama nutrisi adalah sebagai sumber energi, bahan pembangun sel dan sebagai aseptor elektron dalam reaksi bioenergetik (reaksi yang menghasilkan energi). Oleh karenanya bahan makanan yang diperlukan terdiri dari air, sumber energi, sumber karbon, sumber aseptor elektron, sumber mineral, faktor pertumbuhan dan nitrogen. Selain itu, secara umum nutrisi dalam media pembenihan harus mengandung seluruh elemen yang penting untuk sintesis biologis organisme baru.

MMY mempunyai kandungan antara lain ; NH₄NO₃, KH₂PO₄, K₂HPO₄.3H₂O, MgSO₄.7H₂O, FeCl₃.6H₂O, CaCl₂, C₆H₁₂O₆ dan ekstrak yeast, semua senyawa tersebut telah memenuhi kebutuhan karbon, nitrogen, fosfor, sulfur dan *rich medium* sebagai sumber energi dan pertumbuhan sel pada mikroorganisme.

Sel mikroorganisme mengandung karbon, nitrogen, fosfor dan sulfur dengan perbandingan 100 : 10 : 1 : 1. Untuk

pertumbuhan mikroorganisme, unsur-unsur di atas harus ada pada sumber makanannya (substrat). Konsentrasi substrat dapat mempengaruhi proses kerja mikroorganisme. Kondisi yang terbaik dicapai jika jumlah mikroorganisme sebanding dengan konsentrasi substrat (Manurung, 2004).

Kinetika bakteri, transfer massa proton melalui elektrolit dan laju reaksi oksigen pada katoda menentukan performa MFCs dan semua tergantung kepada temperatur. Biasanya konstanta reaksi biokimia meningkat setiap kenaikan temperatur 10^oC sampai tercapai temperatur optimal. Sebagian besar penelitian MFCs dilakukan pada temperatur 27-35 °C (Liu, 2008). Hasil pengukuran dilakukan menggunakan alat multimeter dan menunjukkan ketidakstabilan suhu, tetapi masih menunjukkan nilai pada batas suhu ruangan yang dikehendaki yaitu 27-30 °C. Secara keseluruhan suhu yang terukur dipengaruhi oleh kondisi suhu ruangan dan cuaca pada saat pengukuran dilakukan. Dalam penelitian ini pengaruh perubahan suhu tidak terlalu terlihat secara signifikan dikarenakan hasil pengukuran masih pada batas suhu yang dikehendaki.

Faktor yang sangat berpengaruh dalam energi listrik yang diproduksi adalah mikroorganisme. Mikroorganisme berperan penting dalam sistem MFCs, sebagai penghasil elektron. Dalam penelitian ini, jumlah sel di elektroda carbon cloth dengan penambahan nutrisi dihitung menggunakan *haemocytometer* yang dilengkapi mikroskop pada perbesaran 400X. Gambar dibawah ini menunjukkan jumlah mikroorganisme paling banyak yang terdapat di elektroda *Carbon cloth* yaitu sebesar 6,2 x10¹² sel/gr pada minggu ke-2 penelitian fase pertama.

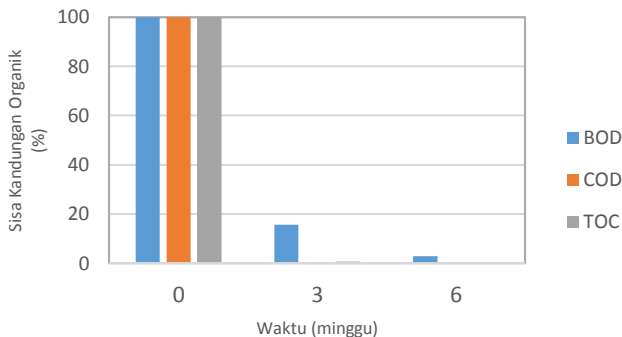
IV.5 Degradasi BOD, COD dan TOC terhadap waktu pada proses MFCs

Pada Tabel 4.2 menunjukkan hasil uji pada parameter (*Biological Oxygen Demand*) BOD₅, (*Chemical Oxygen Demand*) COD dan (*Total Organik Carbon*) TOC yang telah dilakukan di Balai Riset dan Standarisasi Industri Surabaya (Baristand Surabaya). Dari Tabel tersebut dapat dilihat perbandingan penurunan kandungan organik pada chamber MFCs dengan *current circuit* dan tanpa *current circuit*.

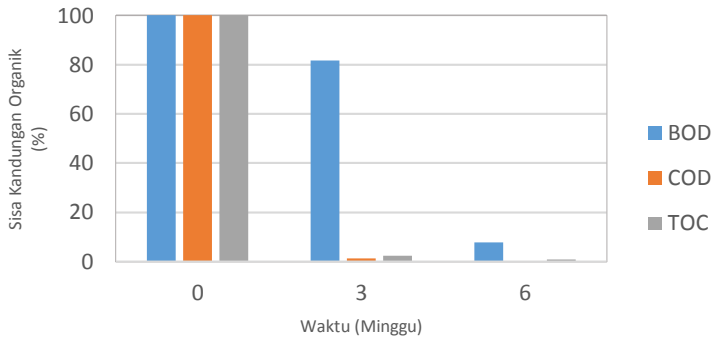
Tabel 4.2 Hasil Uji BOD₅, COD dan TOC Lumpur Lapindo pada t₀ hingga t₆ dalam mg/L

Variabel	Parameter	0 minggu	3 minggu	6 minggu
Lumpur+1,25%Stillage + <i>Circuit Current</i>	BOD ₅	1701,99	267,3	48,38
	COD	242474,5	653,32	227,3
	TOC	63040	352,7	222,3
Lumpur+1,25%Stillage Tanpa <i>Circuit Current</i>	BOD ₅	1701,99	1390,08	132,53
	COD	242474,5	3011,48	541,03
	TOC	63040	1465,7	498,7

*Pengujian di Lab. Baristan



Gambar 4.5 degradasi kandungan organik dengan menggunakan *current circuit*



Gambar 4.6 degradasi kandungan organik tanpa menggunakan *current circuit*

Hasil uji menunjukkan perbedaan penurunan kandungan BOD₅ dari t₀ hingga t₆ pada *chamber* dengan *current circuit* dan tanpa *current circuit*. Persen penurunan kandungan BOD₅ setelah 6 minggu pada *chamber* dengan *current circuit*, mencapai 97,14 %. Hal ini menunjukkan adanya aktifitas mikroba dalam menguraikan unsur organik yang terdapat di dalam substrat lumpur Lapindo. Diikuti dengan menurunnya hasil BOD₅ hal ini sebanding dengan penurunan kandungan COD pada masing-masing variabel setelah minggu ke-6. Persen penurunan kandungan COD terbesar terjadi pada t=3 minggu sebesar 99,73 %. Penurunan COD mengindikasikan terjadinya proses bioremediasi pada lumpur Lapindo yang mendukung konsep pemanfaatan unsur organik oleh mikroba untuk proses oksidasi (Nair dkk, 2013). Persen penurunan kandungan TOC setelah 6 minggu ini juga menunjukkan bahwa mikroba memanfaatkan unsur karbon organik di area anoda untuk proses oksidasi.

Berbeda dengan *chamber* tanpa *current circuit*, hasilnya mengalami penurunan yang lebih rendah dibandingkan dengan

chamber dengan *current circuit*. Terlihat pada minggu ke 3 kandungan BOD pada *chamber* baru turun sebesar 18,33% meskipun parameter COD dan TOC sudah turun cukup banyak yaitu berturut-turut 98,76% dan 97,67%. Pada minggu ke 6 pun BOD turun 92,21% dari kondisi awal, masih lebih rendah daripada penurunan dengan *current circuit*. Sedangkan COD dan TOC pada minggu ke 6 mengalami penurunan sebesar berturut-turut 99,78% dan 99,21%.

BOD merupakan wujud zat organik yang *biodegradable* atau dapat diuraikan oleh mikroorganisme (Alaerts dkk, 1984). Mikroba anaerob yang terdapat pada reaktor menggunakan senyawa organik sebagai aseptor elektron dalam proses oksidasi biologinya. Sehingga nilai kandungan BOD didalam reaktor menjadi berkurang karena telah digunakan untuk proses metabolisme bakteri didalamnya.

IV.6 Hasil Uji SEM-EDX

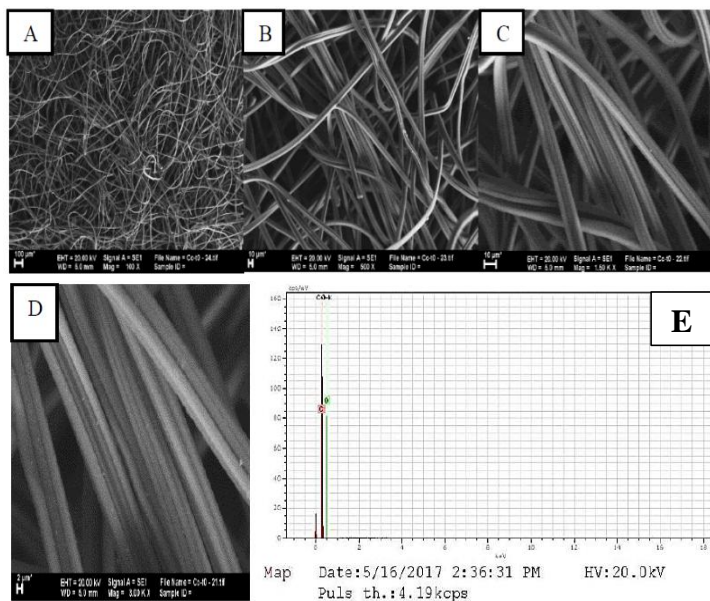
Scanning Elektron Microscopy (SEM) merupakan mikroskop elektron yang dapat digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dalam skala mikro dan nano. Teknik analisis SEM menggunakan elektron sebagai sumber pencitraan dan medan elektromagnetik sebagai lensanya. SEM yang dilengkapi dengan *Energy Dispersive X-ray* (EDX) dapat mengidentifikasi komposisi unsur-unsur yang terkandung pada suatu sampel (Voutou, 2008).

Teknik karakterisasi konvensional yang berbasis pada panjang gelombang 650 nm keatas, seperti mikroskop optik pada analisis metalografi tidak memiliki resolusi yang cukup untuk mendapatkan informasi ilmiah yang diharapkan. Untuk keperluan tersebut, SEM dipahami sebagai teknik yang diterima dan diakui oleh komunitas peneliti.

Pengujian SEM-EDX pada elektroda, diujikan di Laboratorium Teknik Material, Departemen Teknik Material dan Metalurgi, ITS, terdiri dari:

1. *Carbon Cloth* sebelum penelitian pada minggu ke-0.
2. *Carbon Cloth* dengan variabel 1,25% *stillage* berkawat *Ti-wire* setelah penelitian pada minggu ke-9.

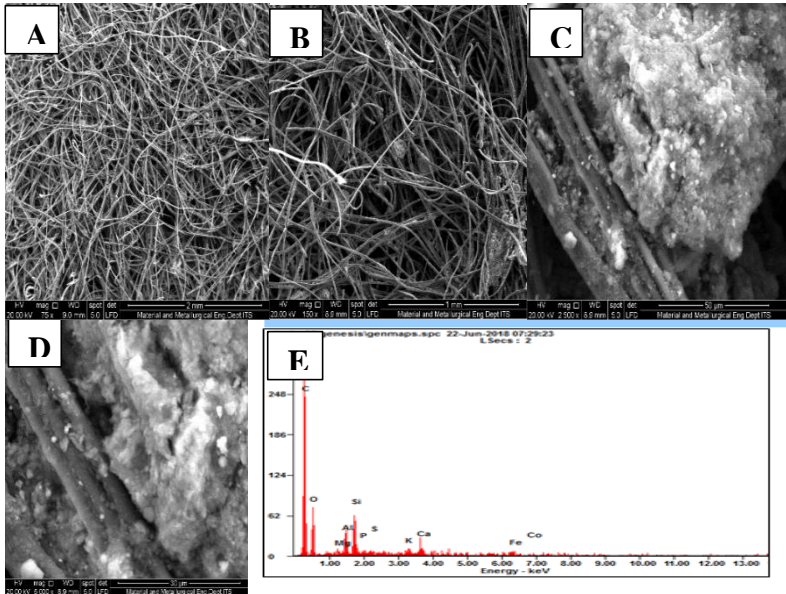
Uji karakterisasi material elektroda dengan menggunakan SEM-EDX ini berfungsi untuk melihat morfologi dan biofilm dari komunitas bakteri microbial serta kemungkinan produk samping dari hasil metabolisme bakteri selama penelitian.



Gambar 4.7 Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda *Carbon Cloth* pada $t = 0$, A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x, E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x

Gambar 4.7 menunjukkan hasil Analisa SEM dan EDX pada elektroda *Carbon Cloth* pada minggu ke-0. Gambar A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM dengan perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x. E menunjukkan hasil Analisa EDX pada perbesaran 3000x dimana *Carbon Cloth* memiliki morfologi seperti sekumpulan serat yang tidak beraturan dan memiliki permukaan yang masih bersih. Kondisi awal elektroda *Carbon Cloth* ini selanjutnya akan dibandingkan dengan kondisi setelah minggu ke-9 percobaan di laboratorium yang menggunakan variabel terbaik pada penelitian yang pertama, yaitu variabel rasio 1,25% lumpur dengan *stillage* yang menggunakan Ti-wire.

Carbon Cloth mengalami kenaikan fluktuasi yang tidak stabil dalam Gambar 4.8, pada minggu ke-9 mengalami titik kenaikan ekstrim. Hal ini dimungkinkan karena adanya penyerapan lumpur di permukaan menuju kedalam inti *Carbon Cloth* sehingga mengakibatkan kenaikan nilai tegangan. Dari hasil uji *Scanning Elektron Microscopy* (SEM) nampak bahwa *Carbon Cloth* memiliki morfologi seperti serat yang tidak beraturan sehingga memungkinkan terbentuknya *bubble* di dalam celah-celah *Carbon Cloth*. Maka dari itu sebelum dilakukan penelitian seharusnya *Carbon Cloth* dipersiapkan terlebih dahulu dengan cara merendam *Carbon Cloth* pada larutan NaCl 0,3 M, hal ini bertujuan agar *bubble* didalamnya terpecah dan proses penyerapan lumpur dapat merata sehingga tidak terjadi keterlambatan penyerapan yang menimbulkan kenaikan ekstrim pada waktu tertentu.



Gambar 4.8 Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda *Carbon Cloth* dengan 1,25% stillage pada minggu ke-9, A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 75x, 150x, 2500x, dan 5000x, E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 150x

Carbon cloth awal mengandung dua unsur yaitu karbon dan oksigen. Keduanya ini berfungsi untuk proses metabolisme bakteri *electricigens*. Tabel 4.3 membandingkan hasil EDX antara *Carbon Cloth* pada $t = 0$ yang digunakan sebagai elektroda dengan kandungan unsur C (97,27%) mengalami degradasi setelah 9 minggu percobaan yang dilakukan di laboratorium dengan menurunnya kandungan C menjadi 56,10%. Dari hasil uji spektrum EDX juga menunjukkan bahwa semakin lama *Carbon Cloth* digunakan maka *Carbon Cloth* akan mengalami penurunan

komposisi karbon dari anoda sehingga setelah mencapai waktu tertentu performa MFCs akan mulai menurun.

Tabel 4.3 Hasil pengujian SEM-EDX pada *carbon cloth* berkawat *Ti-Wire* untuk penambahan *stillage* 1,25% dan MMY pada minggu ke-0 sampai minggu ke-9

Carbon Cloth t_0		Carbon Cloth t_9	
Unsur	Normal (% Berat)	Unsur	Normal (% Berat)
C	97,27	C	56,10
O	2,73	O	22,87
TOTAL	100	Si	7,21
		Al	3,23
		Fe	3,07
		Ca	1,93
		Mg	0,86
		K	0,79
		Cl	0,87
		P	0,87
		Ti	0,85
		Fe	3,07
		TOTAL	100

Terbentuknya unsur selain C pada saat t_9 merupakan hasil dari aktifitas metabolisme bakteri dalam hal ini adalah degradasi biokimia dari komponen organik (Sevda dkk, 2013). Spektrum EDX juga menunjukkan adanya kerusakan komponen dari *carbon cloth* yang berada di anoda seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.8e. Dalam operasi jangka panjang, setelah waktu tertentu kinerja *MFCs* mulai berkurang. Selain itu, adanya bakteri yang mati di permukaan dalam atau luar biofilm menyebabkan substrat tidak

sampai ke bakteri di lapisan dalam. Hal itu menyebabkan menurunnya kinerja sel.

Teramati juga bahwa jumlah karbon yang berkurang di minggu ke-9 disebabkan oleh adanya aktifitas metabolisme bakteri, sementara oksigen jumlahnya bertambah karena pada reaksi reduksi dihasilkan senyawa oksigen yang mengalir ke katoda. Sementara unsur-unsur lain yang hadir di minggu ke-9 merupakan indikasi bahwa selama waktu itu terjadi reaksi yang memungkinkan terbentuknya unsur-unsur tersebut.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan :

1. Rasio terbaik berat lumpur/*stillage* untuk menghasilkan *power density* yang terbesar dengan jumlah bakteri yang relatif konstan adalah pada rasio 98,75% : 1,25% dengan penambahan MMY yang menghasilkan listrik sebesar 0,99 watt/m².
2. Degradasi kandungan organik dengan parameter COD, BOD dan TOC dari *Stillage* menggunakan teknologi MFCs dengan *current circuit* pada minggu keenam secara berturut-turut sebesar 99,91 %, 97,14 % dan 99,65 %.

V.2 Saran dan Rekomendasi

Dari hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan, maka saran untuk penelitian kedepan adalah :

1. Penggunaan *stillage* untuk dijadikan substrat pada *mix culture* MFC dengan lumpur lapindo kurang efektif sebagai sumber karbon dibanding limbah cair lain seperti *molasses*.
2. Penggunaan eksternal resistor pada sambungan chamber MFCs untuk memastikan terdapatnya aliran elektron dari anoda ke katoda.
3. Analisa voltammetry dan MTT-Assay untuk melihat aktivitas bakteri MFC sekaligus untuk mempelajari mekanisme bakteri dalam menghasilkan listrik dan mendegradasi parameter organik.

4. Melakukan analisa RNA-Sequencing method untuk mengetahui jenis bakteri yang dominan dan berperan di dalam MFCs. Metode untuk merunut dan mengidentifikasi silsilah bakteri dari urutan DNA.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-qadiri, H. M., Al-alamy, N. I., Lin, M., Al-holy, M., Cavinato, A. G., dan Rasco, B. 2007. Studying of the bacterial growth phases using fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Rapid Methods & Automation in Microbiology*.
- Alvin Juniawan, B. R. 2013. Karakteristik lumpur lapindo dan fluktuasi logam berat pb dan cu pada sungai porong dan aloo. *Sains dan Terapan Kimia, Vol. 7, No.1*, 50-59.
- Arisandi, P. 2006. Menebar bencana lumpur di Kali Porong. *Ecological Observation And Wetlands Conservation*.
- Arungovind, M., Purushotham, K., Arunkumar, J., dan Sendilvelan, S. 2017. "Analysis of microbial fuel cell for energy harvesting with waste water and molasses". *International Journal of Pharma and Bio Sciences*.
- Cae, Kyu-Jung., Choi Mi-Jin., Lee, Jin-Wook., Kim, Kyoung-Yeol., Kim, In S. 2009. "Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells". Gwangju Institute of Science and Technology ; Elsevier.
- Darmin, R. G. 2013. "Studi komputasi reaksi adsorpsi disosiasi gas O_2 pada permukaan pt-fe dengan metode teori fungsi kerapatan". *Jurnal Kimia Mulawarman* Vol.10 Nomor 2, 64.
- Januarita R, Azizah A, Ulfa A W A, Syahidah H, Samudro G. 2016. *MFCs 2 In 1 : Microbial Fuel Cells Pengolah Air Limbah dan Penghasil Listrik (Alternatif : Limbah Isi Rumen Sapi Dengan Pengaruh Variasi COD dan pH)*. Artikel Ilmiah-Universitas Diponegoro, 5.

- Juniawan, A., Rumhayati, B. dan Ismuyanto, B. 2013. Karakteristik Lumpur Lapindo dan Fluktuasi Logam Berat Pb dan Cu pada Sungai Porong dan Aloo. Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Brawijaya Malang.
- Katuri, K. P., Scott, K., Head, I. M., Piciooreanu, C., dan Curtis, T. P. 2011. “*Microbial fuel cells meet with external resistance*”. Bioresource Technology.
- Logan, B. E., Hamerelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguia, S., Rabaey, K. 2006. “*Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology*”. Environmental Science and Technology.
- Luisa, David; Ruud A. Timmers, Marjolein Helder, Kirsten J.J. Steinbusch, Hubertus V.M. Hamelers, Cees J.N. Buisman. 2015. “*Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms*”. Trends in Biotechnology, 29, 41–49.
- M. Wijaya, R. R. 2016. “*Pengaruh pemberian C/N rasio berbeda terhadap pembentukan bioflok dan pertumbuhan ikan lele dumbo (Clarias gariepinus)*”. Jurnal Perikanan Kelautan Vol. VII No. 1.
- Miroliaei, M. R., Samimi, A., Mohebbi-Kalhari, D., dan Khorram, M. (2014). “*Kinetics investigation of diversity cultures of E. coli and Shewanella sp*”. Journal of Industrial and Engineering Chemistry.
- Nair, R., Renganathan, K., Barathi, S., Venkatraman, K. 2013. “*Performance of salt-bridge microbial fuel cell at various agarose Concentrations using hostel sewage waste as substrate*”. International Journal of Advancements in Research & Technology, Vol. 2,5,326, ISSN 2278-7763
- Nguyet Thu Phung, Lee, Kang, dkk. 2004. “*Analysis of microbial diversity in oligotrophic microbial fuel cells using 16S*

- rDNA sequences*". Korea Institute of Science and Technology ; Elsevier, FEMS-Microbiology.
- Pandit, S., dan Das, D. (2018). "*Principles of Microbial Fuel Cell for The Power Generation*". In *Microbial Fuel Cell A Bioelectrochemical Sistem that converts waste to watts*. springer.
- Purwatil, E., M. Latif, H. P., dan Andrian, O. 2014. Inovasi sumber energi terbarukan dari perancangan prototipe microbial fuel cell tipe seri, paralel dan seri paralel dengan memanfaatkan bakteri *Escherichia coli*.
- Rohan, D., Deepa, V., Rohan, G., dan Satish, B. 2013. "*Bioelectricity Production from Microbial Fuel using Escherichia Coli (Glucose and Brewery Waste)*". International Research Journal of Biological Sciences.
- Sharah, A., Karnila, R., dan Desmelati. 2015. Pembuatan kurva pertumbuhan bakteri asam laktat yang di isolasi dari ikan peda kembung (*Rastrelliger sp.*).
- Sunshine, Justin C., Ray, Ricky, Little, Brenda, Ringeisen dan Bradley, R. 2014. "*Diversifying Biological Fuel Cell Design by Use of Nanoporous Filters*". Environmental Science and Technology, 41 (4), 1444–49.
- Wang, L., Fan, D., Chen, W., dan Terentjev, E. M. 2015. "*Bacterial growth, detachment and cell size control on polyethylene terephthalate surfaces*". scientific report.
- Widanarni, W. H. 2011. "*Pengaruh penambahan molase terhadap kelangsungan hidup dan pertumbuhan larva udang windu *Penaeus monodon* Fab. yang diberi bakteri probiotik *Vibrio SKT-b**". Jurnal Akuakultur Indonesia.
- Xuboujun, Fei, He, Zhen, Ge, Zheng. 2015. "*Using Microbial Fuel Cells to Treat Raw Sludge and Primary Effluent for Bioelectricity Generation*". Department of Civil

Engineering and Mechanics; University of Wisconsin - Milwaukee.

Y. Zhang, C. S. 2013. "*Electricity production from molasses wastewater in two-chamber microbial fuel cell*". Water Science and Technology.

APPENDIKS A
PERHITUNGAN PEMBUATAN LARUTAN,
JUMLAH BAKTERI DAN POWER DENSITY

A1. Membuat NaOH 1 N

Perhitungan menggunakan rumus:

$$\begin{aligned} \text{Normalitas} &= \frac{\text{Massa NaOH}}{Mr} \times \frac{1000}{\text{Volume}} \\ 1 &= \frac{\text{Massa NaOH}}{40} \times \frac{1000}{1000} \\ \text{Massa NaOH} &= 40gr \end{aligned}$$

A2. Membuat NaOH 0,5 mol/L

Perhitungan menggunakan rumus :

$$\begin{aligned} \text{Molaritas} &= \frac{\text{Massa NaOH}}{Mr} \times \frac{1000}{\text{Volume}} \\ 0,5 &= \frac{\text{Massa NaOH}}{40} \times \frac{1000}{1000} \\ \text{Massa NaOH} &= 20gr \end{aligned}$$

A3. Membuat NaCl 0,3 M

Perhitungan menggunakan rumus :

$$\begin{aligned} \text{Molaritas} &= \frac{\text{Massa NaOH}}{Mr} \times \frac{1000}{\text{Volume}} \\ 0,3 &= \frac{\text{Massa NaOH}}{58,5} \times \frac{1000}{1000} \\ \text{Massa NaOH} &= 17,55gr \end{aligned}$$

A4. Membuat 0,1% (w/v) glukosa dan yeast extract (MMY)

Volume = 500 mL

Maka, setiap 0,1 gr/100mL

$$\text{Berat Glukosa} = \frac{0,1 gr}{100 mL} \times 500 mL$$

$$\text{Berat Glukosa} = 0,5gr$$

$$\text{Berat Yeast Extract} = \text{Berat Glukosa} = 20gr$$

A5. Menghitung Jumlah Sel

Prosedur :

- Sampel lumpur diambil dan ditimbang sebanyak 1 gr.
- Lumpur dimasukkan ke tabung reaksi dan ditambahkan aquades kemudian dilakukan pengenceran lagi hingga 6x.
- Sampel diambil dengan menggunakan pipet tetes untuk diteteskan diatas permukaan *Haemacytometer*.
- *Haemacytometer* dilakukan dibawah lensa mikroskop dengan pembesaran 400X.
- Pengamatan dilakukan untuk variabel lumpur dengan penambahan *stillage* 1.25% diperoleh :

Kotak 1 = 11

Kotak 2 = 9

Kotak 3 = 13

Kotak 4 = 13

Kotak 5 = 10

56 sel/kotak

Volume Kotak = luas kotak x kedalaman kotak

Volume Kotak = $0,04 \text{ mm}^2 \times 0,1 \text{ mm}$

Volume Kotak = $0,004 \text{ mm}^3 / \text{kotak}$

= $0,000004 \text{ cm}^3$

= $0,000004 \text{ ml}$

Jumlah sel $\left(\frac{\text{sel}}{\text{kotak}}\right) = \frac{56 \text{ sel}}{5 \text{ kotak}} = 11,2 \text{ sel/kotak}$

Jumlah Sel $\left(\frac{\text{sel}}{\text{ml}}\right) = \frac{\text{Jumlah sel/kotak}}{\text{Volume kotak mm}^3} \times \text{faktor pengenceran}$

Jumlah Sel $\left(\frac{\text{sel}}{\text{ml}}\right) = \frac{11,2 \text{ sel/kotak}}{0,000004 \text{ ml}^3 / \text{kotak}} \times 2 \times 10^5$

Jumlah sel $\left(\frac{\text{sel}}{\text{ml}}\right) = 5,6 \times 10^{11} \text{ sel/ml}$

A6. Menghitung Power Density (Watt/m²)

Dengan menggunakan rumus Hukum Ohm yaitu $P = V \times I$.
Data yang didapat dari pengukuran dengan variabel untuk

variabel lumpur dengan penambahan *stillage* 1,25% dengan eksternal resistansi 1k Ω

Keterangan : karena ada 2 elektroda pada anoda yang diukur dan memiliki 4 sisi luasan maka dibagi 40 cm².

- Menghitung *Power Density* (P)

Dari perhitungan diatas diketahui nilai V = 841 mV = 0,841 V dan nilai I = 123 mA = 0,123 A dengan luas permukaan A = 0,004 m² sehingga nilai P dapat dihitung menggunakan rumus :

$$P = \frac{V \times I}{A}$$

$$P = \frac{0,841 \times 0,123}{0,004}$$

$$= 25,86 \text{ watt/m}^2$$

APPENDIKS B
HASIL PENGUKURAN

Tabel B.1 Hasil pengukuran Arus dan Tegangan listrik

Minggu ke-	Lumpur		1.25% Cu		1.25% Cu + MMY	
	V	I	V	I	V	I
0	0.3300	3.30E-04	0.0500	5.00E-05	0.1000	1.00E-04
1	0.1900	1.90E-04	0.1600	1.60E-04	0.4100	4.10E-04
2	0.1810	1.81E-04	0.0993	9.93E-05	0.3120	3.12E-04
3	0.2540	2.54E-04	0.2520	2.52E-04	0.2490	2.49E-04
4	0.2630	2.63E-04	0.1110	1.11E-04	0.1827	1.83E-04
5	0.3030	3.03E-04	0.4500	4.50E-04	0.5350	5.35E-04
7	0.2360	2.36E-04	0.2620	2.62E-04	0.3570	3.57E-04
8	0.2410	2.41E-04	0.2660	2.66E-04	0.2460	2.46E-04
9	0.0003	3.00E-07	0.0060	6.00E-06	0.4740	4.74E-04

(lanjutan **Tabel B.1**)

Minggu ke-	2.5% Cu		2.5% Cu + MMY		5% Cu		5% Cu + MMY	
	V	I	V	I	V	I	V	I
0	0.0200	2.0E-05	0.0200	2.00E-05	0.0200	2.00E-05	0.7000	7.00E-04
1	0.0700	7.0E-05	0.1500	1.50E-04	0.2500	2.50E-04	0.1300	1.30E-04
2	0.0361	3.6E-05	0.1221	1.22E-04	0.1197	1.20E-04	0.0608	6.08E-05
3	0.0910	9.1E-05	0.0957	9.57E-05	0.1621	1.62E-04	0.0101	1.01E-05
4	0.0139	1.4E-05	0.0683	6.83E-05	0.1238	1.24E-04	0.0016	1.60E-06
5	0.0545	5.5E-05	0.0830	8.30E-05	0.1282	1.28E-04	0.0072	7.20E-06
7	0.1124	1.1E-04	0.0503	5.03E-05	0.0924	9.24E-05	0.0267	2.67E-05
8	0.1070	1.1E-04	0.0839	8.39E-05	0.0004	4.00E-07	0.0082	8.20E-06
9	0.0009	9.0E-07	0.0230	2.30E-05	0.0042	4.20E-06	0.0719	7.19E-05

(lanjutan Tabel B.1)

Minggu ke-	7.5% Cu		7.5% Cu + MMY		10% Cu		10% Cu + MMY	
	V	I	V	I	V	I	V	I
0	0.0200	2.00E-05	0.4000	4.00E-04	<<	<<	0.0200	2.0E-05
1	0.1200	1.20E-04	0.1400	1.40E-04	0.2800	2.80E-04	0.0400	4.0E-05
2	0.1207	1.21E-04	0.0907	9.07E-05	0.2180	2.18E-04	0.1099	1.1E-04
3	0.0398	3.98E-05	0.2310	2.31E-04	0.2240	2.24E-04	0.0169	1.7E-05
4	0.1158	1.16E-04	0.2083	2.08E-04	0.0429	4.29E-05	0.0399	4.0E-05
5	0.0860	8.60E-05	0.2350	2.35E-04	0.0885	8.85E-05	0.0605	6.1E-05
7	0.0974	9.74E-05	0.0104	1.04E-05	0.1920	1.92E-04	0.0394	3.9E-05
8	0.0022	2.20E-06	0.0464	4.64E-05	0.1227	1.23E-04	0.0358	3.6E-05
9	0.1575	1.58E-04	0.0037	3.70E-06	0.0998	9.98E-05	0.0024	2.4E-06

Tabel B.2 Jumlah Bakteri Per-Minggu

Periode (Minggu)	Carbon Cloth							
	MMY					Non MMY		Lumpur
	1.25%	2.50%	5%	7.50%	10%	1.25%	2.50%	5%
0	3.20E+12	2.60E+12	3.25E+12	3.40E+12	1.60E+12	2.00E+12	1.60E+12	1.70E+12
1	2.35E+12	3.45E+12	2.25E+12	2.75E+12	2.15E+12	2.55E+12	1.65E+12	6.00E+11
2	6.20E+12	3.65E+12	1.90E+12	1.45E+12	2.45E+12	3.35E+12	2.65E+12	2.70E+12
3	5.85E+12	3.80E+12	1.90E+12	1.55E+12	2.40E+12	3.65E+12	2.60E+12	2.65E+12
4	4.60E+11	7.70E+11	1.00E+12	5.65E+11	6.60E+11	4.45E+12	6.50E+12	3.50E+12
5	2.40E+12	2.75E+12	3.65E+12	2.35E+12	1.95E+12	1.80E+12	1.50E+12	2.00E+12
6	1.85E+12	2.05E+12	2.00E+12	1.90E+12	1.90E+12	1.80E+12	1.70E+12	1.85E+12
7	1.65E+12	2.35E+12	2.35E+12	1.90E+12	2.05E+12	2.00E+12	2.05E+12	1.85E+12
8	3.600E+12	3.950E+12	2.80E+12	3.600E+12	2.40E+12	3.05E+12	2.2000E+12	2.20E+12

Tabel 4.3 Hasil pengukuran Arus, Tegangan, Suhu dan *Electroconductivity* pada *Mix Culture* dengan *Ti-Wire*

minggu ke-	Stillage 1.25% Ti-wire					
	mV	μ A	V	I	mA/m ²	P (mW/m ²)
0	0.3	<<	0.0003	0.000300	<<	<<
1	27	90	0.027	0.027000	5.750000	0.155250
2	47.9	24.9	0.0479	0.0479	7.78125	0.372721875
3	57.7	32.9	0.0577	0.0577	10.28125	0.593228125
4	191	27.8	0.191	0.191	8.6875	1.6593125
5	2.1	0.1	0.0021	0.0021	0.03125	0.000065625
6	1.4	0.06	0.0014	0.0014	0.01875	0.00002625
7	1.4	0.01	0.0002	0.0014	0.0031	0.000004
8	0.2	0.01	0.0002	0.0002	0.0031	0.000001

Tabel 4.4 Jumlah Bakteri

Periode (Minggu)	<i>Carbon Cloth dengan Ti-Wire</i>						
	Stillage 1.25% (MMY)						
	1	2	3	4	5	Sel/kotak	Jumlah sel/ml
0	26	38	38	39	42	36.6	9.15E+12
1	11	10	13	11	14	11.8	2.95E+12
2	14	10	2	8	8	8.4	2.10E+12
3	8	12	13	9	8	10	2.50E+12
4	22	14	12	17	22	17.4	4.35E+12
5	18	12	15	17	13	15	3.75E+12
6	21	20	40	25	15	24.2	6.05E+12
7	47	63	75	62	65	62.4	1.56E+13
8	19	21	20	14	11	17	4.25E+12

APPENDIKS C

DOKUMENTASI PERCOBAAN

C.1 AREA LUMPUR LAPINDO



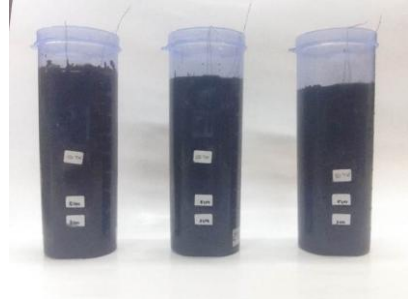
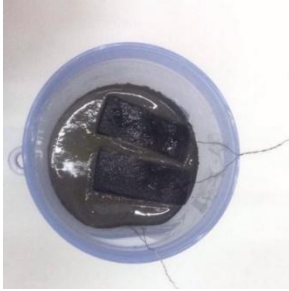
Gambar C.1 Pengambilan sampel lumpur Lapindo

C.2 PERCOBAAN DI LABORATORIUM

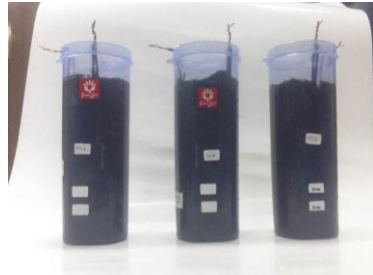


Gambar C.2 Sampel *Molasses* dan *Stillage* yang akan diuji kandungan organiknya (COD, BOD dan TOC).

C.3 CHAMBER MFCS YANG BERISI LUMPUR DAN STILLAGE



(a)



(b)

Gambar C.3 Rangkaian sistem *MFCs* menggunakan (a) Titanium dan (b) tembaga

LAPORAN HASIL UJI

NO. 2044-2047/18/LH/02/IV/2018

Nomor Analisa : 2018P2044 s/d 2018P2047
Contoh : Totes
Merk : -
Diterima Tanggal : 29 Maret 2018
Catatan Sampel : 200 cairan totes dalam botol

Nama Pengirim : Wanggi Ario K.

Alamat : Jl. Mega Mendung RT. 02 RW. 03 No. 38
Bogor

Parameter	Satuan	Hasil Uji				Metode Uji
		P. 2044 (LSE 260318)	P. 2045 (LME 260318)	P. 2046 (LM 260318)	P. 2047 (LS 260318)	
BOD ₅	mg/L	287,63	641,56	1300,06	2336,84	SNI 6989.72 : 2009
COD	mg/L	653,32	1429,36	3811,48	5746,17	SNI 6989.2 : 2009
Total Organik Cairan (TOC)	mg/L	352,7	4201,92	1466,7	3195,7	SNI 03-6989.2B - 2008

Catatan :

- Parameter uji sesuai dengan permintaan



17 April 2018
Ketua

Wanggi Ario K.

Baristand Industri Surabaya, Jl. Jagir Wonorejo, RT. 02 RW. 03 No. 38, Bogor

021-8410254/3000622601

LAPORAN HASIL UJI

No. 2813-2816/18/LHU/2/2018

Nomor Analisa : 2018P2813 s/d 2018P2816 Nama Pengirim : Wangsit Aris K
 Contoh : Tetes
 Merk : Teriampir Alamat : Jl. Mega Mendung RT. 02 RW. 03 No. 39
 Diterima Tanggal : 23 April 2018 Bogor
 Catatan Sampel : 500 cairan tetes dalam botol

Parameter	Satuan	Hasil Uji				Metode Uji
		P. 2813 (S tanpa E)	P. 2814 (S dengan E)	P. 2815 (M tanpa E)	P. 2816 (M dengan E)	
BOD ₅	mg/L	132.53	48.38	1137.63	65.17	SNI 6989.2 : 2009
COD	mg/L	541.07	227.3	2577.81	240.05	SNI 6989.2 : 2009
Total Organik Carbon (TOC)	mg/L	498.7	222.3	1287.7	244.5	SNI 03-6989.28 - 2005

Catatan :

- Parameter uji sesuai dengan permintaan



LAPORAN HASIL UJI

No. 3421-3424/18/LH/2/M/2018

Nomor Analisa : 2018P3421 sld 2018P3424 Nama Pengirim : Wangsil Ario K
Contoh : Tetes
Merk : Teriampir Alamat : Jl. Mega Mendung RT. 02 RW. 03 No. 39
Diterima Tanggal : 14 Mei 2018 Bogor
Catatan Sampel : 500 cairan tetes dalam botol

Parameter	Satuan	Hasil Uji				Metode Uji
		P. 3421 (S tanpa E)	P. 3422 (S dengan E)	P. 3423 (M tanpa E)	P. 3424 (M dengan E)	
BOD ₅	mg/L	4390,78	2093,32	1086,77	1854,99	SNI 6989.2 : 2009
COD	mg/L	11747,5	5114,8	2947,7	5682,4	SNI 6989.2 : 2009
Total Organik Carbon (TOC)	mg/L	2751,1	1091,1	1021,1	1636,1	SNI 03-6989.28 - 2005

Catatan :

- Parameter uji sesuai dengan permintaan





LAPORAN HASIL UJI

No. 7865-7866/17/LHU/31/2018

Nomor Analisa : 2017P7885 s/d 2017P7886 Nama Pengirim : Wangsit Arie K
Contoh : Cairan
Merk : Terlampir Alamat : Jl. Mega Mendung RT. 02 RW. 03 No. 38
Diterima Tanggal : 28-Desember-2017 Bogor
Catatan Sampel : 350 ml cairan lumpur dalam botol

Parameter	Satuan	Hasil		Metode Uji
		P. 7885 (Lumpur)	P. 7886 (Stillage)	
BOD ₅	mg/L	43.77	1701.99	SNI 6989.72 : 2009
COD	mg/L	82	242474.49	SNI 6989.2 : 2009
TOC	mg/L	7.52	63040	SNI 06-6989.28 - 2005

Catatan :

- Parameter diuji sesuai permintaan
- Pengiriman contoh tidak dilengkapi dengan BAPC



LAPORAN HASIL UJI

No. 1372/18/LHU/2/III/2018

Nomor Analisa : 2018P1372

Nama Pengirim : Wangsit Aria K

Contoh : Tetes

Merk : -

Alamat : Jl. Mega Mendung RT. 02 RW. 03 No. 39
Bogor

Diterima Tanggal : 08-Maret-2018

Catatan Sampel : 350 cairan tetes dalam botol

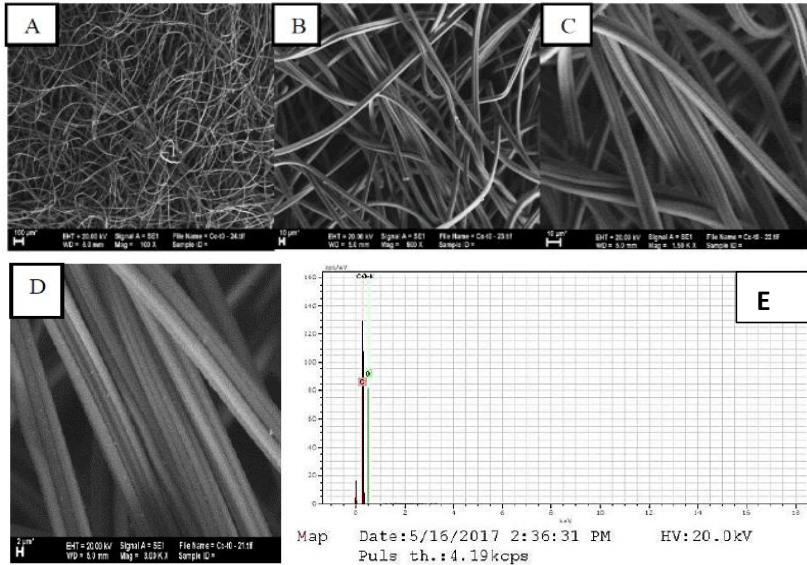
Parameter Uji	Satuan	Hasil Uji	Metode Uji
BOD ₅	mg/L	297911.6	SNI 6989.72:2009
COD	mg/L	864540.8	SNI 6989.2:2009
Total Organik Carbon (TOC)	mg/L	414430	SNI 06-6999.28-2005

Catatan :

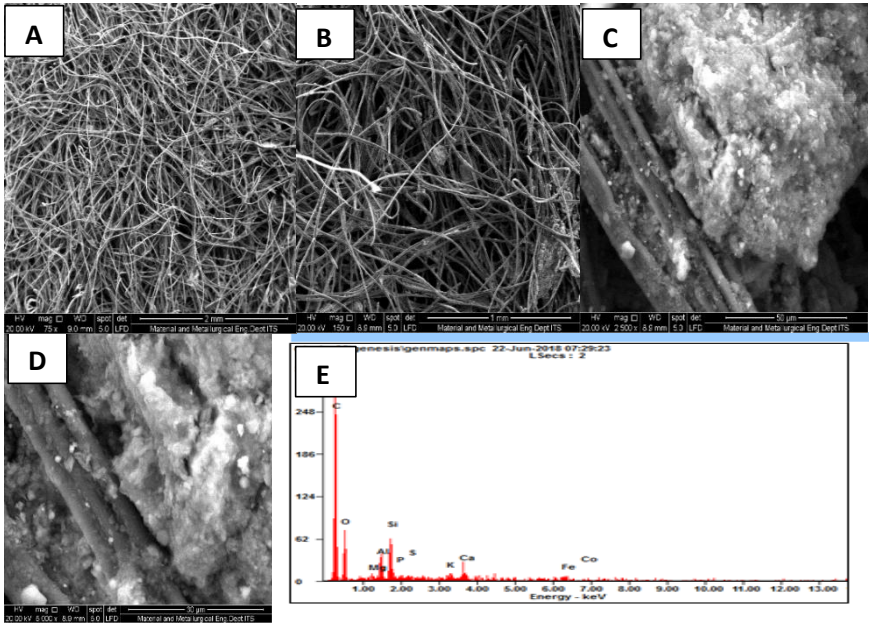
- Parameter uji sesuai dengan permintaan



C.4 HASIL UJI SEM-EDX CARBON CLOTH t_0 dan t_9



Gambar C.4 Hasil uji SEM-EDX carbon cloth pada t_0 ; A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x, E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x



Gambar C.5 Hasil Analisa SEM dan EDX *Carbon Cloth* dengan 1,25% stillage pada t_9 ; A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 75x, 150x, 2500x, dan 5000x, E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 150x