



SKRIPSI – TK 141581

Pengolahan Limbah Molases Sebagai Sumber Energi Listrik Serta Reduksi Logam Berat Cr (VI) dengan Reaktor Dual Chamber *Microbial Fuel Cell* (MFC) Sistem Kontinyu

Oleh :

**Martiana Nugraeny
NRP. 0221144000034**

**Tri Wahyuning Eka Purnama Sari
NRP. 0221144000039**

Dosen Pembimbing :

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

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



FINAL PROJECT– TK 141581

Molases Wastewater Treatment As a Source of Electrical Energy and Heavy Metal Reduction of Cr (VI) with Dual Chamber Reactor *Microbial Fuel Cell* (MFC) Continuous System

By :

**Martiana Nugraeny
NRP. 0221144000034**

**Tri Wahyuning Eka Purnama Sari
NRP. 0221144000039**

Advisor :

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

**DEPARTEMEN OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

Pengolahan Limbah Molases Sebagai Sumber Energi Listrik serta Reduksi Logam Berat Cr (VI) dengan Reaktor Dual Chamber *Microbial Fuel Cell* (MFC) Sistem Kontinyu

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

Oleh :

Martiana Nugraeny **NRP. 02211440000034**

Tri Wahyuning Eka P. S. **NRP. 02211440000039**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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

[Handwritten signatures of the examiners]



Pengolahan Limbah Molases Sebagai Sumber Energi Listrik Serta Reduksi Logam Berat Cr (VI) dengan Reaktor Dual Chamber *Microbial Fuel Cell* (MFC) Sistem Kontinyu

Nama Mahasiswa : Martiana Nugraeny (0221144000034)
Tri Wahyuning Eka P.S.(0221144000039)
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknologi Industri

ABSTRAK

Sekarang ini kebutuhan dan ketergantungan manusia akan energi listrik semakin meningkat. Sedangkan, bahan bakar fosil sebagai sumber energi yang tidak dapat diperbarui mulai terbatas. Disisi lain, limbah industri semakin bertambah seiring dengan semakin pesatnya perkembangan teknologi. Salah satunya adalah limbah molases yang masih mempunyai kandungan sukrosa sebesar 55% dan mempunyai potensi untuk digunakan sebagai sumber energi alternatif. Limbah industri lainnya yaitu limbah logam berat Cr(VI) yang merupakan zat pencemar reaktif dan bersifat toksik bagi manusia. 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 “Pengolahan Limbah Molases Sebagai Sumber Energi Listrik Serta Reduksi Logam Berat Cr (VI) dengan Reaktor Dual Chamber *Microbial Fuel Cell* (MFC) Sistem Kontinyu”. Metode penelitian yang dilakukan pada penelitian ini yaitu menggunakan bakteri dalam limbah organik molases pada sisi anoda dan larutan $K_2Cr_2O_7$ 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 kromium 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. Digunakan limbah organik (molases) dengan konsentrasi bakteri *Shewanella oneidensis* 12,5 % (v/v) dan konsentrasi awal larutan Cr(VI) yaitu 8 mg/L. Variabel penelitian berupa ratio recycle yaitu rate recycle : rate feed masuk sebesar 0,525; 0,6; 0,75 dan 0,85 serta pH pada ruang katoda yaitu 3 dan 4 Hasil berupa power density diukur dengan multimeter, limbah organik setelah proses bio-listrik dianalisa kandungan BOD dan larutan $K_2Cr_2O_7$ dianalisa kandungan kromium pada masing-masing variabel, kemudian dibandingkan kondisi yang paling optimal. Hasil dari penelitian ini menunjukkan power density dalam setiap ratio recycle untuk pH 3 yaitu $\pm 6,5 \text{ mW/m}^2$; $\pm 33 \text{ mW/m}^2$; $\pm 6 \text{ mW/m}^2$ dan $\pm 1 \text{ mW/m}^2$ sedangkan untuk pH 4 yaitu $\pm 3,2 \text{ mW/m}^2$; $\pm 2,6 \text{ mW/m}^2$; $\pm 7 \text{ mW/m}^2$ and $\pm 2 \text{ mW/m}^2$. Reduksi logam Cr(VI) hampir 100% dalam setiap variabel recycle ratio yaitu 0; 0,04; 0,097 dan 0,09 mg/L untuk pH 3 serta 0,069; 0,099; 0,059 dan 0,078 mg/L untuk pH 4. Sedangkan, pengurangan nilai BOD yaitu 17,89; 55,79; 28,26 dan 51,94% untuk pH 3 serta 81,25; 77,98 ; 67,28 dan 61% untuk pH 4. Dari penelitian ini, didapatkan hasil yang paling optimal untuk produksi listrik serta reduksi logam Cr(VI) yaitu pada ratio recycle 0,6 dan pH 3 di katoda. Recycle ratio tidak sebanding dengan penurunan konsentrasi limbah Cr(VI) di katoda maupun produksi listrik di anoda. Selain itu, semakin rendah pH di katoda, produksi listrik yang dihasilkan dan jumlah logam Cr(VI) yang tereduksi semakin tinggi.

Kata kunci : bio-listrik, *Shewanella oneidensis*, *microbial fuel cell*, reduksi logam Cr

Molases Wastewater Treatment As a Source of Electrical Energy and Heavy Metal Reduction of Cr (VI) with Dual Chamber Reactor Microbial Fuel Cell (MFC) Continuous System

Name : Martiana Nugraeny (0221144000034)
Tri Wahyuning Eka P.S.(0221144000039)
Advisors : Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng
Departement : Chemical Engineering
Faculty : Industrial Technolology

ABSTRACT

Nowadays human needs and dependence on electrical energy is increasing. Meanwhile, fossil fuels as a non-renewable energy source are limited. In the other side, industrial waste is increasing along with the rapid development of technology. One of them is molasses waste that still has a sucrose content of 55% and has the potential to be used as an alternative energy source. Other industrial waste is heavy metal waste Cr (VI) that is a reactive pollutant and toxic to humans. One of alternative energy that very potential to be developed is fuel cell biology-based. Microbial Fuel Cell (MFC) is a technology that convert chemical energy to electrical energy with catalytic reaction from microorganism. Thus, it is necessary to do research with the topic “Molases Wastewater Treatment As a Source of Electrical Energy and Heavy Metal Reduction of Cr (VI) with Dual Chamber Reactor Microbial Fuel Cell (MFC) Continuous System”. The research method using bacteria in organic waste on anode compartment and $K_2Cr_2O_7$ solution on cathode compartment. This research aims are to assess the production process of bio-electrical using Microbial Fuel Cell (MFC) with the appropriate bacteria concentration and determine the chromium content decrease after bio-electrical process. Bio-electrical process using dual-chamber reactor which are connected by salt bridge and there are electrode in each chamber which connected by copper wire. Used organic waste

(molasses) with the concentration of *Shewanella oneidensis* 12.5% (v/v) and the initial concentration of Cr (VI) solution is 8 mg/L. The research variables are recycle ratio (recycle rate: fresh feed rate) of 0,525; 0.6; 0,75 and 0.85 and pH at the cathode compartment are 3 and 4. The result of power density measured by multimeter, organic waste after the bio-electric process analyzed the content of BOD and $K_2Cr_2O_7$ solution analyzed chromium content in each variable, then compared the most optimal conditions. The results of this experiment showed the power density in each recycle ratio for pH 3 are $\pm 6.5 \text{ mW/m}^2$; $\pm 33 \text{ mW/m}^2$; $\pm 6 \text{ mW/m}^2$ and $\pm 1 \text{ mW/m}^2$ while for pH 4 are $\pm 3.2 \text{ mW/m}^2$; $\pm 2.6 \text{ mW/m}^2$; $\pm 7 \text{ mW/m}^2$ and $\pm 2 \text{ mW/m}^2$. The reduction of Cr (VI) metal are almost 100% in each recycle ratio variable that are 0; 0.04; 0.097 and 0.09 mg/L for pH 3 and 0.069; 0.099; 0.059 and 0.078 mg/L for pH 4. Meanwhile, the reduction of BOD value are 17.89; 55.79; 28.26 and 51.94% for pH 3 and 81.25; 77.98; 67.28 and 61% for pH 4. From this research, the most optimal results that obtained for electricity production and reduction of Cr (VI) metal that is in the recycle ratio of 0.6 and pH 3 in the cathode compartment. The recycle ratio is not proportional to the decrease of Cr (VI) waste concentration in the cathode as well as the production of electricity in the anode. In addition, the lower pH at the cathode, the higher production of electricity and reduced amount of Cr (VI) metal.

Keywords: *bio-electrical*, *Shewanella oneidensis*, *microbial fuel cell*, reduction of Cr metal

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT karena hanya dengan rahmat dan berkah-Nya sehingga kami dapat menulis dan telah menyelesaikan Laporan Skripsi yang berjudul **“Pengolahan Limbah Molases Sebagai Sumber Energi Listrik Serta Reduksi Logam Berat Cr (VI) dalam Reaktor Dual Chamber *Microbial Fuel Cell* (MFC Sitem Kontinyu)”**. Laporan Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam penyusunan laporan ini, penulis banyak mendapat bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung dari beberapa pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Juwari, ST, M.Eng., Ph.D. selaku Kepala Departemen S1 Teknik Kimia FTI – ITS.
2. Ibu Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng selaku Kepala Laboratorium Pengolahan Limbah Industri, Departemen Teknik Kimia FTI-ITS, sekaligus Dosen Pembimbing Laboratorium Pengolahan Limbah Industri, Departemen Teknik Kimia FTI-ITS atas bimbingan, saran dan motivasi yang telah diberikan.
3. Bapak dan Ibu Dosen pengajar dan seluruh karyawan Departemen Teknik Kimia FTI-ITS.
4. Orang tua dan seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayang kepada kami.
5. Teman-teman Limbah's Crew yang telah memberikan inspirasi, semangat dan keceriaannya.
6. Teman-teman K-54 atas semua dukungan dan kerjasamanya.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan, sehingga saran dan kritik yang membangun dari pembaca sangat diperlukan agar dapat diperbaiki menjadi lebih baik di kemudian hari.

Surabaya, 09 Juli 2018

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	5
I.3 Tujuan Penelitian	6
I.4 Manfaat Penelitian	6
I.5 Batasan Penelitian	6

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Kromium (Cr)	9
II.2 <i>Shewanella oneidensis</i>	10
II.3 <i>Fuel Cell</i>	12
II.4 <i>Microbial Fuel Cell</i> (MFC)	16
II.5 Penelitian Terdahulu	26

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Kondisi Operasi	29
III.2 Variabel Penelitian	30
III.3 Bahan, Alat, dan Skema Alat Penelitian	30
III.3.1 Bahan Penelitian	30
III.3.2 Alat Penelitian	30
III.3.3 Skema Alat Penelitian	31
III.4 Diagram Alir Penelitian	32
III.5 Prosedur Penelitian	33
III.5.1 Persiapan Penelitian	33
III.5.1 Proses Eksperimen	34
III.6 Tahap Analisa Penelitian	35
III.7 Rencana Jadwal Kegiatan	37

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	
IV.1 <i>Microbial Fuel Cell</i> (MFC) Sistem Resirkulasi Kontinyu	39
IV.2 Prinsip Kerja Bakteri <i>Shewanella oneidensis MR-1</i>	43
IV.3 Hubungan Populasi Bakteri dan Produksi Listrik yang Dihasilkan.....	44
IV.4 Hubungan BOD (<i>Biological Oxygen Demand</i>) terhadap populasi bakteri	50
IV.5 Reduksi Logam Cr ⁶⁺	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
V.1 Kesimpulan	55
V.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	xi
APPENDIKS A	A-1
APPENDIKS B	B-1
RIWAYAT PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1	Bakteri <i>Shewanella oneidensis</i>	11
Gambar II.2	Skema Cara Kerja <i>Microbial Fuel Cells</i> (MFCs)	17
Gambar II.3	Substrat Organik (Asam Asetat) Yang Teroksidasi Dalam Ruang Anoda (Anaerob); Proton Dan Elektron Yang Dihasilkan	19
Gambar II.4	Reaksi dari Reduksi Kromium pada Reaktor <i>Microbial Fuel Cell</i>	20
Gambar II.5	Elektroda Batang Grafit.....	21
Gambar II.6	Kurva Pertumbuhan Bakteri	22
Gambar II.7	Hematisometer (<i>Counting Chamber</i>)	24
Gambar III.1	Rangkaian alat <i>microbial fuel cells</i>	31
Gambar III.2	Diagram alir <i>microbial fuel cells</i>	24
Gambar III.3	Hematisometer (<i>Counting Chamber</i>)	36
Gambar IV.1	Reaktor <i>Microbial Fuel Cell</i> (MFC) sistem resirkulasi kontinyu	41
Gambar IV.2	Kurva pertumbuhan bakteri <i>Shewanella</i> <i>oneidensis MR-1</i>	43
Gambar IV.3	Pertumbuhan populasi bakteri <i>Shewanella</i> <i>oneidensis MR-1</i> pada (a) pH 3 (b) pH 4 di Katoda	45
Gambar IV.4	Produksi Listrik pada Variabel (a) pH 3 (b) pH 4 di Katoda.....	47
Gambar IV.5	Hasil analisa BOD ₅ pada variabel (a) pH 3 dan (b) pH 4 di Katoda	51
Gambar IV.6	Hasil reduksi logam Cr ⁶⁺ pada (a) pH 3 dan (b) pH 4 di Katoda.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Jenis – jenis <i>Fuel Cell</i>	13
Tabel II.2 Perbandingan Kondisi Sistem <i>Fuel Cell</i> Biasa dengan MFC	13
Tabel II.3 Penggunaan Berbagai Jenis Substrat dan Mikroorganisme pada <i>MicrobialFuel Cell</i>	18
Tabel II.4 Perkembangan Penelitian <i>Microbial Fuel Cell</i> sebagai Penghasil Listrik	26
Tabel III.1 Rencana dan Jadwal Kegiatan Penelitian Tahun 2017-2018.....	37

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Saat ini kebutuhan energi, khususnya energi listrik mengalami peningkatan dengan pesat. Hal ini sudah selayaknya sebagai dampak meningkatnya seluruh aktivitas kehidupan yang menggunakan energi listrik. Muchlis dan Adhi (2002) menyatakan bahwa pertumbuhan kebutuhan listrik nasional mengalami peningkatan sebesar 6,5% per tahun, dan diperkirakan pada tahun 2020 kebutuhan listrik di Indonesia mencapai 272,34 TWh.

Selama ini pemenuhan energi listrik berasal dari pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil, seperti batu bara, minyak bumi dan gas (Arota, 2013). Berdasarkan Data Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM) 2006 pemakaian energi di Indonesia saat ini lebih dari 90 % menggunakan energi fosil, yaitu minyak bumi 51,66 %, gas bumi 28,57 %, batu bara 15,34 %, sedangkan sumber energi lain meliputi tenaga air 3,11 %, panas bumi 1,32 %, serta energi baru dan terbarukan (EBT) yang hanya sekitar 0,2 %. Tingginya penggunaan minyak bumi dan gas alam sebagai sumber energi berdampak pada menipisnya cadangan fosil tersebut. Cadangan minyak bumi dan gas bumi Indonesia hanya 1% dan 1.4% dari total cadangan minyak dan gas dunia. Cadangan minyak bumi Indonesia hingga tahun 2030 diperkirakan sekitar 9,1 barel dengan produksi sebesar 387 barel/tahun maka rasio cadangan minyak bumi tersebut tanpa eksploitasi baru hanya mampu bertahan selama 23 tahun mendatang sedangkan kebutuhan energi Indonesia hingga tahun 2030 sekitar 504.46 miliar barel (Luciana, 2017). Hal ini mengindikasikan bahwa Indonesia mengalami keterbatasan energi dan terancam mengalami krisis energi di masa mendatang.

Selain itu pembakaran bahan bakar fosil mempunyai pengaruh negatif terhadap lingkungan karena adanya emisi gas CO₂, NO_x dan SO₂ yang dapat menimbulkan pencemaran udara dan dihasilkan pula polutan radioaktif (Asri, 2016). Kenaikan jumlah gas CO₂ dalam udara akan meningkatkan efek rumah kaca yang dapat mengakibatkan pemanasan global, dan berdampak pada perubahan iklim serta rusaknya ekosistem di bumi (Finahari, 2007).

Permasalahan lain yang ada di Indonesia yaitu limbah industri. Dengan semakin pesatnya perkembangan industri, jumlah limbah industri juga akan semakin meningkat. Salah satu limbah yang berbahaya adalah limbah logam berat Chromium (VI) yang biasanya berasal dari industri pelapisan logam (*electroplating*), industry cat/pigmen dan industry penyamakan kulit (*leather tanning*) (Slamet, 2003). Pencemaran lingkungan oleh logam berat mendapat perhatian besar karena merupakan polutan yang bersifat toksik, baik pada hewan maupun tumbuhan dan berpotensi menimbulkan kerusakan ekosistem bila konsentrasinya melebihi batas ambang. Sifat toksik diantaranya ditentukan oleh bentuk ion krom dan konsentrasinya. Krom serta bentuk-bentuk turunannya yang terdapat di alam terutama berasal dari kegiatan antropogenik seperti emisi dari industri, proses-proses pembakaran dan lain-lain (Bielicka dkk., 2005).

Logam berat, termasuk kromium (Cr) merupakan zat pencemar yang umumnya sangat reaktif dan bersifat toksik bagi manusia sehingga termasuk ke dalam golongan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Cr (VI) secara alami dapat ditemukan dalam batuan, hewan, tumbuhan, tanah, abu atau gas vulkanik, dan dari berbagai aktivitas manusia seperti kegiatan penambangan (Kromit dan batubara) serta limbah hasil kegiatan industri seperti industri cat, baja, tekstil, kulit, semen, keramik, dan kertas (Khairani, dkk., 2007).

Logam kromium (Cr) merupakan salah satu contoh logam berat. Logam kromium (Cr) terdiri atas ion logam Cr (VI) dan ion logam Cr (III). Ion logam Cr(VI) dimungkinkan dalam bentuk dikromat ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), hidrokromat (HCrO_4) atau kromat (CrO_4^{2-}) sedangkan ion logam Cr(III) dalam bentuk kromium valensi tiga berhidrat (*hydrated trivalent chromium*), $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ dan kompleks hidoksida kromium ($\text{Cr}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$ atau $\text{Cr}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4^+$). Adanya dua keadaan oksidasi dari Cr tersebut mengakibatkan perbedaan toksisitas dan karakteristik transport. Ion logam Cr(VI) adalah sangat toksik sedangkan ion logam Cr(III) adalah kurang (Silva *et al*, 2009). Tingkat toksisitas Cr (III) hanya sekitar 1/100 kali Cr (VI). Bahkan dari penelitian lebih lanjut, ternyata Cr (III) merupakan suatu jenis nutrisi yang dibutuhkan tubuh manusia dengan kadar sekitar 50 – 200 $\mu\text{g}/\text{hari}$. Cr (VI) mudah larut dalam air dan membentuk *divalent oxyanion* yaitu *chromate* (CrO_4^{2-}) dan *dichromate* ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), sedangkan Chromium trivalent/Cr (III) mudah diendapkan atau diabsorpsi oleh senyawa – senyawa organik dan anorganik pada pH netral atau alkali (Slamet, 2003).

Pengolahan limbah logam Cr (VI) merupakan tantangan di bidang air dan pengolahan air limbah. Pengolahan limbah logam Cr (VI) dalam air limbah industri dapat dilakukan dengan berbagai proses kimia fisika seperti adsorpsi, sedimentasi, pemisahan elektrokimia, pertukaran ion, filtrasi dan proses membran, presipitasi kimia, dan ekstraksi pelarut (Sophia, 2016). Tetapi metode-metode ini juga memerlukan energi dan mungkin akan menghasilkan polutan yang lain.

Selain limbah logam, industri di Indonesia juga menghasilkan limbah Molases (tetes tebu) yang merupakan hasil samping dari industri pengolahan gula yang masih mengandung gula cukup tinggi. Kandungan gula molase terutama sukrosa berkisar 48 – 55% (Sebayang, 2006). Jumlah molase yang dihasilkan di Indonesia mencapai 1,3

juta ton per tahun dan belum dimanfaatkan dengan maksimal (Pramana, 2008).

Limbah industri kimia (limbah logam Cr dan molase) 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* dewasa ini masih terus berkembang pesat dan disempurnakan. *Fuel cell* adalah teknologi elektrokimia yang secara kontinyu mengkonversi energy kimia menjadi energy listrik selama terdapat bahan bakar dan pengoksidan (Shukla *et al.*, 2004). *Fuel cell* tersusun atas anoda, katoda dan elektrolit (membrane).

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 elektrolyt 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). *Microbial Fuel Cell* menggunakan bakteri sebagai katalis untuk mengoksidasi bahan organik dan anorganik serta menghasilkan arus listrik. Proses oksidasi pada anoda dan proses reduksi pada katoda mampu menghasilkan energi listrik. MFCs tidak memerlukan katalis metal pada anoda, melainkan mikroorganisme yang secara biologis mampu mengoksidasi materi organik dan

mentransfer electron ke anoda. Sementara itu, proton dipisahkan dan ditransfer ke katoda. Bakteri pada *Microbial Fuel Cell* tidak secara langsung mentransfer electron yang dihasilkan ke aseptor electron terminalnya, melainkan menyalurkan ke elektroda (anoda). Elektron – elektron kemudian dikonduksikan mendekati katoda sehingga menghasilkan energy listrik (Timotius, 2016).

MFCs yang dikembangkan oleh Mohan, S, V dkk (2007) masih menggunakan sistem batch. Penggunaan sistem batch memiliki beberapa kekurangan yaitu dalam skala industri sistem batch membutuhkan volume dan ruang yang besar karena semua substrat yang akan direaksikan dimasukkan dalam waktu yang bersamaan, lalu bakteri yang digunakan terhitung besar karena substrat yang akan diuraikan juga banyak. Serta produksi listrik akan mengalami penurunan dikarenakan bakteri tidak memperoleh substrat tambahan untuk terus berkembangbiak yang selanjutnya akan berdampak pada kematian bakteri. Kekurangan lainnya yaitu kemampuan reduksi logam akan berkurang karena proton (H^+) dan electron (e^-) yang dihasilkan pada sisi anoda akan semakin berkurang sebagai dampak dari kematian bakteri, Sehingga diperlukan pengembangan penelitian mengenai pengolahan limbah molases sebagai sumber energi listrik serta reduksi logam berat Cr (VI) dengan pemanfaatan bakteri *Shewanella oerindensis* dalam reaktor dual chamber *Microbial Fuel Cell* (MFC) sistem kontinyu.

I.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana proses pemanfaatan limbah molases dan limbah logam berat secara optimal sebagai bahan baku untuk menghasilkan listrik dalam sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC) secara resirkulasi kontinyu?
2. Bagaimana pengaruh *ratio recycle* pada ruang anoda dan katoda serta pengaruh pH di katoda terhadap banyaknya

reduksi logam dan energi yang dihasilkan secara *Microbial Fuel Cell* (MFC) system resirkulasi kontinyu?

I.3 Tujuan Penelitian

1. Mempelajari proses pemanfaatan limbah molases dan limbah logam berat Cr^{6+} yang optimum untuk menghasilkan listrik dengan *Microbial Fuel Cell* (MFC) sistem resirkulasi kontinyu.
2. Mengetahui pengaruh *ratio recycle* pada ruang anoda dan katoda serta pengaruh pH di katoda terhadap banyaknya reduksi logam dan energi yang dihasilkan secara *Microbial Fuel Cell* (MFC) system resirkulasi kontinyu.

I.4 Manfaat Penelitian

1. Untuk mengetahui cara memanfaatkan limbah bahan organik secara optimal dimana mempunyai potensi sebagai bahan baku untuk menghasilkan listrik.
2. Untuk mengetahui *ratio recycle* dan pH yang tepat dalam pembentukan listrik dengan menggunakan metode *Microbial Fuel Cell* (MFC) sistem resirkulasi kontinyu.
3. Untuk mengetahui konsentrasi penurunan limbah Cr (VI) pada sisi katoda dalam metode *Microbial Fuel Cell* (MFC) sistem resirkulasi kontinyu dengan menggunakan mikroba *Shewanella oneidensis* pada sisi anoda.

I.5 Batasan Masalah

Batasan penelitian dari penelitian ini adalah:

1. Reaktor yang digunakan dalam sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC) ini adalah reaktor dual-chamber.
2. Reagen di anoda menggunakan larutan organik limbah cair pabrik gula (molases) dengan konsentrasi 5% terhadap campuran substrat organik serta dengan perbandingan konsentrasi bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 12,5 % (v/v).

3. Reagen di katoda menggunakan larutan logam Cr (VI) dengan konsentrasi 8 mg/L + larutan buffer untuk mengatur pH
4. Sistem penukar kation pada reaktor *Microbial Fuel Cell* (MFC) adalah jembatan garam. Jembatan garam dibentuk dengan larutan KCl bercampur dengan agar.
5. Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis elektroda grafit batang.
6. pH yang digunakan pada reaktor anoda adalah pH 7 dan di katoda pH 3 dan 4.
7. *Flowrate* limbah masuk ruang anoda dan katoda masing-masing adalah 0,4 liter per jam.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Kromium (Cr)

Kromium merupakan logam yang keras, tahan panas, elektropositif, dan merupakan penghantar panas yang baik. Kromium ini merupakan sebuah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang Cr dengan nomor atom 24, memiliki berat atom 51,996, titik cair 1875 °C, titik didih 2665 °C, dan massa jenis 7,19 g/ml. Toksisitas unsur Cr terhadap organisme perairan tergantung pada bentuk kromium, bilangan oksidasinya, dan pH. Penurunan pH dan kenaikan suhu dapat meningkatkan toksisitas Cr^{6+} terhadap organisme air. Toksisitas Cr^{6+} lebih besar daripada toksisitas Cr^{3+} . Cr^{6+} yang larut di dalam air sebagian besar diserap oleh ikan melalui insang sehingga akumulasinya paling banyak didapatkan pada insang dari pada organ lainnya. Kromium dapat menyebabkan iritasi kulit dan mata, serta dapat menyebabkan gangguan saluran pencernaan (Giacinta, 2012).

Di alam unsur ini tidak ada dalam bentuk logam murni. Sumber alami kromium sangat sedikit, yaitu batuan *chromite* (FeCr_2O_4) dan *chromic oxide* (Cr_2O_3). Di perairan alami kromium jarang ditemukan dan biasanya dalam bentuk kromium trivalent (Cr^{3+}) dan kromium hexavalent (Cr^{6+}). Sumber Cr^{6+} berasal dari industri pelapisan logam dan produksi pigmen. Cr^{3+} banyak terdapat dalam limbah industri pencelupan tekstil, keramik gelas, dan dari kegiatan penyamakan kulit.

Kadar kromium pada perairan tawar biasanya kurang dari 0,001 mg/l dan pada perairan laut sekitar 0,00005 mg/l. Kromium trivalent biasanya tidak ditemukan pada perairan tawar, sedangkan pada perairan laut sekitar 50% kromium merupakan kromium trivalent. Kadar kromium yang diperkirakan aman bagi kehidupan akuatik adalah sekitar 0,05 mg/l. Kadar kromium 0,1 mg/l dianggap berbahaya bagi kehidupan organisme laut. Kadar maksimum kromium untuk keperluan air baku air minum dan

kegiatan perikanan menurut Peraturan Pemerintah No. 82 tahun 2001 adalah sebesar 0,05 mg/l (Apriadi, 2005).

Kromium dapat menyala atau mudah menyala, dapat terbakar secara spontan apabila terpapar di udara, atau bila debu kromium bercampur dengan udara dapat terbakar atau meledak. Kromium tidak dapat bercampur dengan basa, oksidator, halogen, peroksida dan logam – logam.

II.2 *Shewanella oneidensis*

Genus *Shewanella* merupakan proteobacteria gram-negatif berbentuk batang (panjang 2 – 3 μm dan berdiameter 0,4 – 0,7 μm). Bakteri ini merupakan bakteri anaerob fakultatif yang biasa di temukan dalam sedimen laut (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).

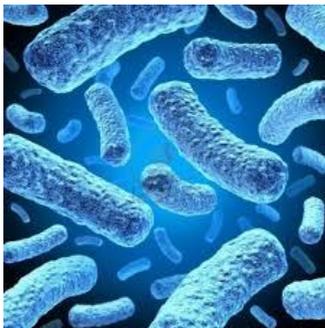
Karakter khusus dari *Shewanella* adalah kemampuannya dalam menangkap elektron dalam kondisi kekurangan oksigen dan kemampuannya dalam bertahan hidup di berbagai macam habitat. Mereka telah diisolasi dari konsentrasi garam, suhu dan tekanan barometrik. (Gralnick dkk, 2007)

Shewanella oneidensis (secara umum dikenal sebagai *Shewanella putrefaciens*) terkenal untuk keragaman terminal penangkap elektron dimana mereka dapat mereduksi dan salah satu keluarga primer dari bakteri yang digunakan dalam MFC (Logan dkk., 2006).

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 : *Shewanella*
Nama Binomial : *Shewanella oneidensis*
(MacDonell dan Colwell., 1985)

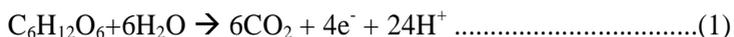


Gambar 2.1 Bakteri *Shewanella oneidensis*

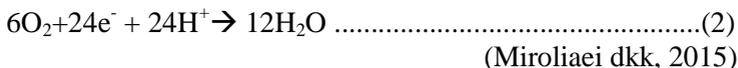
Kapasitasnya dapat bertahan dalam temperatur rendah memberikan organisme ini keuntungan di lingkungan dingin secara permanen seperti pada lautan dan daerah kutub. Kemampuan ini juga berguna di lingkungan dengan fluktuasi temperatur yang besar. Misal, temperatur *Oneida Lake* turun secara dramatis saat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

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

Shewanella sp. adalah bakteri yang memiliki mekanisme berbeda dalam mentransfer elektron ke elektroda. Bakteri ini 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 ditransfer ke bagian katoda berkurang karena hadirnya oksigen sesuai dengan reaksi di bawah ini.



II.3 Fuel Cell

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.

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.

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 cel*

Tabel 2.1. Jenis - jenis Fuel Cell

Jenis	Elektrolit	Suhu Operasi	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 electrolyte (H ⁺)	60 - 100	Kerapatan energi tinggi Memiliki kepekaan	Kendaraan (sedan, bis, minivan) Stasiun

			terhadap CO (<100ppm)	pembangkit panas
Phosporic 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

(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 CO₂, 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 dirumah 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, memungkinkan 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 elektrolyt* (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 elektrolisatenaga solar cell, maka bahan-bahan yang diperlukan 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).

II.4 Microbial Fuel Cell (MFC)

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 (Kordesch dan Simader, 2001).

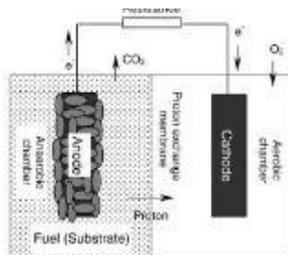
Menurut Lovley (2006), *microbial fuel cell* memiliki beberapa kelebihan yaitu dapat menghasilkan listrik dari bahan organik dan biomassa terbaru. Bakteri mampu menjadi katalis dan beradaptasi dengan baik terhadap bahan organik berbeda yang terdapat pada limbah lingkungan sehingga menghasilkan elektron. Katalis yang digunakan dalam *fuel cell* biasanya berupa platina sehingga memiliki investasi yang lebih mahal, sedangkan pada MFC dapat digantikan oleh pertumbuhan mikroorganisme (Novitasari, 2011). Perbandingan antara *fuel cell* biasa dengan MFC dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.2 Perbandingan Kondisi Sistem *Fuel Cell* Biasa dengan MFC

Kondisi Operasi	<i>Fuel Cell</i> biasa	<i>Microbial Fuel Cell</i>
Katalis	Logam mulis	Mikroorganisme/enzim
pH	Larutan asam (pH<1)	Larutan netral (pH 7 – 9)
Temperatur	>200 ^o C	22 – 25 ^o C
Elektrolit	Asam fosfat	Larutan fosfat
Kapasitas	Tinggi	Rendah
Efisiensi	40 – 60%	>40%
Tipe Bahan Bakar	Gas alam	Karbohidrat dan hidrokarbon

(Idham, 2009)

Microbial fuel cell membangkitkan listrik dengan mengoksidasi bahan organik secara anaerob melalui bantuan bakteri. 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 proton dari ruang anoda menuju ruang katoda melalui membran elektrolit dan aliran elektron yang bergerak ke arah yang sama melalui kabel konduksi. Elektron merupakan partikel subatomik yang bermuatan negatif dimana elektron ini digunakan untuk menghasilkan listrik. Elektron dihasilkan dari metabolisme secara natural yang terjadi di mikroorganisme (Hoogers 2002).



Gambar 2.2 Skema Cara Kerja *Microbial Fuel Cells*(MFCs)

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 2.3 Penggunaan Berbagai Jenis Substrat dan Mikroorganisme pada *Microbial Fuel Cell*

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

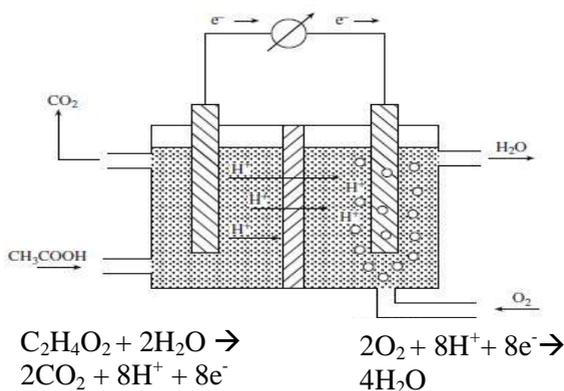
(Idham, 2009)

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.

1. 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 2.3

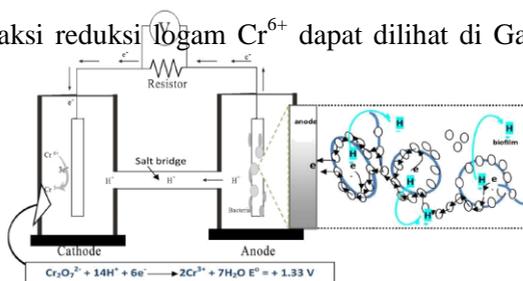


Gambar 2.3 Substrat organik (asam asetat) yang teroksidasi dalam ruang anoda (anaerob); proton dan elektron yang dihasilkan

2. 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

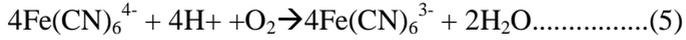
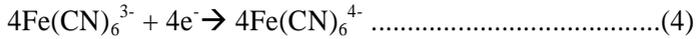
Fe^{3+}). Proses reaksi reduksi logam Cr^{6+} dapat dilihat di Gambar 2.4



Gambar 2.4 Reaksi dari reduksi kromium pada reaktormicrobial 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 ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$) dikenal sangat baik sebagai akseptor elektron dalam sistem MFC. $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ merupakan spesies elektroaktif yang mampu menangkap elektron dengan baik dengan harga potensial reduksi standar sebesar +0,36 V. Keuntungan terbesar dalam penggunaan kalium ferrisianida adalah dihasilkannya overpotensial yang rendah bila menggunakan elektroda karbon. Akan tetapi kerugian terbesar adalah terjadinya proses reoksidasi yang tidak sempurna oleh oksigen sehingga larutannya harus diganti secara teratur. Kinerja jangka panjang ferrisianida dalam sistem MFC sangat dipengaruhi oleh efisiensi difusinya melewati PEM (*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. Fe^{2+} kemudian akan dioksidasi menjadi Fe^{3+} dengan melepaskan elektron dan akan bereaksi dengan H^+ yang datang dari anoda dengan cara melewati *Proton Exchange Membrane*, dan membentuk molekul air. Berikut merupakan reaksi yang terjadi pada kompartemen katoda dalam sistem MFC :



3. 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 2.5 Elektroda Batang Grafit

Sumber : Sidharta, 2007.

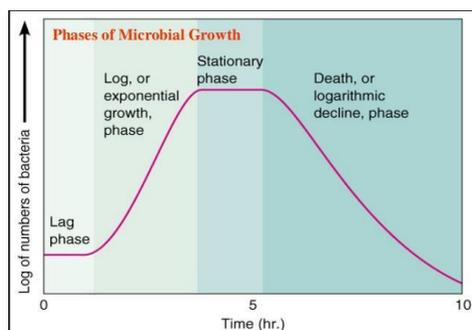
Karbon aktif adalah karbon dengan struktur *amorphous* atau monokristalin yang telah diperlakukan khusus sehingga memiliki luas permukaan yang besar (300 – 2000 m²/gram). Karakteristik karbon yang ideal adalah pada rentang pH 5 – 6, titik leleh 3800°C, dan ukuran partikel kurang dari 50 µm. Resin

perekat berguna untuk merekatkan karbon aktif sehingga memiliki struktur yang kuat dan tidak rapuh selama microbial *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.

4. Pertumbuhan Bakteri

4.1 Kurva Pertumbuhan Bakteri.

Pertumbuhan sel bakteri biasanya mengikuti suatu pola pertumbuhan tertentu berupa kurva pertumbuhan sigmoid yang terlihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.6. 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 *logphase*), 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.

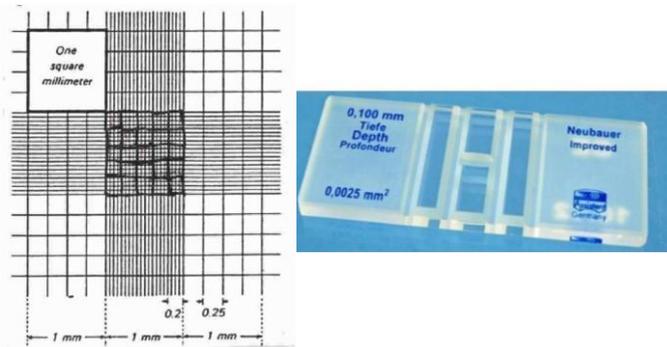
Fase log / pertumbuhan eksponensial. Pada fase eksponensial atau logaritmik, sel berada dalam keadaan pertumbuhan dimana laju pertumbuhan lebih besar daripada laju kematian.

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.

4.2 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* (*coultercounter*). 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 sebuah perangkat ruang hitung yang berupa dua ruang tergores dan penutup yang memiliki ukuran-ukuran tertentu berupa kotak atau petak-petak yang batas-batas garis ukurnya dapat dilihat dengan mikroskop. Setiap kotak ditandai dengan grid persegi seluas 1 mm^2 yang mewakili volume $0,1 \text{ mm}^3$. (Janice Lai, 1999). Skema *counting chamber* dapat dilihat pada Gambar 2.6



Gambar 2.7 Hemasitometer(*Counting Chamber*)

4.3 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 (CO_2). 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 pertumbuhan atau membunuh bakteri. Diantaranya adalah antibiotik, detergen, logam, sanitiser, dan lain-lain.

II. 5 Penelitian Terdahulu

Berikut adalah hasil penelitian tentang *microbial fuel cell* sebagai penghasil listrik yang pernah dilakukan pada beberapa penelitian sebelumnya pada **Tabel 2.4**:

Tabel 2.4 Perkembangan Penelitian *Microbial Fuel Cell* sebagai Penghasil Listrik

No.	Peneliti	Jurnal	Judul	Hasil
1	Nair, Ramya dkk, 2013	<i>International Journal of Advancements in Research & Technology, Volume 2 (2013)</i>	<i>Performance of salt-bridge microbial fuel cell at various agarose concentration using hostel sewage waste as substrate</i>	Membandingkan konsentrasi agar pada jembatan garam untuk masing-masing variabel. Didapatkan hasil arus listrik (I) dan voltase (V) sebanding dengan meningkatnya konsentrasinya dari 7% dengan hasil I= 0,79 mA dan V= 0,75 V, sedangkan pada konsentrasi 10% dihasilkan I= 0,97 mA dan V=0,95 V.
2	Sophia, A, C	<i>Journal of Environmental</i>	<i>Modified microbial</i>	Bakteri <i>Shewanella oerindesis</i> dapat

No.	Peneliti	Jurnal	Judul	Hasil
	dkk, 2016	<i>Chemical Engineering, Volome 4 (2016)</i>	<i>fuel cell for Cr(VI) reduction and simultaneo us bio-electricity production</i>	mereduksi logam Cr(VI) dengan penurunan konsentrasi sebesar 5 mg/L dan 10 mg/L menjadi 0,2 mg/L dan 2 mg/L. Larutan Cr 5 mg/L dihasilkan maksimum <i>power density</i> = 92,65 mW/m ² , untuk larutan Cr 10 mg/L dihasilkan maksimum <i>power density</i> = 75,08 mW/m ² .
3	Eliato, T, R dkk, 2016	<i>Journal Energy Sources, Volume 38 (2016)</i>	<i>Potassium Permanganate as electron receiver in a microbial fuel cell</i>	Digunakan katoda berupa larutan KmnO ₄ dan anoda berupa lumpur dari proses anaerobik dengan konsentrasi 400 µM dihasilkan <i>power density</i> sebesar 93,13 mW/m ² dan <i>COD removal</i> sebesar 51%.
4	Prapti Ira K, 2017	<i>Thesis (2017)</i>	Pengolahan Limbah Logam Cr sebagai penghasil Bio-Listrik dengan Menggunakan Reaktor Microbial Fuel Cell	pH 4 adalah yang kondisi terbaik untuk menghasilkan power density dan reduksi Cr(VI) terbesar.

No.	Peneliti	Jurnal	Judul	Hasil
5	Aprillia A & Nora Ellyza, 2017	<i>Skripsi (2017)</i>	Pemanfaatan Bakteri <i>E. Coli</i> dan <i>Shewanella oerindesis</i> dalam Limbah Organik pada Produksi Listrik <i>Microbial Fuel Cell</i> (MFC)	Digunakan katoda berupa larutan $K_3Fe(CN)_6$ 0,1 M dan anoda berupa limbah organik pabrik gula (tetes) dengan 2 jenis bakteri. Didapatkan hasil konsentrasi bakteri <i>E. Coli</i> dan <i>Shewanella oerindesis</i> terbaik dalam menghasilkan tegangan listrik masing-masing yaitu 12,5% (v/v).

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 2018 – Mei 2018. Penelitian yang dilaksanakan meliputi : 1) Perancangan reaktor *microbial fuel cell* system resirkulasi kontinyu, 2) Persiapan bakteri, 3) Persiapan reagen di katoda 4) Proses bio-listrik pada *microbial fuel cell* 5) Analisa pH, produksi listrik, dan kandungan Cr (VI) yang tereduksi.

III.1 Kondisi Operasi

- Suhu =20 – 30°C
- Tekanan =1 atm
- Waktu =10 hari
- Elektroda =Grafit (karbon aktif) batang silinder Diameter 5 cm dan Tinggi = 30 cm
- pH di larutan anoda =7
- Jenis bakteri di anoda =*Shewanella oneidensis MR-1* + bakteri dari molases
- Konsentrasi larutan Cr(VI) =8 mg/L + larutan buffer (mengatur pH)
- Volume larutan di anoda dan katoda =10 L
- Konsentrasi molases =5% (v/v) terhadap campuran substrat organik
- Konsentrasi bakteri =12,5% (v/v) terhadap campuran substrat

- | | |
|--------------------------------|---|
| | organik dengan populasi bakteri $\pm 10^7$ sel/ml |
| ▪ Flowrate limbah masuk anoda | =0,4 Liter per Jam |
| ▪ Flowrate limbah masuk katoda | =0,4 Liter per Jam |

III.2 Variabel Penelitian

- | | |
|------------------------------------|------------------|
| - <i>Ratio recycle</i>
dan 0,85 | = 0,5; 0,6; 0,75 |
| - pH ruangkatoda | = 3 dan 4 |

III.3 Bahan, Alat dan Skema Alat Penelitian

III.3.1 Bahan Penelitian

Bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah:

- Aquadest
- Biakanbakteri *Shewanella oneidensis MR-1*
- HCl 1M dan NaOH 1M
- Padatan kalium klorida (KCl)
- Agar batang
- Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$) 0,1 M
- Na_2HPO_4 (Disodium fosfat)
- Natrium Sitrat atau Sodium sitrat ($Na_3C_6H_5O_7$) 0,1 M
- Padatan kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$)
- Limbah pabrik gula (Molasses)
- Yeast extract, Pepton, NB
- NaH_2PO_4 (Mono sodium fosfat)

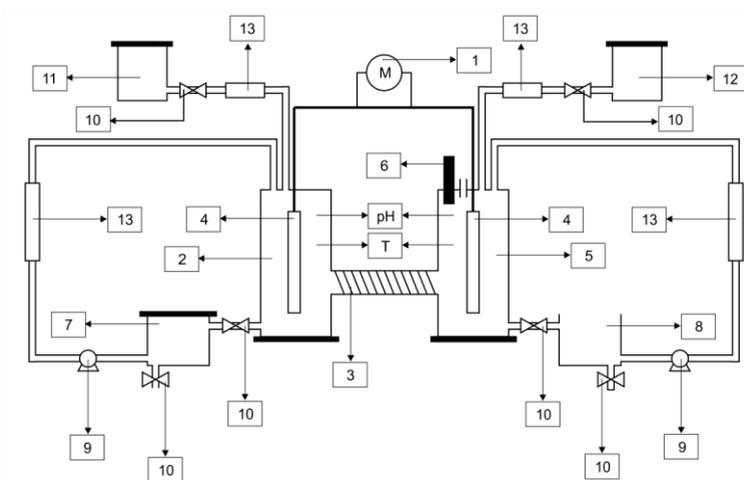
III.3.2 Alat Penelitian

Alat Penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

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

- Pompa
- Autoclave
- pH meter
- Air Pump
- *Flowmeter*
- Multimeter (voltmeter dan amperemeter)
- Mikroskop

III.3.3 Skema Alat Penelitian

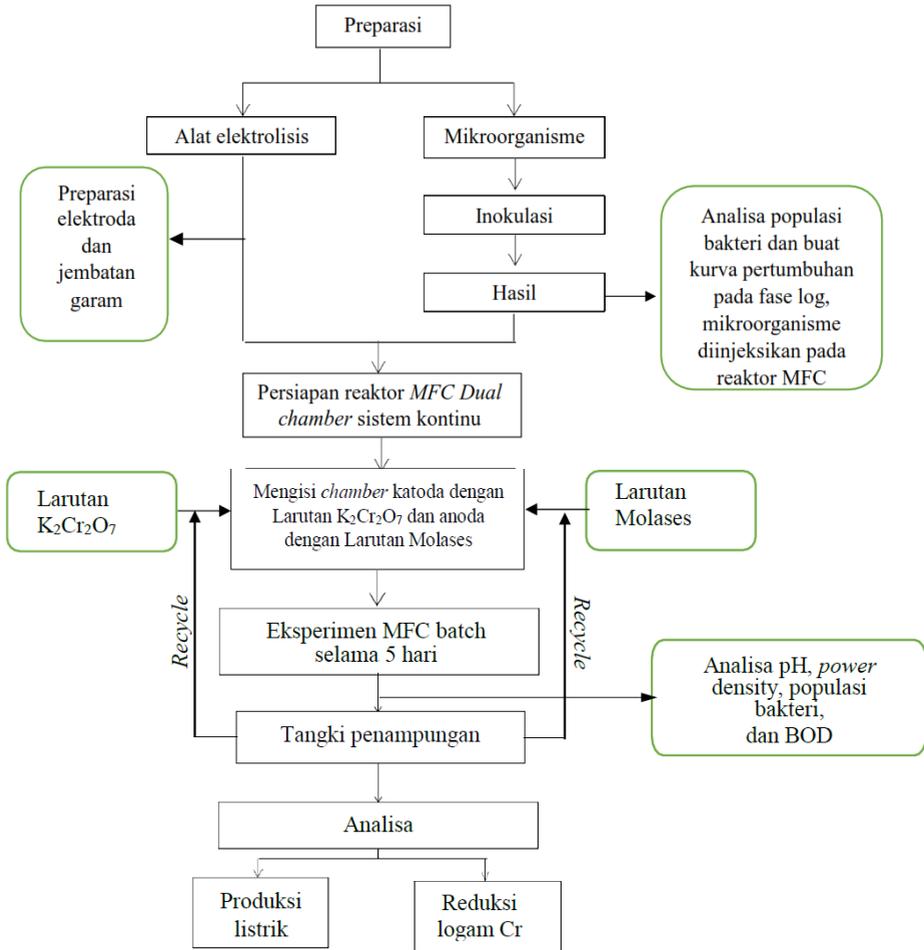


Gambar III.1 Rangkaian alat *microbial fuel cells*

Keterangan gambar:

- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1. Multimeter | 2. Ruang Anoda | 3. Jembatan Garam |
| 4. Elektroda | 5. Ruang Katoda | 6. pH meter |
| 7. Bak sisa limbah molase | 8. Bak sisa larutan logam Cr | 9. Pompa <i>recycle</i> |
| 10. <i>Valve</i> | 11. Tangki molases | 12. Tangki larutan logam Cr |
| 13. <i>Flowmeter</i> | | |

III.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar III.2 Diagram Alir *Microbial Fuel Cells*

III.5 Prosedur Penelitian

III.5.1 Persiapan Penelitian

a. Pembuatan larutan buffer sitrat pH 4

- pH 3

Membuat larutan asam sitrat 0,1 M (21,04 g Asam sitrat dalam 1L aquades) dan larutan sodium sitrat 0,1 M (29,41 g Sodium sitrat / Natrium sitrat dalam 1L aquades). Lalu mencampur (46,5 mL larutan asam sitrat 0,1 M) + (3,5 mL larutan sodium sitrat 0,1 M) dan dilarutkan aquadest sampai volume mencapai 100 mL.

- pH 4

Membuat larutan asam sitrat 0,1 M (21,04 g Asam sitrat dalam 1L aquades) dan larutan sodium sitrat 0,1 M (29,41 g Sodium sitrat / Natrium sitrat dalam 1L aquades). Lalu mencampur (33 mL larutan asam sitrat 0,1 M) + (17 mL larutan sodium sitrat 0,1 M) dan dilarutkan aquadest sampai volume mencapai 100 mL.

b. Pembuatan larutan buffer fosfat pH 7

Menimbang NaH_2PO_4 sebanyak 0,4063 gram dan Na_2HPO_4 sebanyak 0,9247 gram. Kemudian melarutkan semua dalam 500 mL aquadest.

c. Pembuatan larutan logam Cr(VI)

Larutan Cr (VI) 8 mg/L untuk 10 L dibuat dengan menghitung kebutuhan kalium dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) secara kuantitas. Kemudian melarutkan kedalam 5L aquadest dan menambahkan 5L larutan buffer sitrat.

d. Pembuatan Media Cair dan Biakan Bakteri

Mensterilkan erlenmeyer kedalam autoklaf kemudian didinginkan. Membuat media cair dengan bahan yeast extract, pepton, dan padatan nutrient broth masing-masing 1 gr kemudian melarutkan dalam beaker glass berisi 1L aquadest yang dipanasi hingga mendidih. Setelah media cair dingin lalu dituangkan kedalam erlenmeyer steril, kemudian menginkubasi bakteri menggunakan jarum ose

kedalam erlenmeyer, tutup bagian atas erlenmeyer menggunakan kapas steril dan diinkubasi hingga fase log.

e. Preparasi aktivasi elektroda

Elektroda grafit silinder direndam ke dalam larutan HCl 1M selama 1 hari kemudian dibilas dengan menggunakan aquades. Lalu rendam di larutan NaOH 1M selama 1 hari, setelah itu rendam dalam aquades hingga saat akan digunakan (Novitasari, 2011).

f. Pembuatan jembatan garam

Melarutkan 10 gram agar batang dalam 100 mL air, kemudian menambahkan 4 gram kalium klorida. Memanaskan hingga mendidih, lalu dinginkan. Masukkan cairan agar tersebut kedalam selang / pipa, tunggu hingga agar padat. Kemudian menghubungkan jembatan garam dengan kompartemen anoda dan katoda.

III.5.2 Proses eksperimen

a. Proses eksperimen *microbial fuel cells*

- 1) Ruang katoda dan anoda dipisahkan menggunakan jembatan garam seperti pada gambar 3.1.
- 2) Pada ruang anoda diisi dengan larutan organik berupa limbah pabrik gula (tetes) dan diinjeksi mikroorganisme *Shewanella oneidensis MR-1* ketika berada di fase log dengan mengondisikan jumlah sel minimal 10^6 sel/ml sebanyak 12,5% (v/v). Serta dilakukan penambahan buffer fosfat untuk menjaga pH dalam anoda sebesar 7.
- 3) Membiarkan molases yang ditumbuhi oleh bakteri selama 4 hari.
- 4) Ruang katoda diisi dengan larutan Cr(VI) dan ditambah dengan larutan buffer sitrat hingga mencapai pH yang diinginkan.
- 5) Kemudian elektroda dipasang di masing-masing ruang dan dihubungkan dengan rangkaian kabel seperti pada gambar 3.1
- 6) Menyalakan pompa dan mengatur *flowmeter* sesuai dengan *ratio recycle* pada variable yaitu 0,5; 0,6; 0,75 dan 0,85.

- 7) Diamati nilai arus listrik dan tegangan yang tertera pada layar digital multimeter hingga stabil dan dicatat. Kemudian menghitung *power density* dengan persamaan (3).

b. Pengambilan sampel

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

III. 6 Tahap Analisa Penelitian

a. Analisa pH

Pengukuran pH menggunakan pH meter di 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)

$$Power\ density\ \left(\frac{mW}{m^2}\right) = \frac{I\ (mA) \times V(Volt)}{A(m^2)} \quad \dots 3$$

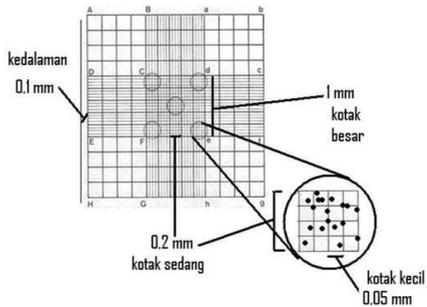
Dimana I sebagai kuat arus, V sebagai beda potensial dan A adalah luas permukaan elektroda.

c. Analisa Populasi bakteri

Analisa populasi bakteri menggunakan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Diencerkan 0,1 mL sampel dengan aquades 9,9 mL (pengenceran 100 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
 $= \text{jumlah sel rata rata} \times \frac{1}{25} \times \frac{1}{0,1}$
- Hitung jumlah sel sebenarnya
 $= \text{jumlah sel per } \text{mm}^3 \times \text{faktor pengenceran}$

d. Analisa BOD

Pengukuran kebutuhan oksigen kimiawi (BOD) mengacu pada SNI 6989.72:2009.

e. Analisa Kandungan Cr

Pengukuran logam Krom mengacu pada SNI 6979.71.2009

III. 7 Rencana Jadwal Kegiatan

Tabel 3.1.Rencana dan Jadwal Kegiatan Penelitian
Tahun 2017-2018

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

IV.1 *Microbial Fuel Cell (MFC) Sistem Resirkulasi Kontinyu*

Penelitian ini menggunakan reaktor *dual chamber Microbial Fuel Cells* (MFCs) sistem resirkulasi kontinyu, dimana produk dari reaktor akan di-*recycle* dan dimasukkan kembali kedalam reaktor dengan ratio tertentu. Kompartemen anoda diisi dengan limbah organik pabrik gula (molases) dengan konsentrasi 5% sebagai substrat, biakan bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* dengan konsentrasi 12,5% sebagai penghasil elektron dan proton, serta larutan buffer fosfat pH 7 sebagai pengkondisi netral untuk perkembang biakan bakteri. Kondisi operasi dalam kompartemen anoda adalah anaerob. Bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* merupakan bakteri fakultatif anaerob, sehingga dapat melakukan respirasi aerob menggunakan oksigen sebagai akseptor elektron dan dapat melakukan respirasi dibawah kondisi aerob. Sedangkan kompartemen katoda diisi limbah logam berat Cr (VI) sintesis dengan konsentrasi 8 mg/L, dan larutan buffer sitrat dengan pH sesuai variable (3 atau 4) sebagai pengkondisian suasana asam untuk mereduksi logam. Kondisi operasi untuk kompartemen katoda adalah aerob (memerlukan oksigen). Konsentrasi Cr (VI) dibuat sintesis 8 mg/L karena mengambil data dari pencemaran sungai bengawan solo (Susanti, 2014). Nilai ambang batas yang ditetapkan WHO dan KLH untuk cemaran logam Cr (VI) adalah sebesar 0 ppm (Sari, 2008).

Volume reaktor adalah 15 liter. Chamber katoda dan anoda dihubungkan dengan jembatan garam yang berfungsi sebagai proton exchanger. Selain itu, elektroda batang grafit dipasang pada masing – masing chamber yang disambungkan dengan kabel tembaga sebagai media untuk transfer elektron, serta multimeter sebagai pengukur kuat arus (I) dan voltase (V) yang dihasilkan. Bak penampung diletakkan di bawah reaktor sebagai tempat penampungan bottom product yang selanjutnya akan dipompa dan dimasukkan kembali kedalam reaktor utama

dengan flowrate tertentu yang diatur dengan menggunakan flowmeter. Bak penampung juga diletakkan diatas reaktor utama sebagai penampung fresh feed yang selanjutnya akan di alirkan kedalam reaktor utama menggunakan prinsip gravitasi dengan flowrate tertentu yang diatur dengan flowmeter pada tiap akan melakukan recycle. Recycle yang dilakukan berdasarkan variabel recycle ratio (RR) sesuai variabel yang sudah ditentukan. Rangkaian reaktor *Microbial Fuel Cells* (MFCs) sistem resirkulasi kontinyu dapat dilihat pada gambar 4.1.

Berdasarkan pada panelitian Prakoso (2018), jumlah bakteri mengalami kenaikan pada hari ke 0 sampai hari ke 5, kemudian mengalami penurunan pada hari ke 6 sampai hari ke 12. Oleh karena itu, reaktor beroperasi dengan sistem batch selama 5 hari. Reaktor beroperasi selama 9 hari, dimana 5 hari beroperasi secara *batch* dan 4 hari selanjutnya beroperasi secara kontinyu. Proses *batch* pada 5 hari pertama dilakukan dengan tujuan untuk memberikan waktu kepada bakteri beradaptasi dengan lingkungan baru, mendegradasi larutan molases pada reaktor utama sebelum dilakukan proses *recycle* sehingga berakibat pada produksi listrik serta untuk mereduksi logam berat pada kompartemen katoda. Apabila dilakukan proses kontinyu secara langsung, maka akan tidak efisien karena membuang larutan molases dan larutan logam yang masih mempunyai kadar pencemaran yang tinggi dan masih bisa dimanfaatkan untuk proses MFC. Proses kontinyu dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Pembuatan larutan molases baru (*fresh feed*) sebanyak 9,6 L dengan konsentrasi molases 5% dan konsentrasi bakteri 12,5%. Kemudian memasukkan larutan tersebut kedalam bak penampung diatas reaktor utama kompartemen anoda.
2. Pembuatan larutan logam Cr (VI) baru (*fresh feed*) sebanyak 9,6 L dengan konsentrasi 8 ppm dan kondisi pH sesuai dengan variabel. Kemudian memasukkan larutan tersebut kedalam bak penampung diatas reaktor utama kompartemen katoda.

3. Membuka valve pada reaktor utama yang menuju ke bak penampungan bottom product pada masing – masing kompartemen.
4. Membuka valve dan mengatur *flowrate* pada aliran *fresh feed* menuju ke reaktor utama dengan *rate* sebesar 0,4 Liter/Jam pada masing – masing kompartemen.
5. Menyalakan pompa dan mengatur *flow rate* aliran dari *bottom product* ke dalam reaktor utama dengan cara membuka valve sesuai dengan *recycle ratio* masing – masing variabel.
6. Mengamati proses *recycle* dan menjaga *flowrate* tetap pada kondisi konstan.

Parameter yang dianalisa dan dihitung setiap hari yaitu *power density*, pH dan jumlah populasi bakteri. Sedangkan parameter yang dianalisa dan dihitung setiap dua hari yaitu reduksi BOD dan reduksi logam berat Cr^{6+} .



Gambar 4.1 Reaktor *dual chamber Microbial Fuel Cell*(MFC) sistem resirkulasi kontinyu

Mekanisme kerja reaktor *microbial fuel cell* sistem resirkulasi kontinyu pada penelitian ini yaitu pertama, bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* melakukan metabolisme yang melibatkan larutan molasses sebagai substrat sehingga menyebabkan degradasi senyawa organik di kompartemen anoda. Metabolisme ini berlangsung secara anaerob yang menghasilkan elektron (e^-) dan proton (H^+) dengan reaksi :

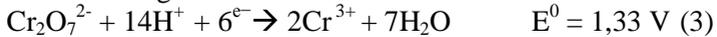


Kedua, elektron (e^-) dan proton (H^+) yang telah dihasilkan akan ditransfer ke kompartemen katoda dengan mengikuti prinsip kerja sel volta. Elektron dari bakteri melewati elektroda (grafit) di kompartemen anoda dan kemudian melalui sirkuit menuju kompartemen katoda. Perbedaan potensial dalam aliran elektron dapat menghasilkan *power density*. Sedangkan proton (H^+) melewati *Proton Exchange Membrane* (PEM) dari kompartemen anoda menuju ke kompartemen katoda.

Ketiga, elektron (e^-) dan proton (H^+) bereaksi dengan ion dikromat ($Cr_2O_7^{2-}$) yang ada di kompartemen katoda, ion ini dibentuk dengan reaksi sebagai berikut:



Elektron (e^-) dan proton (H^+) bereaksi dengan ion dikromat ($Cr_2O_7^{2-}$) membentuk ion Cr^{3+} atau biasa dikenal dengan reaksi reduksi sebagai berikut :



Selain itu proton dan elektron juga bereaksi dengan oksigen (O_2) untuk membentuk air dengan reaksi sebagai berikut :

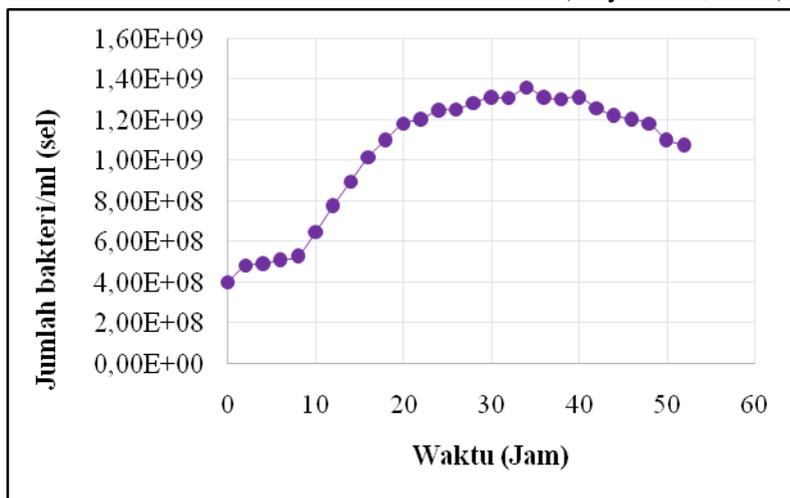


Akibat terjadinya transfer elektron dari anoda ke katoda, muatan yang ada pada masing – masing *chamber* menjadi tidak seimbang. Oleh karena itu, proses penyeimbangan muatan akan terjadi dengan cara memanfaatkan *Proton Exchange Membrane* (PEM) yang mengandung ion K^+ dan Cl^- . Karena kompartemen anoda kehilangan elektron, untuk menstabilkannya maka muatan ion Cl^- dari PEM akan berpindah menuju kompartemen anoda. Sedangkan dalam kompartemen katoda yang menerima elektron memiliki muatan negatif, sehingga membutuhkan ion K^+ dari PEM untuk menstabilkan muatannya. K^+ masuk ke kompartemen katoda untuk membuat seimbang kadar ion dikromat atau permanganat yang tereduksi. Kemudian Ion H^+ dari kompartemen anoda bergerak ke kompartemen katoda untuk menggantikan ion K^+ .

IV.2 Prinsip Kerja Bakteri *Shewanella oneidensis MR-1*

Bakteri memiliki peran penting pada proses *Microbial Fuel Cells* (MFC) yaitu untuk mengoksidasi substrat organik. Pada penelitian ini, bakteri yang digunakan adalah *Shewanella oneidensis MR-1* dengan konsentrasi 12,5% (v/v). Bakteri diinjeksikan ke dalam larutan molasses yang ada pada kompartemen anoda ketika berada di fase log dengan jumlah sel minimal 10^6 sel/ml. Pada fase log bakteri mengalami pertumbuhan secara cepat. Selain itu, kebutuhan akan energi bagi bakteri pada fase log lebih tinggi dibandingkan dengan fase pertumbuhan lainnya. Sehingga diharapkan banyak proton dan elektron yang dihasilkan dari proses metabolisme bakteri tersebut.

(Setyati dkk, 2015)



Gambar 4.2 Kurva pertumbuhan bakteri *Shewanella oneidensis MR-1*

(Ayuningtyas dkk, 2017)

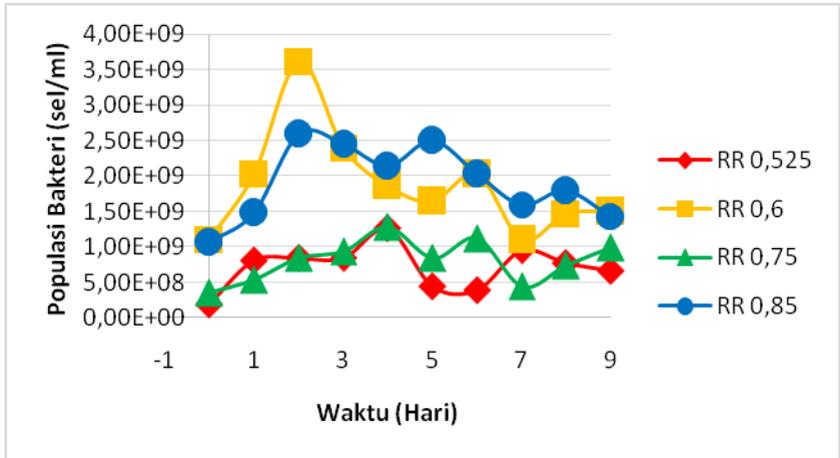
Berdasarkan kurva pertumbuhan bakteri pada Gambar 4.2, fase log untuk bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* terjadi pada jam ke-8 hingga jam ke-30, sehingga bakteri dimasukkan ke dalam kompartemen anoda setelah inkubasi 8 jam.

Metabolisme bakteri untuk menghasilkan proton dan elektron melalui tahap berikut :

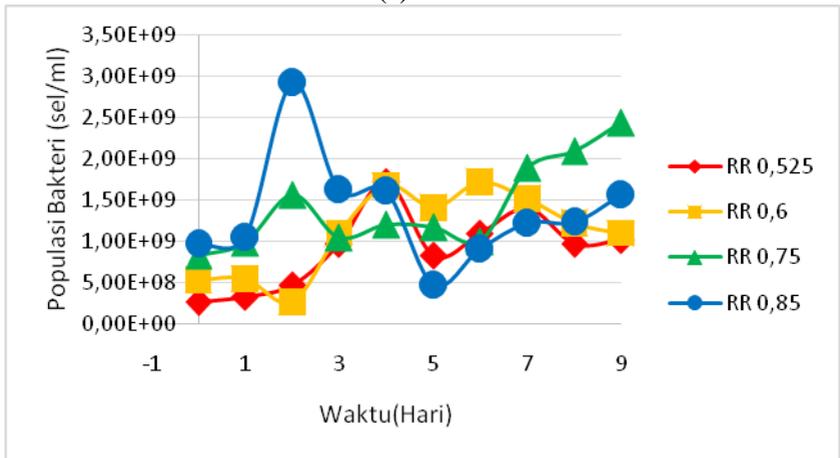
1. Pertama terjadi proses glikolisis dimana glukosa akan terurai secara enzimatik untuk menghasilkan dua molekul asam laktat yang memiliki tiga atom karbon karena proses oksidasi berlangsung secara anaerob. Bakteri pada anoda akan memetabolisme glukosa untuk menghasilkan ATP.
2. Elektron yang dihasilkan dalam proses metabolisme tersebut selanjutnya diberikan kepada NAD^+ yang akan tereduksi menjadi NADH. NADH merupakan koenzim yang berperan sebagai pembawa elektron pada proses metabolisme tingkat sel.
3. Padarantai transfer elektron yang terjadi di membran plasma bakteri, NADH akan teroksidasi membentuk NAD^+ dan elektron.
4. Elektron yang terbentuk akan ditangkap oleh elektroda yang selanjutnya akan ditransfer ke kompartemen katoda melalui kabel tembaga, sementara proton berdifusi melalui jembatan garam yang berfungsi sebagai *Proton Exchange Membran* (PEM).

IV.3 Hubungan Populasi Bakteri dan Produksi Listrik yang Dihasilkan

Proses metabolisme bakteri sangat berpengaruh pada besarnya listrik yang dihasilkan pada MFC karena elektron dihasilkan dari proses metabolisme tersebut. Listrik dapat dihasilkan karena adanya elektron yang berpindah dari anoda ke katoda akibat adanya beda potensial melalui elektroda dan kabel tembaga. Kompartemen katoda memiliki potensial yang lebih besar dibandingkan dengan kompartemen anoda yang bermuatan negatif karena adanya elektron. Berikut adalah grafik populasi bakteri dan produksi listrik yang dihasilkan. Grafik 4.3 adalah populasi bakteri pada variabel pH 3 dan pH 4 di katoda, sedangkan grafik 4.4 adalah hasil produksi listrik pada variabel pH 3 dan pH 4 di katoda.



(a)

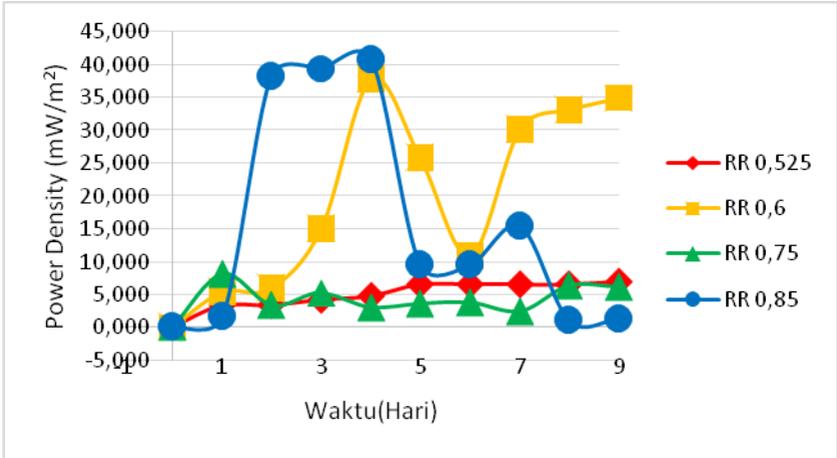


(b)

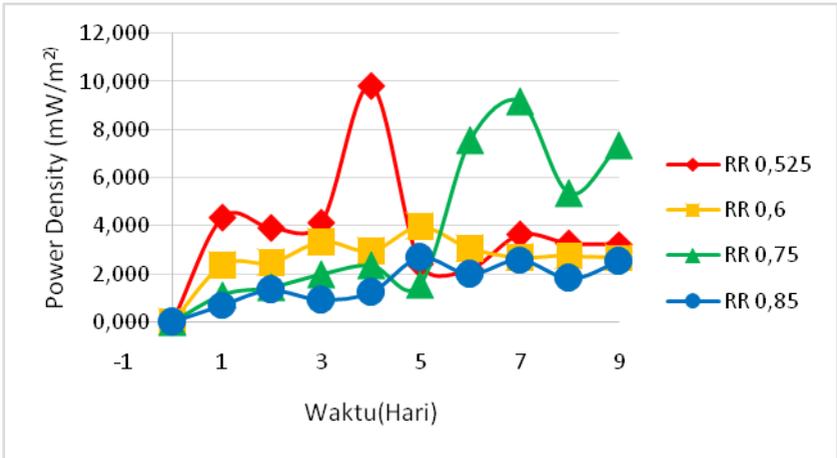
Gambar 4.3 Pertumbuhan populasi bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* pada (a) pH 3 (b) pH 4 di Katoda

Pada gambar 4.3, kedua variasi pH menunjukkan populasi yang berangsur naik dan mencapai puncak pada hari ke-

2, kemudian turun secara perlahan sampai hari ke-5 dan bergerak relatif stabil pada hari ke-6 sampai hari ke-9. Hal ini mengindikasikan bahwa bakteri membutuhkan waktu untuk beradaptasi dan bereproduksi pada lingkungan baru, sehingga dibutuhkan waktu yang cukup lama agar populasinya stabil. Kenaikan optimum pada penelitian ini yang terjadi pada hari ke 2 mengakibatkan pH yang semakin menurun, sehingga bakteri lama kelamaan akan mengalami penurunan populasi. Pengendalian pH dilakukan dengan cara menambahkan larutan NaOH untuk mengkondisikan kompartemen anoda tetap pada pH 6 -7. Akan tetapi dengan volume reaktor yang cukup besar mengakibatkan pengendalian yang sulit karena membutuhkan jumlah NaOH yang besar. Selain itu, banyaknya senyawa organik yang dapat dikonsumsi oleh mikroba juga berpengaruh pada pertumbuhan bakteri. Pada hari ke-5 populasi bakteri menurun karena konsentrasi substrat sudah berkurang, kemudian pada hari ke-6 sampai hari ke-9 pertumbuhan cenderung stabil karena mendapatkan tambahan substrat dari proses *recycle*. Pada *recycle ratio* 0,85 dan pH 4 bakteri mengalami penurunan yang sangat drastis hal ini disebabkan karena adanya penurunan pH pada kompartemen anoda. pH sangat berpengaruh pada populasi bakteri, sehingga diperlukan adanya control pH yang dilakukan setiap hari. Pada gambar 4.3 (a) dan 4.3 (b) menunjukkan bahwa populasi bakteri paling tinggi ada pada variabel recycle ratio 0,6 pada pH 3 dan 0,75 pada pH 4. Namun pada pH 3, recycle ratio 0,85 menunjukkan hasil yang relatif lebih stabil meskipun mempunyai jumlah populasi bakteri yang lebih rendah. Pada pH 4, recycle ratio yang menunjukkan kecenderungan relatif stabil adalah 0,6 tetapi menunjukkan penurunan populasi seiring bertambahnya waktu.



(a)



(b)

Gambar 4.4 Produksi Listrik pada Variabel (a) pH 3 dan (b) pH 4 di Katoda

Berdasarkan gambar 4.4, *Power density* tertinggi dihasilkan oleh variabel recycle ratio 0,85 pada pH 3. Namun,

nilai tersebut semakin lama semakin menurun hingga mendekati nilai 0. Hal ini dikarenakan proton H^+ yang dihasilkan dari metabolisme bakteri terlalu banyak sehingga akan menumpuk pada kompartemen anoda yang berakibat pada menurunnya pH pada range 3 – 5 yang berdampak pada kematian mikroorganisme. Penurunan pH yang terjadi pada masing – masing variabel dapat dilihat pada appendix B-10. pH optimum bagi pertumbuhan bakteri adalah antara 6,5 – 7,5. Li dkk (2008) menyatakan bahwa pH yang rendah pada kompartemen anoda akan menonaktifkan mikroorganisme dan mengurangi kinerja MFC. Variabel recycle ratio pada pH 3 di katoda yang mempunyai produksi listrik relatif lebih stabil dan paling optimum adalah pada ratio 0,6 yaitu berkisar antara $\pm 33 \text{ mW/m}^2$.

Sedangkan pada pH 4, produksi listrik tertinggi dihasilkan oleh variabel recycle ratio 0,525. Namun, produksi listrik yang dihasilkan semakin menurun seiring dengan bertambahnya waktu. Hal ini dikarenakan adanya penurunan pH pada kompartemen anoda sehingga menyebabkan penurunan produksi listrik. Variabel yang mendekati nilai relatif stabil adalah 0,75 yaitu berkisar antara $\pm 8 \text{ mW/m}^2$. Dari kedua grafik diatas dapat disimpulkan bahwa *power density* tidak berbanding lurus dengan recycle ratio. Produksi listrik berbanding lurus dengan populasi bakteri yang ditunjukkan pada gambar 4.3. Dimana semakin besar populasi bakteri, semakin besar pula produksi listrik yang dihasilkan.

Dari gambar 4.4, dapat dilihat bahwa pada pH 3 di katoda menghasilkan *power density* yang lebih besar. Hal ini membuktikan bahwa pH yang lebih rendah memberikan efek positif pada produksi listrik ketika $K_2Cr_2O_7$ digunakan sebagai penerima elektron di MFC (Li dkk, 2008).

Berbeda dengan sistem *batch*, sistem resirkulasi kontinyu ini menghasilkan listrik secara kontinyu dengan nilai yang relatif stabil. Menurut Logan (2006) pada sistem batch dimana tidak ada substrat organik yang tersisa, maka produksi listrik yang dihasilkan akan menurun karena tidak ada lagi senyawa yang

dioksidasi. Pada sistem resirkulasi kontinyu ini, terjadi penambahan substrat dan bakteri baru serta *recycle* dari *bottom product* yang mencegah terjadinya kekurangan substrat dan bakteri. Sehingga pemanfaatan substrat maupun bakteri akan menjadi optimal.

Recycle ratio adalah perbandingan antara *recycle* dan *fresh feed* yang masuk kedalam reaktor. Apabila recycle ratio tinggi (jumlah yang di *recycle* banyak), bakteri yang dikembalikan terlalu besar dan substrat yang tersedia lebih kecil sehingga akan menyebabkan ketidakseimbangan antara jumlah bakteri dan substrat yang tersedia.

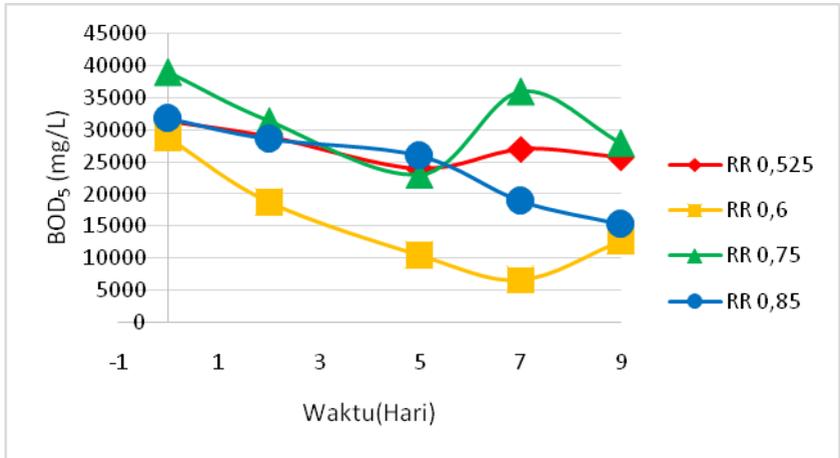
Produksi listrik juga dipengaruhi oleh beberapa faktor. Menurut Jadhav G. (2008) yaitu laju konversi substrat, PEM, internal dan eksternal hambatan dalam sel serta beda potensial antara anoda dan katoda. Menurut Sevda dkk (2012), pembentukan *biofilm* disekitar elektroda bisa menjadi penghambat terserapnya elektron dari bakteri secara maksimal. Pada proses pengolahan awal, energi yang dihasilkan dari metabolisme bakteri sebagian besar digunakan untuk membentuk *biofilm*. Sel – sel teradsorpsi dipermukaan media kemudian tumbuh, berkembang biak dan menghasilkan *Extracellular Polymeric Substance (EPS)* untuk membentuk *biofilm*. Elektroda karbon pada kompartemen anoda MFCs juga berperan menjadi media lekat bagi mikroorganisme untuk membentuk *biofilm* (Purwono, 2015). Bakteri dapat mati disekitar *biofilm* baik di lapisan dalam maupun di lapisan luar. Substrat juga tidak mampu menembus lapisan tersebut, sehingga bakteri didalam lapisan *biofilm* tidak mendapatkan substrat untuk melakukan metabolisme. Apabila permukaan elektroda sudah dipenuhi oleh *biofilm*, jumlah elektron yang dapat ditransfer ke elektroda akan sedikit sehingga terjadi penurunan arus listrik yang berdampak pada penurunan power density (Kim dkk, 2003).

Menurut Lovley (2008), substrat bahan organik juga memiliki efek terhadap produksi listrik. Kompartemen anoda dengan substrat glukosa sebagai bahan yang dapat terfermentasi

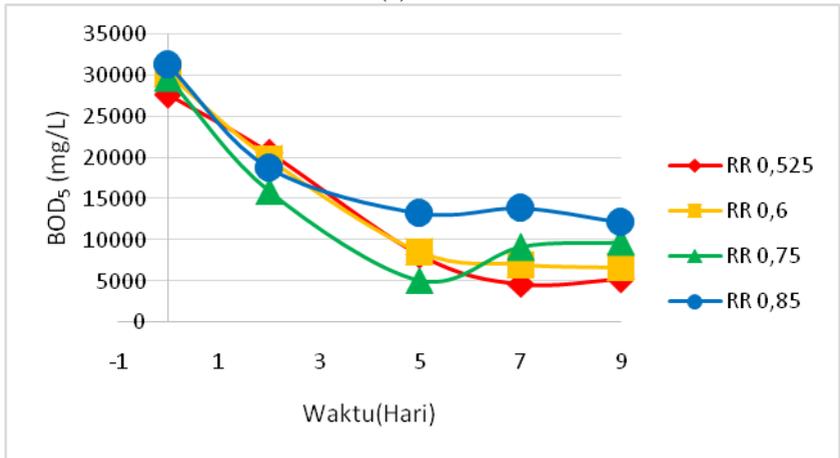
terdeteksi menghasilkan gas CH₄ dan asam – asam organik seperti asam piruvat, asam format, asam propionat dan asam butirat. Senyawa tersebut merupakan produk proses fermentasi. Produk fermentasi bahan organik kompleks limbah cair yang dapat menjadi penghambat elektron yaitu biomassa, bahan organik terlarut, gas H₂ dan gas CH₄ (Min dkk, 2005).

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

BOD atau (*Biological Oxygen Demand*) merupakan suatu ukuran jumlah oksigen yang digunakan oleh populasi mikroba yang terkandung dalam perairan sebagai respon terhadap masuknya bahan organik yang dapat terurai (Mays, 1996). Yang biasanya dinyatakan dengan BOD₅. Penguraian zat organik adalah peristiwa alamiah, apabila suatu badan air tercemar oleh bahan organik maka mikroba yang ada dalam perairan akan memanfaatkan oksigen terlarut dalam air selama proses *biodegradable* berlangsung, sehingga mengakibatkan semakin menurunnya kadar oksigen terlarut dalam air dan dapat menimbulkan kematian pada biota air lainnya karena kondisi air menjadi anaerobic. Biasanya ditandai dengan timbulnya bau busuk. Hubungan BOD₅ terhadap populasi bakteri per satuan waktu untuk semua variabel dapat dilihat pada gambar 4.5.



(a)



(b)

Gambar 4.5 Hasil analisa BOD₅ pada variabel (a) pH 3 dan (b) pH 4 di Katoda

Gambar 4.5 menunjukkan penurunan nilai BOD₅ terhadap waktu. Penurunan paling signifikan terjadi pada variabel recycle

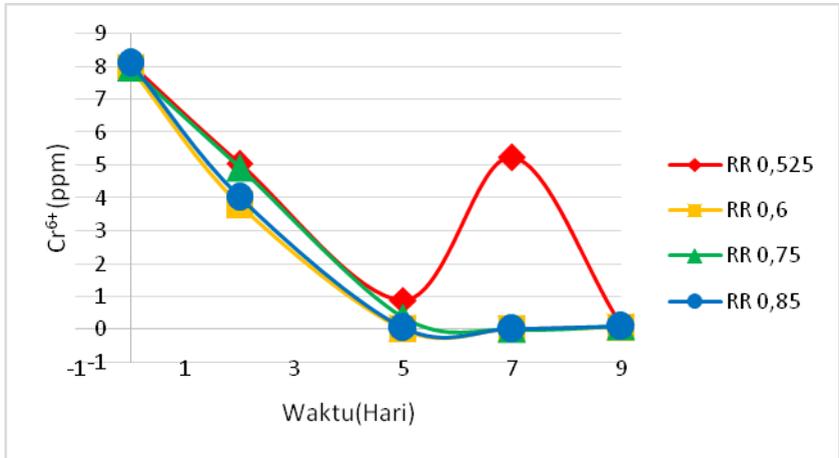
ratio 0,6 pada pH 3 yaitu sebesar 55,79% dan 0,525 pada pH 4 yaitu sebesar 77,98%. Penurunan konsentrasi BOD₅ pada masing-masing variabel dipengaruhi oleh proses metabolisme dari bakteri proses pengolahan limbah. Penurunan BOD ini sebanding dengan jumlah populasi bakteri. BOD akan stagnan pada waktu tertentu, karena reaktor beroperasi secara kontinyu.

Dengan populasi bakteri yang kecil, BOD *removal* juga cenderung kecil. Hal ini menunjukkan semakin rendah populasi bakteri maka jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh bakteri untuk bermetabolisme (BOD) juga akan semakin rendah dan semakin sedikit bahan organik yang terdekomposisi oleh bakteri karena bakteri membutuhkan substrat untuk bermetabolisme.

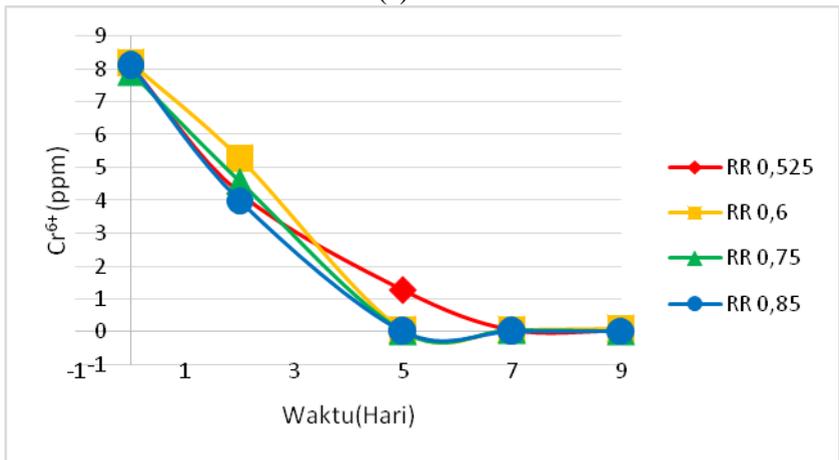
Penurunan BOD terjadi sampai pada hari ke 5 dan kemudian pada hari ke 6 sampai hari ke 9 menunjukkan nilai yang relatif stabil. hal ini dikarenakan pada hari 0 sampai hari ke 5 reaktor masih beroperasi pada sistem batch dimana tidak ada penambahan larutan molases sehingga reduksi akan terus berlangsung. Sedangkan pada hari ke 6 sampai hari ke 9 reaktor beroperasi secara kontinyu, sehingga nilai BOD relatif stabil karena reaktor mendapatkan penambahan larutan molases baru. Nilai yang sama menunjukkan bahwa penambahan larutan dan proses metabolisme bakteri seimbang.

IV.5 Reduksi Logam Cr⁶⁺

Selain sebagai penghasil listrik, MFC juga dikembangkan untuk pengolahan limbah (reduksi logam dan BOD *removal*) secara bersamaan. Reduksi logam terjadi dengan cara memanfaatkan hasil metabolisme bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* berupa proton dan elektron di ruang anoda yang akan berpindah ke kompartemen katoda dan bereaksi dengan logam Cr(VI) menjadi Cr(III) di kompartemen katoda.



(a)



(b)

Gambar 4.6 Hasil reduksi logam Cr^{6+} pada (a) pH 3 dan (b) pH 4 di Katoda

Menurut Gang Wang (2008) dan Silvia (2009) reaksi reduksi Cr^{6+} menjadi Cr^{3+} sangat dipengaruhi oleh pH seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3, dimana 7 atom H^+ digunakan untuk mereduksi setiap mol Cr^{6+} . Semakin rendah pH,

maka reduksi akan semakin besar karena mempunyai banyak H^+ . Berdasarkan Gambar 4.6 (a) dan 4.6 (b), presentase penurunan konsentrasi logam Cr^{6+} hampir 100% pada semua variabel. Bentuk kurva hasil reduksi Cr^{6+} ini sama dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Gang Wang (2008).

Pada pH 3, penurunan konsentrasi Cr (VI) terbesar terjadi pada RR 0,6 dengan %removal sebesar 99,49%. Sedangkan pada pH 4 terjadi pada RR 0,75 dengan %removal 99,25%. Seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3, semakin besar reaktan (H^+ dan e^-) jumlah Cr (VI) yang tereduksi akan semakin besar. H^+ dan e^- dihasilkan dari proses metabolisme bakteri dari kompartemen anoda. Proses metabolisme ini dipengaruhi oleh jumlah bakteri, dimana semakin besar jumlah bakteri maka H^+ dan e^- yang dihasilkan akan semakin besar sehingga BOD removal akan semakin tinggi.

Namun pada saat kondisi pH 3 dan RR 0,525, logam Cr^{6+} mengalami kenaikan pada hari ke 7. Hal ini dikarenakan pada saat reduksi ion Cr^{6+} ada sebagian ion logam yang menjadi Cr^{2+} . Dimana ion logam ini dapat teroksidasi kembali membentuk Cr^{6+} , sehingga ion Cr^{6+} mengalami kenaikan pada hari ke 7. Selain itu, pada hari ke-7 terjadi proses recycle dan penambahan fresh feed yang mengakibatkan bertambahnya konsentrasi Cr^{6+} .

Secara visual terjadi perubahan warna pada limbah cair sintesis yang semula berwarna kuning menjadi bening, dikarenakan sebagian besar Cr^{6+} sudah tereduksi menjadi Cr^{3+} . Kromium dalam larutan biasanya berbentuk trivalen (Cr^{3+}) dan ion hexavalen (Cr^{6+}) (Asmadi, 2009).

Proses reduksi ini terjadi secara kontinyu, dimana konsentrasi logam akan mendapatkan penambahan secara terus menerus dari *fresh feed* dan *bottom product*. Dari grafik dapat disimpulkan, kondisi terbaik untuk reduksi logam Cr (VI) adalah pada RR 0,6 dan pH 3 di katoda.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Metode *dual chamber Microbial Fuel Cell (MFC)* sistem resirkulasi kontinu dengan limbah pabrik gula (molases) mampu menghasilkan energi listrik serta mereduksi logam Cr dengan bantuan bakteri *Shewanella oneidensis MR-1*.
2. Variabel recycle ratio yang mempunyai produksi listrik relatif lebih stabil dan paling optimum adalah RR 0,6 pada pH 3 di katoda yaitu berkisar antara $\pm 33 \text{ mW/m}^2$.
3. Variabel RR 0,6 dan pH 3 di katoda adalah yang terbaik untuk mereduksi logam berat Cr^{6+} menjadi Cr^{3+} dengan persen removal sebesar 99,49%.
4. Variabel RR 0,525 dan pH 4 di katoda adalah yang terbaik untuk menurunkan nilai BOD dengan persen removal sebesar 81,25% selama 9 hari.
5. *Recycle ratio* tidak sebanding dengan penurunan konsentrasi limbah Cr (VI) di katoda maupun produksi listrik di anoda.
6. Semakin rendah pH di katoda, produksi listrik yang dihasilkan dan jumlah logam Cr(VI) yang tereduksi semakin tinggi.
7. MFC pada penelitian ini lebih optimal digunakan untuk proses reduksi logam.

V.2 Saran

1. Penelitian dilakukan lebih lama untuk mendapatkan hasil yang lebih stabil.
2. Penggunaan bahan untuk reaktor sebaiknya berbahan *glass* untuk mencegah terjadinya kebocoran.
3. Pemasangan kabel tembaga sebaiknya dilindungi menggunakan plastik agar tidak bersentuhan langsung

dengan larutan yang dapat bersifat asam, agar kabel tidak mudah patah.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen RM dan Bennetto HP. 1993. *Microbial fuel cells: electricity production from carbohydrates*. J. Appl. Biochem. Biotechnol. 39: 27-40.
- Apriadi, D. 2005. *Kandungan Logam Berat Hg, Pb dan Cr Pada Air, Sedimen dan Kerang Hijau (Perna Viridis L.) di Perairan Kamal Muara Teluk Jakarta*. Bogor : Tugas Akhir Institut Pertanian Bogor.
- Arota, Anjas Starlen, Hesky S. Kolibu, dan Benny M. Lumi. 2013. *Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Hibrida (Energi Angin dan Matahari) Menggunakan Hybrid Optimization Model For Electric Renewables (HOMER)*. Jurnal MIPA UNSRAT. Vol. 2 No. 2. Hal 145 – 150.
- Asri. 2016. *Dampak Limbah dan Polusi terhadap Manusia dan Lingkungan*. Alauddin University Press. ISBN 978-602-328-133-6.
- Asmadi, Endro. S., dan W. Oktiawan. 2009. *Pengurangan Chrom (Cr) dalam Limbah Cair Industri Kulit pada Proses Tannery Menggunakan Senyawa Alkali $Ca(OH)_2$, NaOH dan $NaHCO_3$ (Studi Kasus PT.Trimulyo Kencana Mas Semarang)*. JAI Vol 5. No.1
- Ayuningtyas, Aprillia dan Nora Ellyza. 2017. *Pemanfaatan Bakteri Eschericia coli dan Shewanella oneidensis dalam Limbah Organik pada Produksi Listrik dengan Microbial Fuel Cell (MFC)*. Skripsi Departemen Teknik Kimia FTI - ITS
- Bielicka A., Bojanowska, I., Winiewski, A. 2005. *Two Faces of Chromium - Pollutant and Bioelement*. Polish Journal of Environmental Studies 14(1): 5-10.

- Finahari, Ida N., Djati H.S., dan Heni Susiati. 2007. *Gas CO₂ dan Polutan Radioaktif dari PLTU Batubara*. Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Vol. 9 No. 1.
- Gralnick A. Jeffrey dan Heidi H. Hau. 2007. *Ecology and Biotechnology of the Genus Shewanella*. Annual Review of Microbiology. 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*. Bogor : Teknologi Hasil Perairan Institut Pertanian Bogor.
- Jadhav, G.S., T.T. More dan M.M. Ghangrekar. 2008. *Microbial Fuel Cell: Application in Wastewater Treatment*. Departemen of Civil Engineering, Indian Institute of Technology.
- Junaidi, Giacinta, M., dan Salimin, Z. 2012. *Pengolahan Logam Berat Krom (Cr) pada Limbah Cair Industri Penyamakan Kulit dengan Proses Koagulasi Flokulasi dan Presipitasi*. Indo. J. Chem.
- 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.
- Khairani, Nina, M. Azam, K. Sofjan F. Dan Soeleman. 2007. *Penentuan Kandungan Unsur Krom Dalam Limbah Tekstil Dengan Metode Analisis Pengaktifan Neutron*. ISSN : 1410 – 9662 Vol 10., No.1, Januari 2007, hal 35-43.

- Kim, B.H, Chang I.S, Gil, G.C, Park H.S, Kim H.J. 2003. *Novel BOD sensor using mediatorless microbial fuel cell*. Biotechnol. Lett. 25: 541–545.
- Lai, Janice. 1999. *Automated Cell Counting and Characterization*. Stanford, CA : Departement of Mechanical Engineering Stanford University.
- Li, Zhongjian, Xingwang Zhang dan Lecheng Lei. 2008. *Electricity Production During The Treatment of Real Electriplating Containing Cr^{6+} Using Microbial Fuel Cell*. Process Biochemistry Vol 43 Hal 1352 – 1358.
- Logan E. Bruce, Bert Hamelers, Rene R, Uwe S, Jurg K, Stefano F, Peter A, Willy V dan K. Rabaey. 2006. *Microbial Fuel Cells : Methodology and Technology*. Environmental Science & Technology. Vol. 40, No. 17.
- Lovley, Derek R. 2008. *The Microbe Electric : Conversion of Organic Matter to Electricity*, Current Opinion in Biotechnology 2008, 19:564-571.
- Luciana, Anisa. 2017. *ESDM : Cadangan Minyak Bumi Indonesia 3,3 Miliar Barel*. <https://bisnis.tempo.co>.
- MacDonell, M.T. & Colwell, R.R. 1985. *Phylogeny of the Vibrionaceae, and Recommendation for Two New Genera, Listonella and Shewanella*. Syst Appl Microbiol 6, 171-182.
- Mays, 1996 dalam Erwin. 2014. *Tingkat Pencemaran pada saat Pasang dan Surut di Perairan Pantai Kota Makassar*. Skripsi. Jurusan Ilmu Kelautan Universitas Hasanuddin.
- Min, 2005 dalam Zhang, Y. 2012. *Energy Recovery From Waste Streams With Microbial Fuel Cell (MFC)-Based Technologies*. Thesis. Departement of Environment Engineering. Technical University of Denmark.

- Miroliaei M.R, Abdolreza Samimi, Davod Mohebbi-Kalhari. 2015. *Competition Between E. Coli and Shewanella s. for Electricity in Air Cathode MFC in Presence of Methylene Blue as Artificial Mediator*. Environmental Progres & Suistaiable Energy. Vol. 34 No. 4.
- Mohan, S.V. Lens, Nancharaiah, Y.V., P.N.L. 2015. *Metal removal and recovery in bioelectrochemical system, A reviem*. Bioresour. Technol. 195, 96-101.
- Muchlis, Moch., dan Adhi Darma Permana. 2002. *Proyeksi Kebutuhan Listrik PLN Tahun 2003 s.d. 2020*.
- 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. *Opimalisasi Kinerja Microbial Fuel Cell (MFC) untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Bakteri Lactobacillus bulgaricus*. Skripsi. Departemen Teknik Kimia FT Universitas Indonesia
- Pramana, A.S.D. 2008. *Selayang Pandang Tentang Molase (Tetes Tebu)*. Chemical Engineering Knowledge.
- Purwono, Hermawan dan Hadiyanto. 2015. *Penggunaan Teknologi Reaktor Microbial Fuel Cells (MFCs) dalam Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu untuk Menghasilkan Energi Listrik*. Jurnal Presipitasi Vol. 12 No. 2 ISSN 1907 – 187X
- Rabaey K, Boon N, Siciliano SD, Verhaege M, dan Verstaete W. 2003. *Biofuel cell select for microbial consortia that self-mediate electron transfer*. J. Applied Environmental Microbiology 70: 5373-5382.
- 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.
- Sari .2008. Susanti, R., Dewi Mustikaningtyas dan Fitri Arum Sasi. 2014. Analisis Kadar Logam Berat pada Sungai di Jawa Tengah. Jurnal Sain dan Teknologi Vol. 12 No. 1
- Sebayang, Firman. 2006. *Pembuatan Etanol dari Molase Secara Fermentasi Menggunakan Sel Saccharomyces cerevisiae yang Terimobilisasi pada Kalsium Alginat*. Jurnal Teknologi Proses 5(2) Hal 68 – 74.
- Setyati, Wilis Ari, Erni Martani, Triyanto, Subagiyo dan M. Zainuddin. 2015. *Kinetika Pertumbuhan dan Aktivitas Protease Isolat 36k dari Sedimen Ekosistem Mangrove, Karimunjawa, Jepara*. Ilmu Kelautan Vol. 20 (3) Hal 163 – 169
- Sevda S dan Srekrishnan. 2012. *Effect of Salt Concentration and Mediator in Salt Bridge Microbial Fuel Cell for Electricity Generation from Synthetic Wastewater*. Jurnal of Environmental Science and Health Vol 47 (6):878-86
- Silvia, B., Figueiredo, H., Neves, I.C dan Tavares, T.. 2009. *The Role of pH on Cr (VI) Reduction and Removal by Arthrobacter Viscosus*. International Journal of Chemical and Biological Engineering 2:2:100-103
- Shopia, A. Carmalin, Saikanth Sai, 2016, *Modified Microbial Fuel Cell For Cr(VI) reduction and simultaneous bio-electricity production*, Journal of Enviromental Chemical Engineering 4 (2402 – 2409).
- Shukla AK, Suresh P, Berchmans S, dan Rajendran A. 2004. *Biological fuel cells and their applications*. J. Current Science 87: 455-468.

- Sidharta ML. 2007. *Pemanfaatan Limbah Cair sebagai Sumber Energi Listrik pada Microbial Fuel Cell*. Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- Slamet, Riyadi Syakur dan Wahyu Danumulyo. 2003. *Pengolahan Limbah Logam Berat Chromium (VI) dengan foto katalis TiO₂*. Makara, Teknologi, Vol. 7, No. 1.
- Suhada, Hendrata. 2001. *Fuel Cell Sebagai Penghasil Energi Abad 21*. Jurnal Teknik Mesin Vol. 3. No. 2. Oktober 2001: 92 – 100
- Susanti, R., Dewi Mustikaningtyas dan Fitri Arum Sasi. 2014. Analisis Kadar Logam Berat pada Sungai di Jawa Tengah. Jurnal Sain dan Teknologi Vol. 12 No. 1
- Timotius, Kris Herawan. 2016. *Pengolahan Air Limbah Produksi Listrik secara Simultan oleh Microbial Fuel Cells (MFCs)*. Jurnal Teknik dan Ilmu Komputer Vol. 06. No. 22. April – Juni 2017.
- Wang, Gang, Liping Huang, dan Yifeng Zhang. 2008. *Cathodic Reduction of Hexavalent Chromium [Cr(VI)] Coupled with Electricity Generation in Microbial Fuel Cells*. Biotechnol Lett 30: 1959 - 1966
- Zahara, Nova Chisilia, 2011, *Pemanfaatan Saccharomyces cerevisiae Dalam Sistem Microbial Fuel Cell untuk Produksi Energi Listrik*. Jakarta : Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

APPENDIKS A PERHITUNGAN BAHAN

1. Pembuatan larutan logam Cr^{6+} konsentrasi 8mg/L dari serbuk $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dalam 15 L volume reaktor di katoda (5 hari pertama sebelum *recycle*).

- **pH 3**

Massa serbuk $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ yang dibutuhkan

$$\begin{aligned} \frac{n_1}{\text{Massa K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} &= \frac{n_2}{\text{Massa Cr}_2} \\ \frac{Mr \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{Massa K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} &= \frac{Mr \text{ Cr}_2}{\text{Massa Cr}_2} \\ \text{Massa K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 &= \frac{Mr \text{ Cr}_2}{Mr \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} \times \frac{\text{Massa Cr}_2}{\text{Liter}} \times \text{Vol. Reaktor} \\ &= \frac{293,98 \text{ gr/mol}}{2 \times 51,9 \text{ gr/mol}} \times \frac{8 \text{ mg}}{1 \text{ L}} \times 15 \text{ L} \\ \text{Massa K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 &= 339,861 \text{ mg} \end{aligned}$$

Asam sitrat dan Natrium Sitrat yang dibutuhkan

Untuk 100 mL larutan buffer pH 3, dibutuhkan 46,5 mL Asam Sitrat; 3,5 mL Natrium Sitrat dan 50 mL aquadest. Sehingga, untuk volume 7500 mL larutan buffer dibutuhkan:

$$\text{Larutan Asam Sitrat} = 46,5 \text{ mL} \times 75 = 3487,5 \text{ mL}$$

$$\text{Larutan Natrium Sitrat} = 3,5 \text{ mL} \times 75 = 262,5 \text{ mL}$$

$$\text{Aquadest} = 50 \text{ mL} \times 75 = 3750 \text{ mL}$$

Dengan demikian larutan 15 L yang memiliki konsentrasi 8mg/L Cr^{6+} dapat dibuat dengan komposisi seperti pada tabel berikut.

No	Komponen	Jumlah
1	Serbuk $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	339,861 mg
2	Asam Sitrat	3.487,5 mL
3	Natrium Sitrat	262,5 mL
4	Aquadest	11.250 mL
TOTAL		15.000 mL

- **pH 4**

Massa serbuk $K_2Cr_2O_7$ yang dibutuhkan

$$\begin{aligned} n_1 &= n_2 \\ \frac{\text{Massa } K_2Cr_2O_7}{Mr \text{ } K_2Cr_2O_7} &= \frac{\text{Massa } Cr_2}{Mr \text{ } Cr_2} \\ \text{Massa } K_2Cr_2O_7 &= \frac{Mr \text{ } Cr_2}{Mr \text{ } K_2Cr_2O_7} \times \frac{\text{Massa } Cr_2}{\text{Liter}} \times \text{Vol. Reaktor} \\ &= \frac{293,98 \text{ gr/mol}}{2 \times 51,9 \text{ gr/mol}} \times \frac{8 \text{ mg}}{1 \text{ L}} \times 15 \text{ L} \\ \text{Massa } K_2Cr_2O_7 &= 339,861 \text{ mg} \end{aligned}$$

Asam sitrat dan Natrium Sitrat yang dibutuhkan

Untuk 100 mL larutan buffer pH 4, dibutuhkan 33 mL Asam Sitrat; 17 mL Natrium Sitrat dan 50 mL aquadest. Sehingga, untuk volume 7500 mL larutan buffer dibutuhkan:

$$\text{Larutan Asam Sitrat} = 33 \text{ mL} \times 75 = 2.475 \text{ mL}$$

$$\text{Larutan Natrium Sitrat} = 17 \text{ mL} \times 75 = 1.275 \text{ mL}$$

$$\text{Aquadest} = 50 \text{ mL} \times 75 = 3.750 \text{ mL}$$

Dengan demikian larutan 15 L yang memiliki konsentrasi 8 mg/L Cr^{6+} dapat dibuat dengan komposisi seperti pada table berikut.

No	Komponen	Jumlah
1	Serbuk $K_2Cr_2O_7$	339,861 mg
2	Asam Sitrat	2.475 mL
3	Natrium Sitrat	1.275 mL
4	Aquadest	11.250 mL
TOTAL		15.000 mL

2. Pembuatan larutan logam Cr^{6+} konsentrasi 8mg/L dari serbuk $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dalam 9,6 L volume reaktor di katoda (*Recycle*).

- pH 3

Massa serbuk $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ yang dibutuhkan

$$\begin{aligned} n_1 &= n_2 \\ \frac{\text{Massa K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{Mr K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} &= \frac{\text{Massa K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{Mr K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} \\ \text{Massa K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 &= \frac{\text{Mr K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{Mr Cr}_2} \times \frac{\text{Massa Cr}_2}{\text{Liter}} \times \text{Vol. Reaktor} \\ &= \frac{293,98 \text{ gr/mol}}{2 \times 51,9 \text{ gr/mol}} \times \frac{8 \text{ mg}}{1 \text{ L}} \times 9,6 \text{ L} \\ \text{Massa K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 &= 217,511 \text{ mg} \end{aligned}$$

Asam sitrat dan Natrium Sitrat yang dibutuhkan

Untuk 100 mL larutan buffer pH 3, dibutuhkan 46,5 mL Asam Sitrat; 3,5 mL Natrium Sitrat dan 50 mL aquadest. Sehingga, untuk volume 4.800 mL larutan buffer dibutuhkan:

$$\begin{aligned} \text{Larutan Asam Sitrat} &= 46,5 \text{ mL} \times 48 = 2.232 \text{ mL} \\ \text{Larutan Natrium Sitrat} &= 3,5 \text{ mL} \times 48 = 168 \text{ mL} \\ \text{Aquadest} &= 50 \text{ mL} \times 48 = 2.400 \text{ mL} \end{aligned}$$

Dengan demikian larutan 9,6 L yang memiliki konsentrasi 8 mg/L Cr^{6+} dapat dibuat dengan komposisi seperti pada tabel berikut.

No	Komponen	Jumlah
1	Serbuk $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	217,511 mg
2	Asam Sitrat	2.232 mL
3	Natrium Sitrat	168 mL
4	Aquadest	7.200 mL
TOTAL		9.600 mL

- **pH 4**

Massa serbuk $K_2Cr_2O_7$ yang dibutuhkan

$$\begin{aligned}
 n_1 &= n_2 \\
 \frac{\text{Massa } K_2Cr_2O_7}{Mr \text{ } K_2Cr_2O_7} &= \frac{\text{Massa } K_2Cr_2O_7}{Mr \text{ } K_2Cr_2O_7} \\
 \text{Massa } K_2Cr_2O_7 &= \frac{Mr \text{ } K_2Cr_2O_7}{Mr \text{ } Cr_2} \times \frac{\text{Massa } Cr_2}{\text{Liter}} \times \text{Vol. Reaktor} \\
 &= \frac{293,98 \text{ gr/mol}}{2 \times 51,9 \text{ gr/mol}} \times \frac{8 \text{ mg}}{1 \text{ L}} \times 9,6 \text{ L} \\
 \text{Massa } K_2Cr_2O_7 &= 217,511 \text{ mg}
 \end{aligned}$$

Asam sitrat dan Natrium Sitrat yang dibutuhkan

Untuk 100 mL larutan buffer pH 4, dibutuhkan 33 mL Asam Sitrat; 17 mL Natrium Sitrat dan 50 mL aquadest. Sehingga, untuk volume 4.800 mL larutan buffer dibutuhkan:

$$\begin{aligned}
 \text{Larutan Asam Sitrat} &= 33 \text{ mL} \times 48 = 1.584 \text{ mL} \\
 \text{Larutan Natrium Sitrat} &= 17 \text{ mL} \times 48 = 816 \text{ mL} \\
 \text{Aquadest} &= 50 \text{ mL} \times 48 = 2.400 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

Dengan demikian larutan 9,6 L yang memiliki konsentrasi 8 mg/L Cr^{6+} dapat dibuat dengan komposisi seperti pada tabel berikut.

No	Komponen	Jumlah
1	Serbuk $K_2Cr_2O_7$	217,511 mg
2	Asam Sitrat	1.584 mL
3	Natrium Sitrat	816 mL
4	Aquadest	7.200 mL
TOTAL		TOTAL

3. Pembuatan larutan molasses dengan konsentrasi 5 % dan konsentrasi bakteri 12,5% dalam 15 L volume reaktor di anoda (5 hari pertama sebelum *recycle*).

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Molases} &= \frac{5}{100} \times 15 \text{ L} = 0,75 \text{ L} = 750 \text{ mL} \\ \text{Kebutuhan Media Bakteri} &= \frac{12,5}{100} \times 15 \text{ L} = 1,875 \text{ L} \\ &= 1.875 \text{ mL} \end{aligned}$$

Buffer yang dibutuhkan

Untuk membuat 500 mL buffer fosfat dengan pH 7 dibutuhkan 0,4063 gram NaH_2PO_4 dan 0,9247 gram Na_2HPO_4 serta 500 mL aquadest. Sehingga, untuk volume 7.500 mL larutan buffer dibutuhkan:

$$\begin{aligned} \text{Serbuk NaH}_2\text{PO}_4 &= 0,4063 \text{ gram} \times 15 &= 6,0945 \text{ gram} \\ \text{Serbuk Na}_2\text{HPO}_4 &= 0,9247 \text{ gram} \times 15 &= 13,8705 \text{ gram} \\ \text{Aquadest} &= 500 \text{ mL} \times 15 &= 7.500 \text{ mL} \end{aligned}$$

Dengan demikian larutan molasses 15 L yang memiliki konsentrasi 5% dan konsentrasi bakteri 12,5% dapat dibuat dengan komposisi seperti pada table berikut.

No	Komponen	Jumlah
1	Molases	750 mL
2	Biakan Bakteri	1.875 mL
3	NaH_2PO_4	6,0945 gram
4	Na_2HPO_4	13,8705 gram
5	Aquadest	12.400 mL
TOTAL		15.000 mL

4. Pembuatan larutan molasses dengan konsentrasi 5 % dan konsentrasi bakteri 12,5% dalam 9,6 L volume reaktor di anoda (*recycle*).

$$\text{Kebutuhan Molases} = \frac{5}{100} \times 9,6 \text{ L} = 0,48 \text{ L} = 480 \text{ mL}$$

$$\text{Kebutuhan Media Bakteri} = \frac{12,5}{100} \times 9,6 \text{ L} = 1,2 \text{ L} = 1.200 \text{ mL}$$

Buffer yang dibutuhkan

Untuk membuat 500 mL buffer phospat dengan pH 7 dibutuhkan 0,4063 gram NaH_2PO_4 dan 0,9247 gram Na_2HPO_4 serta 500 mL aquadest. Sehingga, untuk volume 4.800 mL larutan buffer dibutuhkan:

$$\text{Serbuk NaH}_2\text{PO}_4 = 0,4063 \text{ gram} \times 9,6 = 3,90048 \text{ gram}$$

$$\text{Serbuk Na}_2\text{HPO}_4 = 0,9247 \text{ gram} \times 9,6 = 8,87712 \text{ gram}$$

$$\text{Aquadest} = 500 \text{ mL} \times 9,6 = 4.800 \text{ mL}$$

Dengan demikian larutan molasses 9,6 L yang memiliki konsentrasi 5% dan konsentrasi bakteri 12,5% dapat dibuat dengan komposisi seperti pada tabel berikut.

No	Komponen	Jumlah
1	Molases	480 mL
2	Biakan Bakteri	1.200 mL
3	NaH_2PO_4	3,90048 gram
4	Na_2HPO_4	8,87712 gram
5	Aquadest	7.900 mL
TOTAL		15.000 mL

5. Pembuatan larutan HCl 1M dalam 100mL aquades untuk aktivasi elektroda

Diketahui densitas HCl = 1,19 Kg/L, dan BM HCl = 36,5

Mencari massa sebenarnya dari larutan HCl pekat 37% / Liter

$$= 37 \% \text{ per L} \times 1,19 \text{ Kg/L}$$

$$= 0,4403 \text{ Kg}$$

$$= 440,3 \text{ g}$$

Rumus Pengenceran agar menjadi HCl 1 M

$$V_1 \times M_1 = V_2 \times M_2$$

$$V_1 \times 12,063 = 3000 \times 1$$

$$V_1 = 248,6941 \text{ mL}$$

Sehingga larutan HCl 1M dapat dibuat dengan melarutkan 248,6941 mL HCl dengan aquadest sampai volumenya 3000 mL.

6. Pembuatan larutan NaOH 1M dalam 3 L aquades untuk aktivasi elektroda

$$\begin{aligned} \text{NaOH 1M} &= \frac{\text{gr}}{\text{Mr}} \times \frac{1000}{\text{mL}} \\ 1 &= \frac{\text{gr}}{40} \times \frac{1000}{3000} \\ \text{Massa NaOH} &= 120 \text{ gr} \end{aligned}$$

Sehingga larutan NaOH 1M dapat dibuat dengan melarutkan 120 gr padatan dalam 3000 mL aquadest.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPENDIKS B
HASIL PENGAMATAN DAN PERHITUNGAN

1. Hasil Populasi Bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1

Tabel A-1 Hasil perhitungan populasi bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 variabel *recycle ratio* 0,525 dan pH 3 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Pukul	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata (sel/Kotak)	Jumlah Bakteri (sel/ml)
		A	B	C	D	E		
0	22.00	8	9	5	12	3	7,4	1,85E+08
1	22.00	33	17	36	41	34	32,2	8,05E+08
2	22.00	37	25	35	40	30	33,4	8,35E+08
3	22.00	33	31	32	50	23	33,8	8,45E+08
4	22.00	50	56	65	38	42	50,2	1,26E+09
5	22.00	20	28	11	9	10	15,6	3,90E+08
	10.00	27	13	16	10	30	19,2	4,80E+08
6	22.00	25	25	22	39	13	24,8	6,20E+08
	10.00	6	8	10	1	4	5,8	1,45E+08
7	22.00	11	15	5	23	6	12	3,00E+08
	10.00	65	30	85	85	55	64	1,60E+09
8	22.00	25	33	24	40	10	26,4	6,60E+08
	10.00	35	30	34	34	45	35,6	8,90E+08
9	22.00	33	21	20	35	24	26,6	6,65E+08

Tabel A-2 Hasil perhitungan populasi bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 variabel *recycle ratio* 0,6 dan pH 3 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Pukul	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata (sel/Kotak)	Jumlah Bakteri (sel/ml)
		A	B	C	D	E		
0	22.00	34	51	48	21	67	44,2	1,11E+09

1	22.00	50	70	89	100	98	81,4	2,04E+09
2	22.00	149	163	147	103	162	144,8	3,62E+09
3	22.00	70	88	97	75	150	96	2,40E+09
4	22.00	42	77	70	81	101	74,2	1,86E+09
5	22.00	106	102	107	80	110	101	2,53E+09
	10.00	23	28	34	35	31	30,2	7,55E+08
6	22.00	91	81	119	161	70	104,4	2,61E+09
	10.00	45	45	80	72	49	58,2	1,46E+09
7	22.00	29	29	50	44	34	37,2	9,30E+08
	10.00	55	43	47	80	27	50,4	1,26E+09
8	22.00	32	32	72	86	44	53,2	1,33E+09
	10.00	51	56	62	62	91	64,4	1,61E+09
9	22.00	45	70	72	43	71	60,2	1,51E+09

Tabel A-3 Hasil perhitungan populasi bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel *recycle ratio* 0,75 dan pH 3 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Pukul	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah Bakteri
		A	B	C	D	E	(sel/Kotak)	(sel/ml)
0	22.00	10	17	15	10	18	14	3,50E+08
1	22.00	28	19	26	11	23	21,4	5,35E+08
2	22.00	33	16	50	30	38	33,4	8,35E+08
3	22.00	30	43	39	30	45	37,4	9,35E+08
4	22.00	27	57	57	53	63	51,4	1,29E+09
5	22.00	25	30	15	23	45	27,6	6,90E+08
	10.00	39	36	34	37	50	39,2	9,80E+08
6	22.00	45	30	25	30	15	29	7,25E+08
	10.00	68	20	85	70	60	60,6	1,52E+09
7	22.00	10	5	10	15	23	12,6	3,15E+08
	10.00	12	17	30	31	22	22,4	5,60E+08

8	22.00	30	35	14	34	9	24,4	6,10E+08
	10.00	45	29	36	24	40	34,8	8,70E+08
9	22.00	41	44	45	24	45	39,8	9,95E+08

Tabel A-4 Hasil perhitungan populasi bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel *recycle ratio* 0,85 dan pH 3 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Pukul	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah Bakteri
		A	B	C	D	E	(sel/Kotak)	(sel/ml)
0	22.00	40	29	38	46	59	42,4	1,06E+09
1	22.00	49	30	100	73	44	59,2	1,48E+09
2	22.00	75	93	143	109	98	103,6	2,59E+09
3	22.00	83	59	87	125	135	97,8	2,45E+09
4	22.00	50	75	97	113	93	85,6	2,14E+09
5	22.00	95	100	150	44	107	99,2	2,48E+09
	10.00	74	80	144	105	100	100,6	2,52E+09
6	22.00	98	114	126	94	135	113,4	2,84E+09
	10.00	60	72	48	45	16	48,2	1,21E+09
7	22.00	56	82	56	65	39	59,6	1,49E+09
	10.00	44	66	90	64	77	68,2	1,71E+09
8	22.00	36	55	100	80	129	80	2,00E+09
	10.00	60	55	75	69	59	63,6	1,59E+09
9	22.00	35	70	71	42	69	57,4	1,44E+09

Tabel A-5 Hasil perhitungan populasi bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel *recycle ratio* 0,525 dan pH 4 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Pukul	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah Bakteri
		A	B	C	D	E	(sel/Kotak)	(sel/ml)
0	22.00	8	5	12	11	16	10,4	2,60E+08
1	22.00	9	3	23	10	19	12,8	3,20E+08
2	22.00	7	18	30	18	20	18,6	4,65E+08
3	22.00	18	50	45	25	55	38,6	9,65E+08
4	22.00	58	74	74	64	75	69	1,73E+09
5	22.00	28	24	52	24	22	30	7,50E+08
	10.00	30	30	25	33	63	36,2	9,05E+08
6	22.00	50	45	49	52	45	48,2	1,21E+09
	10.00	33	29	39	53	44	39,6	9,90E+08
7	22.00	34	33	50	52	50	43,8	1,10E+09
	10.00	54	65	80	75	70	68,8	1,72E+09
8	22.00	31	23	28	57	43	36,4	9,10E+08
	10.00	39	35	44	42	46	41,2	1,03E+09
9	22.00	33	31	72	43	25	40,8	1,02E+09

Tabel A-6 Hasil perhitungan populasi bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel *recycle ratio* 0,6 dan pH 4 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Pukul	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah Bakteri
		A	B	C	D	E	(sel/Kotak)	(sel/ml)
0	22.00	28	22	28	12	15	21	5,25E+08
1	22.00	29	30	16	15	20	22	5,50E+08
2	22.00	10	9	11	15	8	10,6	2,65E+08
3	22.00	50	44	32	51	43	44	1,10E+09

4	22.00	70	50	74	85	57	67,2	1,68E+09
5	22.00	87	65	79	94	110	87	2,18E+09
	10.00	18	27	20	34	29	25,6	6,40E+08
6	22.00	81	118	115	103	155	114,4	2,86E+09
	10.00	18	26	36	24	11	23	5,75E+08
7	22.00	49	32	48	44	46	43,8	1,10E+09
	10.00	87	72	73	73	83	77,6	1,94E+09
8	22.00	38	50	39	47	40	42,8	1,07E+09
	10.00	38	53	70	63	50	54,8	1,37E+09
9	22.00	24	69	45	33	49	44	1,10E+09

Tabel A-7 Hasil perhitungan populasi bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel recycle ratio 0,75 dan pH 4 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Pukul	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata (sel/Kotak)	Jumlah Bakteri (sel/ml)
		A	B	C	D	E		
0	22.00	21	22	35	58	28	32,8	8,20E+08
1	22.00	35	25	40	57	39	39,2	9,80E+08
2	22.00	60	52	76	70	54	62,4	1,56E+09
3	22.00	40	50	35	40	45	42	1,05E+09
4	22.00	35	44	49	62	50	48	1,20E+09
5	22.00	90	29	25	30	35	41,8	1,05E+09
	10.00	68	38	69	23	59	51,4	1,29E+09
6	22.00	49	28	38	45	28	37,6	9,40E+08
	10.00	44	33	57	46	33	42,6	1,07E+09
7	22.00	80	88	96	115	102	96,2	2,41E+09
	10.00	42	53	61	66	52	54,8	1,37E+09
8	22.00	72	71	79	84	67	74,6	1,87E+09
	10.00	80	79	95	108	104	93,2	2,33E+09
9	22.00	33	71	101	137	145	97,4	2,44E+09

Tabel A-8 Hasil perhitungan populasi bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel *recycle ratio* 0,85 dan pH 4 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Pukul	Jumlah per kotak					Jumlah rata-rata	Jumlah Bakteri
		A	B	C	D	E	(sel/Kotak)	(sel/ml)
0	22.00	43	46	38	36	29	38,4	9,60E+08
1	22.00	45	45	40	25	54	41,8	1,05E+09
2	22.00	90	121	166	103	105	117	2,93E+09
3	22.00	100	45	80	43	56	64,8	1,62E+09
4	22.00	43	63	90	55	70	64,2	1,61E+09
5	22.00	13	15	18	16	15	15,4	3,85E+08
	10.00	29	12	27	19	24	22,2	5,55E+08
6	22.00	13	28	18	14	17	18	4,50E+08
	10.00	41	45	62	68	55	54,2	1,36E+09
7	22.00	36	37	58	41	55	45,4	1,14E+09
	10.00	43	45	59	56	59	52,4	1,31E+09
8	22.00	53	56	65	64	50	57,6	1,44E+09
	10.00	64	26	41	50	24	41	1,03E+09
9	22.00	31	43	67	67	105	62,6	1,57E+09

Contoh perhitungan populasi bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel *recycle ratio* 0,525 dan pH 3 pada katoda hari ke-0 :

Jumlah rata-rata per kotak = 7,4 sel/kotak

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

Kedalaman hemasitometer = 0.1 mm

Faktor pengenceran = 100 kali

$$\text{Jumlah sel/mm}^2 = 7,4 \frac{\text{sel}}{\text{kotak}} \times 25 \frac{\text{kotak}}{\text{mm}^2} = 185 \frac{\text{sel}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Jumlah sel/mm}^3 = 185 \frac{\text{sel}}{\text{mm}^2} \div 0.1 \text{ mm} = 1850 \frac{\text{sel}}{\text{mm}^3}$$

$$\text{Jumlah sel/ml} = 1850 \frac{\text{sel}}{\text{mm}^3} \times 1000 \frac{\text{mm}^3}{\text{ml}} = 1850000 \frac{\text{sel}}{\text{ml}}$$

Dikali faktor pengenceran 100 kali, maka

$$\text{Jumlah sel/ml} = 1850000 \frac{\text{sel}}{\text{ml}} \times 100 = 185000000 \frac{\text{sel}}{\text{ml}}$$

$$= 1,85 \times 10^8 \frac{\text{sel}}{\text{ml}}$$

Digunakan cara yang sama untuk perhitungan yang lain.

2. Produksi listrik yang dihasilkan

Tabel A-9 Produksi listrik yang dihasilkan bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel *recycle ratio* 0,525 dan pH 3 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Voltase	Arus (I)	Luas Permukaan	Power Density
	V	mA	m ²	mW/m ²
0	0,0	0	0,0510	0,000
1	0,300	0,57	0,0510	3,351
2	0,350	0,49	0,0510	3,361
3	0,440	0,49	0,0510	4,225
4	0,490	0,49	0,0510	4,706
5	0,679	0,49	0,0510	6,521
6	0,675	0,49	0,0510	6,482
7	0,680	0,49	0,0510	6,530
8	0,681	0,49	0,0510	6,540
9	0,710	0,5	0,0510	6,957

Tabel A-10 Produksi listrik yang dihasilkan bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel *recycle ratio* 0,6 dan pH 3 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Voltase	Arus (I)	Luas Permukaan	Power Density
	V	mA	m ²	mW/m ²
0	0,0	0	0,0510	0,000
1	0,580	0,47	0,0510	5,342
2	0,670	0,45	0,0510	5,909
3	0,750	1,02	0,0510	14,993
4	0,740	2,61	0,0510	37,852
5	0,880	1,5	0,0510	25,870
6	0,830	0,67	0,0510	10,899
7	0,960	1,6	0,0510	30,103
8	0,940	1,8	0,0510	33,160
9	0,910	1,96	0,0510	34,955

Tabel A-11 Produksi listrik yang dihasilkan bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel *recycle ratio* 0,75 dan pH 3 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Voltase	Arus (I)	Luas Permukaan	Power Density
	V	mA	m ²	mW/m ²
0	0,0	0	0,0510	0,000
1	0,700	0,59	0,0510	8,094
2	0,350	0,49	0,0510	3,361
3	0,690	0,39	0,0510	5,274
4	0,580	0,27	0,0510	3,069
5	0,340	0,55	0,0510	3,665
6	0,330	0,58	0,0510	3,751
7	0,150	0,85	0,0510	2,499

8	0,340	0,95	0,0510	6,330
9	0,345	0,9	0,0510	6,085

Tabel A-12 Produksi listrik yang dihasilkan bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel *recycle ratio* 0,85 dan pH 3 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Voltase	Arus (I)	Luas Permukaan	Power Density
	V	mA	m ²	mW/m ²
0	0,0	0	0,0510	0,000
1	0,860	0,1	0,0510	1,685
2	0,890	2,19	0,0510	38,199
3	0,895	2,25	0,0510	39,466
4	0,890	2,34	0,0510	40,815
5	0,540	0,9	0,0510	9,525
6	0,540	0,9	0,0510	9,525
7	0,490	1,6	0,0510	15,365
8	0,530	0,1	0,0510	1,039
9	0,660	0,1	0,0510	1,293

Tabel A-13 Produksi listrik yang dihasilkan bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel *recycle ratio* 0,525 dan pH 4 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Voltase	Arus (I)	Luas Permukaan	Power Density
	V	mA	m ²	mW/m ²
0	0,0	0	0,0510	0,000
1	0,850	0,26	0,0510	4,331
2	0,800	0,25	0,0510	3,920
3	0,700	0,3	0,0510	4,116
4	0,570	0,88	0,0510	9,830

5	0,470	0,26	0,0510	2,395
6	0,450	0,25	0,0510	2,205
7	0,530	0,35	0,0510	3,635
8	0,520	0,32	0,0510	3,261
9	0,500	0,33	0,0510	3,234

Tabel A-14 Produksi listrik yang dihasilkan bakteri *Shewanella oneidensis MR-1* variabel recycle ratio 0,6 dan pH 4 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Voltase	Arus (I)	Luas Permukaan	Power Density
	V	mA	m ²	mW/m ²
0	0,0	0	0,0510	0,000
1	0,670	0,18	0,0510	2,364
2	0,780	0,16	0,0510	2,446
3	0,810	0,21	0,0510	3,334
4	0,680	0,22	0,0510	2,932
5	1,010	0,2	0,0510	3,959
6	1,040	0,15	0,0510	3,057
7	1,050	0,13	0,0510	2,675
8	1,080	0,13	0,0510	2,752
9	1,040	0,13	0,0510	2,650

Tabel A-15 Produksi listrik yang dihasilkan bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 variabel *recycle ratio* 0,75 dan pH 4 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Voltase	Arus (I)	Luas Permukaan	Power Density
	V	mA	m ²	mW/m ²
0	0,0	0	0,0510	0,000
1	0,200	0,29	0,0510	1,137
2	0,240	0,3	0,0510	1,411
3	0,250	0,4	0,0510	1,960
4	0,230	0,52	0,0510	2,344
5	0,200	0,39	0,0510	1,529
6	0,370	1,04	0,0510	7,541
7	0,330	1,42	0,0510	9,184
8	0,360	0,76	0,0510	5,362
9	0,420	0,89	0,0510	7,326

Tabel A-16 Produksi listrik yang dihasilkan bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 variabel *recycle ratio* 0,85 dan pH 4 pada katoda selama 9 hari

Hari Ke -	Voltase	Arus (I)	Luas Permukaan	Power Density
	V	mA	m ²	mW/m ²
0	0,0	0	0,0510	0,000
1	0,240	0,15	0,0510	0,706
2	0,320	0,21	0,0510	1,317
3	0,260	0,18	0,0510	0,917
4	0,330	0,19	0,0510	1,229
5	0,230	0,59	0,0510	2,659
6	0,230	0,44	0,0510	1,983

7	0,330	0,4	0,0510	2,587
8	0,180	0,51	0,0510	1,799
9	0,240	0,53	0,0510	2,493

Perhitungan luas permukaan 1 buah elektroda grafit batang silinder. Dengan pengukuran diketahui Diameter 5 cm ; $r = 2,5$;

Tinggi (h) = 30 cm

$$\begin{aligned}
 \text{Luas penampang (A)} &= (2\pi r^2) + (2\pi r h) \\
 &= (2 \times 3,14 \times 2,5^2 \text{cm}) + (2 \times 3,14 \times 2,5 \times 30 \text{cm}) \\
 &= 510,25 \text{ cm}^2 \\
 &= 0,05103 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Contoh perhitungan power density bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 variabel *recycle ratio* 0,525 dan pH 3 pada katoda hari ke-9:

$$\text{Tegangan listrik} = 0,710 \text{ V}$$

$$\text{Arus listrik} = 0,5 \text{ mA}$$

$$\text{Luas permukaan elektroda} = 510,25 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned}
 \text{Power Density} \left(\frac{\text{mW}}{\text{m}^2} \right) &= \frac{I (\text{mA}) \times V (\text{Volt})}{A (\text{m}^2)} \\
 &= \frac{0,5 \times 0,71}{0,05103} \\
 &= 6,957 \left(\frac{\text{mW}}{\text{m}^2} \right)
 \end{aligned}$$

Digunakan cara yang sama untuk perhitungan yang lain.

3. Hasil Uji Analisa BOD

Tabel A-17 Analisa BOD untuk semuavariabel *recycle ratio*(RR) bakteri *Shewanella oneidensis MR-1*(v/v) pada katoda pH 3 selama 9 hari

Hari Ke -	BOD ₅ (mg/L)			
	RR 0,525	RR 0,6	RR 0,75	RR 0,85
0	31300	28700	39000,98	31700
2	28880	18700,23	31300	28500,7
5	24004	10421,69	23000	25954,98
7	27050,9	6513,68	36000	18796,08
9	25700,78	12687,24	27979,6	15235,79

Tabel A-18 Analisa BOD untuk semuavariabel *recycle ratio*(RR) bakteri *Shewanella oneidensis MR-1*(v/v) pada katoda pH 4 selama 9 hari

Hari Ke -	BOD ₅ (mg/L)			
	RR 0,525	RR 0,6	RR 0,75	RR 0,85
0	27700	30240	29750	31250,9
2	20599,17	19780	15980	18764,6
5	8147,69	8546,37	5150,33	13240,49
7	4679,72	7025,86	9210,81	13828,18
9	5194,82	6659,04	9735,03	12186,09

4. Hasil pH di kompartemen Katoda

Tabel A-19 Analisa pH untuk semua variabel *recycle ratio*(RR) bakteri *Shewanella oneidensis MR-1*(v/v) pada katoda pH 3 selama 9 hari

Hari Ke -	pH Anoda untuk variabel ratio recycle			
	0,525	0,6	0,75	0,85
0	6,78	6,89	7,01	6,78
1	5,12	7,02	6,54	5,12
2	4,02	6,91	6,56	5,22
3	4,98	6,89	6,53	4,98
4	4,99	6,93	6,49	8,57
5	3,67	6,47	6,21	3,67
6	4,07	6,68	6,4	4,07
7	4,21	6,72	5,98	5,9
8	5,01	6,75	5,75	5,01
9	4,9	6,63	5,01	4,9

Tabel A-20 Analisa pH untuk semua variabel *recycle ratio* (RR) bakteri *Shewanella oneidensis MR-1*(v/v) pada katoda pH 4 selama 9 hari

Hari Ke -	pH Anoda untuk variabel ratio recycle			
	0,525	0,6	0,75	0,85
0	6,98	6,41	7,01	6,55
1	6,78	6,01	6,9	6,41
2	6,84	6,3	6,87	6,11
3	6,76	5,5	6,85	6,15
4	6,79	3,51	6,88	6,4
5	6,65	3,63	6,1	5,9
6	6,5	4,26	6	5,87
7	5,09	4,35	3,2	6,01
8	3,55	4,02	3,57	5,98
9	5,6	5,01	4,1	5,88

Tabel A-21 Analisa pH untuk semua variabel *recycle ratio* (RR) bakteri *Shewanella oneidensis MR-1*(v/v) pada katoda pH 3 selama 9 hari

Hari Ke -	pH Katoda untuk variabel ratio recycle			
	0,525	0,6	0,75	0,85
0	2,81	2,9	2,93	2,81
1	2,71	2,86	2,83	2,71
2	2,54	2,89	2,9	2,54
3	2,74	2,73	2,88	2,74
4	2,61	2,95	2,86	2,61
5	2,79	2,67	2,94	2,79
6	2,66	2,79	2,79	2,66
7	2,7	2,72	2,64	2,7
8	2,68	2,82	2,81	2,68
9	2,82	2,77	2,76	2,82

Tabel A-22 Analisa pH untuk semua variabel *recycle ratio* (RR) bakteri *Shewanella oneidensis MR-1*(v/v) pada katoda pH 4 selama 9 hari

Hari Ke -	pH Katoda untuk variabel ratio recycle			
	0,525	0,6	0,75	0,85
0	4,02	3,98	3,99	3,77
1	3,98	3,79	3,88	3,71
2	3,99	3,76	3,86	3,75
3	3,87	3,77	3,9	3,65
4	3,74	3,74	3,7	3,64
5	3,93	3,73	3,72	3,65
6	3,86	3,78	3,74	3,72
7	3,79	3,71	3,78	3,71
8	3,7	3,7	3,81	3,7
9	3,72	3,7	3,73	3,74

5. Hasil Reduksi Logam Berat

Tabel A-23 Analisa reduksi logam untuk semua variabel *recycle ratio* (RR) bakteri *Shewanella oneidensis MR-1*(v/v) pada katoda pH 3 selama 9 hari

Hari Ke -	Reduksi Logam Cr(mg/L)			
	RR 0,525	RR 0,6	RR 0,75	RR 0,85
0	8,09	7,95	7,97	8,11
2	5,06	3,79	4,92	4,02
5	0,897	0,015	0,387	0,06
7	5,225	0,032	0	0,025
9	0,152	0,04	0,097	0,09

Tabel A-24 Analisa reduksi logam untuk semua variabel *recycle ratio* (RR) bakteri *Shewanella oneidensis MR-1*(v/v) pada katoda pH 4 selama 9 hari

Hari Ke -	Reduksi Logam Cr(mg/L)			
	RR 0,525	RR 0,6	RR 0,75	RR 0,85
0	8,13	8,201	7,899	8,099
2	4,226	5,268	4,594	4,002
5	1,285	0,043	0	0,021
7	0,057	0,06	0,048	0,016
9	0,069	0,099	0,059	0,078

RIWAYAT PENULIS



Penulis bernama lengkap Martiana Nugraeny, dilahirkan di Pekalongan, 31 Maret 1996, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal SD Muhammadiyah 02 Bendan Pekalongan, SMP Negeri 01 Pekalongan, SMA Negeri 01 Pekalongan. Penulis pernah melaksanakan kerja praktek di Vico Indonesia Muara Bada Kalimantan

Timur. Penulis mengambil penelitian di laboratorium Pengolahan Limbah Industri, dan telah menyelesaikan tugas pra desain pabrik dengan judul “Pra Desain Pabrik Tepung Berkalsium Tinggi Berbahan Dasar Tulang Ikan Tuna” dan skripsi dengan judul “Pengolahan Limbah Molases Sebagai Sumber Energi Listrik Serta Reduksi Logam Berat Cr(VI) dengan Reaktor Dual Chamber *Microbial Fuel Cells* (MFC) Sistem Kontinyu”.

 :martiananugraeny@gmail.com

RIWAYAT PENULIS



Penulis bernama lengkap Tri Wahyuning Eka Purnama Sari, dilahirkan di Bojonegoro 31 Juli 1996, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal SD Negeri Wadang 1, SMP Negeri 1 Kalitidu, SMA Negeri 1 Bojonegoro, S1 Teknik Kimia FTI-ITS. Penulis pernah melaksanakan kerja praktek di PT Pupuk Kalimantan Timur Pabrik 2 bagian Urea Plan. Penulis mengambil penelitian di laboratorium Pengolahan Limbah Industri, dan telah menyelesaikan tugas pra desain pabrik dengan judul “Pra Desain Pabrik Tepung Berkalsium Tinggi Berbahan Dasar Tulang Ikan Tuna” dan skripsi dengan judul “Pengolahan Limbah Molases Sebagai Sumber Energi Listrik Serta Reduksi Logam Berat Cr(VI) dengan Reaktor Dual Chamber *Microbial Fuel Cells* (MFC) Sistem Kontinyu”.



: triwahyuning96@gmail.com