



SKRIPSI – TK 141581

Pemanfaatan Bakteri *Eschericia coli* dan *Shewanella oneidensis* dalam Limbah Organik pada Produksi Listrik dengan *Microbial Fuel Cell* (MFC)

Oleh:

**Aprillia Ayuningtyas
NRP. 2313100007**

**Nora Ellyza
NRP. 2313100024**

**Dosen Pembimbing I
Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng.
NIP. 19590730 198603 2 001**

**Dosen Pembimbing II
Dr. Eng. R. Darmawan ST., MT.
NIP. 19780506 200912 1 001**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**



FINAL PROJECT – TK 141581

**Utilization of Bacteria Eschericia coli and Shewanella
oneidensis in Organic Waste at Electricity Production
using Microbial Fuel Cell (MFC)**

By:

**Aprillia Ayuningtyas
NRP. 2313100007**

**Nora Ellyza
NRP. 2313100024**

Advisors

**Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng.
NIP. 19590730 198603 2 001**

**Dr. Eng. R. Darmawan ST., MT.
NIP. 19780506 200912 1 001**

**DEPARTEMEN OF CHEMICAL ENGINEERING
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**

LEMBAR PENGESAHAN

Pemanfaatan Bakteri *Eschericia coli* dan *Shewanella oneidensis* dalam Limbah Organik pada Produksi Listrik dengan *Microbial Fuel Cell* (MFC)

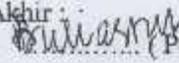
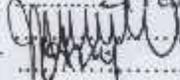
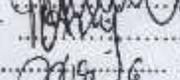
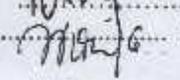
Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Oleh :

Aprillia Ayuningtyas
Nora Ellyza

NRP. 2313100007
NRP. 2313100024

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti,  (Pembimbing I)
M. Eng.
2. Dr. Eng R. Darmawan, S.T., M.T.  (Pembimbing II)
3. Ir. Nuniek Hendriani, M.T.  (Penguji I)
4. Dr. Lailatul Qadariah, S.T., M.T.  (Penguji II)
5. Dr. Widiyastuti, S.T., M.T.  (Penguji III)



Pemanfaatan Bakteri *Eschericia coli* dan *Shewanella oneidensis* dalam Limbah Organik pada Produksi Listrik dengan *Microbial Fuel Cell* (MFC)

ABSTRAK

Indonesia adalah salah satu negara dengan jumlah penduduk yang banyak. Hal ini sangat mempengaruhi kebutuhan energi listrik yang setiap tahunnya semakin meningkat diseluruh bagian Indonesia. Salah satu energi alternatif yang sangat berpotensi untuk dikembangkan adalah *fuel cell* yang berbasis biologi. *Microbial Fuel Cell* (MFC) merupakan teknologi yang mengkonversi energi kimia ke energi listrik dengan bantuan reaksi katalitik dari mikroorganisme. Sehingga, perlu dilakukan penelitian dengan judul “Pemanfaatan Bakteri *Eschericia coli* dan *Shewanella oneidensis* dalam Limbah Organik pada Produksi Listrik dengan *Microbial Fuel Cell* (MFC)”. Metode penelitian yang dilakukan pada penelitian ini yaitu menggunakan bakteri dalam limbah organik pada sisi anoda dan larutan ferisianida pada sisi katoda. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji proses produksi bio-listrik menggunakan *Microbial Fuel Cell* (MFC) dengan konsentrasi bakteri yang tepat dan mengetahui penurunan kandungan ferisianida setelah proses bio-listrik. Proses bio-listrik ini dilakukan dengan *dual-chamber reactor* yang dihubungkan dengan jembatan garam dan terdapat elektroda di setiap chamber yang dihubungkan dengan kabel tembaga. Limbah organik yang digunakan adalah limbah cair pengolahan pabrik gula dengan konsentrasi bakteri 10 %, 12,5 %, 15 %, 17,5 % (v/v) dan perbandingan bakteri campuran 1:1 , 1:2 , 2:1. Dari hasil penelitian diperoleh tegangan listrik pada variabel konsentrasi bakteri terbaik adalah 12.5%, baik untuk bakteri *Eschericia coli* dan *Shewanella*

oneidensis yaitu sebesar 847 mV dan 988 mV, dan untuk variabel bakteri campuran yaitu pada perbandingan 1:2 dengan tegangan listrik 1052.667 mV. Selama 12 hari, persentase penurunan BOD terbesar adalah pada variabel konsentrasi bakteri *Eschericia coli* 12.5% sebesar 84.531% dan pada bakteri *Shewanella oneidensis* 17.5% sebesar 73.779%. Reduksi Fe^{3+} terbaik yaitu sebesar 53,52 % pada variabel dengan bakteri *Eschericia coli* 10 % (v/v), 62,22 % pada variabel dengan bakteri *Shewanella oneidensis* sebesar 62,22 % pada konsentrasi 15 %. Pada variabel dengan bakteri campuran didapatkan hasil reduksi terbaik pada perbandingan *Eschericia coli* : *Shewanella oneidensis* 1 : 2 sebesar 77,44 %.

Kata kunci : bio-listrik, *Escherichia coli*, ferisianida, *microbial fuell cell*, *Shewanella oneidensis*

Utilization of bacteria *Escherichia coli* and *Shewanella oneidensis* in Organic Waste at Electricity Production using *Microbial Fuel Cell* (MFC)

ABSTRACT

Microbial Fuel Cell (MFC) is a technology that convert chemical energy into electrical energy with catalytic reaction from microorganism. The research method using bacteria in organic waste on anode compartment and ferricyanide solution on cathode compartment. Liquid wastewater from sugar factory is used as organic waste with bacterial concentration 10%, 12,5%, 15%, 17,5% (v/v) and with bacteria mixture ratio 1:1, 1:2, 2:1. The result of the research shows that the best voltage of bacteria concentration is 12.5% for *Escherichia coli* and *Shewanella oneidensis* bacteria, which is 847 mV and 988 mV, and for the mixed bacteria variable is 1: 2 ratio with the voltage is 1261 mV. For 12 days, the largest percentage of the decrease of BOD₅ was 12.5% *Escherichia coli* bacteria concentration variable is 84.531% and 17.5% *Shewanella oneidensis* is 73.779%. The best Fe³⁺ reduction was 53,52% for *Escherichia coli* at 10% concentration (v/v), for *Shewanella oneidensis* bacteria is 62,22% at 15% concentration (v/v). In the variable with mixed bacteria was obtained the best reduction result on the ratio *Escherichia coli* : *Shewanella oneidensis* 1: 2 was 77,44%.

Keyword : bio-electrical, *Escherichia coli*, ferricyanide, microbial fuel cell, *Shewanella oneidensis*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah kehadiran Allah SWT Yang Maha Mengetahui terhadap setiap yang ada di bumi dan di langit, hanya karena rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan proposal skripsi ini. Proposal skripsi ini berjudul “Pemanfaatan Bakteri *Eschericia coli* dan *Shewanella oneidensis* dalam Limbah Organik pada Produksi Listrik dengan *Microbial Fuel Cell* (MFC)”

Penulisan proposal skripsi ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Juwari, ST, M.Eng, Ph.D selaku ketua departemen Teknik Kimia FTI-ITS
2. Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng selaku dosen pembimbing I yang telah banyak memberikan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan proposal skripsi ini.
3. Dr. Eng. R. Darmawan, ST, MT selaku dosen pembimbing II yang telah banyak memberikan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan proposal skripsi ini.
4. Orang tua dan seluruh keluarga besar yang selalu mendoakan, memberikan dukungan dan semangat pada penulis mulai awal perkuliahan hingga mengerjakan proposal skripsi ini.
5. Rekan-rekan teknik kimia terutama angkatan 2013 dan semua pihak yang telah banyak membantu hingga terselesainya proposal skripsi ini.

Proposal skripsi ini tentunya masih terdapat banyak kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran demi penyempurnaan proposal skripsi ini. Akhirnya, penulis berharap agar proposal skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	I
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	x
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang.....	I-1
I.2 Rumusan Masalah.....	I-7
I.3 Tujuan Penelitian.....	I-7
I.4 Manfaat Penelitian.....	I-8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Fuel Cell.....	II-1
II.2 Microbial Fuel Cell.....	II-6
II.3 <i>Eschericia coli</i>	II-12
II.4 <i>Shewanella oneidensis</i>	II-13
II.5 Pertumbuhan Bakteri.....	II-17
II.6 Penelitian Terdahulu.....	II-21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
III.1 Variabel Penelitian.....	III-1
III.2 Bahan,Alat dan Skema Penelitian.....	III-2
III.3 Skema Alat Penelitian.....	III-4
III.4 Diagram Alir Penelitian.....	III-5
III.5 Rencana Jadwal Kegiatan.....	III-9
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
IV.1 Persiapan Bakteri.....	IV-1
IV.2 Tegangan Listrik.....	IV-3
IV.3 Hubungan BOD.....	IV-11
IV.4 Reduksi Fe ³⁺	IV-16

	IV.5	Power Density	IV-23
BAB V		KESIMPULAN DAN SARAN	
	V.1	Kesimpulan.....	V-1
DAFTAR PUSTAKA			xi
APPENDIKS			A-1
BIODATA PENULIS			

DAFTAR GAMBAR

Gambar I.1	Proyeksi Kebutuhan Listrik Per Sektor Tahun 2003 s.d. 2020.....	I-1
Gambar I.2	Kapasitas Terpasang Pembangkit Tenaga Listrik Nasional Tahun 2009 s.d. 2014.....	I-2
Gambar 2.1	Skema cara kerja microbial fuel cell....	II-6
Gambar 2.2	Substrat organik (asam asetat) yang teroksidasi dalam ruang anoda (anaerob); proton dan elektron yang dihasilkan.....	II-8
Gambar 2.3	Reaksi dari reduksi kromium pada reaktor microbial fuel cell.....	II-9
Gambar 2.4	Elektroda Batang Grafit.....	II-10
Gambar 2.5	Bakteri <i>Escherichia coli</i>	II-11
Gambar 2.6	Bakteri <i>Shewanella oneidensis</i>	II-12
Gambar 2.7	Klasifikasi mekanisme transfer elektron pada bakteri ke elektroda.....	II-14
Gambar 2.8	Kurva Pertumbuhan Bakteri.....	II-15
Gambar 2.9	Hemasitometer.....	II-16
Gambar 3.1	Rangkaian alat <i>microbial fuel cell</i>	III-3
Gambar 3.2	Diagram Alir microbial fuel cells.....	III-3
Gambar 3.3	Hemasitometer (Counting Chamber)...	III-6
Gambar 4.1	Kurva pertumbuhan bakteri <i>Escherichia coli</i>	IV-2
Gambar 4.2	Kurva pertumbuhan bakteri <i>Shewanella oneidensis</i>	IV-2
Gambar 4.3	Kurva pertumbuhan bakteri <i>Escherichia coli</i> pada proses MFC.....	IV-4
Gambar 4.4	Kurva tegangan listrik yang dihasilkan selama proses MFC dengan bakteri <i>Escherichia coli</i>	IV-4

Gambar 4.5	Kurva tegangan tertinggi masing masing variabel dengan menggunakan bakteri <i>Eschericia coli</i>	IV-5
Gambar 4.6	Kurva pertumbuhan <i>Shewanella oneidenis</i> selama proses MFC.....	IV-7
Gambar 4.7	Kurva tegangan listrik dengan menggunakan bakteri <i>Shewanella oneidenis</i> selama proses MFC.....	IV-7
Gambar 4.8	Hasil tegangan tertinggi masing masing variabel dengan menggunakan bakteri <i>Shewanella oneidenis</i>	IV-9
Gambar 4.9	Kurva pertumbuhan bakteri campuran selama proses MFC.....	IV-10
Gambar 4.10	Kurva Tegangan listrik dengan menggunakan bakteri campuran <i>Eschericia coli</i> dan <i>Shewanella oneidenis</i>	IV-10
Gambar 4.11	Kurva hasil analisa BOD pada berbagai variabel konsentrasi bakteri <i>Eschericia coli</i>	IV-12
Gambar 4.12	Kurva penurunan BOD masing – masing variabel	IV-13
Gambar 4.13	Kurva hasil analisa BOD5 terhadap waktu pada berbagai variabel konsentrasi bakteri <i>Shewanella oneidenis</i>	IV-14
Gambar 4.14	Kurva Penurunan BOD masing – masing variabel.....	IV-15
Gambar 4.15	Kurva hasil analisa BOD5 terhadap waktu pada berbagai variabel konsentrasi campuran bakteri <i>Eschericia coli:Shewanella oneidenis</i> .	IV-16
Gambar 4.16	Kurva hasil analisa Fe^{3+} pada variabel dengan menggunakan bakteri <i>Eschericia coli</i> selama proses MFC.....	IV-18

Gambar 4.17	Kurva reduksi Fe ³⁺ pada variabel dengan menggunakan bakteri <i>Shewanella oneidensis</i>	IV-19
Gambar 4.18	Kurva reduksi Fe ³⁺ pada variabel dengan menggunakan bakteri campuran.....	IV-20
Gambar 4.19	Kurva pH pada variabel dengan bakteri <i>Eschericia coli</i> selama proses MFC.....	IV-21
Gambar 4.20	Kurva pH pada variabel dengan bakteri <i>Shewanella oneidensis</i> selama proses MFC.....	IV-22
Gambar 4.21	Kurva pH pada variabel dengan bakteri campuran selama proses MFC	IV-23
Gambar 4.22	Kurva power density pada variabel dengan menggunakan bakteri <i>Eschericia coli</i>	IV-24
Gambar 4.23	Kurva power density pada variabel dengan menggunakan bakteri <i>Shewanella oneidensis</i>	IV-25
Gambar 4.24	Kurva power density pada variabel dengan menggunakan bakteri <i>Shewanella oneidensis</i>	IV-25

DAFTAR TABEL

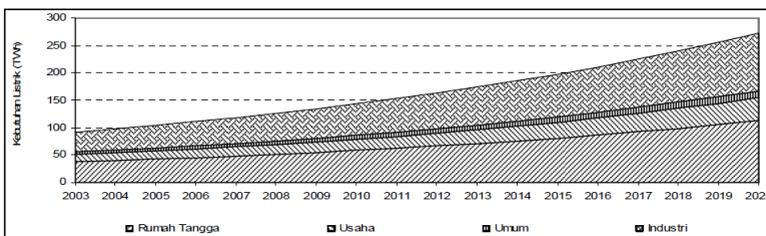
Tabel 2.1	Jenis – jenis Fuel Cell.....	II-3
Tabel 2.2	Penggunaan Berbagai Jenis Substrat dan Mikroorganisme pada microbial fuel cell (MFC).....	II-6
Tabel 3.1	Rencana dan Jadwal Kegiatan Penelitian Tahun 2017.....	III-9

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 LATAR BELAKANG MASALAH

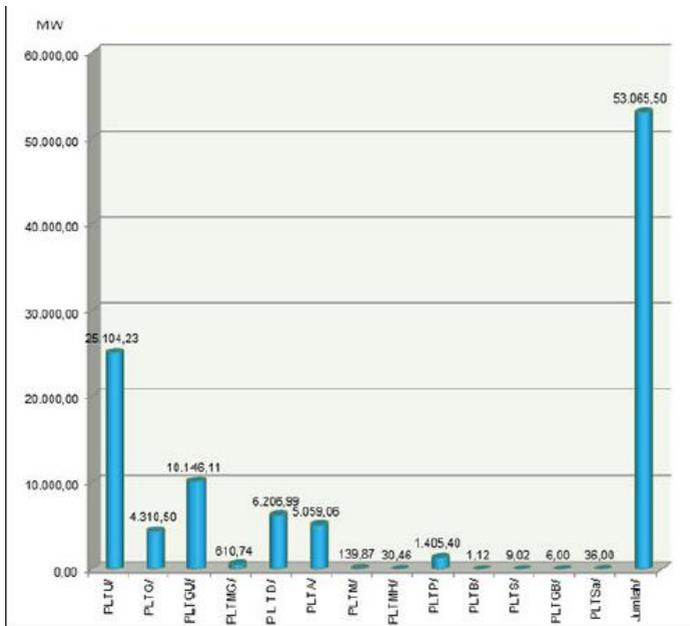
Indonesia menjadi salah satu negara dengan jumlah penduduk yang banyak. Hal ini sangat mempengaruhi kebutuhan energi listrik yang setiap tahunnya semakin meningkat diseluruh bagian Indonesia dan di segala sektor. Besarnya kebutuhan listrik di Indonesia yang ditunjukkan pada Gambar .11, merupakan akumulasi dari kebutuhan listrik pada masing-masing sektor pengguna energi di 22 wilayah pemasaran listrik PLN. Berdasarkan hasil proyeksi kebutuhan listrik dari tahun 2003 s.d. 2020 yang dilakukan Dinas Perencanaan Sistem PT PLN (Persero) dan Tim Energi BPPT, terlihat bahwa selama kurun waktu tersebut rata-rata kebutuhan listrik di Indonesia tumbuh sebesar 6,5% per tahun dengan pertumbuhan listrik di sektor komersial yang tertinggi, yaitu sekitar 7,3% per tahun dan disusul sektor rumah tangga dengan pertumbuhan kebutuhan listrik sebesar 6,9% per tahun. Hal tersebut sangat beralasan, mengingat untuk meningkatkan perekonomian di Indonesia, pemerintah meningkatkan pertumbuhan sektor pariwisata yang selanjutnya akan mempengaruhi pertumbuhan sektor komersial. Untuk sektor rumah tangga laju pertumbuhan kebutuhan listrik yang tinggi dipicu oleh ratio elektrifikasi dari berbagai daerah yang masih relatif rendah, karena sampai tahun 2003 masih ada beberapa wilayah di Indonesia yang belum terlistriki terutama di daerah yang tidak dilewati listrik PLN. (Muchlis dan Adhi , 2002).



Gambar 1.1. Proyeksi Kebutuhan Listrik Per Sektor Tahun 2003 s.d. 2020

Berdasarkan Gambar 1 terlihat bahwa kebutuhan listrik nasional didominasi oleh sektor industri, disusul sektor rumah tangga, usaha, dan umum. Pola kebutuhan listrik per sektor tersebut akan berbeda apabila ditinjau menurut wilayah pemasaran listrik PLN, dimana semakin ke Kawasan Indonesia Timur, semakin besar kebutuhan listrik sektor rumah tangga dibanding sektor industri. Hal ini disebabkan karena masih rendahnya rasio elektrifikasi dan terbatasnya jumlah industri. (Muchlis dan Adhi , 2002).

PT. PLN saat ini menjadi ujung tombak penyedia energi listrik di Indonesia dengan berbagai jenis pembangkitnya dan dengan kapasitas produksi yang sangat besar. Namun masih banyak daerah pelosok di Indonesia yang belum teraliri listrik. Ketidaksiapan Perusahaan Listrik Negara (PLN) untuk menyuplai energi listrik bagi konsumen yang terus mengalami peningkatan akan mengganggu energi listrik yang disalurkan. Akibatnya sering terjadi pemadaman bergilir yang akan mengurangi kenyamanan konsumen dalam melakukan aktivitas keseharian. Pada Gambar 2.1 terlihat data kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik nasional.



Gambar 1.2. Kapasitas Terpasang Pembangkit Tenaga Listrik Nasional Tahun 2009 s.d. 2014.

(Statistik Ketenagalistrikan , 2014)

Penggunaan energi fosil yang berdampak pada persoalan lingkungan, menimbulkan efek rumah kaca yang pada akhirnya menyumbang pada peningkatan pemanasan global (*global warming*), hujan asam, meningkatnya keasaman tanah dan memicu berbagai penyakit yang mengancam jiwa manusia. Sebagai ilustrasi, pada dekade 1990-an 85% dari produksi energi listrik di Indonesia setara dengan sekitar 43.200 GWh dihasilkan oleh energi fosil, berarti terjadi pembebasan 42 juta ton CO₂, 41,5 ribu ton SO₂ serta 30 ribu ton NO_x ke atmosfer (Agung, 2013). Polutan tersebut selain mengancam manusia secara langsung, akibatnya juga dirasakan oleh lingkungan sekitarnya termasuk tumbuh-tumbuhan dan gedung-gedung (Hendrata Suhada, 2001).

Pengembangkan sumber energi alternatif sangat penting untuk mengurangi krisis energi masa depan dan mengurangi dampak negatif dari polusi terhadap lingkungan. Berbagai macam cara telah diupayakan sebagai solusi ketergantungan penggunaan energi yang berasal dari fosil. Energi terbarukan dipandang sebagai salah satu alternatif yang bagus untuk mengatasi permasalahan krisis energi. Metode pengembangan energi listrik dari sumber yang dapat terbarukan tanpa menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) dan ramah lingkungan telah ditemukan dan dikembangkan oleh para peneliti (Du, dkk., 2007; Fitrialdi, 2011).

Seiring dengan perkembangan zaman, jumlah penduduk di dunia, termasuk Indonesia, semakin meningkat. Indonesia sendiri merupakan salah satu negara dengan jumlah penduduk terbanyak di dunia yaitu lebih dari 250 juta jiwa dan mempunyai laju kenaikan penduduk lebih dari satu persen. Adanya pertumbuhan penduduk yang cepat menuntut fasilitas hidup yang digunakan untuk pemenuhan kebutuhan yang banyak pula . Karena itu, semakin banyak industri yang dibangun dan beroperasi guna memenuhi kebutuhan masyarakat Indonesia dan dunia. Di Indonesia sendiri, pertumbuhan Industri sudah hampir mencapai angka tujuh persen . (Askari , 2015).

Pembangunan industri itu akan memberikan dampak positif dan dampak negatif. Salah satu dampak negatif yang timbul adalah meningkatnya jumlah limbah yang diproduksi. Limbah ini akan mengganggu proses aliran di dalam industri sehingga limbah harus dikeluarkan dari proses industri dan umumnya limbah akan dibuang ke lingkungan. Namun, sebelum dibuang limbah harus diolah dengan benar terlebih dahulu agar tidak berakibat buruk seperti rusaknya ekosistem lingkungan sekitar karena pencemaran maupun terganggunya kesejahteraan masyarakat.

Permasalahannya, limbah yang dihasilkan dari produksi suatu barang/bahan akan berbeda cara pengolahan dan teknologinya pada limbah produksi barang/bahan yang lain

sehingga permasalahan pengolahan limbah ini adalah permasalahan yang kompleks. Awalnya, limbah yang dihasilkan langsung dibuang ke lingkungan sekitar oleh beberapa pelaku industri tanpa diolah terlebih dahulu karena beberapa faktor, di antaranya adalah teknologi yang belum mencukupi dan mahal biaya pengolahan limbah saat itu.

Namun, seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, telah ditemukan metode dan teknologi untuk mengolah limbah secara efektif dan efisien sehingga pengolahan limbah menjadi semakin baik, mudah, dan murah sehingga limbah tidak akan merusak lingkungan sekitar atau bahkan limbah ini mampu digunakan untuk proses industri yang lain.

Air limbah adalah air yang tidak bersih dan mengandung berbagai zat yang dapat membahayakan manusia dan makhluk hidup lainnya dan lazimnya muncul karena hasil aktivitas manusia, baik dari industri maupun dari rumah tangga. Dengan konsentrasi dan kuantitas tertentu, kehadiran limbah dapat berdampak negatif terhadap lingkungan dan juga kesehatan manusia sehingga perlu dilakukan penanganan dan pengolahan terhadap limbah sebelum limbah dibuang ke lingkungan. (Budi, 2000).

Limbah industri kimia dapat dijadikan sebagai salah satu sumber energi alternatif yang mampu menjawab tantangan meningkatnya kebutuhan energi listrik di masa depan. Salah satu cara pembangkit energi alternatif yang belakangan ini marak dikembangkan oleh para ahli adalah pembangkit berbasis *fuel cell*. Teknologi *fuel cell* (sel bahan bakar) dewasa ini masih terus berkembang pesat dan disempurnakan. *Fuel cell* bekerja berdasarkan prinsip pembakaran listrik-kimiawi yang mana akan memproduksi energi listrik arus searah, terdiri dari elektrolit yang memisahkan katoda dari anoda yang bertugas menghantar ion. *Fuel cell* seringkali dianggap sangat menarik dalam aplikasi modern karena efisiensi tinggi dan penggunaan bebas emisi, berlawanan dengan bahan bakar umum seperti methane atau gas

alam yang menghasilkan karbon dioksida. Satu-satunya hasil produk dari bahan bakar yang beroperasi menggunakan hidrogen murni adalah uap air.

Secara umum, *fuel cell* memiliki beberapa keunggulan, seperti memiliki efisiensi yang tinggi yang dapat digunakan pada berbagai skala pembangkit energi, jika hidrogen digunakan sebagai bahan bakar maka polusi emisi dapat dikurangi, tidak membutuhkan alat - alat penggerak, seperti pompa, kompressor, dan blower. Selain itu *fuel cell* dapat berasal dari berbagai jenis material elektrolit yang digunakan sebagai penghantar proton, serta memiliki kecepatan yang hampir sama dengan baterai dalam memberikan listrik (Mench, 2008). Adapun jenis *fuel cell* yang ada pada saat ini yaitu: *Alkaline Fuel cells* (AFC); *proton electrolyt membrane* (PEM); *Phosphoric Acid Fuel cells* (PAFC); *Molten carbonate Fuel cells* (MCFC); *Solid oxide Fuel cells* (SOFC); *Direct methanol Fuel cells* (DMFC) dan *Microbial Fuel cells* (MFC). Semua jenis *fuel cell* ini ditentukan berdasarkan material elektrolit yang digunakan sebagai penghantar protonnya (Suhada, 2001).

Microbial Fuel Cell (MFC) adalah teknologi yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan reaksi katalitik mikroorganisme (Allen dan Bennetto, 1993; Kim dkk, 1999b; Stirling dkk, 1983; Rawson dan Willmer 1989; Suzuki dkk, 1978;.. Wingard dkk, 1982). *Microbial Fuel Cell* menggunakan bakteri sebagai katalis untuk mengoksidasi bahan organik dan anorganik serta menghasilkan arus listrik. Elektron yang dihasilkan oleh bakteri dari substrat pada anoda (terminal negatif) dan mengalir ke katoda (terminal positif) yang dihubungkan dengan bahan bersifat konduktif. Dengan konvensi, arus positif mengalir dari katoda ke anoda, berlawanan dengan arah aliran elektron. Elektron dapat ditransfer ke anoda oleh mediator elektron dengan membran langsung yang berhubungan dengan transfer elektron atau dengan kawat sangat tipis yang diproduksi oleh bakteri, atau mungkin dengan materi lain yang belum ditemukan. Mediator kimia, seperti Neutral Red (NR) atau

anthraquinone-2,6-disulfonate (AQDS), dapat ditambahkan ke dalam sistem untuk membantu produksi listrik. Apabila tidak ada mediator yang ditambahkan ke dalam sistem, maka MFC ini diklasifikasikan sebagai “*mediator-less*” atau tanpa mediator meskipun mekanisme transfer elektronnya tidak diketahui. Pada umumnya, elektron yang diperoleh dari katoda dikombinasikan dengan proton yang berdifusi dari anoda melewati pemisah dan oksigen diperoleh dari udara, yang menghasilkan air. Pengoksidasi kimia, seperti *ferricyanid* atau Mn(IV), dapat juga digunakan meskipun memang harus di regenerasi. (Logan dkk, 2006).

MFC terus menerus akan di teliti dengan meningkatkan kinerja dan efisiensinya terhadap teknologi. Pembangkit listrik dipengaruhi oleh beberapa parameter yang saling terkait seperti konfigurasi reaktor (*single chamber*, *two-chambered*, *tubular*, atau *stacked*), ukuran elektroda, karakteristik proton exchange membrane (PEM), substrat, kehadiran mediator, daya tahan elektrolit, kinetika reaksi oksigen pada bagian katoda, dan tipe bakteri yang digunakan. Untuk membuat MFC yang efisien, maka parameter tersebut harus dioptimalkan. (Miroliac dkk, 2015).

I.2 RUMUSAN MASALAH

1. Bagaimana memanfaatkan limbah bahan organik pabrik gula (tetes) yang belum termanfaatkan secara optimal yang mempunyai potensi sebagai bahan baku untuk menghasilkan listrik.

2. Bagaimana mendapatkan atau memenuhi kebutuhan energi dengan melalui pembuatan energi alternatif secara *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

I.3 TUJUAN PENELITIAN

1. Mempelajari pembuatan energi listrik dengan metode *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

2. Mencari konsentrasi mikroba *Escherichia coli* dan *Shewanella oneidensis* serta campurannya yang tepat dalam

menghasilkan listrik dengan menggunakan metode *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

3. Mempelajari persen penurunan kandungan limbah *Ferricyanid* pada sisi katoda dalam metode *Micobial Fuel Cell (MFC)* dengan menggunakan mikroba *Escherichia coli* dan *Shewanella oneidensis* serta campurannya pada sisi anoda.

I.4 MANFAAT PENELITIAN

1. Untuk mengetahui cara memanfaatkan limbah bahan organik pabrik gula (tetes) secara optimal dimana mempunyai potensi sebagai bahan baku untuk menghasilkan listrik.

2. Untuk mengetahui konsentrasi mikroba *Escherichia coli* dan *Shewanella oneidensis* serta campurannya yang tepat dalam pembentukan listrik dengan menggunakan metode *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

3. Untuk mengetahui konsentrasi penurunan limbah *Ferricyanid* pada sisi katoda dalam metode *Microbial Fuel Cell (MFC)* dengan menggunakan mikroba *Escherichia coli* dan *Shewanella oneidensis* serta campurannya pada sisi anoda.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Fuel Cell

Fuel cell merupakan suatu teknologi yang akan merubah masa depan dalam pengolahan bahan bakar tertentu menjadi suatu energi yang diperlukan untuk menggerakkan bermacam-macam peralatan. *Fuel cell* merupakan teknologi elektrokimia yang secara kontinyu mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik selama terdapat bahan bakar dan pengoksidan (Shukla dkk. 2004). *Fuel cell* tersusun atas anoda, katoda dan elektrolit. Anoda berperan sebagai tempat terjadinya pemecahan hidrogen (H_2) menjadi proton dan elektron (listrik). Katoda berperan sebagai tempat terjadinya reaksi penggabungan proton, elektron dan oksigen untuk membentuk air. Elektrolit adalah media untuk mengalirkan proton.

1. Sejarah Perkembangan Fuel Cell

Fuel cell telah didemonstrasikan oleh *Sir William Robert Grove*, seorang ahli hukum merangkap sebagai ahli fisika amatir, pada tahun 1839, dengan melakukan pembalikan elektrolisa air, elektrode yang digunakan adalah platina. Pada tahun 1889, *Charles Langer* dan *Ludwig Mond* pertama kali menggunakan istilah *fuel cell*, pada saat mencoba membuat mesin generator dengan menggunakan udara dan gas arang. Pada tahun 1932 *Francis Bacon* berhasil mengembangkan *fuel cell*. Untuk menerapkan *fuel cell* dalam penggunaan praktis baru dapat dilakukan 27 tahun kemudian, yaitu sebagai penghasil tenaga listrik untuk alat las dengan kapasitas 5 kW. Mulai tahun 1950 pihak NASA di Amerika Serikat telah melakukan pemanfaatan untuk program angkasa luar mereka yaitu untuk pesawat roket Appolo dan Gemini. Selama lebih dari 30 tahun, *US Department of Technology* telah melakukan banyak penelitian dan pengembangan dan pada tahun 1987 mereka mulai menerapkannya pada kendaraan (Hendrata, 2001).

2. Prinsip Dasar *Fuel Cell*

Fuel cell bekerja berdasar prinsip pembakaran listrik-kimiawi, *cell* ini akan memproduksi energi listrik arus searah. *Fuel cell* ini terdiri dari elektrolit yang memisahkan katoda dari anoda, elektrolit hanya dapat menghantar ion saja, sedangkan elektron tidak dapat melewati elektrolit, jadi elektrolit ini bukan penghantar listrik dan juga menghindarkan terjadinya reaksi kimia. Pada anoda akan dialirkan secara berkesinambungan bahan bakar dan pada katode dialirkan oksigen, pengaliran ini dilakukan secara terpisah. Karena pengaruh katalisator pada elektroda, maka molekul-molekul dari gas yang dialirkan akan berubah menjadi ion. Reaksi pada anoda menghasilkan elektron yang bebas, sedang pada katoda elektron yang bebas akan diikat.

Elektron-elektron bebas yang terjadi harus dialirkan keluar melalui penghantar menuju ke katoda, agar proses listrik-kimiawi dapat berlangsung. Reaksi kimia pada *fuel cell*.



Pada anoda hidrogen di oksidasi menjadi proton:



Setiap molekul H_2 terpecah menjadi dua atom H^+ (proton), sedang setiap atom hidrogen melepaskan elektronnya. Proton ini akan bergerak menuju katoda melewati membran. Elektron yang terbentuk akan menghasilkan arus listrik kalau dihubungkan dengan penghantar listrik menuju katoda. Pada katoda oksigen dirubah



Molekul oksigen akan bergabung dengan empat elektron, menjadi ion oksigen yang bermuatan negatif untuk

selanjutnya bergabung lagi dengan proton yang mengalir dari anoda. Setiap ion oksigen akan melepaskan kedua muatan negatifnya dan bergabung dengan dua proton, sehingga terjadi oksidasi menjadi air.

3. 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* (DMFC)
- g. *Regenerative fuel cells*
- h. *Microbial fuel cell*

Tabel 2.1 Jenis - jenis Fuel Cell

Jenis	Elektrolit	Suhu Operasi (°C)	Karakteristik	Penggunaan
Alkaline (AFC)	KOH	60 – 120	Efisiensi energi tinggi memiliki kepekaan terhadap CO ₂	Pesawat ruang angkasa, kendaraan
Polymer Ex-change Membrane (PEM)	Polymer elektrolit (H ⁺)	60 – 100	Kerapatan energi tinggi memiliki kepekaan terhadap CO (<100ppm)	Kendaraan (sedan, bis, minivan), stasiun pembangkit panas

Phosphoric acid Fuel Cell (PAFC)	Phosphor Acid (H^+)	160 – 200	Efisiensi energi terbatas, peka terhadap CO (<1,5% Vol)	Stasiun pembangkit panas, kendaraan
Molten Carbonate	Molten carbonate (CO_3^{2-})	500 – 650	Problem korosi	Stasiun pembangkit energi panas, pembangkit energi listrik
Solid Oxyde (SOFC)	Lapisan Keramik (O_2)	800 – 1000	Efisiensi sistem tinggi, temperatur operasi perlu diturunkan	Pembangkit energi panas, penggabung stasiun pembangkit dengan turbin gas
Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)	Elektrolit Polymer (H^+)	60 – 120	Efisiensi sistem tinggi peka terhadap. Hasil oksidasi di anoda	Kendaraan

Sumber : Hendrata Suhada (2001)

Dari tabel 2.1 dapat dilihat jenis dari pada elektrolit untuk masing-masing *fuel cell* dan operasi temperatur, karakteristik dan penggunaannya. *Fuel cell* mempunyai efisiensi yang cukup tinggi, dari 40% sampai 70%, tergantung dari jenis *fuel cell*, yang paling tinggi adalah *alkaline (AFC)*, *solid oxyde (SOFC)*, *direct methanol fuel cell (DMFC)* dan *regenerative fuel cell*.

Fuel cell mempunyai kepekaan terhadap zat- zat tertentu seperti CO_2 , CO, korosi dan produk oksidasi. Penggunaan dari pada *fuel cell* ini terutama untuk menghasilkan energi yang dipakai pada program angkasa luar, power station penghasil listrik atau energi panas dan untuk kendaraan.

Alkaline fuel cells (AFC) menggunakan *alkaline potassium hydroxyde* sebagai elektrolit, dapat menghasilkan efisiensi sampai 70%. Banyak digunakan oleh NASA untuk misi ulang-alik angkasa luar. Biayanya sangat mahal, sehingga tidak dipakai untuk komersial.

Proton exchange membrane (PEM) memiliki membran yang terbuat dari plastik tipis yang pada kedua sisinya dilapisi dengan platina. Jenis ini sangat sesuai untuk kendaraan, karena mampu beroperasi pada temperatur yang rendah. Harganya relatif murah, sehingga dapat digunakan untuk alat listrik, kamera video dan telepon selular.

Fuel cell PEM memiliki kepadatan energi yang tinggi (*high energy density*). *Proton exchange membrane fuel cells* dari beberapa produsen.

Phosphoric acid fuel cells (PAFC) sudah banyak digunakan untuk penghasil listrik di rumah sakit, hotel, perkantoran, sekolah dan stasiun penghasil listrik.

Molten carbonate (MCFC) beroperasi pada temperatur yang tinggi sehingga hanya dapat digunakan untuk keperluan industri. Jenis ini dapat dipakai untuk menghasilkan energi yang besar, energi sebesar 10 kW dan 2 MW telah diuji coba di Jepang dan Itali.

Solid oxide (SOFC) ini menggunakan material dari keramik keras, memnung-kinkan untuk operasi temperatur tinggi, banyak dicoba untuk keperluan stasiun pembangkit tenaga listrik. Cell ini berbentuk tabung. Jepang telah mencoba dengan tenaga yang dihasilkan sebesar 25 kW dan di Eropa sudah dicoba sebesar 100 kW, percobaan sebesar 220 kW sedang dilakukan.

Direct methanol fuel cell (DMFC) mirip dengan *proton exchange elektrolit* (PEM), yaitu sama-sama menggunakan plastik polymer sebagai membran. Pada DMFC hidrogen diambil secara langsung oleh katalisator anoda dari methanol cair, sehingga tidak diperlukan sebuah *reformer* bahan bakar.

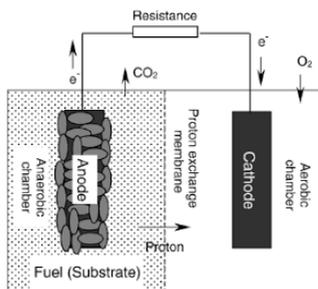
Regenerative fuel cell merupakan jenis yang terbaru. Dengan menggunakan elektrolisa tenaga solar cell, maka bahan-

bahan yang diperluDZkan oleh *fuel cell* diambil dari air dengan cara mengubahnya menjadi hidrogen dan oksigen, yang selanjutnya dapat menghasilkan tenaga listrik, panas dan air. Air ini didaur ulang dengan proses yang sama (Hendrata Suhada, 2001).

Microbial fuel cell merupakan salah satu dari fuel cell berbasis biologi. Penggunaan mikroba dalam fuel cell ini menggantikan fungsi dari enzim, sehingga dihasilkan substrat yang lebih murah (Shukla dkk. 2004). Prinsip kerja MFC mirip dengan hidrogen fuel cell, yaitu terdaptkkiran proton dari ruang anoda menuju ruang katoda melalui membran elektrolit dan aliran elektron yang bergerak ke arah yang sama melalui kabel konduksi (Hoogers 2002).

II.1 *Microbial Fuell Cell*

Microbial fuel cell (MFC) merupakan salah satu cara untuk memproduksi energi secara berkesinambungan dalam bentuk listrik dari bahan-bahan yang dapat didegradasi. *Microbial fuel cell* adalah alat untuk mengonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan reaksi katalitik dari mikroorganisme (Allan dan Benneto 1993). *Microbial fuel cell* membangkitkan listrik dengan mengoksidasi bahan organik secara anaerob melalui bantuan bakteri. Aktivitas katalitik dan transfer proton dilakukan dengan menggunakan enzim atau tambahan mediator. Skema MFC seperti pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Skema cara kerja *microbial fuel cell*

Menurut Lovley (2006), *microbial fuel cell* memiliki beberapa kelebihan yaitu dapat menghasilkan listrik dari sampah organik dan biomassa terbaru. Bakteri mampu menjadi katalis dan beradaptasi dengan baik terhadap bahan organik berbeda yang terdapat pada limbah lingkungan sehingga menghasilkan elektron.

Berbagai bentuk bahan organik dapat digunakan sebagai substrat dalam *microbial fuel cell* seperti glukosa, pati, asam lemak, asam amino dan protein, serta air limbah dari manusia dan hewan (Idham, 2009). Percobaan *microbial fuel cell* pada berbagai jenis substrat dapat dilihat pada Tabel 2.2. Bahan anorganik dapat juga digunakan sebagai substrat dalam *microbial fuel cell* seperti busa nikel (Karthikeyan, 2016).

Tabel 2.2 Penggunaan Berbagai Jenis Substrat dan Mikroorganisme pada *microbial fuel cell*

Jenis Substrat	Mikroorganisme	Referensi
Galaktosa, maltosa, sukrosa, 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>Shwanella 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)

Sumber : Idham (2009)

Efisiensi dan kinerja dari *microbial fuel cell* dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor. Menurut (Rozendal dkk., 2006), dalam *microbial fuel cell* dual chamber pertumbuhan optimal bakteri membutuhkan pH netral. Menurut Liu dkk (2004), faktor-faktor yang berpengaruh antara lain kecepatan degradasi substrat,

kecepatan transfer elektron bakteri ke katoda, dan transfer proton dalam larutan. Menurut Lovley (2003), kinerja *microbial fuel cell* dipengaruhi oleh aktivitas mikroba dan substrat yang digunakan.

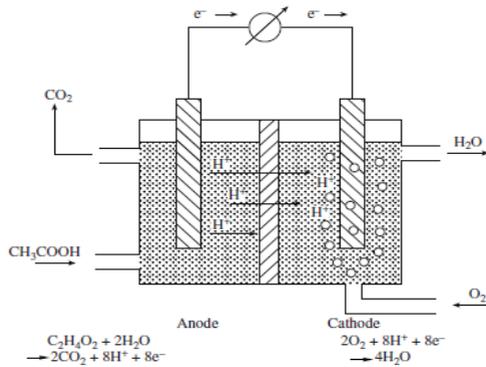
II.2.1 Prinsip Kerja *Microbial Fuel Cell*

Prinsip kerja *microbial fuel cell* adalah memanfaatkan mikroba yang melakukan metabolisme terhadap medium di anoda untuk mengkatalis pengubah materi organik menjadi energi listrik dengan mentransfer elektron dari anoda melalui kabel dan menghasilkan arus ke katoda. Transfer elektron dari anoda diterima oleh ion kompleks di katoda yang memiliki elektron bebas.

Dalam *microbial fuel cell*, zat hasil metabolisme mikroba atau elektron yang dilepaskan mikroba saat melakukan metabolisme dapat digunakan sebagai donor elektron. Zat hasil metabolisme mikroba umumnya merupakan senyawa yang mengandung hidrogen, seperti etanol, metanol atau gas metana. Senyawa ini dapat digunakan sebagai sumber hidrogen melalui serangkaian proses untuk memproduksi elektron dan menghasilkan arus listrik. Setiap aktivitas metabolisme yang dilakukan mikroba umumnya melibatkan pelepasan elektron bebas ke medium. Elektron ini dapat dimanfaatkan pada katoda dalam *microbial fuel cell* untuk menghasilkan arus listrik.

II.2.2 Kompartemen Anoda

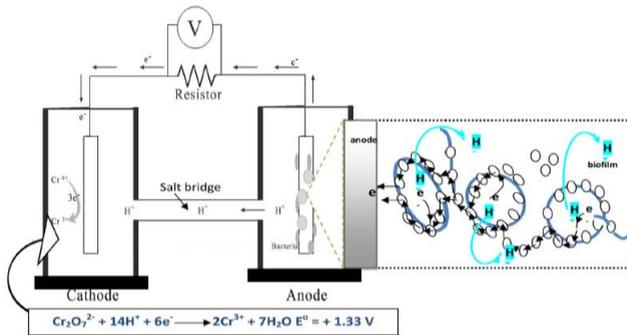
Kompartemen anoda berisikan bakteri dan material organik. Material organik yang dapat digunakan adalah glukosa, asetat, pati dan lainnya. Berdasarkan Rabaey (2003), penggunaan glukosa sebagai sumber karbon dapat meningkatkan elektrisitas hingga 89%. Selanjutnya glukosa akan terurai secara enzimatik untuk menghasilkan dua molekul piruvat yang memiliki tiga atom karbon. Proses ini dikenal sebagai glikolisis (Zahara, 2011). Menurut Lovley (2008), asam asetat dan asam sederhana lainnya merupakan sumber elektron utama untuk menghasilkan arus. Arus listrik yang dihasilkan dari reaksi asam asetat yang terdegradasi. Proses reaksi oksidasi yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Substrat organik (asam asetat) yang teroksidasi dalam ruang anoda (anaerob); proton dan elektron yang dihasilkan

II.2.3 Kompartemen Katoda

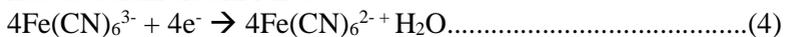
Kompartemen katoda berisi cairan limbah industri. Katoda adalah elektroda dimana akseptor elektron sedang menjalani reaksi reduksi. Jika potensial listrik yang tersedia di permukaan elektroda katoda melebihi ambang zat teroksidasi, mereka dapat dikurangi (Nancharaiah dkk., 2015). Pada ruang katoda dari *microbial fuel cell* terjadi reaksi reduksi, oleh karenanya banyak diaplikasikan pada pengolahan air limbah. Banyak penelitian yang mengacu dari reaksi tersebut seperti mereduksi zat organik (klorobenzen dan trikloroetilen) dan logam berat (Cr^{6+} , Mn^{4+} dan Fe^{3+}). Proses reaksi reduksi logam Cr^{6+} dapat dilihat di Gambar 2.3



Gambar 2.3 Reaksi dari reduksi kromium pada reaktor *microbial fuel cell*

Selain untuk mereduksi kromium pada katoda, dalam microbial fuel cell ini juga dapat mereduksi ferrisianida. Pada kompartemen katoda, terdapat larutan elektrolit yang bersifat konduktif. Kalium ferrisianida ($K_3Fe(CN)_6$) dikenal sangat baik sebagai akseptor elektron dalam sistem MFC. $K_3Fe(CN)_6$ merupakan spesies elektroaktif yang mampu menangkap elektron dengan baik dengan harga potensial reduksi standar sebesar +0,36 V. Keuntungan terbesar dalam penggunaan kalium ferrisianida adalah dihasilkannya overpotensial yang rendah bila menggunakan elektroda karbon. Akan tetapi kerugian terbesar adalah terjadinya proses reoksidasi yang tidak sempurna oleh oksigen sehingga larutannya harus diganti secara teratur. Kinerja jangka panjang ferrisianida dalam sistem MFC sangat dipengaruhi oleh efisiensi difusinya melewati PEM (*Proton Exchange Membrane*) menuju ruang katoda (Logan dkk., 2006).

Pada katoda terjadi reaksi reduksi, dimana Fe^{3+} akan berubah menjadi Fe^{2+} dengan bantuan elektron yang datang dari anoda bereaksi dengan H^+ yang datang dari anoda dengan cara melewati *Proton Exchange Membrane*, dan membentuk molekul air. Berikut merupakan reaksi yang terjadi pada kompartemen katoda dalam sistem MFC :



II.3.4 Elektroda

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

Dari ketiga bentuk karbon lempengan atau batang grafit banyak dipakai karena relatif murah, sederhana dan memiliki luas permukaan tertentu. Area permukaan yang lebih luas diberikan oleh elektroda lelehan grafit. Tetapi tidak semua area permukaan yang terindikasi dapat digunakan oleh bakteri. Elektroda batang grafit dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2. 4 Elektroda Batang Grafit

Sumber : Sidharta (2007)

Karbon aktif adalah karbon dengan struktur *amorphous* atau monokristalin yang telah diperlakukan khusus sehingga memiliki luas permukaan yang besar (300 – 2000 m²/gram). Karakteristik karbon yang ideal adalah pada rentang pH 5 – 6, titik leleh 3800°C, dan ukuran partikel kurang dari 50 µm. Resin perekat berguna untuk merekatkan karbon aktif sehingga memiliki struktur

yang kuat dan tidak rapuh selama mikrobial *fuel cell* dioperasikan. Sebelum digunakan, elektroda harus dibersihkan dan diaktifkan terlebih dahulu. Elektroda direndam dalam larutan HCl 1 molar dan NaOH 1 molar masing-masing selama 1 hari. Tujuannya adalah untuk menghilangkan kontaminasi logam dan bahan organik. Kemudian elektroda disimpan dalam *aquadest* hingga saat akan digunakan.

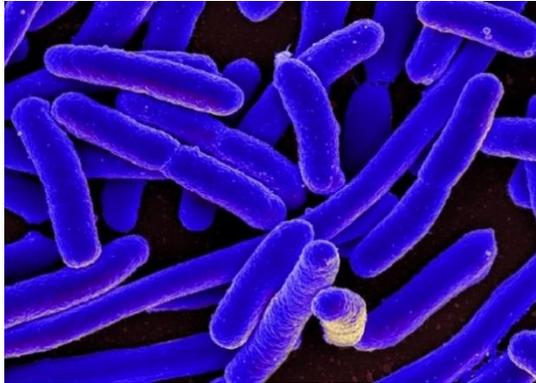
II.3 *Escherichia coli*

Escherichia coli merupakan bakteri yang dapat bersifat patogen, bertindak sebagai penyebab utama morbiditas dan mortalitas diseluruh dunia. Berdasarkan taksonominya *E.coli* diklasifikasikan sebagai berikut :

Kingdom	: <i>Bacteria</i>
Divisio	: <i>Proteobacteria</i>
Kelas	: <i>Gamma Proteobacteria</i>
Ordo	: <i>Enterobacteriales</i>
Famili	: <i>Enterobacteriaceae</i>
Genus	: <i>Escherichia coli</i> .

(Todar, 2008)

Escherichia coli diisolasi pertama kali oleh Theodore Escherich pada tahun 1885 dari tinja seorang bayi. *E. coli* merupakan bakteri Gram negatif berbentuk batang pendek yang memiliki panjang sekitar 2 μm , diameter 0,7 μm , lebar 0,4-0,7 μm dan bersifat anaerob fakultatif. *E. coli* membentuk koloni yang bundar, cembung, dan halus dengan tepi yang nyata. Pada umumnya bakteri memerlukan kelembaban yang cukup tinggi sekitar 85% (Madigan dan Martinko, 2005). Profil *E.coli* dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.5. Bakteri *Escherichia coli*

Escherichia coli merupakan golongan bakteri mesofilik yaitu bakteri yang suhu pertumbuhan optimumnya 15-45°C dan dapat hidup pada pH 5,5-8. *E. coli* akan tumbuh secara optimal pada suhu 27° C. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Hawa dkk. (2011), *E. coli* memiliki suhu maksimum pertumbuhan 40-45°C, di atas suhu tersebut bakteri akan mengalami inaktivasi.

II.4 *Shewanella oneidensis*

Shewanella pertama kali diisolasi pada tahun 1931 sebagai salah satu dari beberapa mencemari mikroorganisme yang bertanggung jawab untuk pembusukan mentega. Anggota dari genus *Shewanella* menyusun bermacam-macam grup dari bakteri anaerob yang secara luas terdistribusi di laut dan lingkungan air tawar. Karakter khusus dari *Shewanellae* adalah kemampuannya dalam menangkap elektron dalam kondisi kekurangan oksigen dan kemampuannya dalam bertahan hidup di berbagai macam habitat. Mereka telah diisolasi dari konsentrasi garam, suhu dan tekanan barometrik. (Gralnick dkk, 2007)

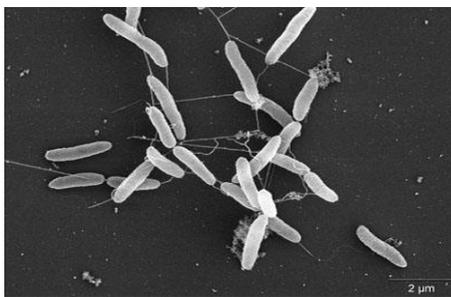
Genus *Shewanella* merupakan proteobacteria gram-negatif yang berbentuk batang dengan panjang 2 – 3 µm dan memiliki diameter 0,4 – 0,7 µm bakteri ini (Gambar 2.6) merupakan bakteri anaerob fakultatif yang biasa di temukan dalm sedimen laut dan

dapat berenang dengan bantuan *single polar flagellum* . (Venkateswaran dkk, 1999). *Shewanella oneidensis* mampu hidup sampai dengan suhu 35°C tetapi memiliki kemampuan untuk tumbuh pada kisaran suhu yang luas, termasuk suhu mendekati nol. (Abboud dkk, 2005). Tetapi temperatur optimum mereka adalah diatas 16°C. (Gralnick dkk, 2007).

Berdasarkan taksonominya *Shewanella oneidensis* diklasifikasikan sebagai berikut :

Kingdom	: <i>Bacteria</i>
Divisio	: <i>Proteobacteria</i>
Kelas	: <i>Gamma Proteobacteria</i>
Ordo	: <i>Alteromonadales</i>
Famili	: <i>Shewanellaceae</i>
Genus	: <i>Shewanella</i>
Nama Binomial	: <i>Shewanella oneidensis</i>

(MacDonell dan Colwell., 1985)



Gambar 2.6. Bakteri *Shewanella oneidensis*

Ciri khas dari bakteri ini yaitu *psychrotolerance* , *halophilicity* rendah dan memiliki kemampuan untuk mereduksi susunan yang tidak paralel dalam senyawa organik dan anorganik untuk respirasi. Bakteri ini mampu bernafas pada logam (Gralnick dkk., 2007). *Shewanella oneidensis* (secara umum dikenal sebagai *Shewanella putrefaciens*) adalah bakteri anaerob fakultatif yang

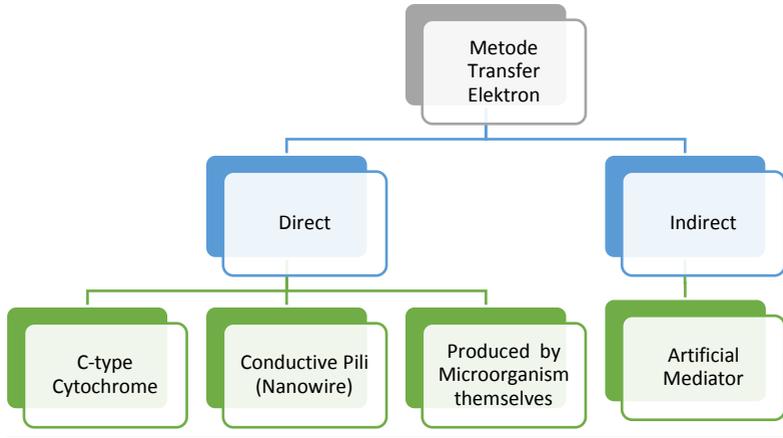
ditemukan dalam bentuk endapan (Perry dkk., 1993; Venkateswaran dkk., 1999; Venter dkk., 2004). *Shewanella* terkenal untuk keragaman terminal penangkap elektron dimana mereka dapat mereduksi dan salah satu keluarga primer dari bakteri yang digunakan dalam MFC (Logan dkk., 2006).

Sejauh ini, *Shewanella* adalah organisme dengan sistem bernafas yang paling beragam. Keragaman pernafasan *Shewanellae* dapat membuat *Shewanella* mampu bernafas di berbagai tempat. Pada lingkungan *anoxic*, *Shewanella* cenderung bernafas dalam satu senyawa namun juga mampu dalam beberapa senyawa. (Gralnick dkk., 2007)

Kapasitasnya dapat bertahan dalam temperatur rendah memberikan organisme ini keuntungan di lingkungan dingin secara permanen seperti pada lautan dan daerah kutub. Kemampuan ini juga berguna di lingkungan dengan fluktuasi temperatur yang besar. Misal, temperatur *Oneida Lake* turun secara dramatis saat musim dingin, dengan danau yang membeku total selama beberapa bulan. (Gralnick dkk., 2007)

Shewanella juga memiliki beberapa aplikasi dalam bidang Bioteknologi, yaitu sebagai akseptor elektron yang dapat berguna dalam *Microbial Fuel Cell* (MFC) dan Bioremediasi dari Radionuklida dan limbah dasar *toxic*. (Gralnick dkk., 2007)

Prinsip dasar dari MFC adalah ekstraksi dan transfer elektron dari mikroba ke elektroda pada anoda. Namun, untuk membentuk arus listrik, anoda harus disambungkan dengan katoda menggunakan sirkuit elektrik eksternal. Mikroba memetabolisme substrat organik secara anaerobik. Elektron yang dihasilkan ditransfer ke elektroda pada anoda dengan beberapa cara yaitu c-type cytochrom yang terletak pada membran terluar pada sel bakteri. Metode ini terjadi pada bakteri *Shewanella*. Cara yang lain adalah dengan *conductive pili* atau biasa disebut *nanowire* dan yang terakhir adalah dengan bantuan mediator oleh mikroorganisme itu sendiri. (Miroliaei dkk, 2015)

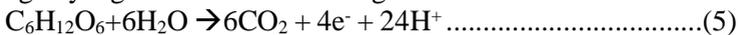


Gambar 2.7 Klasifikasi mekanisme transfer elektron pada bakteri ke elektroda

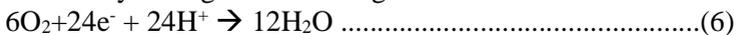
(Miroliaei dkk, 2015)

Shewanella merupakan bakteri fakultatif anaerob yang menggunakan lebih dari 14 terminal elektron aseptor untuk respirasi seperti oksigen, fumarat, logam seperti Cr, Fe, Mn, technetium dan uranium dalam bentuk larutan maupun padatan. Reduksi anaerobik dari elektron aseptor yang susah larut seperti Fe (III) dan Mn (IV) oksida terjadi secara ekstrasel melalui mulyi-heme c cytochrome yang terletak pada membran luar. (Bouheni dkk., 2009)

E.coli dan *Shewanella* sp. adalah bakteri yang memiliki mekanisme berbeda dalam mentransfer elektron ke elektroda. Keduanya dapat dengan mudah menyumbangkan elektron secara langsung. Pada kondisi ideal, oksidasi satu mol glukosa sebagai biofuel pada kondisi anaerobik, terdapat 24 mol elektron dan ion hidrogen yang terbentuk sesuai dengan reaksi di bawah ini



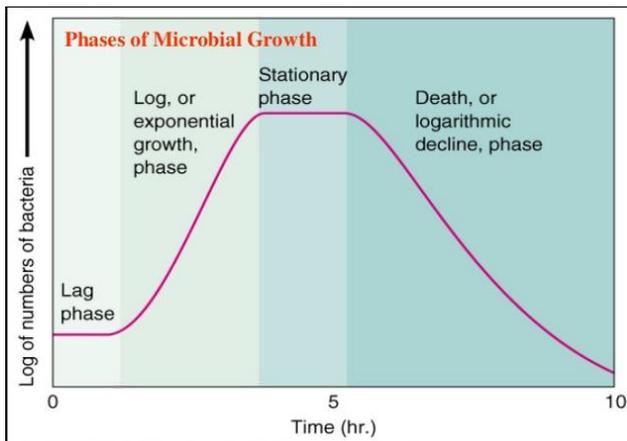
Elektron dan proton yang tertransfer ke bagian katoda berkurang karena hadirnya oksigen sesuai dengan reaksi di bawah ini.



II.5 Pertumbuhan Bakteri

II.5.1 Kurva Pertumbuhan Bakteri.

Pertumbuhan sel bakteri biasanya mengikuti suatu pola pertumbuhan tertentu berupa kurva pertumbuhan



Gambar 2.8. Kurva Pertumbuhan Bakteri

Kurva pertumbuhan bakteri dapat dipisahkan menjadi empat fase utama : fase lag (fase lamban atau *lag phase*), fase pertumbuhan eksponensial (fase pertumbuhan cepat atau *log phase*), fase stationer (fase statis atau stationary phase) dan fase penurunan populasi (*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.
- Fase log / pertumbuhan eksponensial. Pada fase eksponensial atau logaritmik, sel berada dalam keadaan pertumbuhan dimana laju pertumbuhan lebih besar daripada laju kematian.
 - Fase stasioner. Selama fase ini laju pertumbuhan sama dengan laju kematian.
 - Fase penurunan populasi atau fase kematian. Pada saat medium kehabisan nutrisi maka populasi bakteri akan menurun jumlahnya. Pada saat ini jumlah sel yang mati lebih banyak daripada sel yang hidup.

II.5.2 Perhitungan Populasi Bakteri.

Jumlah sel dapat diukur dengan beberapa cara, antara lain dengan perhitungan cawan (*plate counter*), hitungan mikroskopik langsung (*direct microscopic count*) atau secara elektronik dengan bantuan alat yang disebut penghitung *Coulter* (*coulter counter*). Cara lain untuk menentukan jumlah sel ialah dengan menyaring sampel dengan suatu saringan membran. Saringan tersebut kemudian diinkubasikan pada permukaan medium yang sesuai. Jasad-jasad renik yang tertahan pada permukaan saringan menyerap nutrisi dari medium dan menghasilkan koloni-koloni, masing-masing berasal dari satu sel tunggal yang dapat hidup. Pada penelitian ini digunakan metode *counting chamber*. *Counting chamber* disebut juga hemasitometer, merupakan ruang hitung yang berupa kaca obyek tebal yang dipermukaan atasnya diasah suatu daratan yang memiliki ukuran-ukuran tertentu berupa kotak atau petak-petak yang batas-batas garis ukurnya dapat dilihat dengan mikroskop (Dosen-Dosen Teknik Kimia, 2015). Skema *counting chamber* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Hemasitometer (*Counting Chamber*)

II.5.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Bakteri.

Pertumbuhan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi dalam medium dan kondisi fisik. Kondisi pertumbuhan yang seimbang ditandai dengan penambahan komponen sel secara teratur. Faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan bakteri yaitu :

1. Suhu
Suhu mempengaruhi laju pertumbuhan, mempengaruhi

jumlah total pertumbuhan, merubah proses-proses metabolik tertentu serta morfologi (bentuk luar) sel. Berdasarkan suhu inkubasi bakteri, bakteri dikelompokkan ke dalam: Psikrofil (suhu 0°C-30 °C), Mesofil (suhu 25 °C -40 °C), Termofil fakultatif (25 °C -55 °C) dan Termofil obligat (45 °C -75 °C).

2. pH

pH optimum bagi pertumbuhan bakteri adalah antara 6,5-7,5. Beberapa spesies bakteri ada yang mempunyai pH minimum 0,5 dan pH maksimum 9,5. Pergeseran pH dalam suatu medium dapat terjadi karena adanya senyawa-senyawa asam atau basa selama pertumbuhan. Pergeseran ini dapat dicegah dengan menggunakan larutan penyangga yang disebut *Buffer* (kombinasi garam-garam KH_2PO_4 dan K_2HPO_4).

3. Pencahayaan

Bakteri biasa tumbuh dalam gelap. Namun beberapa bakteri juga memerlukan pencahayaan untuk pertumbuhannya seperti bakteri Fotoautotrofik (fotosintesis).

4. Waktu

Pada lingkungan dan suhu yang cocok, bakteri membelah diri setiap 20-30 menit. Dalam 8 jam satu sel bakteri telah berkembang menjadi 17 juta sel dan menjadi satu milyar dalam 10 jam.

5. Oksigen

Berdasarkan kebutuhan oksigen, bakteri dapat digolongkan menjadi bakteri aerob, bakteri anaerob fakultatif, bakteri anaerob, bakteri anaerob aerotoleran dan bakteri mikroaerofilik.

6. Air

Air merupakan bahan yang penting bagi pertumbuhan bakteri. Tetapi bakteri tidak dapat menggunakan air yang mengandung zat-zat terlarut dalam konsentrasi tinggi, seperti gula dan garam.

7. Karbon

Unsur karbon sangat penting bagi pertumbuhan bakteri. Menurut kebutuhannya, maka bakteri dibagi menjadi 2 golongan

yaitu autotrof, dimana memenuhi unsur karbon dari sumber anorganik seperti air, garam anorganik dan karbondioksida (CO₂). Sedangkan, heterotrof memenuhi unsur karbonnya dari sumber organik seperti karbohidrat (glukosa).

8. Nitrogen, sulfur dan fosfor

Nitrogen, sulfur dan fosfor diperlukan untuk menyusun bagian-bagian sel misalnya untuk mensintesis protein diperlukan nitrogen dan sulfur. Untuk mensintesis DNA dan RNA, diperlukan nitrogen dan fosfor.

9. Senyawa logam

Senyawa logam untuk pertumbuhan makhluk hidup diperlukan dalam jumlah sedikit. Di antaranya yang diperlukan untuk kehidupan bakteri adalah Fe, Cu dan Zn.

10. Inhibitor

Inhibitor adalah zat yang menghambat tumbuhnya bakteri seperti logam.

II.6 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian yang dilakukan oleh Mohammad Reza Miroliaei, Abdolreza Samimi, Davod Mohebbi-Kalhari, Mohammad Khoram dengan judul “Kinetics Investigation of Diversity Cultures of E.coli and Shewanella sp. and Their Combined Effect with Mediator on MFC Performance” pada tahun 2014 dihasilkan *power density* untuk E.coli dengan konsentrasi mediator MB 0,025 dihasilkan *power density* sebesar 46,14 mW/m², dengan Shewanella sp. tidak ditambahkan dengan MB menghasilkan 26,91 mW /m², dan untuk campuran kedua bakteri dengan konsentrasi MB 0,01 dihasilkan 24,88 mW/m².

Pada penelitian yang dilakukan oleh S. Venkata Mohan, G. Mohanakrishna, B.Purushotham Reddy, R. Saravanan, P.N. Sarma pada tahun 2007 dengan judul “Bioelectricity Generation from

Chemical Wastewater Treatment in Mediatorless (Anode) Microbial Fuel Cell (MFC) using Selectively Enriched Hydrogen Producing Mixed Culture Under Acidophilic Microenvironment” dengan menggunakan katoda berupa larutan ferisianida dan anoda berupa limbah cair kimia dari proses anaerobik dihasilkan voltase sebesar 271,15 mV dan 304 mV pada hambatan 50 Ω dengan *COD removal* sebesar 35,4% dan 62,9%

Penelitian yang dilakukan oleh Ramya Nair, Renganathan.K, S.Barathi, Venkatraman.K pada tahun 2013 dengan judul “Performance of Salt-Bridge Microbial Fuel Cell at Various Agarose Concentration using Hostel Sewage Waste as Substrate” membandingkan konsentrasi agar pada masing masing variabel. Didapatkan hasil arus listrik (I) dan voltase (V) meningkat sebanding dengan meningkatnya konsentrasi dari 7 % dengan hasil I sebesar 0,79 mA dan V sebesar 0,75 V, sedangkan hasil pada konsentrasi 10 % dihasilkan I sebesar 0,97 mA dan V sebesar 0,95 V. Pada konsentrasi 11 % dan 12 % hasil I dan V menurun.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Pengolahan Limbah Industri, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada bulan Februari 2017 – Mei 2017. Penelitian yang dilaksanakan meliputi : 1) Perancangan reaktor microbial fuel cell, 2) Persiapan bakteri, 3) Persiapan reagen di katoda 4) Proses bio-listrik pada *microbial fuel cell* 5) Analisa pH, konsentrasi $K_3Fe(CN)_6$, COD (*chemical oxygen demand*) dan produksi listrik.

III.1 Variabel Penelitian

1. Kondisi Operasi

- Suhu = 20 – 30°C
- tekanan = 1 atm
- Waktu = 12 hari
- Elektroda = grafit (karbon aktif) diameter 0,5 cm
- pH pada larutan anoda = 7
- Volume reaktor = 800 mL

2. Variabel Percobaan

- Jenis bakteri = *Escherichia coli*, *Shewanella oneidensis*
dan Campuran *Escherichia coli* dan *Shewanella oneidensis*
- Konsentrasi bakteri = 10 %; 12,5%; 15%; 17,5% (v/v)
Dengan populasi bakteri 10^7 sel/ml
Rasio bakteri campuran = *Escherichia coli* :
Shewanella oneidensis = 1:1 ; 1:2 ; 2:1

III.2 Bahan, Alat dan Skema Alat Penelitian

1. Bahan Penelitian

Bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah:

- Aquadest
- Biakan bakteri *Escherichia coli*
- Biakan bakteri *Shewanella oneidensis*
- Larutan $K_3Fe(CN)_6$ 0,1 M

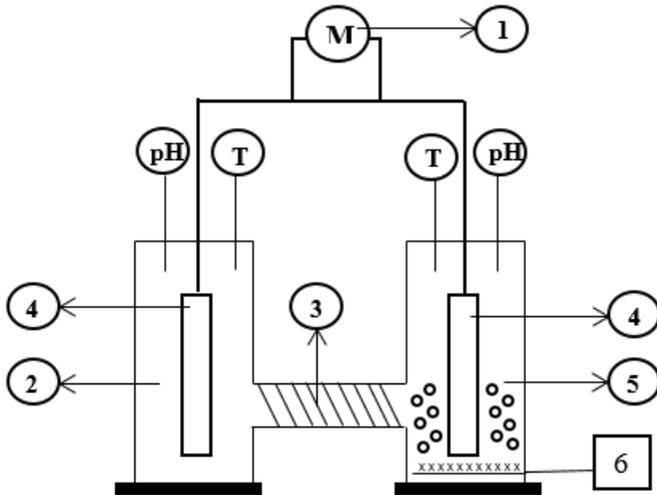
2. Alat Penelitian

Alat yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Counting chamber
- Rak tabung reaksi dan tabung reaksi
- Pipet tetes
- Erlenmeyer
- Gelas Beker
- Gelas Ukur

- Air pump
- Autoclave
- pH meter,
- Pipet Volume
- Thermometer
- Multimeter (voltmeter dan amperimeter)
- Mikroskop

III.3 Skema Alat Penelitian

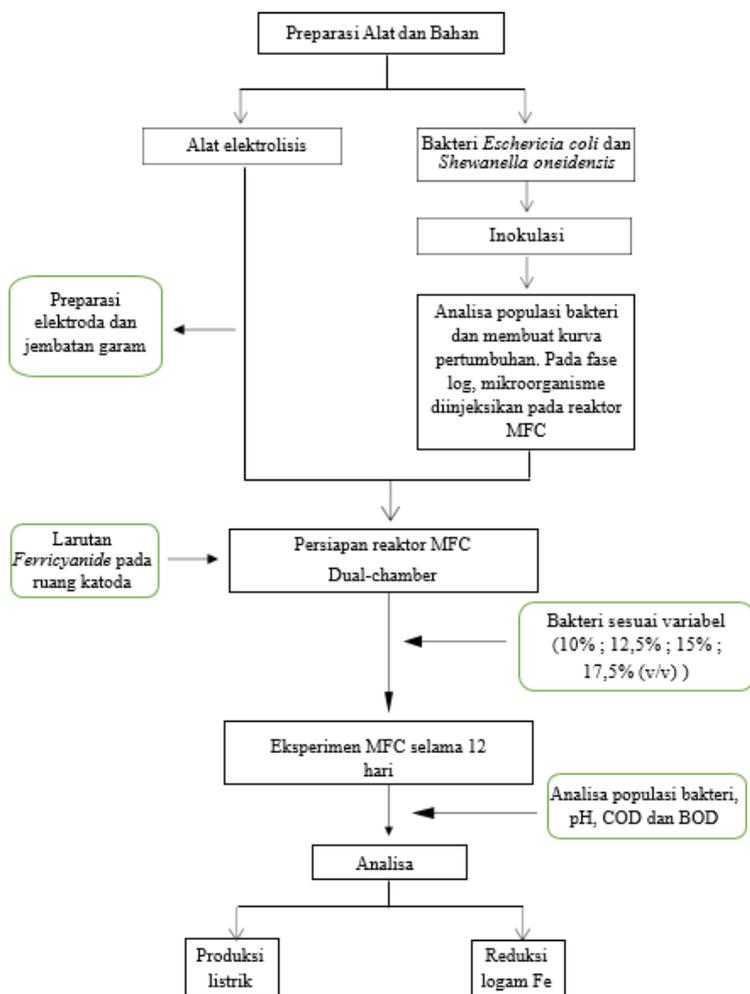


Gambar 3.1 Rangkaian alat *microbial fuel cells*

Keterangan gambar :

1. Multimeter (Voltmeter/Amperemeter)
2. Ruang Anoda (anaerob) (bakteri dan limbah organik)
3. Jembatan garam
4. Elektroda
5. Ruang Katoda (aerob) (larutan *ferricyanide*)
6. Aerator

III.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir *microbial fuel cells*

A. Tahapan Penelitian

1. Persiapan Penelitian

a. Pembuatan larutan $K_3Fe(CN)_6$

Larutan $K_3Fe(CN)_6$ dibuat dengan cara mencampurkan 400 mL larutan kalium ferrisianida 0,1 M dan 400 mL buffer fosfat 0,1 M pH 7,0.

b. Preparasi Elektroda

Elektroda karbon direndam ke dalam larutan HCl 1 M selama 1 hari kemudian dibilas dengan menggunakan aquades. Setelah itu elektroda direndam lagi ke dalam larutan NaOH 1 M selama 1 hari kemudian lagi dengan menggunakan aquades. Elektroda direndam dalam larutan aquades hingga saat akan digunakan (Novitasari, 2011)

c. Preparasi jembatan garam

Larutkan 10 gram agar dalam 100 ml air, kemudian tambahkan 4 gram kalium klorida. Dipanaskan hingga mendidih, setelah itu dinginkan. Kemudian masukan cairan agar tersebut kedalam pipa, tunggu hingga agar padat.

d. Preparasi rasio bakteri campuran

Rasio bakteri campuran dibuat dengan berdasarkan jumlah volume. Jumlah volume bakteri yang digunakan adalah sebesar 100 ml, dengan jumlah bakteri sel/ml sebesar 10^7 . Untuk perbandingan 1:1, maka volume bakteri *Eschericia coli* 50 ml dan volume bakteri *Shewanella oneidensis* 50 ml. Untuk perbandingan 1:2, maka volume bakteri *Eschericia coli* 30 ml dan volume bakteri *Shewanella oneidensis* 70 ml. Sedangkan, untuk perbandingan 2:1, maka volume bakteri *Eschericia coli* 70 ml dan volume bakteri *Shewanella oneidensis* 30 ml.

2. Proses eksperimen

a. Proses eksperimen *microbial fuel cells*

- 1) Ruang katoda dan anoda dipisahkan menggunakan jembatan garam seperti pada gambar 3.1. Jembatan garam yang digunakan terbuat dari 4% KCl dalam 10% agar.
- 2) Ruang katoda diisi dengan larutan $K_3Fe(CN)_6$ dan pada ruang anoda diisi dengan mikroorganisme.
- 3) Kemudian elektroda dipasang di masing-masing ruang dan dihubungkan dengan rangkaian kabel seperti pada gambar 3.1
- 4) Diamati nilai arus listrik dan tegangan yang tertera pada layar digital multimeter hingga stabil dan dicatat.

b. Pengambilan sampel

Pengambilan sample dilakukan per 24 jam kemudian di analisa produksi listrik, pH dan populasi bakterinya.

3. Tahap Analisa Proses

a. Analisa pH

Pengukuran pH menggunakan pH meter

Pengukuran pH dilakukan dengan menggunakan thermometer alkohol yang dimasukkan ke dalam ruang katoda dan anoda.

b. Analisa produksi listrik

Multimeter digital dihubung pada kedua elektroda, dengan kutub positif di katoda dan kutub negatif di ruang anoda. Pembacaan tegangan dan arus listrik dicatat setiap 24 jam. Dari data kuat arus dan tegangan, dapat diperoleh nilai *power density* (mW/m^2), yaitu

daya per satuan luas permukaan elektroda. *Power density* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Momoh et al, 2010)

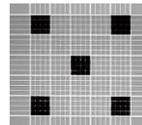
$$\text{Power density (mW/m}^2\text{)} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (Volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}}$$

Dimana I sebagai kuat arus, V sebagai beda potensial dan A adalah luas permukaan elektroda.

c. Analisa Populasi bakteri

Analisa populasi bakteri menggunakan dengan prosedur sebagai berikut:

- 1) Diencerkan 0,1 mL sampel dengan aquades 9,9 mL (pengenceran 10 kali)
- 2) Teteskan ke permukaan *counting chamber* hingga dapat menutupi seluruh permukaannya.
- 3) Letakkan *haemocytometer* dibawah lensa mikroskop untuk dihitung jumlah selnya.
- 4) Dilakukan pengamatan di mikroskop dengan perbesaran 400 kali



Gambar 3.3 Hemasitometer (*Counting Chamber*)

Cara perhitungan populasi bakteri

- Dihitung jumlah sel yang terlihat di masing masing bagian hemasitometer sebanyak 3 kali
- Hitung jumlah sel rata – rata =
$$\frac{\text{Jumlah total sel yang terlihat}}{3}$$

- Hitung jumlah sel per mm^3
 $= \text{jumlah sel rata rata} \times \frac{1}{\frac{1}{25}} \times \frac{1}{0,1}$
- Hitung jumlah sel sebenarnya
 $=$
 $\text{jumlah sel per } \text{mm}^3 \times \text{faktor pengenceran}$

III.5 Rencana Jadwal Kegiatan

Tabel 3.1. Rencana dan Jadwal Kegiatan Penelitian Tahun 2017

No	Kegiatan	Nov	Des	Jan	Feb	Mar	April	Mei	Juni
1	Studi Literatur								
2	Persiapan Bahan dan Rangkai Alat								
3	Penelitian								
4	Analisis Hasil Eksperimen								
5	Pengerjaan Laporan								

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

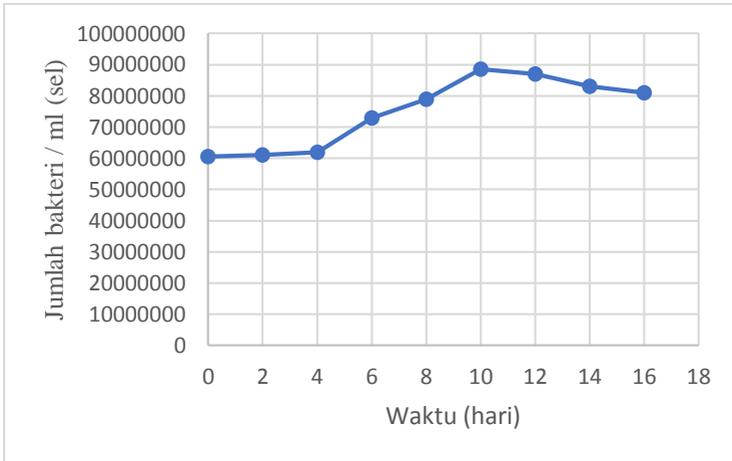
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Microbial fuel cell pada penelitian ini menggunakan reaktor *double chamber* dengan jembatan garam diantara dua chamber. Limbah organik yang digunakan yaitu limbah pabrik gula dengan konsentrasi 5 % pada sisi anoda dan larutan ferrisianida 0,1 M ditambah bufferphospat untuk menjaga pH pada sisi katoda. Aerasi dilakukan pada sisi katoda dengan menggunakan *air pump*. Pada sisi anoda reaktor dikondisikan anaerobik dan pada kedua chamber diberi 3 batang grafit sebagai elektroda yang tersambung dengan kabel untuk mengukur tegangan yang dihasilkan. Reaktor berjalan selama 12 hari. Bakteri yang digunakan yaitu *Eschericia coli*, *Shewanella oneidensis* dan campuran kedua bakteri yang di masukkan ke dalam reaktor pada fase log. Jumlah sel dikondisikan pada 10^7 sel/ml.

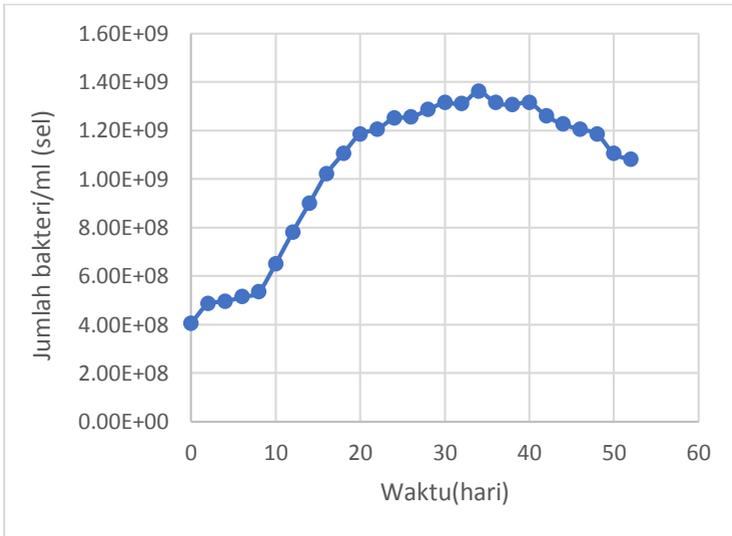
Beberapa parameter yaitu tegangan listrik, COD, BOD, reduksi Fe^{3+} dan jumlah bakteri diukur sebagai parameter utama. Tegangan dan jumlah bakteri dihitung setiap hari sedangkan COD, BOD, dan Fe^{3+} dihitung setiap dua hari sekali. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil sebagai berikut

IV.1 Persiapan Bakteri

Bakteri merupakan salah satu faktor utama pada proses *microbial fuel cell* (MFC). Pada proses ini, bakteri dimasukan ke dalam reaktor ketika mencapai fase log pada pertumbuhannya. Pembuatan kurva pertumbuhan bakteri dilakukan hingga jumlah bakteri sudah menunjukkan penurunan. Perhitungan jumlah bakteri dilakukan selama dua jam sekali dengan menggunakan metode *counting chamber*. Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 menunjukkan kurva pertumbuhan untuk bakteri *Eschericia coli* dan *Shewanella oneidensis*.



Gambar 4. 1 Kurva pertumbuhan bakteri *Escherichia coli*



Gambar 4. 2 Kurva pertumbuhan bakteri *Shewanella oneidensis*

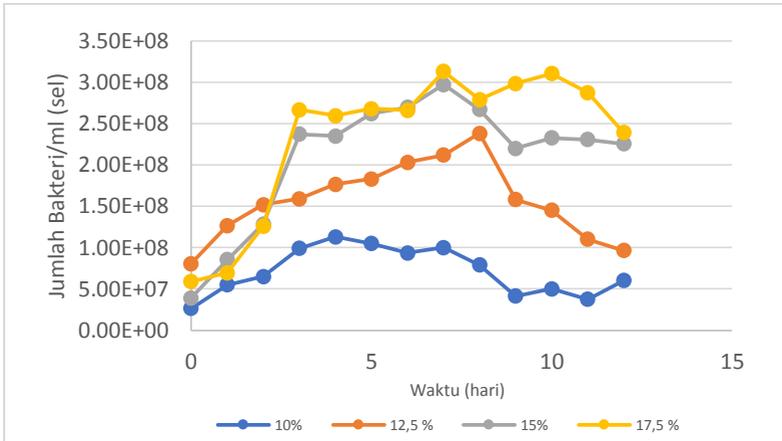
Dari gambar 4.1 terlihat bahwa fase log untuk bakteri *Escherichia coli* terjadi pada jam ke 4 hingga jam ke 10. Pada jam

ke 10 hingga jam ke 12 , pertumbuhan bakteri mencapai pada fase stasioner, kemudian pada perhitungan jumlah bakteri pada jam ke 14 dan seterusnya menunjukkan jumlah bakteri menurun yang menandakan bahwa bakteri sudah berada pada fase kematian. Sehingga untuk bakteri *Eschericia coli* dimasukkan ke dalam reaktor setelah 4 jam inkubasi.

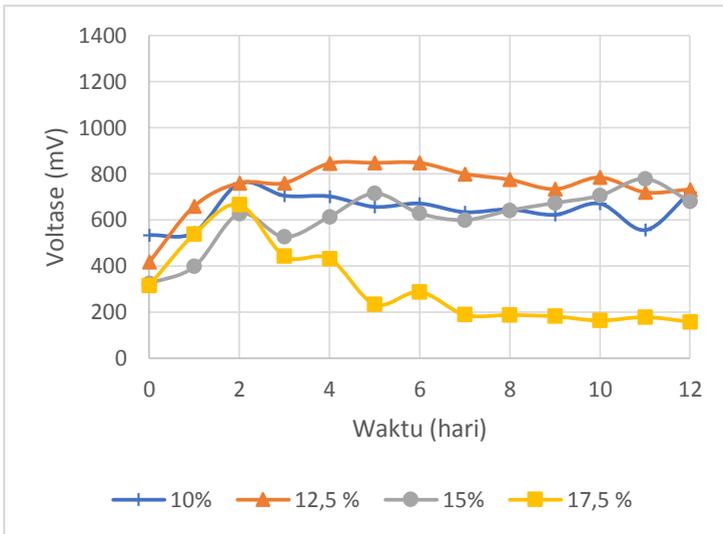
Dari Gambar 4.2, fase log untuk bakteri *Shewanella oneidensis* terjadi pada jam ke 8 hingga jam ke 30. Pada jam perhitungan jumlah bakteri pada jam ke 32 hingga 40 menunjukkan jumlah yang stagnan, sehingga bakteri mengalami fase stasioner. Pada perhitungan jam ke 42 hingga jam ke 52 , jumlah bakteri menurun sehingga bakteri sudah mengalami fase kematian. Sehingga bakteri *Shewanella oneidensis* di masukkan ke dalam reaktor setelah 8 jam inkubasi.

IV.2 Tegangan Listrik

Tegangan listrik merupakan salah satu paramater utama keberhasilan proses *microbial fuel cell*. Kehadiran bakteri sangat berpengaruh terhadap tegangan listrik yang dihasilkan pada proses *microbial fuel cell*. Kehadiran bakteri pada proses ini menjadi sangat penting karena elektron dihasilkan oleh proses metabolisme bakteri dan degradasi glukosa pada sisi anoda. Tegangan listrik dihasilkan karena adanya elektron yang berpindah akibat adanya beda potensial pada sisi anoda dan katoda. Katoda yang bersifat positif memiliki potensial yang lebih besar dari anoda yang bersifat negatif. Elektron yang berasal dari proses metabolisme bakteri dan degradasi glukosa akan menuju katoda melalui sirkuit dan proton bergerak melalui jembatan garam. Gambar 4.3 di bawah ini menunjukkan pertumbuhan bakteri *Eschericia coli* selama proses MFC untuk berbagai konsentrasi yang digunakan sedangkan Gambar 4.4 menunjukkan hasil tegangan listrik selama proses MFC.

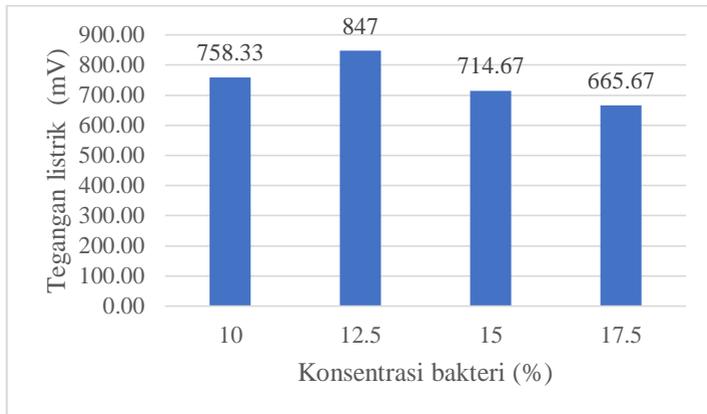


Gambar 4. 3 Kurva pertumbuhan bakteri *Eschericia coli* pada proses MFC



Gambar 4. 4 Kurva tegangan listrik yang dihasilkan selama proses MFC dengan bakteri *Eschericia coli*

Pada variabel dengan menggunakan bakteri *Eschericia coli* pertumbuhan bakteri terbaik pada variabel 17,5 % namun , dari hasil tegangan listrik yang dihasilkan (Gambar 4.4) terlihat bahwa pada variabel 17,5 % tegangan yang dihasilkan sangat kecil dan terus menurun. Hal ini dikarenakan tidak adanya tambahan substrat makanan bagi bakteri selama proses MFC sehingga bakteri tidak mampu melakukan metabolisme secara sempurna sehingga elektron yang dihasilkan juga sedikit yang mempengaruhi tegangan yang terukur pun kecil. Sedangkan tegangan tertinggi dihasilkan pada variabel dengan jumlah bakteri 12,5% yaitu sebesar 845 mV pada hari ke 5. Dari Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 dapat terlihat bahwa, jumlah bakteri akan berbanding lurus dengan tegangan yang dihasilkan. Karakteristik tegangan yang dihasilkan pada variabel dengan menggunakan bakteri *Eschericia coli* ini yaitu tegangan berbanding lurus dengan jumlah bakteri. Dari semua variabel menggunakan bakteri *Eschericia coli* , didapatkan tegangan tertinggi masing masing variabel seperti pada gambar 4.5



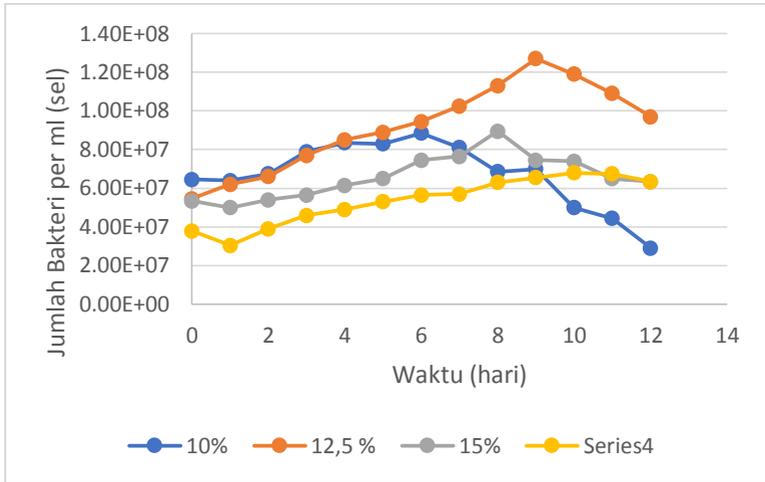
Gambar 4. 5 Kurva tegangan tertinggi masing masing variabel dengan menggunakan bakteri *Eschericia coli*

Bakteri dalam mentransfer elektronnya dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti ada atau tidaknya enzim redoks pada

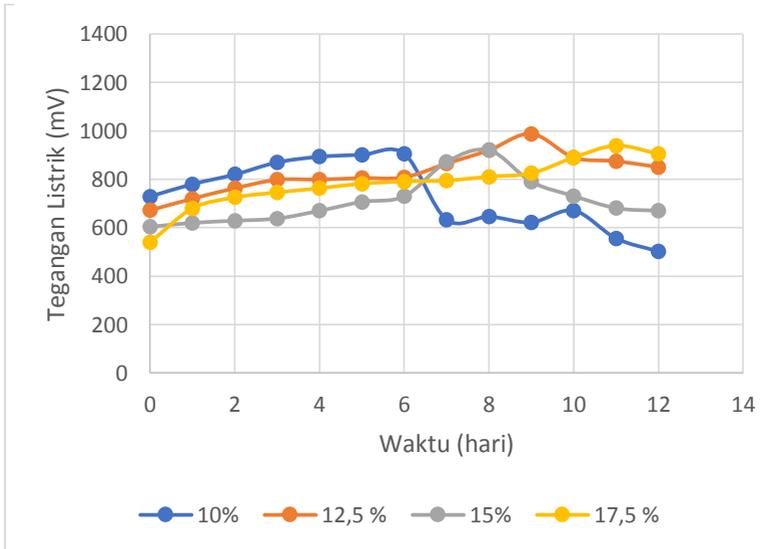
lapisan terluar membran bakteri tersebut, permukaan konduktif atau nanowire yang mampu mentransfer elektron dari badan bakteri ke elektroda. Dalam mentransfer elektronnya, *Eschericia coli* bukanlah bakteri yang mampu mentransfer elektronnya secara langsung (*indirect method*), ia membutuhkan *artificial mediator* yaitu Methylen Blue atau MB untuk mentransfer elektronnya. Pada penelitian kali ini, MB tidak ditambahkan karena MB akan bersifat racun ketika ditambahkan pada limbah. Hasil tegangan yang tidak terlalu tinggi dan fluktuatif terjadi akibat hal diatas.

Selain hal diatas, tegangan listrik yang dihasilkan juga dapat disebabkan oleh biofilm yang terbentuk pada dinding elektroda. Biofilm akan menghambat sel bakteri untuk mentransfer elektronnya. Bakteri dapat mati dilapisan dalam atau luar biofilm tersebut. Substrat juga tidak mampu untuk menembus biofilm sehingga bakteri yang terdapat pada lapisan dalam biofilm tidak mendapatkan bahan makanan. (Sevda dkk , 2012)

Variabel selanjutnya yaitu dengan menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis*. Pada variabel ini sama seperti pada variabel dengan bakteri *Eschericia coli*. Gambar 4.6 menunjukkan pertumbuhan bakteri *Shewanella oneidensis* selama proses MFC berlangsung dan Gambar 4.7 menunjukkan hasil tegangan listrik yang dihasilkan tiap variabel dengan menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis*.



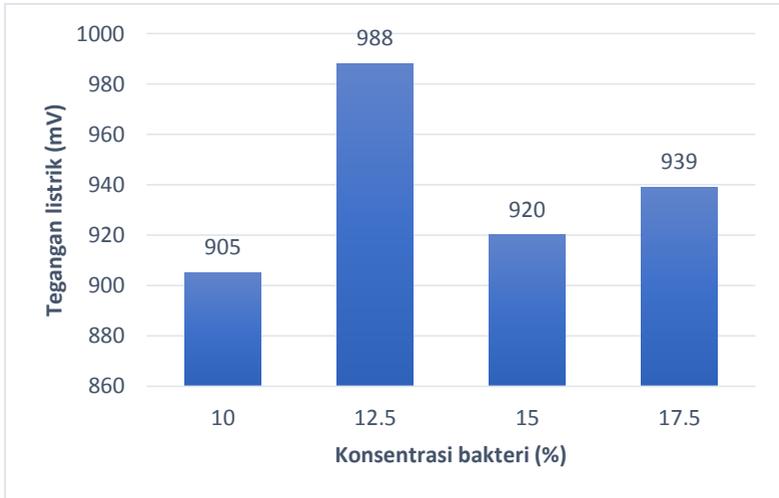
Gambar 4. 6 Kurva pertumbuhan *Shewanella oneidensis* selama proses MFC



Gambar 4. 7 Kurva tegangan listrik dengan menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis* selama proses MFC

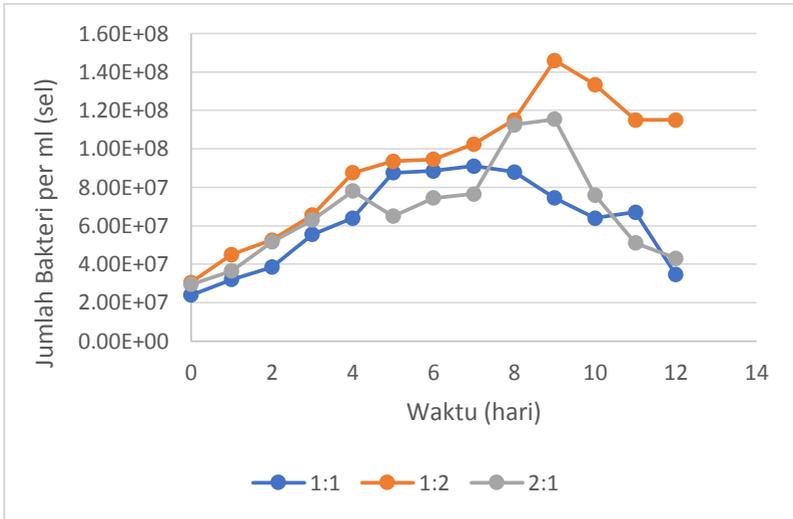
Dari Gambar 4.6 terlihat bahwa pertumbuhan bakteri terbaik pada variabel dengan jumlah bakteri 12,5 %. Pada awal percobaan jumlah bakteri sebesar $5,45 \times 10^7$, hingga hari ke 9 jumlah bakteri masih terus meningkat kemudian pada perhitungan hari ke 10 hingga 12 jumlah bakteri telah mengalami penurunan. Seiring dengan pertumbuhan bakteri yang terus meningkat hingga hari ke 9, tegangan listrik yang dihasilkan juga meningkat hingga hari ke 9 kemudian menurun pada hari ke 10 hingga hari ke 12. Pada variabel 17,5 % , jumlah bakteri terus naik hingga hari ke 10 lalu mulai turun pada hari ke 12. Namun tegangan listrik yang di hasilkan tidak setinggi pada variabel 12,5 %. Sama seperti pada variabel dengan bakteri *Eschericia coli*, jumlah bakteri pada variabel ini berbanding lurus dengan tegangan listrik yang dihasilkan. Namun, pada variabel dengan menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis* , tegangan yang dihasilkan nilainya lebih besar dari tegangan yang dihasilkan dengan bakteri *Eschericia coli* yaitu sebesar 988 mV. Tegangan yang dihasilkan pun lebih stabil dibandingkan dengan tegangan yang dihasilkan dengan bakteri *Eschericia coli* yaitu 847 mV.

Ditinjau dari karakteristik bakteri *Shewanella oneidensis*, bakteri ini mampu mentransfer elektronnya secara langsung ke elektroda. Adanya membran berupa *C-type Cytochrom* pada bakteri ini membantu melepaskan elektron dari bagian dalam tubuhnya ke bagian membran terluar bakteri. Bakteri ini juga menghasilkan nanowire yang menyebabkan kontak dengan elektroda menjadi lebih baik dan meningkatkan *power density*. Hal tersebut yang menyebabkan tegangan listrik yang dihasilkan lebih besar nilainya dibanding dengan hasil dari bakteri *Eschericia coli*. Dari semua variabel menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis*, didapatkan tegangan tertinggi masing masing variabel seperti pada Gambar 4.8 .

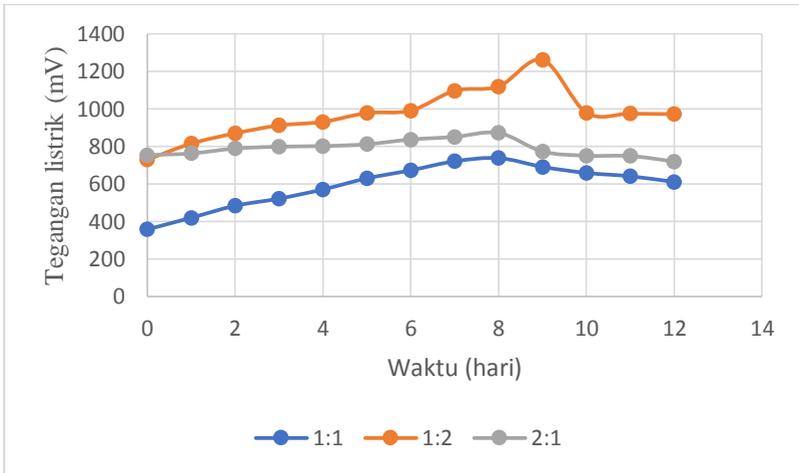


Gambar 4. 8 Hasil tegangan tertinggi masing masing variabel dengan menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis*

Variabel selanjutnya yaitu dengan menggunakan campuran bakteri *Eschericia coli* dan *Shewanella oneidensis* . terdapat 3 variasi perbandingan jumlah volume bakteri , dengan perbandingan *Eschericia coli* : *Shewanella oneidensis* yaitu 1 : 1 , 1 : 2 dan 2 : 1. Dari percobaan pada variabel dengan menggunakan satu jenis bakteri pada anoda, didapatkan konsentrasi bakteri terbaik untuk menghasilkan listrik pada 12,5 %. Konsentrasi tersebut dijadikan konsentrasi pada variabel dengan bakteri campuran. Sehingga, volume media bakteri yang dicampurkan kedalam anoda yaitu sebanyak 100 ml. Untuk perbandingan 1 : 1 volume media untuk kedua bakteri masing masih 50 ml. Sedangkan untuk variabel 1 : 2 yaitu 40 ml : 60 ml dan variabel 2 : 1 yaitu 60 ml : 40 ml. Gambar 4.9 dibawah ini menunjukkan kurva pertumbuhan campuran bakteri selama proses MFC dan Gambar 4.10 menunjukkan tegangan listrik yang dihasilkan masing masing variabel



Gambar 4. 9 Kurva pertumbuhan bakteri ampuran selama proses MFC

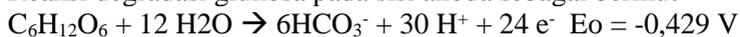


Gambar 4. 10 Kurva Tegangan listrik dengan menggunakan bakteri campuran *Eschericia coli* dan *Shewanella oneidensis*

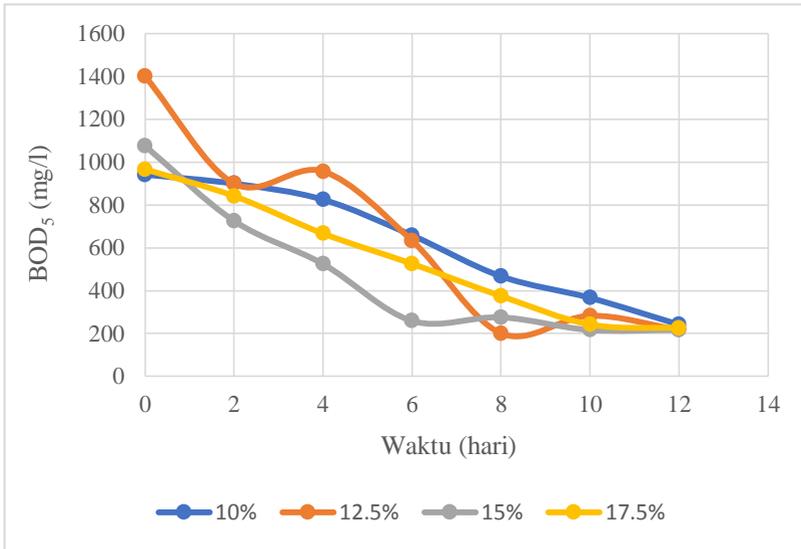
Dari Gambar 4.9 terlihat bahwa pertumbuhan bakteri terbaik pada variabel dengan perbandingan *Eschericia coli* : *Shewanella oneidensis* 1 : 2. Jumlah bakteri terus naik hingga hari ke 9 kemudian pada hari ke 10 dan selanjutnya jumlah bakteri menurun. Tegangan listrik yang dihasilkan pada hari pertama yaitu sebesar 730 mV dan terus naik hingga hari ke 9 mencapai 1261 mV. Pada hari ke 10 hingga ke 12 tegangan yang dihasilkan juga menurun. Pada variabel 2 : 1 jumlah bakteri naik hingga hari ke 9 , tegangan listrik yang di hasilkan juga naik hingga hari ke 8 namun jumlah bakteri dan tegangan yang dihasilkan tidak sebesar pada variabel 1 : 2. Hal ini teradi karena , pada variabel 1 : 2 jumlah bakteri *Shewanella oneidensis* yang dimasukkan ke dalam reaktor lebih banyak dibanding dengan bakteri *Eschericia coli* sehingga tegangan listrik yang dihasilkan juga semakin besar karena sifat bakteri *Shewanella oneidensis* yang lebih baik untuk menghasilkan elektron dibanding dengan bakteri *Eschericia coli*.

IV.3 Hubungan BOD (*Biological Oxygen Demand*) terhadap Pertumbuhan Bakteri

Penguraian zat organik adalah peristiwa alamiah, jika suatu badan air tercemar oleh zat organik maka bakteri akan dapat memanfaatkan oksigen terlarut dalam air selama proses *biodegradable* berlangsung, sehingga dapat mengakibatkan semakin menurunnya kadar oksigen terlarut sehingga menimbulkan kematian pada biota air dan keadaan pada badan air dapat menjadi anaerobik yang ditandai dengan timbulnya bau busuk. Pada percobaan ini, didapatkan nilai BOD₀ tidak seragam dikarenakan pada masing masing variabel konsentrasi bakteri yang berbasis v/v dilakukan pengenceran dengan air yang telah disterilkan agar di setiap variabel konsentrasi limbah tetes 5%. Reaksi degradasi glukosa pada sisi anoda sebagai berikut



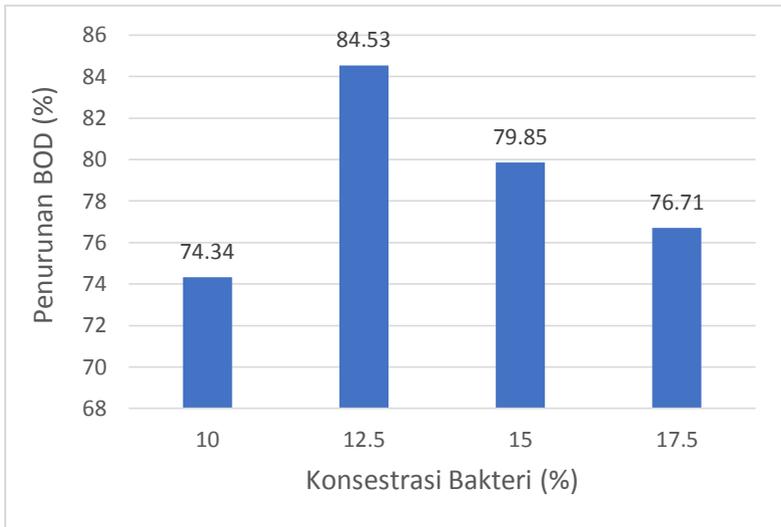
Hasil analisa BOD₅ pada variabel dengan bakteri *Eschericia coli* dapat dapat dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Kurva hasil analisa BOD pada berbagai variabel konsentrasi bakteri *Escherichia coli*

Pada gambar 4.11 menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai BOD₅ terhadap waktu. Pada reaktor berisi limbah glukosa dengan variabel konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 10% (v/v) memiliki nilai BOD₅ awal yaitu 941.777 mg/L, sedangkan nilai akhir konsentrasi BOD₅ sebesar 241.693 mg/L. Perubahan nilai BOD₅ tersebut mengalami penurunan dengan presentase 74.336%. Pada reaktor dengan limbah glukosa dengan variabel konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 12.5% (v/v) memiliki penurunan nilai BOD₅ yaitu 1400.837 mg/L menjadi 216.697 mg/L. Presentase penurunan nilai BOD₅ pada konsentrasi bakteri 12.5% sebesar 84.531%. Pada reaktor dengan variabel konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 15% (v/v) memiliki perubahan nilai BOD₅ yaitu 1075.693 mg/L menjadi 216.677 mg/L. Presentase penurunan nilai BOD₅ pada konsentrasi bakteri 15% sebesar 79.857%. Variabel terakhir yaitu pada reaktor dengan variabel penambahan konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 17.5% (v/v), memiliki nilai BOD₅ yaitu 966.890 mg/L menjadi 225.093 mg/L. Presentase

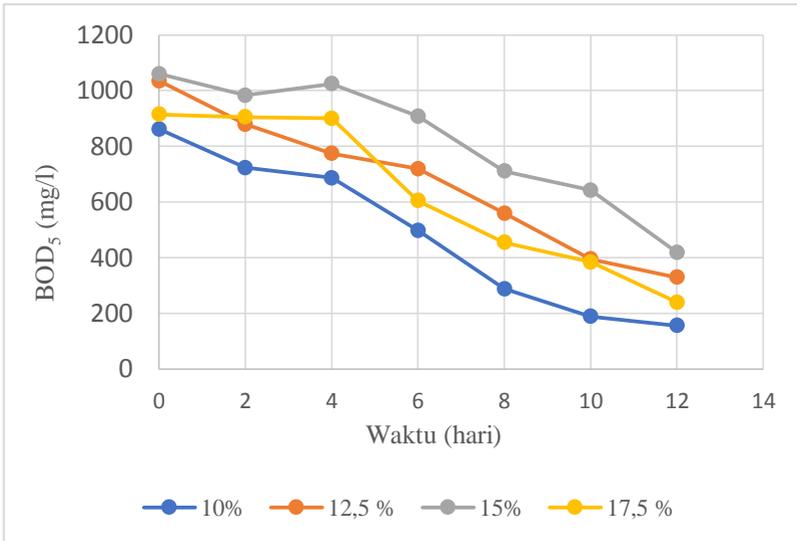
penurunan nilai BOD₅ pada konsentrasi bakteri 17.5% (v/v) sebesar 76.719%. Grafik di bawah ini menunjukkan persen penurunan masing- masing variabel.



Gambar 4. 12 Kurva penurunan BOD masing – masing variabel

Dari grafik diatas diperoleh hasil bahwa presentase penurunan BOD₅ paling besar pada variabel konsentrasi bakteri 12.5% (v/v). Hal ini dikarenakan, pada hari ke-8 jumlah bakteri konsentrasi 12.5% lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi bakteri lainnya yaitu sebesar 2.38×10^8 sel/ml. Pada jumlah bakteri tersebut menunjukkan pula nilai BOD₅ yang rendah yaitu sebesar 200.777 mg/L. Ini menunjukkan bahwa semakin rendahnya jumlah bakteri maka nilai BOD₅ juga semakin rendah. Mikroorganisme yang banyak akan dapat meningkatkan nilai BOD₅, karena pada saat itu mikroorganisme memanfaatkan bahan organik untuk didekomposisi.

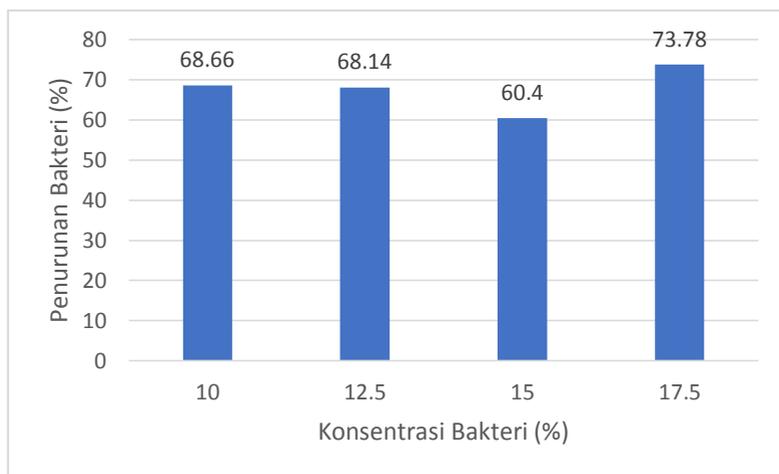
Hubungan BOD₅ (mg/L) dengan variabel konsentrasi bakteri *Shewanella oneidensis* terhadap waktu dapat dilihat pada gambar 4.12 dibawah ini.



Gambar 4. 13 Kurva hasil analisa BOD₅ terhadap waktu pada berbagai variabel konsentrasi bakteri *Shewanella oneidensis*

Pada Gambar 4.12 menunjukkan bahwa nilai BOD₅ menurun seiring waktu. Hal ini dikarenakan bahan baku dalam air limbah sudah menurun karena degradasi oleh mikroorganisme. Pada reaktor dengan variabel konsentrasi bakteri *Shewanella oneidensis* 10% (v/v) menunjukkan perubahan nilai BOD₅ dari 861.433 mg/L menjadi 269.933 mg/L. Perubahan nilai BOD₅ tersebut menunjukkan bahwa presentase penurunan BOD₅ pada konsentrasi bakteri 10% sebesar 68.665%. Pada reaktor dengan variabel konsentrasi bakteri *Shewanella oneidensis* 12.5% (v/v) menunjukkan perubahan nilai BOD₅ dari 1034.670 mg/L menjadi 329.620 mg/L. Perubahan nilai BOD₅ tersebut menunjukkan bahwa presentase penurunan kadar BOD₅ pada konsentrasi bakteri 12.5% sebesar 68.143%. Pada reaktor variabel konsentrasi bakteri *Shewanella oneidensis* 15% (v/v) menunjukkan bahwa perubahan nilai BOD₅ dari 1059.760 mg/L menjadi 419.560 mg/L. Perubahan

nilai BOD₅ tersebut menunjukkan presentase penurunan kadar BOD₅ pada konsentrasi bakteri 15% sebesar 60.409%. Variabel selanjutnya yaitu reaktor dengan variabel konsentrasi bakteri *Shewanella oneidensis* 17.5% (v/v) menunjukkan perubahan nilai BOD₅ dari 915.130 mg/L menjadi 239.960 mg/L. Perubahan nilai BOD₅ tersebut menunjukkan presentase penurunan kadar BOD₅ pada konsentrasi bakteri 17.5% sebesar 73.779%. Berikut grafik penurunan masing – masing variabel.

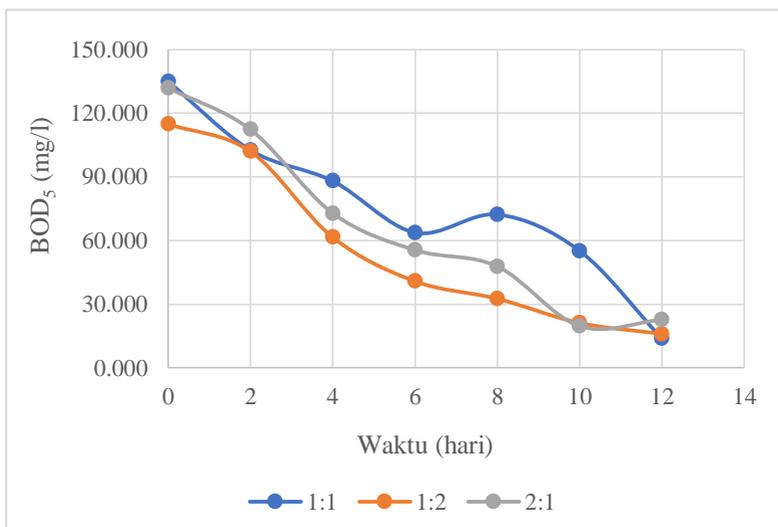


Gambar 4. 14 Kurva penurunan BOD masing-masing variabel

Penurunan konsentrasi BOD₅ pada masing-masing variabel dipengaruhi oleh adanya metabolisme dari bakteri yang semakin menurun selama proses pengolahan limbah. Pada presentase penurunan kadar BOD₅ paling besar adalah pada variabel konsentrasi bakteri *Shewanella oneidensis* 17.5% (v/v). Pada hari ke 10, jumlah mikroorganisme paling banyak ditunjukkan pada variabel konsentrasi bakteri 12.5%. Sesuai dengan nilai BOD₅ pada konsentrasi bakteri 12.5% ini besar. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar mikroorganisme, maka semakin besar pula nilai BOD₅. Selain itu, pada konsentrasi 17.5% memiliki penurunan nilai BOD₅ paling besar karena sesuai dengan

jumlah bakteri pada (Gambar 4.6) yang terus meningkat dibandingkan dengan variabel konsentrasi bakteri yang lain. Ini menunjukkan bahwa kemampuan mikroorganisme dalam mendegradasi bahan organik juga akan terus meningkat. Pada konsentrasi bakteri 12.5% jumlah bakteri pada gambar 4.6 secara keseluruhan menunjukkan bahwa jumlah bakteri paling banyak diantara variabel konsentrasi lainnya, namun nilai BOD nya rendah. Hal ini dapat disebabkan karakteristik dari mikroorganisme yang tidak dapat menerima nutrisi yang terdapat dalam reaktor.

Pada variabel terakhir yaitu campuran bakteri *Escherichia coli:Shewanella oneidensis* dengan perbandingan 1:1 ; 1:2 dan 2:1, menunjukkan hasil BOD₅ seperti pada Gambar 4.13.



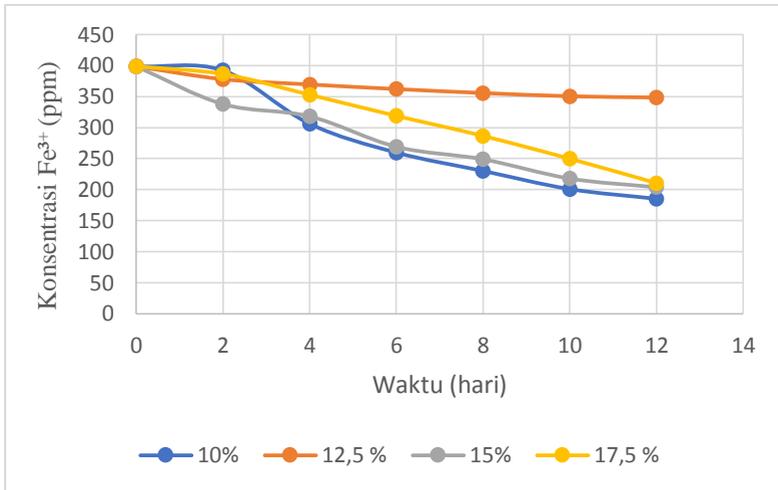
Gambar 4. 15 Kurva hasil analisa BOD₅ terhadap waktu pada berbagai variabel konsentrasi campuran bakteri *Escherichia coli:Shewanella oneidensis*

Gambar 4.13 diatas terlihat bahwa BOD₅ menurun dari seiring berjalannya waktu. Pada reaktor berisi limbah glukosa dengan perbandingan campuran bakteri 1:1 memiliki nilai BOD₅

awal yaitu 1349.80 mg/L, sedangkan nilai akhir konsentrasi BOD₅ sebesar 138.43 mg/L. Perubahan nilai BOD₅ pada perbandingan 1:1 mengalami penurunan dengan presentase 89.745%. Pada reaktor dengan limbah glukosa dengan perbandingan campuran bakteri 1:2 memiliki penurunan nilai BOD₅ yaitu 1148.92 mg/L menjadi 160.02 mg/L. Presentase penurunan nilai BOD₅ pada perbandingan 1:2 sebesar 86.072%. Pada reaktor dengan perbandingan bakteri campuran 2:1 memiliki perubahan nilai BOD₅ yaitu 1319.35 mg/L menjadi 227.07 mg/L. Presentase penurunan nilai BOD₅ pada variabel perbandingan campuran 2:1 sebesar 82.789%. Presentase penurunan BOD₅ terbesar variabel bakteri campuran adalah pada variabel perbandingan 1:1. Ditinjau dari Gambar 4.9 dan Gambar 4.13 dapat dilihat pada hari ke-8 jumlah bakteri perbandingan 1:1 sebesar 8.8×10^7 sel/ml, dengan nilai BOD₅ yaitu 72.267 mg/L. Pada perbandingan 1:2 jumlah bakteri sebesar 1.15×10^8 sel/ml, dengan nilai BOD₅ 32.591 mg/L. Sedangkan pada perbandingan 2:1 jumlah bakteri sebesar 1.13×10^8 sel/ml, dengan nilai BOD₅ 47.825 mg/L. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar jumlah bakteri, namun nilai BOD₅ yang semakin rendah. Hal ini dapat terjadi disebabkan oleh karakteristik bakteri yang tidak sepenuhnya dapat menerima atau mendegradasi bahan organik yang ada di dalam reaktor.

IV.4 Reduksi Fe³⁺

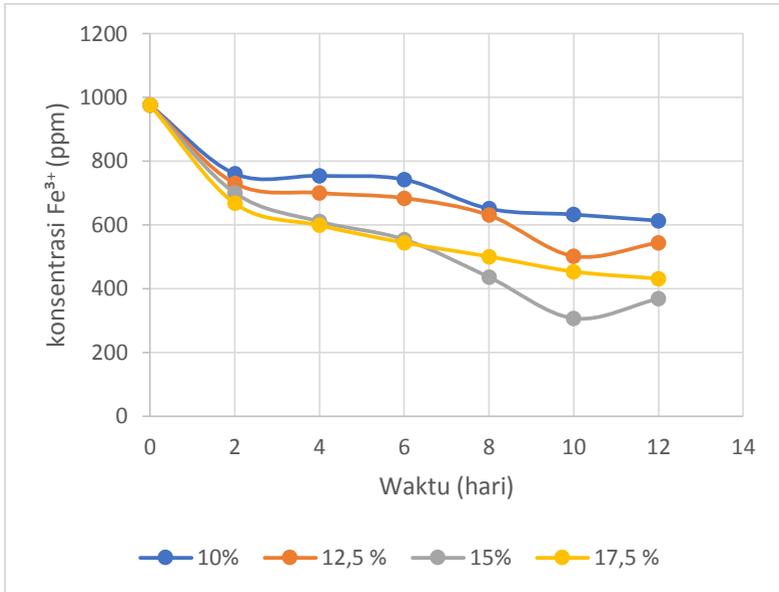
Pada sisi katoda dalam reaktor microbial fuel cell, digunakan 400 ml larutan ferrisianida 0,1 M dicampurkan dengan larutan buffer fospat sebanyak 400 ml. Pada sisi katoda terdapat reaksi reduksi Fe³⁺ menjadi Fe²⁺. Pada penelitian ini untuk mengetahui reduksi Fe³⁺ dihitung dengan cara menganalisa jumlah Fe³⁺ setiap dua hari sekali. Gambar 4.13 dibawah ini menunjukkan kurva hasil analisa Fe³⁺ pada variabel dengan menggunakan bakteri *Eschericia coli*.



Gambar 4. 16 Kurva hasil analisa Fe^{3+} pada variabel dengan menggunakan bakteri *Eschericia coli* selama proses MFC

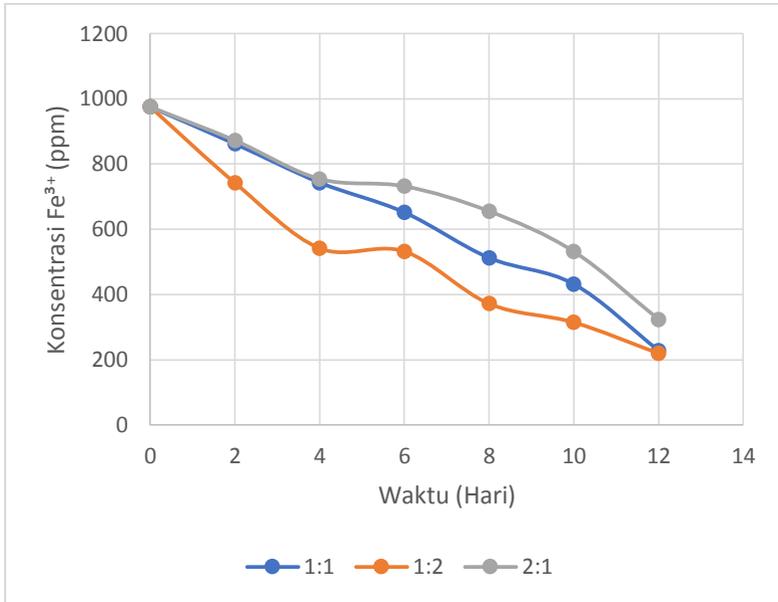
Dari hasil analisa yang telah dilakukan pada variabel dengan menggunakan bakteri *Eschericia coli*, jumlah awal Fe^{3+} pada semua variabel yaitu sebesar 398,58 ppm. Setelah proses MFC selama 12 hari, untuk variabel dengan jumlah bakteri 10 % , 12,5 % , 15 % dan 17,5 % berturut turut sebesar 185,23 ppm, 348,5 ppm, 203,81 ppm dan 210,58 ppm. Sehingga reduksi pada masing masing variabel yaitu 53,52 % , 12,56 % , 48,86% dan 47,16 % . Reduksi Fe terbesar berada pada variabel 10 % .

Berbeda dengan variabel dengan menggunakan bakteri *Eschericia coli*, Gambar 4.14 dibawah ini merupakan hasil reduksi Fe^{3+} pada variabel dengan menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis*.



Gambar 4. 17 Kurva reduksi Fe³⁺ pada variabel dengan menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis*

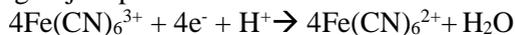
Dari hasil analisa yang telah dilakukan pada variabel dengan menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis*, jumlah awal Fe³⁺ pada semua variabel ini yaitu sebesar 974,98 ppm. Setelah proses MFC selama 12 hari, untuk variabel dengan jumlah bakteri 10 % , 12,5 % , 15 % dan 17,5 % berturut turut sebesar 612,84 ppm, 544,02 ppm, 368,39 ppm dan 431,1 ppm. Sehingga reduksi pada masing masing variabel yaitu 37,14 % , 44,20 % , 62,22% dan 55,78 % . Reduksi Fe terbesar berada pada variabel 15 % . Untuk variabel dengan menggunakan bakteri campuran, Kurva reduksi Fe³⁺ pada variabel dengan menggunakan bakteri bakteri campuran dapat dilihat pada Gambar 4.15



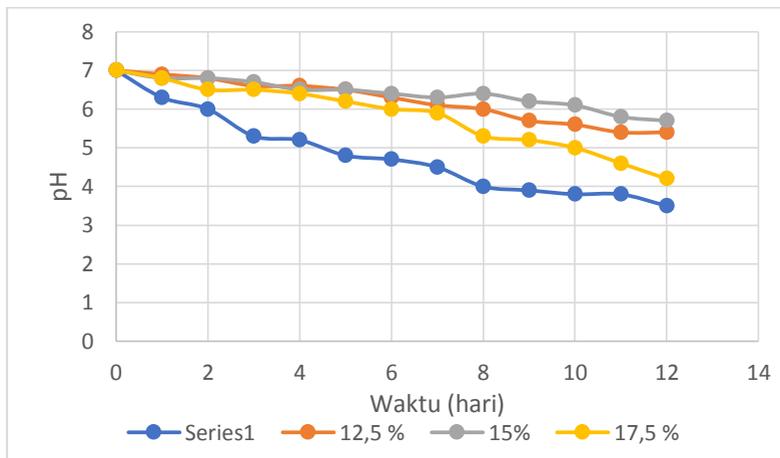
Gambar 4. 18 Kurva reduksi Fe^{3+} pada variabel dengan menggunakan bakteri campuran

Dari hasil analisa yang telah dilakukan pada variabel dengan menggunakan bakteri campuran, jumlah awal Fe^{3+} pada semua variabel ini yaitu sebesar 974,98 ppm. Setelah proses MFC selama 12 hari, untuk variabel dengan perbandingan bakteri 1 : 1 , 1 : 2 , dan 2 : 1 berturut turut sebesar 228,6 ppm, 219,86 ppm, 324,19 ppm. Sehingga reduksi pada masing variabel yaitu 76,54 %, 77,45 %, dan 66,74 %. Reduksi Fe terbesar berada pada variabel 17,5 %.

Pada sisi katoda, dimana Fe^{3+} akan berubah menjadi Fe^{2+} dengan bantuan elektron yang datang dari anoda dengan dan akan bereaksi dengan H^+ yang datang dari anoda dengan cara melewati jembatan garam, dan membentuk molekul air. Berikut merupakan reaksi yang terjadi pada sisi katoda

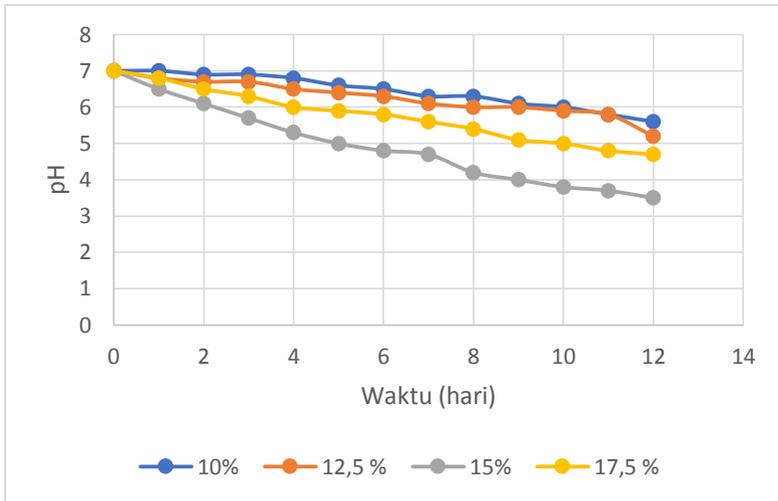


Dari reaksi tersebut , maka kehadiran H^+ menjadi faktor penting dalam reduksi Fe^{3+} . Kehadiran H^+ dipresentasikan dengan kondisi pH pada sisi katoda. Gambar 4.16 dibawah ini menunjukkan kondisi pH pada variabel dengan berbagai konsentrasi bakteri *Eschericia coli* yang berbeda beda



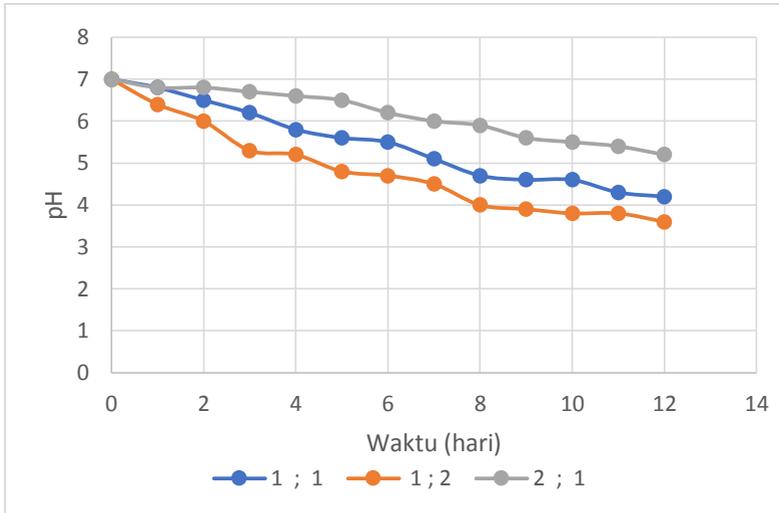
Gambar 4. 19 Kurva pH pada variabel dengan bakteri *Eschericia coli* selama proses MFC

Dari Gambar 4.16 terlihat bahwa penurunan pH paling besar terjadi pada variabel dengan konsentrasi bakteri 10 %. Semua variabel bermula pada pH 7. Pada variabel 10 % , pada hari ke 12 pH menurun menjadi 3,5 sehingga rasio penurunan pH sebesar 50 %. Pada variabel 12,5 % , 15 % dan 17,5 % rasio penurunan pH berturut turut sebesar 22,85 % , 18,57 % dan 40 %. Sehingga sesuai bahwa reduksi Fe^{3+} pada variabel dengan menggunakan bakteri *Eschericia coli* berbanding lurus dengan kehadiran H^+ . Gambar 4.17 dibawah ini menunjukkan kondisi pH pada variabel dengan berbagai konsentrasi bakteri *Shewanella oneidensis* yang berbeda beda



Gambar 4. 20 Kurva pH pada variabel dengan bakteri *Shewanella oneidensis* selama proses MFC

Dari Gambar 4.16 terlihat bahwa penurunan pH paling besar terjadi pada variabel dengan konsentrasi bakteri 15 %. Semua variabel bermula pada pH 7. Pada variabel 15 % , pada hari ke 12 pH menurun menjadi 3,7 sehingga rasio penurunan pH sebesar 47,14 %. Pada variabel 10 % , 12,5 % dan 17,5 % rasio penurunan pH berturut turut sebesar 20 % , 25,71 % dan 32,85 %. Sehingga sesuai bahwa reduksi Fe^{3+} pada variabel dengan menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis* berbanding lurus dengan kehadiran H^+ . Gambar 4.18 dibawah ini menunjukkan kondisi pH pada variabel dengan berbagai konsentrasi bakteri campuran yang berbeda beda



Gambar 4. 21 Kurva pH pada variabel dengan bakteri campuran selama proses MFC

Dari Gambar 4.16 terlihat bahwa penurunan pH paling besar terjadi pada variabel dengan perbandingan campuran bakteri 1 : 2 yaitu sebesar 48,57%. Semua variabel bermula pada pH 7. Pada variabel dengan perbandingan 1 : 2 , pada hari ke 12 pH menurun menjadi 3,6 sehingga rasio penurunan pH sebesar 48,57 %. Pada variabel 1 : 1 dan 2 : 1 rasio penurunan pH berturut turut sebesar 40 % dan 25,71 %. Sehingga sesuai bahwa reduksi Fe^{3+} pada variabel dengan menggunakan bakteri campuran berbanding lurus dengan kehadiran H^+ .

Korelasi antara penurunan konsentrasi Fe^{3+} dengan voltage tidak linier disebabkan karena konsentrasi Fe^{3+} tidak dipengaruhi oleh bakteri secara langsung, hanya dipengaruhi oleh kehadiran H^+ yang dihasilkan dari hasil reaksi degradasi glukosa. Semakin tinggi tegangan listrik yang terukur mendeskripsikan degradasi glukosa yang sempurna pada sisi anoda. Dengan degradasi glukosa yang sempurna, maka H^+ yang dihasilkan akan semakin banyak. H^+ akan melawati jembatan garam menuju sisi katoda. Semakin

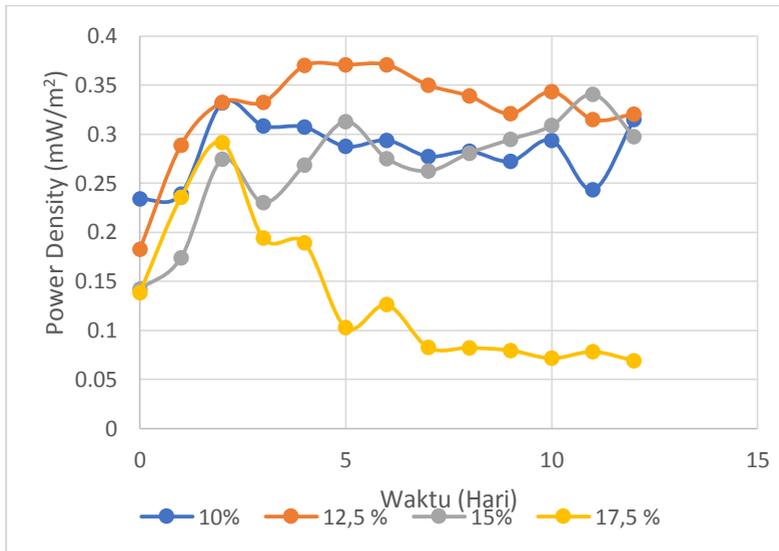
lama maka sisi katoda akan kaya akan H^+ sehingga reaksi reduksi Fe^{3+} akan berjalan. Sehingga konsentrasi Fe^{3+} pun akan menurun.

IV. 5 Power Density

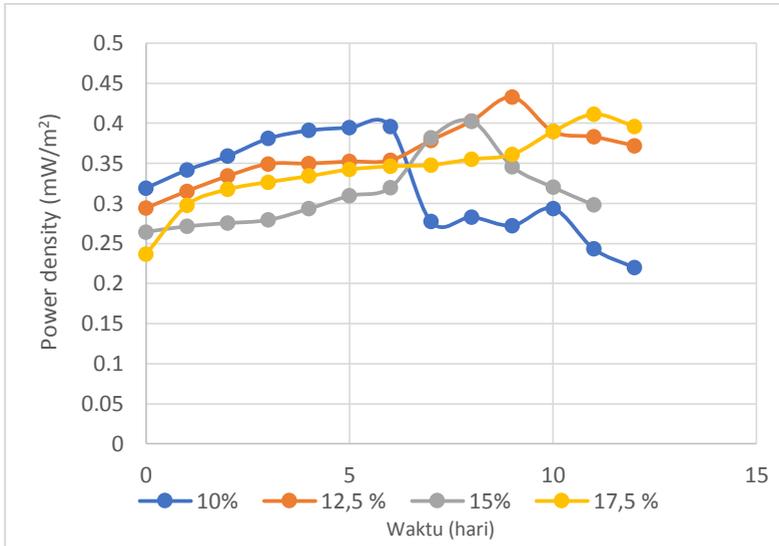
Produksi listrik dalam reaktor MFC dihitung dengan menganalisa dengan open circuit voltage (OVC) dan arus (I) diukur setiap hari. Nilai kuat arus dan tegangan yang didapatkan kemudian dikonversi ke *power density* P (mW/m^2) sesuai dengan rumus :

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

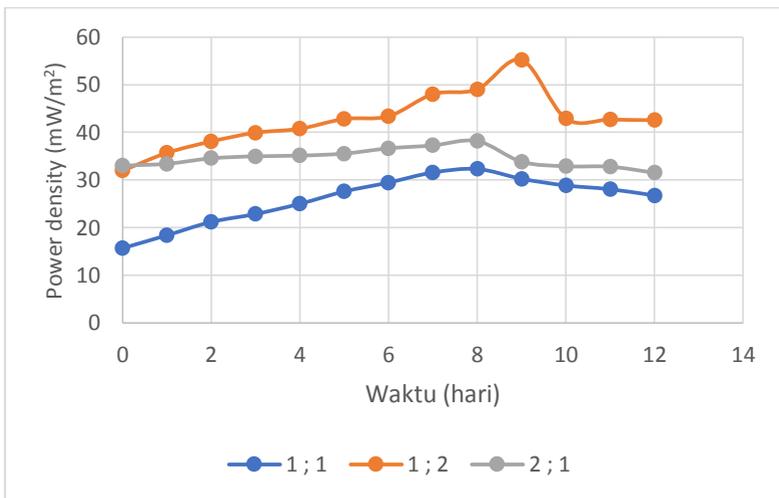
Dimana I (mA) adalah arus listrik , V (volt) adalah tegangan atau beda potensial dan A (m^2) adalah luas permukaan yang digunakan mikroorganisme bertumbuh di anoda grafit batang. Grafit yang digunakan berjumlah masing – masing 3 buah pada tiap sisi. Luas permukaan dihitung dengan perhitungan selimut tabung tanpa tutup ($2 \pi r t + 2 \pi r^2$) sebesar $22,844 \text{ cm}^2$. Gambar dibawah ini menunjukkan power density yang dihasilkan pada semua variabel



Gambar 4. 22 Kurva power density pada variabel dengan menggunakan bakteri *Eschericia coli*.



Gambar 4. 23 Kurva power density pada variabel dengan menggunakan bakteri *Eschericia coli*.



Gambar 4. 24 Kurva power density pada variabel dengan menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis*

Dilihat dari grafik diatas tampak bahwa power density akan sebanding dengan tegangan listrik yang dilakukan. Arus listrik (I) yang dihasilkan pada semua variabel stagnan pada nilai 0,01 mA. Hal ini dikarenakan tegangan atau beda potensial yang digunakan juga tidak terlalu besar. Namun, hal tersebut menunjukkan bahwa adanya pergerakan atau perpindahan elektron akibat adanya beda potensial pada sisi anoda dan katoda, arus listrik atau I menunjukkan kecepatan elektron berpindah pada sirkuit.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Metode Microbial Fuel Cell (MFC) mampu mengkonversi limbah pabrik gula menjadi energi listrik dengan bantuan bakteri *Eschericia coli* dan *Shewanella oneidensis* serta campuran kedua bakteri tersebut.
2. Konsentrasi bakteri *Eschericia coli* terbaik dalam menghasilkan tegangan listrik yaitu 12,5 % (v/v) begitupula untuk bakteri *Shewanella oneidensis* juga pada konsentrasi bakteri 12,5 % (v/v). Perbandingan campuran bakteri *Eschericia coli* : *Shewanella oneidensis* yang terbaik dalam menghasilkan listrik yaitu dengan perbandinga 1 : 2.
3. Penurunan konsentrasi Fe^{3+} terbaik pada variabel dengan menggunakan bakteri *Eschericia coli* yaitu pada konsnetrasi bakteri 10 % (v/v), sedangkan untuk variabel dengan menggunakan bakteri *Shewanella oneidensis* yaitu pada konsentrasi 15 % (v/v) serta pada perbandingan bakteri *Eschericia coli* : *Shewanella oneidensis* 1 : 2 untuk variabel dengan bakteri campuran.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Allen RM dan Bennetto HP. 1993. *Microbial fuel cells: electricity production from carbohydrates*. J. Appl. Biochem. Biotechnol. 39: 27-40.
- Biffinger Justin. C, et al. 2008. The influence of acidity on microbial fuel cells containing *Shewanella oneidensis*. Biosensors and Bioelectronics 24 (2008) 900-905
- Du, Zhuwei, H. Li, And T. Gu. 2007. *A State Of The Art Review On Microbial Fuel Cell; A Promising Technology For Wastewater Treatment And Bioenergy*. Journal Biotechnology Advances 25. 464-482
- Direktorat Ketenagalistrikan Kementrian ESDM. 2014. Statistik Ketenagalistrikan 2014. Jakarta
- Dwidjoseputro, D. 1998. Dasar-Dasar Mikrobiologi, Djambatan; Jakarta.
- Fitrialdi. 2011. *Microbial Fuel Cell Sebagai Energi Alternatif Menggunakan Bakteri Escherichia Coli*, Program Studi Kimia Pascasarjana Universitas Andalas ;Padang
- Gani, A. 2003. *Metode Diagnostik Bakteriologi III*, Balai Laboratorium Kesehatan; Makassar
- Gralnick A. Jeffrey dan Heidi H. Hau. 2007. *Ecology and Biotechnology of the Genus Shewanella*. Annual Review of Microbiology. 2007.61:237-58

- Hendratta Suhada. 2001. *Fuel Cell Sebagai Penghasil Energi Abad 21*, Jurnal Teknik Mesin Vol. 3, No. 2, Oktober 2001: 92 – 100
- Idham F, Halimi S, dan Latifah S. 2009. Alternatif Baru Sumber Pembangkit Listrik dengan Menggunakan Sedimen Laut Tropika Melalui Teknologi Microbial Fuel Cell. Teknologi Hasil Perairan Institut Pertanian Bogor.
- Karthikeyan. 2016. *Effect of composites based nickel foam anode in microbial fuel cell using Acetobacter aceti and Gluconobacter roseus as a biocatalysts*, J. Bioresource Technology, Journal homepage: www.elsevier.com/locate/biortech
- Liu H dan Logan BE. 2004. *Electricity Generation Using An Air Cathode Single-Chamber Microbial Fuel Cell In The Presence and Absence of Proton Exchange Membrane*, J. Environmental Science Technology 38: 4040
- Logan E. Bruce, et al. 2006. *Microbial Fuel Cells : Methodology and Technology*. Environmental Science & Technology. Vol. 40, No. 17. 2006
- Lovley, Derek R. 2008. *The microbe electric: conversion of organic matter to electricity*, Current Opinion in Biotechnology 2008, 19:564-571

- Muchlis, Moch., dan Adhi Darma Permana. 2002. Proyeksi Kebutuhan Listrik PLN Tahun 2003 s.d. 2020.
- Miroliaei M.R, Abdolreza Samimi, Davod Mohebbi-Kalhari. 2015. *Competition Between E. Cli and Shewanella s. for Electricity in Air Cathode MFC in Presence of Methylene Blue as Artificial Mediator*. Environmental Progres & Suistaible Energy. Vol. 34 No. 4. 2015
- Miroliaei M.R, Abdolreza Samimi, Davod Mohebbi-Kalhari. 2014. *Kinetics Investigation of Diversity Cultures of E.coli and Shewanella sp., and their Combined Effect with Mediator on MFC Performance*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry.
- Mohan S.V, G Mohanakrishna, B Purushotham Reddy, R Saravanan, P.N Sarma. 2007. *Bioelectricity generation from chemical wastewater treatment in mediatorless (anode) microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched hydrogen producing mixed culture under acidophilic microenvironment*. Biochemical Engineering Journal 39 (2008) 121-130
- Nancharaiah, Y.V., Mohan, S.V. Lens, P.N.L. 2015. *Metal removal and recovery in bioelectrochemical system, A reviem*. Bioresour. Technol. 195, 96-101
- Novitasari, Deni. 2011. *Optimasi Kinerja Microbial Fuel Cell Untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Bakteri*

- Lactobacillus bulgaricus*, Skripsi, Fakultas Teknik
Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia
- Purwati, Endang, dkk., 2014, *Inovasi Sumber Energi Terbarukan
Dari Perancangan Prototipe Microbial Fuel Cell Tipe
Seri, Paralel Dan Seri Paralel Dengan Memanfaatkan
Bakteri Escherichia Coli*, Vol. 40 No. 1: 132 -141
- Rabaey K, Boon N, Siciliano SD, Verhaege M, dan Verstaete W.
2004. *Biofuel cell select for microbial consortia that self-
mediate electron transfer*. J. Applied Environmental
Microbiology 70: 5373-5382.
- Ramya N, Renganathan K, S Barathi, Venkatraman. K. 2013.
*Performance of Salt-Bridge Microbial Fuel Cell at
Various Agarose Concentrations Using Hostel Sewage
as Substrate*. International Journal of Advancements in
Research & Technology, Volume 2, Issue 5, May-2013
- Rozendal, R. A., Hamelers, H. V. M. & Buisman, C. J. N. 2006.
*Effects of Membrane Cation Transport on pH and
Microbial Fuel Cell Performance*. Journal
Environmental Science Technology, Vol. 40, No.17,
5206–5211.
- Scott, Keith dan Murano, Cassandro. 2007. *Microbial Fuel Cells
Utilising Carbohydrates*. Journal of Chemical
Technology and Biotechnoogy (82):92-100

- Shukla AK, Suresh P, Berchmans S, dan Rajendran A. 2004. *Biological fuel cells and their applications*. J. Current Science 87: 455-468
- Sidharta ML, dkk. 2007. Pemanfaatan Limbah Cair sebagai Sumber Energi Listrik pada Microbial Fuel Cell. Institut Teknologi Bandung.
- Velasquez-Orta, Sharon B. 2009. *The effect of flavin electron shuttles in microbial fuel cells current production*. Springer-verlag.
- Venkateswaran K, et al. 1999. Polyphasic taxonomy of the genus *Shewanella* and description of *Shewanella oneidensis* sp. nov. International Journal of Systematic Bacteriology (1999), 49, 705-724
- Zahara, Nova Chisilia. 2011. *Pemanfaatan Saccharomyces cerevisiae Dalam Sistem Microbial Fuel Cell untuk Produksi Energi Listrik*, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPENDIKS A

HASIL PENGAMATAN DAN PERHITUNGAN

1. Populasi Bakteri tiap variabel

A.1 Populasi Bakteri *Escherichia coli*

Tabel A-1 Hasil perhitungan jumlah bakteri 10% *Escherichia coli* (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah bakteri (sel/ml)
	A	B	C	D	E		
Rabu / 22 Maret 2017	14	10	9	10	10	10.6	2.65E+07
Kamis / 23 Maret 2017	55	15	13	12	15	22	5.50E+07
Jumat /24 Maret 2017	25	26	28	27	24	26	6.50E+07
Sabtu / 25 Maret 2017	45	35	36	42	40	39.6	9.90E+07
Minggu / 26 Maret 2017	49	36	47	44	50	45.2	1.13E+08
Senin / 27 Maret 2017	51	31	45	29	54	42	1.05E+08
Selasa / 28 Maret	39	29	41	36	42	37.4	9.35E+07
Rabu / 29 Maret 2017	29	55	47	39	30	40	1.00E+08
Kamis / 30 Maret 2017	35	28	33	27	35	31.6	7.90E+07
Jumat /31 Maret 2017	12	18	18	20	15	16.6	4.15E+07
Sabtu / 1 April 2017	19	22	21	13	25	20	5.00E+07
Minggu / 2 April 2017	15	17	18	10	15	15	3.75E+07
Senin / 3 April 2017	24	29	24	23	20	24	6.00E+07

Tabel A-2 Hasil perhitungan jumlah bakteri 12.5% *Escherichia coli* (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah bakteri sel/ml
	A	B	C	D	E		
Selasa / 28 Maret 2017	40	21	30	38	32	32.2	8.05E+07
Rabu / 29 Maret 2017	47	42	64	50	50	50.6	1.27E+08

Kamis /30 Maret 2017	65	57	70	60	52	60.8	1.52E+08
Jumat / 31 Maret 2017	67	58	69	54	70	63.6	1.59E+08
Sabtu / 1 April 2017	68	70	71	69	75	70.6	1.77E+08
Minggu / 2 April 2017	70	72	75	74	75	73.2	1.83E+08
Senin / 3 April 2017	79	82	80	85	80	81.2	2.03E+08
Selasa / 4 April 2017	82	83	87	81	91	84.8	2.12E+08
Rabu / 5 April 2017	89	86	97	99	105	95.2	2.38E+08
Kamis / 6 April 2017	50	72	57	69	68	63.2	1.58E+08
Jumat / 7 April 2017	54	42	62	68	64	58	1.45E+08
Sabtu / 8 April 2017	45	43	47	42	43	44	1.10E+08
Minggu / 9 April 2017	38	39	37	39	40	38.6	9.65E+07

Tabel A-3 Hasil perhitungan jumlah bakteri 15% *Eschericia coli* (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah bakteri sel/ml
	A	B	C	D	E		
Jumat / 31 Maret 2017	17	12	13	20	16	15.6	3.90E+07
Sabtu / 1 April 2017	35	34	37	32	33	34.2	8.55E+07
Minggu / 2 April 2017	50	53	48	57	49	51.4	1.29E+08
Senin / 3 April 2017	100	97	90	95	92	94.8	2.37E+08
Selasa / 4 April 2017	89	95	98	87	101	94	2.35E+08
Rabu / 5 April 2017	105	103	110	97	109	104.8	2.62E+08
Kamis / 6 April 2017	101	113	104	101	120	107.8	2.70E+08
Jumat / 7 April 2017	117	120	127	116	114	118.8	2.97E+08
Sabtu / 8 April 2017	102	107	105	111	109	106.8	2.67E+08
Minggu / 9 April 2017	87	80	89	93	91	88	2.20E+08

Senin / 10 April 2017	90	93	95	94	93	93	2.33E+08
Selasa / 11 April 2017	93	92	90	96	90	92.2	2.31E+08
Rabu / 12 April 2017	95	90	90	87	89	90.2	2.26E+08

**Tabel A-4 Hasil perhitungan jumlah bakteri 17.5%
Eschericia coli (v/v) selama 12 hari**

Hari / Tanggal	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah bakteri sel/ml
	A	B	C	D	E		
Jumat / 31 Maret 2017	18	28	27	25	20	23.6	5.90E+07
Sabtu / 1 April 2017	25	30	28	29	27	27.8	6.95E+07
Minggu / 2 April 2017	47	48	52	56	49	50.4	1.26E+08
Senin / 3 April 2017	120	98	104	101	110	106.6	2.67E+08
Selasa / 4 April 2017	99	97	95	115	113	103.8	2.60E+08
Rabu / 5 April 2017	107	108	101	110	110	107.2	2.68E+08
Kamis / 6 April 2017	110	107	125	100	90	106.4	2.66E+08
Jumat / 7 April 2017	120	132	137	120	117	125.2	3.13E+08
Sabtu / 8 April 2017	112	120	107	116	103	111.6	2.79E+08
Minggu / 9 April 2017	115	120	121	121	120	119.4	2.99E+08
Senin / 10 April 2017	120	122	130	121	128	124.2	3.11E+08
Selasa / 11 April 2017	100	120	123	122	110	115	2.88E+08
Rabu / 12 April 2017	98	97	98	95	90	95.6	2.39E+08

A.2 Populasi Bakteri *Shewanella oneidensis*

Tabel A-5 Hasil perhitungan jumlah bakteri 10% *Shewanella oneidensis* (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal		Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah bakteri sel/ml
		A	B	C	D	E		
13	May 17	22	29	21	31	26	25.8	6.45E+07
14	May 17	22	29	21	31	25	25.6	6.40E+07
15	May 17	25	28	20	33	29	27	6.75E+07
16	May 17	29	29	29	36	35	31.6	7.90E+07
17	May 17	30	33	35	32	37	33.4	8.35E+07
18	May 17	32	34	39	28	33	33.2	8.30E+07
19	May 17	33	35	37	34	38	35.4	8.85E+07
20	May 17	39	35	28	30	30	32.4	8.10E+07
21	May 17	35	35	25	20	22	27.4	6.85E+07
22	May 17	35	36	19	25	25	28	7.00E+07
23	May 17	20	25	16	19	20	20	5.00E+07
24	May 17	20	20	18	21	10	17.8	4.45E+07
25	May 17	10	11	15	12	10	11.6	2.90E+07

Tabel A-6 Hasil perhitungan jumlah bakteri 12.5% *Shewanella oneidensis* (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal		Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah bakteri sel/ml
		A	B	C	D	E		
14	May 17	23	24	20	20	22	21.8	5.45E+07
15	May 17	23	25	25	27	24	24.8	6.20E+07
16	May 17	27	26	30	25	24	26.4	6.60E+07
17	May 17	29	30	32	33	30	30.8	7.70E+07
18	May 17	32	35	33	34	36	34	8.50E+07
19	May 17	35	38	34	35	36	35.6	8.90E+07

20	May 17	38	39	40	42	30	37.8	9.45E+07
21	May 17	40	45	39	40	41	41	1.03E+08
22	May 17	45	43	46	47	45	45.2	1.13E+08
23	May 17	46	49	49	55	55	50.8	1.27E+08
24	May 17	45	45	49	49	50	47.6	1.19E+08
25	May 17	40	42	45	51	40	43.6	1.09E+08
26	May 17	40	41	38	40	35	38.8	9.70E+07

Tabel A-7 Hasil perhitungan jumlah bakteri 15% *Shewanella oneidensis* (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal		Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah bakteri sel/ml
		A	B	C	D	E		
14	May 17	26	19	20	20	22	21.4	5.35E+07
15	May 17	17	19	21	19	24	20	5.00E+07
16	May 17	18	17	20	25	28	21.6	5.40E+07
17	May 17	20	20	22	23	28	22.6	5.65E+07
18	May 17	25	24	26	25	23	24.6	6.15E+07
19	May 17	26	27	25	26	26	26	6.50E+07
20	May 17	29	30	32	30	28	29.8	7.45E+07
21	May 17	30	32	31	30	30	30.6	7.65E+07
22	May 17	35	37	36	39	32	35.8	8.95E+07
23	May 17	35	32	30	28	24	29.8	7.45E+07
24	May 17	32	29	28	32	27	29.6	7.40E+07
25	May 17	30	28	22	29	21	26	6.50E+07
26	May 17	28	25	24	23	27	25.4	6.35E+07

**Tabel A-8 Hasil perhitungan jumlah bakteri 17.5%
Shewanella oneidensis (v/v) selama 12 hari**

Hari / Tanggal		Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah bakteri sel/ml
		A	B	C	D	E		
14	May 17	16	15	16	17	12	15.2	3.80E+07
15	May 17	17	1	13	19	11	12.2	3.05E+07
16	May 17	16	15	13	17	17	15.6	3.90E+07
17	May 17	18	20	16	19	19	18.4	4.60E+07
18	May 17	19	20	23	19	17	19.6	4.90E+07
19	May 17	20	22	21	23	20	21.2	5.30E+07
20	May 17	21	24	25	21	22	22.6	5.65E+07
21	May 17	23	22	24	24	21	22.8	5.70E+07
22	May 17	25	26	27	20	28	25.2	6.30E+07
23	May 17	26	27	25	29	24	26.2	6.55E+07
24	May 17	28	27	25	28	28	27.2	6.80E+07
25	May 17	29	25	31	29	21	27	6.75E+07
26	May 17	28	25	24	23	27	25.4	6.35E+07

A.3 Populasi Bakteri Campuran

**Tabel A-9 Hasil perhitungan jumlah bakteri campuran
dengan perbandingan *Eschericia coli* : *Shewanella oneidensis* yaitu 1:1 selama 12 hari**

Hari / Tanggal		Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah bakteri sel/ml
		A	B	C	D	E		
18	May 17	8	7	8	11	14	9.6	2.40E+07
19	May 17	10	12	11	16	15	12.8	3.20E+07
20	May 17	16	12	19	13	17	15.4	3.85E+07
21	May 17	19	21	22	21	28	22.2	5.55E+07
22	May 17	24	26	29	27	22	25.6	6.40E+07
23	May 17	29	32	37	35	33	35	8.75E+07

24	May 17	33	35	37	34	38	35.4	8.85E+07
25	May 17	39	35	38	30	40	36.4	9.10E+07
26	May 17	35	33	34	35	39	35.2	8.80E+07
27	May 17	39	39	20	22	29	29.8	7.45E+07
28	May 17	29	33	20	24	22	25.6	6.40E+07
29	May 17	28	33	27	21	25	26.8	6.70E+07
30	May 17	11	18	13	16	11	13.8	3.45E+07

Tabel A-10 Hasil perhitungan jumlah bakteri campuran dengan perbandingan *Eschericia coli* : *Shewanella oneidensis* yaitu 1:2 selama 12 hari

Hari / Tanggal		Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah bakteri sel/ml
		A	B	C	D	E		
14	May 17	12	11	13	14	11	12.2	3.05E+07
15	May 17	15	15	19	21	20	18	4.50E+07
16	May 17	19	22	23	21	20	21	5.25E+07
17	May 17	29	25	28	22	27	26.2	6.55E+07
18	May 17	34	35	38	33	35	35	8.75E+07
19	May 17	39	31	42	45	30	37.4	9.35E+07
20	May 17	38	39	40	42	30	37.8	9.45E+07
21	May 17	40	45	39	40	41	41	1.03E+08
22	May 17	45	43	46	47	49	46	1.15E+08
23	May 17	55	60	57	59	61	58.4	1.46E+08
24	May 17	57	49	55	54	52	53.4	1.34E+08
25	May 17	52	48	45	41	44	46	1.15E+08
26	May 17	48	43	44	48	47	46	1.15E+08

Tabel A-11 Hasil perhitungan jumlah bakteri campuran dengan perbandingan *Eschericia coli* : *Shewanella oneidensis* yaitu 2:1 selama 12 hari

Hari / Tanggal		Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah bakteri sel/ml
		A	B	C	D	E		
14	May 17	9	7	10	14	19	11.8	2.95E+07
15	May 17	15	18	11	15	14	14.6	3.65E+07
16	May 17	22	21	20	18	22	20.6	5.15E+07
17	May 17	26	22	28	23	27	25.2	6.30E+07
18	May 17	30	44	33	28	21	31.2	7.80E+07
19	May 17	26	27	25	26	26	26	6.50E+07
20	May 17	29	30	32	30	28	29.8	7.45E+07
21	May 17	30	32	31	30	30	30.6	7.65E+07
22	May 17	39	41	34	33	47	45	1.13E+08
23	May 17	45	49	42	47	48	46.2	1.16E+08
24	May 17	22	28	31	38	33	30.4	7.60E+07
25	May 17	29	17	18	16	22	20.4	5.10E+07
26	May 17	11	14	18	22	21	17.2	4.30E+07

2. Perhitungan jumlah bakteri

Contoh perhitungan jumlah bakteri pada variabel bakteri

Eschericia coli 10% (v/v).

Jumlah rata-rata per kotak = 10.6 sel/kotak

Luas kotak = $1/25 \text{ mm}^2$

Kedalaman hemasitometer = 0.1 mm

Faktor pengenceran = 10 kali

$$\begin{aligned} \text{Jumlah sel/mm}^2 &= 10.6 \frac{\text{sel}}{\text{kotak}} \times 25 \frac{\text{kotak}}{\text{mm}^2} \\ &= 265 \frac{\text{sel}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah sel/mm}^3 &= 265 \frac{\text{sel}}{\text{mm}^2} \div 0.1 \text{ mm} \\ &= 2650 \frac{\text{sel}}{\text{mm}^3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah sel/ml} &= 2650 \frac{\text{sel}}{\text{mm}^3} \times 1000 \frac{\text{mm}^3}{\text{ml}} \\ &= 2650000 \frac{\text{sel}}{\text{ml}} \end{aligned}$$

Dikali faktor pengenceran 10 kali,

$$\begin{aligned} \text{Jumlah sel/ml} &= 2650000 \frac{\text{sel}}{\text{ml}} \times 10 \\ &= 26500000 \frac{\text{sel}}{\text{ml}} \\ &= 2.65 \times 10^7 \frac{\text{sel}}{\text{ml}} \end{aligned}$$

3. Hasil perhitungan BOD

B.1 Nilai BOD *Eschericia coli*

Tabel B-12 Hasil pengamatan nilai BOD 5 Bakteri *Eschericia coli* selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	BOD 5 (mg/l)			
		10 %	12.5%	15%	17.5%
Rabu / 22 Maret 2017	0	941.777	1400.837	1075.693	966.890
Jumat /24 Maret 2017	2	899.847	900.067	725.697	841.853
Minggu / 26 Maret 2017	4	825.057	957.130	524.543	666.770
Selasa / 28 Maret 2017	6	658.227	633.540	258.963	525.523
Kamis / 30 Maret 2017	8	466.937	200.777	275.503	374.890
Sabtu / 1 April 2017	10	366.413	283.097	216.320	242.020
Senin / 3 April 2017	12	241.693	216.697	216.677	225.093

B.2 Nilai BOD *Shewanella oneidensis*

Tabel B-13 Hasil pengamatan nilai BOD 5 Bakteri *Shewanella oneidensis* selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	BOD 5 (mg/l)			
		10 %	12.5%	15%	17.5%
Sabtu / 13 Mei 2017	0	861.433	1034.670	1059.760	915.130
Senin / 15 Mei 2017	2	723.247	879.700	983.057	905.170
Rabu / 17 Mei 2017	4	686.553	774.430	1024.460	900.180
Jum'at / 19 Mei 2017	6	498.307	719.400	907.737	605.190
Minggu / 21 Mei 2017	8	288.357	559.440	711.213	455.250
Selasa / 23 Mei 2017	10	189.687	394.950	642.777	385.090
Kamis / 25 Mei 2017	12	156.600	329.620	419.560	239.960

B.3 Nilai BOD Campuran

Tabel B-14 Hasil pengamatan nilai BOD 5 Bakteri Campuran *Eschericia coli* : *Shewanella oneidensis* selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	BOD 5 (mg/l)		
		1:1	1:2	2:1
Sabtu / 13 Mei 2017	0	1349.80	1148.92	1319.35
Senin / 15 Mei 2017	2	1025.72	1019.81	1122.88
Rabu / 17 Mei 2017	4	880.30	615.04	728.50
Jum'at / 19 Mei 2017	6	637.40	407.96	554.92
Minggu / 21 Mei 2017	8	722.67	325.91	478.25
Selasa / 23 Mei 2017	10	551.37	211.82	196.53
Kamis / 25 Mei 2017	12	138.43	160.02	227.07

4. Perhitungan nilai BOD 5

Contoh perhitungan nilai BOD 5 pada variabel bakteri *Eschericia coli* 10% (v/v) pada hari ke-0.

Data yang diperoleh :

$$DO_0 \text{ (Sampel)} = 2.237 \text{ mg/l}$$

$$DO_5 \text{ (Sampel)} = 1.750 \text{ mg/l}$$

$$DO_0 \text{ (Akuades)} = 1.6 \text{ mg/l}$$

$$DO_5 \text{ (Akuades)} = 2.127 \text{ mg/l}$$

$$\text{Volume botol} = 250 \text{ ml}$$

$$\text{Volume sampel} = 10 \text{ ml}$$

Rumus perhitungan BOD 5 :

$$\begin{aligned} BOD_5 &= DO_0 \text{ sampel} - DO_5 \text{ akuades} + \\ &\frac{\text{Volume botol}}{\text{Volume sampel}} (DO_5 \text{ akuades} - DO_5 \text{ sampel}) \\ &= 2.237 - 2.127 + \frac{250}{10} (2.127 - 1.750) \\ &= 2.237 - 2.127 + 25(0.377) \\ &= 2.237 - 2.127 + 9.425 \\ &= \mathbf{941.777 \text{ mg/l}} \end{aligned}$$

5. Hasil Analisa COD

C.1 Nilai COD *Eschericia coli*

Tabel C-15 Hasil pengamatan nilai COD Bakteri *Eschericia coli* selama 12 hari

Waktu	COD (mg/l)			
	10 %	12.5%	15%	17.5%
0	4562.269	4575.150	4552.269	4568.325
2	4239.281	4552.269	4129.068	4249.281
4	4129.096	4186.260	4094.755	4198.023
6	4163.390	4186.260	4049.003	4039.002
8	4094.750	4117.630	4037.566	4003.021
10	4037.570	3991.820	3968.938	3879.232
12	3980.380	2968.840	3763.057	3609.342

C.2 Nilai COD *Shewanella oneidensis*

Tabel C-16 Hasil pengamatan nilai COD Bakteri *Shewanella oneidensis* selama 12 hari

Waktu	COD (mg/l)			
	10 %	12.5%	15%	17.5%
0	3785.948	3785.948	3785.948	3785.948
2	3625.313	3234.128	3678.263	3538.923
4	3574.890	3189.842	3408.619	3412.342
6	4231.782	3021.792	3267.876	3062.391
8	3987.653	2871.287	3298.652	2983.294
10	3872.354	2534.238	3112.387	2831.193
12	4129.085	2459.150	3065.359	2539.216

C.3 Nilai COD Campuran

Tabel C-17 Hasil pengamatan nilai COD Bakteri Campuran selama 12 hari

Waktu	COD (mg/l)		
	1:1	1:2	2:1
0	3785.948	3785.948	3785.948
6	2538.762	3068.326	2983.287
12	1978.758	2035.948	2235.268

6. Hasil Analisa Produksi Listrik

D. Tegangan Listrik

D.1 Tegangan Listrik *Eschericia coli*

Tabel D-18 Hasil pengamatan Tegangan Listrik Bakteri *Eschericia coli* 10% (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	Voltase
		mV
Rabu / 22 Maret 2017	t ₀	534
Kamis / 23 Maret 2017	t ₁	546
Jumat /24 Maret 2017	t ₂	758.333
Sabtu / 25 Maret 2017	t ₃	705
Minggu / 26 Maret 2017	t ₄	702
Senin / 27 Maret 2017	t ₅	656.667
Selasa / 28 Maret 2017	t ₆	671

Rabu / 29 Maret 2017	t ₇	633.667
Kamis / 30 Maret 2017	t ₈	645.667
Jumat / 31 Maret 2017	t ₉	622.333
Sabtu / 1 April 2017	t ₁₀	670.667
Minggu / 2 April 2017	t ₁₁	556
Senin / 3 April 2017	t ₁₂	719.333

Tabel D-19 Hasil pengamatan Tegangan Listrik Bakteri *Eschericia coli* 12.5% (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	Voltase
		mV
Selasa / 28 Maret 2017	t ₀	416.667
Rabu / 29 Maret 2017	t ₁	659.667
Kamis / 30 Maret 2017	t ₂	760
Jumat / 31 Maret 2017	t ₃	760
Sabtu / 1 April 2017	t ₄	845
Minggu / 2 April 2017	t ₅	847
Senin / 3 April 2017	t ₆	847
Selasa / 4 April 2017	t ₇	799.667
Rabu / 5 April 2017	t ₈	774.333
Kamis / 6 April 2017	t ₉	733.333
Jumat / 7 April 2017	t ₁₀	784.333
Sabtu / 8 April 2017	t ₁₁	719.667
Minggu / 9 April 2017	t ₁₂	732.333

Tabel D-20 Hasil pengamatan Tegangan Listrik Bakteri *Eschericia coli* 15% (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	Voltase
		mV
Jumat / 31 Maret 2017	t ₀	324.333
Sabtu / 1 April 2017	t ₁	397.667
Minggu / 2 April 2017	t ₂	627
Senin / 3 April 2017	t ₃	526
Selasa / 4 April 2017	t ₄	613.667
Rabu / 5 April 2017	t ₅	715
Kamis / 6 April 2017	t ₆	628.333
Jumat / 7 April 2017	t ₇	599.667
Sabtu / 8 April 2017	t ₈	641.333
Minggu / 9 April 2017	t ₉	673.333
Senin / 10 April 2017	t ₁₀	705.333
Selasa / 11 April 2017	t ₁₁	778.000
Rabu / 12 April 2017	t ₁₂	679.667

Tabel D-21 Hasil pengamatan Tegangan Listrik Bakteri *Eschericia coli* 17.5% (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	Voltase
		mV
Jumat / 31 Maret 2017	t ₀	316.200
Sabtu / 1 April 2017	t ₁	538.333
Minggu / 2 April 2017	t ₂	666
Senin / 3 April 2017	t ₃	443
Selasa / 4 April 2017	t ₄	431.667
Rabu / 5 April 2017	t ₅	235
Kamis / 6 April 2017	t ₆	288.000
Jumat / 7 April 2017	t ₇	188.667
Sabtu / 8 April 2017	t ₈	187.667
Minggu / 9 April 2017	t ₉	181.667
Senin / 10 April 2017	t ₁₀	163.333
Selasa / 11 April 2017	t ₁₁	178.333
Rabu / 12 April 2017	t ₁₂	158.000

D.2 Tegangan Listrik *Shewanella oneidensis*

Tabel D-22 Hasil pengamatan Tegangan Listrik Bakteri *Shewanella oneidensis* 10% (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	Voltase
		mV
Sabtu / 13 Mei 2017	t ₀	729
Minggu / 14 Mei 2017	t ₁	780
Senin / 15 Mei 2017	t ₂	820
Selasa / 16 Mei 2017	t ₃	870
Rabu / 17 Mei 2017	t ₄	893
Kamis / 18 Mei 2017	t ₅	901
Jum'at / 19 Mei 2017	t ₆	905
Sabtu / 20 Mei 2017	t ₇	633.667
Minggu / 21 Mei 2017	t ₈	645.667
Senin / 22 Mei 2017	t ₉	622.333
Selasa / 23 Mei 2017	t ₁₀	670.667
Rabu / 24 Mei 2017	t ₁₁	556
Kamis / 25 Mei 2017	t ₁₂	502

Tabel D-23 Hasil pengamatan Tegangan Listrik Bakteri *Shewanella oneidensis* 12.5% (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	Voltase
		mV
Sabtu / 13 Mei 2017	t ₀	672
Minggu / 14 Mei 2017	t ₁	720
Senin / 15 Mei 2017	t ₂	763
Selasa / 16 Mei 2017	t ₃	798
Rabu / 17 Mei 2017	t ₄	799
Kamis / 18 Mei 2017	t ₅	805
Jum'at / 19 Mei 2017	t ₆	808
Sabtu / 20 Mei 2017	t ₇	865
Minggu / 21 Mei 2017	t ₈	920
Senin / 22 Mei 2017	t ₉	988
Selasa / 23 Mei 2017	t ₁₀	890
Rabu / 24 Mei 2017	t ₁₁	875
Kamis / 25 Mei 2017	t ₁₂	850

Tabel D-24 Hasil pengamatan Tegangan Listrik Bakteri *Shewanella oneidensis* 15% (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	Voltase
		mV
Sabtu / 13 Mei 2017	t ₀	604
Minggu / 14 Mei 2017	t ₁	620
Senin / 15 Mei 2017	t ₂	629
Selasa / 16 Mei 2017	t ₃	638
Rabu / 17 Mei 2017	t ₄	670
Kamis / 18 Mei 2017	t ₅	707
Jum'at / 19 Mei 2017	t ₆	730
Sabtu / 20 Mei 2017	t ₇	872
Minggu / 21 Mei 2017	t ₈	920
Senin / 22 Mei 2017	t ₉	790
Selasa / 23 Mei 2017	t ₁₀	731
Rabu / 24 Mei 2017	t ₁₁	681
Kamis / 25 Mei 2017	t ₁₂	670

Tabel D-25 Hasil pengamatan Tegangan Listrik Bakteri *Shewanella oneidensis* 17.5% (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	Voltase
		mV
Sabtu / 13 Mei 2017	t ₀	540
Minggu / 14 Mei 2017	t ₁	680
Senin / 15 Mei 2017	t ₂	725
Selasa / 16 Mei 2017	t ₃	746
Rabu / 17 Mei 2017	t ₄	763
Kamis / 18 Mei 2017	t ₅	782
Jum'at / 19 Mei 2017	t ₆	791
Sabtu / 20 Mei 2017	t ₇	795
Minggu / 21 Mei 2017	t ₈	811
Senin / 22 Mei 2017	t ₉	825
Selasa / 23 Mei 2017	t ₁₀	890
Rabu / 24 Mei 2017	t ₁₁	939
Kamis / 25 Mei 2017	t ₁₂	905

D.3 Tegangan Listrik Bakteri Campuran

Tabel D-26 Hasil pengamatan Tegangan Listrik Bakteri Campuran 1:1 selama 12 hari

Hari / Tanggal	Waktu	Voltase
		mV
Sabtu / 13 Mei 2017	t_0	358
Minggu / 14 Mei 2017	t_1	420
Senin / 15 Mei 2017	t_2	484
Selasa / 16 Mei 2017	t_3	522
Rabu / 17 Mei 2017	t_4	571
Kamis / 18 Mei 2017	t_5	630
Jum'at / 19 Mei 2017	t_6	673
Sabtu / 20 Mei 2017	t_7	721
Minggu / 21 Mei 2017	t_8	738
Senin / 22 Mei 2017	t_9	691
Selasa / 23 Mei 2017	t_{10}	659
Rabu / 24 Mei 2017	t_{11}	641
Kamis / 25 Mei 2017	t_{12}	611

**Tabel D-27 Hasil pengamatan Tegangan Listrik
Bakteri Campuran 1:2 selama 12 hari**

Hari / Tanggal	Waktu	Voltase
		mV
Sabtu / 13 Mei 2017	t_0	730
Minggu / 14 Mei 2017	t_1	815
Senin / 15 Mei 2017	t_2	870
Selasa / 16 Mei 2017	t_3	912
Rabu / 17 Mei 2017	t_4	931
Kamis / 18 Mei 2017	t_5	978
Jum'at / 19 Mei 2017	t_6	991
Sabtu / 20 Mei 2017	t_7	1097
Minggu / 21 Mei 2017	t_8	1120
Senin / 22 Mei 2017	t_9	1261
Selasa / 23 Mei 2017	t_{10}	980
Rabu / 24 Mei 2017	t_{11}	975
Kamis / 25 Mei 2017	t_{12}	972

**Tabel D-28 Hasil pengamatan Tegangan Listrik
Bakteri Campuran 2:1 selama 12 hari**

Hari / Tanggal	Waktu	Voltase
		mV
Sabtu / 13 Mei 2017	t_0	754
Minggu / 14 Mei 2017	t_1	763
Senin / 15 Mei 2017	t_2	789
Selasa / 16 Mei 2017	t_3	799
Rabu / 17 Mei 2017	t_4	802
Kamis / 18 Mei 2017	t_5	812
Jum'at / 19 Mei 2017	t_6	837
Sabtu / 20 Mei 2017	t_7	851
Minggu / 21 Mei 2017	t_8	872
Senin / 22 Mei 2017	t_9	773
Selasa / 23 Mei 2017	t_{10}	751
Rabu / 24 Mei 2017	t_{11}	749
Kamis / 25 Mei 2017	t_{12}	720

E. Power Density

E.1 Power Density *Eschericia coli*

Tabel E-29 Hasil Perhitungan Power Density Bakteri *Eschericia coli* 10% (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Voltase	Arus (I)	Power Density (mW/m ²)
	mV	mA	
Rabu / 22 Maret 2017	534	0.01	0.234
Kamis / 23 Maret 2017	546	0.01	0.239
Jumat /24 Maret 2017	758.333	0.01	0.332
Sabtu / 25 Maret 2017	705	0.01	0.309
Minggu / 26 Maret 2017	702	0.01	0.307
Senin / 27 Maret 2017	656.667	0.01	0.287
Selasa / 28 Maret 2017	671	0.01	0.294
Rabu / 29 Maret 2017	633.667	0.01	0.277
Kamis / 30 Maret 2017	645.667	0.01	0.283
Jumat /31 Maret 2017	622.333	0.01	0.272
Sabtu / 1 April 2017	670.667	0.01	0.294
Minggu / 2 April 2017	556	0.01	0.243
Senin / 3 April 2017	719.333	0.01	0.315

Tabel E-30 Hasil Perhitungan Power Density Bakteri *Eschericia coli* 12.5% (v/v) selama 12 hari

Hari / Tanggal	Voltase	Arus (I)	Power Density (mW/m ²)
	mV	mA	
Selasa / 28 Maret 2017	416.667	0.01	0.182
Rabu / 29 Maret 2017	659.667	0.01	0.289
Kamis /30 Maret 2017	760	0.01	0.333
Jumat / 31 Maret 2017	760	0.01	0.333
Sabtu / 1 April 2017	845	0.01	0.370
Minggu / 2 April 2017	847	0.01	0.371

Senin / 3 April 2017	847	0.01	0.371
Selasa / 4 April 2017	799.667	0.01	0.350
Rabu / 5 April 2017	774.333	0.01	0.339
Kamis / 6 April 2017	733.333	0.01	0.321
Jumat / 7 April 2017	784.333	0.01	0.343
Sabtu / 8 April 2017	719.667	0.01	0.315
Minggu / 9 April 2017	732.333	0.01	0.321

**Tabel E-31 Hasil Perhitungan Power Density Bakteri
Eschericia coli 15% (v/v) selama 12 hari**

Hari / Tanggal	Voltase	Arus (I)	Power Density (mW/m ²)
	mV	mA	
Jumat / 31 Maret 2017	324.333	0.01	0.142
Sabtu / 1 April 2017	397.667	0.01	0.174
Minggu / 2 April 2017	627	0.01	0.274
Senin / 3 April 2017	526	0.01	0.230
Selasa / 4 April 2017	613.667	0.01	0.269
Rabu / 5 April 2017	715	0.01	0.313
Kamis / 6 April 2017	628.333	0.01	0.275
Jumat / 7 April 2017	599.667	0.01	0.263
Sabtu / 8 April 2017	641.333	0.01	0.281
Minggu / 9 April 2017	673.333	0.01	0.295
Senin / 10 April 2017	705.333	0.01	0.309
Selasa / 11 April 2017	778.000	0.01	0.341
Rabu / 12 April 2017	679.667	0.01	0.298

**Tabel E-32 Hasil Perhitungan Power Density Bakteri
Eschericia coli 17.5% (v/v) selama 12 hari**

Hari / Tanggal	Voltase	Arus (I)	Power Density (mW/m ²)
	mV	mA	
Jumat / 31 Maret 2017	316.200	0.01	0.138
Sabtu / 1 April 2017	538.333	0.01	0.236
Minggu / 2 April 2017	666	0.01	0.292
Senin / 3 April 2017	443	0.01	0.194
Selasa / 4 April 2017	431.667	0.01	0.189
Rabu / 5 April 2017	235	0.01	0.103
Kamis / 6 April 2017	288.000	0.01	0.126
Jumat / 7 April 2017	188.667	0.01	0.083
Sabtu / 8 April 2017	187.667	0.01	0.082
Minggu / 9 April 2017	181.667	0.01	0.080
Senin / 10 April 2017	163.333	0.01	0.072
Selasa / 11 April 2017	178.333	0.01	0.078
Rabu / 12 April 2017	158.000	0.01	0.069

E.2 Power Density *Shewanella oneidensis*

**Tabel E-33 Hasil Perhitungan Power Density Bakteri
Shewanella oneidensis 10% (v/v) selama 12 hari**

Hari / Tanggal	Voltase	Arus (I)	Power Density (mW/m ²)
	mV	mA	
Sabtu / 13 Mei 2017	729	0.01	0.319
Minggu / 14 Mei 2017	780	0.01	0.341
Senin / 15 Mei 2017	820	0.01	0.359
Selasa / 16 Mei 2017	870	0.01	0.381
Rabu / 17 Mei 2017	893	0.01	0.391
Kamis / 18 Mei 2017	901	0.01	0.394

Jum'at / 19 Mei 2017	905	0.01	0.396
Sabtu / 20 Mei 2017	633.667	0.01	0.277
Minggu / 21 Mei 2017	645.667	0.01	0.283
Senin / 22 Mei 2017	622.333	0.01	0.272
Selasa / 23 Mei 2017	670.667	0.01	0.294
Rabu / 24 Mei 2017	556	0.01	0.243
Sabtu / 13 Mei 2017	729	0.01	0.219

**Tabel E-34 Hasil Perhitungan Power Density Bakteri
Shewanella oneidensis 12.5% (v/v) selama 12 hari**

Hari / Tanggal	Voltase	Arus (I)	Power Density (mW/m ²)
	mV	mA	
Sabtu / 13 Mei 2017	672	0.01	0.294
Minggu / 14 Mei 2017	720	0.01	0.315
Senin / 15 Mei 2017	763	0.01	0.334
Selasa / 16 Mei 2017	798	0.01	0.349
Rabu / 17 Mei 2017	799	0.01	0.350
Kamis / 18 Mei 2017	805	0.01	0.352
Jum'at / 19 Mei 2017	808	0.01	0.354
Sabtu / 20 Mei 2017	865	0.01	0.379
Minggu / 21 Mei 2017	920	0.01	0.403
Senin / 22 Mei 2017	988	0.01	0.432
Selasa / 23 Mei 2017	890	0.01	0.389
Rabu / 24 Mei 2017	875	0.01	0.383
Kamis / 25 Mei 2017	850	0.01	0.372

**Tabel E-35 Hasil Perhitungan Power Density Bakteri
Shewanella oneidensis 15% (v/v) selama 12 hari**

Hari / Tanggal	Voltase	Arus (I)	Power Density (mW/m ²)
	mV	mA	
Sabtu / 13 Mei 2017	604	0.01	0.264
Minggu / 14 Mei 2017	620	0.01	0.271
Senin / 15 Mei 2017	629	0.01	0.275
Selasa / 16 Mei 2017	638	0.01	0.279
Rabu / 17 Mei 2017	670	0.01	0.293
Kamis / 18 Mei 2017	707	0.01	0.309
Jum'at / 19 Mei 2017	730	0.01	0.319
Sabtu / 20 Mei 2017	872	0.01	0.382
Minggu / 21 Mei 2017	920	0.01	0.403
Senin / 22 Mei 2017	790	0.01	0.346
Selasa / 23 Mei 2017	731	0.01	0.319
Rabu / 24 Mei 2017	681	0.01	0.298
Kamis / 25 Mei 2017	670	0.01	0.293

**Tabel E-36 Hasil Perhitungan Power Density Bakteri
Shewanella oneidensis 17.5% (v/v) selama 12 hari**

Hari / Tanggal	Voltase	Arus (I)	Power Density (mW/m ²)
	mV	mA	
Sabtu / 13 Mei 2017	540	0.01	0.236
Minggu / 14 Mei 2017	680	0.01	0.298
Senin / 15 Mei 2017	725	0.01	0.317
Selasa / 16 Mei 2017	746	0.01	0.327
Rabu / 17 Mei 2017	763	0.01	0.334
Kamis / 18 Mei 2017	782	0.01	0.342
Jum'at / 19 Mei 2017	791	0.01	0.346

Sabtu / 20 Mei 2017	795	0.01	0.348
Minggu / 21 Mei 2017	811	0.01	0.355
Senin / 22 Mei 2017	825	0.01	0.361
Selasa / 23 Mei 2017	890	0.01	0.389
Rabu / 24 Mei 2017	939	0.01	0.411
Kamis / 25 Mei 2017	905	0.01	0.396

E.3 Power Density Bakteri Campuran

Tabel E-37 Hasil Perhitungan Power Density Bakteri Campuran 1:1 selama 12 hari

Hari / Tanggal	Voltase	Arus (I)	Power Density
	mV	mA	(mW/m ²)
Sabtu / 13 Mei 2017	358	0.01	0.157
Minggu / 14 Mei 2017	420	0.01	0.184
Senin / 15 Mei 2017	484	0.01	0.212
Selasa / 16 Mei 2017	522	0.01	0.229
Rabu / 17 Mei 2017	571	0.01	0.249
Kamis / 18 Mei 2017	630	0.01	0.276
Jum'at / 19 Mei 2017	673	0.01	0.295
Sabtu / 20 Mei 2017	721	0.01	0.316
Minggu / 21 Mei 2017	738	0.01	0.323
Senin / 22 Mei 2017	691	0.01	0.302
Selasa / 23 Mei 2017	659	0.01	0.288
Rabu / 24 Mei 2017	641	0.01	0.281
Kamis / 25 Mei 2017	611	0.01	0.267

**Tabel E-38 Hasil Perhitungan Power Density Bakteri
Campuran 1:2 selama 12 hari**

Hari / Tanggal	Voltase	Arus (I)	Power Density (mW/m ²)
	mV	mA	
Sabtu / 13 Mei 2017	730	0.01	0.319
Minggu / 14 Mei 2017	815	0.01	0.357
Senin / 15 Mei 2017	870	0.01	0.381
Selasa / 16 Mei 2017	912	0.01	0.399
Rabu / 17 Mei 2017	931	0.01	0.408
Kamis / 18 Mei 2017	978	0.01	0.428
Jum'at / 19 Mei 2017	991	0.01	0.434
Sabtu / 20 Mei 2017	1097	0.01	0.480
Minggu / 21 Mei 2017	1120	0.01	0.490
Senin / 22 Mei 2017	1261	0.01	0.552
Selasa / 23 Mei 2017	980	0.01	0.429
Rabu / 24 Mei 2017	975	0.01	0.427
Kamis / 25 Mei 2017	972	0.01	0.425

**Tabel E-39 Hasil Perhitungan Power Density Bakteri
Campuran 2:1 selama 12 hari**

Hari / Tanggal	Voltase	Arus (I)	Power Density (mW/m ²)
	mV	mA	
Sabtu / 13 Mei 2017	754	0.01	0.330
Minggu / 14 Mei 2017	763	0.01	0.334
Senin / 15 Mei 2017	789	0.01	0.345
Selasa / 16 Mei 2017	799	0.01	0.349
Rabu / 17 Mei 2017	802	0.01	0.351
Kamis / 18 Mei 2017	812	0.01	0.355

Jum'at / 19 Mei 2017	837	0.01	0.366
Sabtu / 20 Mei 2017	851	0.01	0.373
Minggu / 21 Mei 2017	872	0.01	0.382
Senin / 22 Mei 2017	773	0.01	0.338
Selasa / 23 Mei 2017	751	0.01	0.329
Rabu / 24 Mei 2017	749	0.01	0.328
Kamis / 25 Mei 2017	720	0.01	0.315

E.4 Perhitungan Power Density

Contoh perhitungan untuk power density variabel bakteri *Eschericia coli* 10% (v/v).

Data yang diperoleh :

Tegangan listrik = 534 mV

Luas permukaan elektroda = 22.844 m²

Arus listrik = 0.01 mA

Rumus perhitungan power density =

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{\text{Voltase} \times \text{Arus listrik}}{\text{Luas permukaan elektroda}} \\
 &= \frac{534 \times 0.01}{22.844} = \mathbf{0.234 \text{ mW/m}^2}
 \end{aligned}$$

BIODATA PENULIS



Aprillia Ayuningtyas

Penulis dilahirkan di Magetan, 27 April 1995, merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu SD

Negeri 1 Maospati, SMP Negeri 1 Maospati, SMAN 3 Madiun, S1 Teknik Kimia FTI-ITS. Selama kuliah di Teknik Kimia, penulis pernah melaksanakan kerja praktek di PT. Pertamina (Persero) RU VI Balongan, Indramayu.

Email : aprilliaayuningtyas27@gmail.com



BIODATA PENULIS

Nora Ellyza

Penulis dilahirkan di Batang, 30 April 1995, merupakan anak pertama dari dua bersaudara.

Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu SD Negeri 3 Bandar, SMP Negeri 2 Pekalongan, SMAN 1 Pekalongan, S1 Teknik Kimia FTI-ITS. Selama kuliah di Teknik Kimia, penulis pernah melaksanakan kerja praktek di PT. Pertamina (Persero) RU II Dumai, Riau.

Email : nora.ellyza.ne@gmail.com