

**POTENSI BIOLISTRIK LIMBAH INDUSTRI TAHU
MENGUNAKAN SISTEM *MICROBIAL FUEL CELL***

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun Oleh :

IRDA MAYANTI BACHRY

NIM : 4515044006

PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA

UNIVERSITAS BOSOWA

FAKULTAS TEKNIK

2019

**POTENSI BIOLISTRIK LIMBAH INDUSTRI TAHU
MENGUNAKAN SISTEM *MICROBIAL FUEL CELL***

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun Oleh :

IRDA MAYANTI BACHRY

NIM : 4515044006

PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA

UNIVERSITAS BOSOWA

FAKULTAS TEKNIK

2019

LEMBAR PERSETUJUAN
POTENSI BIOLISTRIK LIMBAH INDUSTRI TAHU
MENGGUNAKAN SISTEM *MICROBIAL FUEL CELL*

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun Oleh :

IRDA MAYANTI BACHRY
NIM : 4515044006

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

(Dr.A. Ir. Zulhikar Syaiful., MT)
NIDN : 0918026902

Dosen Pembimbing II

(M. Tang., ST., M.Pkim)
NIDN : 0913027503

LEMBAR PENGESAHAN
POTENSI BIOLISTRIK LIMBAH INDUSTRI TAHU
MENGGUNAKAN SISTEM *MICROBIAL FUEL CELL*

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :
IRDA MAYANTI BACHRY
NIM : 4515044006

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus
Pada Tanggal 13 September 2019

Pembimbing

1. Dr.A. Ir. Zulfikar Syaiful., MT
2. M. Tang., ST., M.Pkim


Penguji

1. Al Gazali, ST., MT
2. Hermawati, S.Si., M.Eng

Tanda Tangan

.....
.....
.....

Makassar, 16 Oktober 2019
Ketua Program Studi Teknik Kimia


M. Tang., ST., M.Pkim
NIDN : 0913027503

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT atas Rahmat dan Anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Potensi Biolistrik Limbah Industri Tahu Menggunakan Sistem *Microbial Fuel Cell*”.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan Program Studi S1 pada Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Bosowa Makassar. Selain itu diharapkan dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya terkait *Microbial Fuel Cell*.

Dalam menyelesaikan skripsi ini, penulis banyak menerima bimbingan, bantuan dan motivasi dari berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ridwan, ST., M.Si, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Bosowa.
2. Bapak M.Tang, ST., M.Pkim selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Bosowa sekaligus sebagai dosen pembimbing.
3. Bapak Dr. Ir. A. Zulfikar Syaiful, MT selaku dosen pembimbing yang telah bersedia memberikan bimbingan dan arahan bagi penulis sampai terselesaikannya skripsi ini.
4. Seluruh dosen pengajar Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Bosowa Makassar yang telah memberikan ilmu kepada penulis selama menjalankan studi.
5. Ibu Nurmiaty Darwis, ST dan Ibu Yuli selaku staff jurusan yang telah membantu penulis selama perkuliahan.
6. Teristimewa, Orang tua dan keluarga penulis yang tak henti-hentinya memberikan dukungan baik secara moril maupun materil kepada penulis selama menjalankan studi.
7. Irwan Yusuf, yang selalu memberikan motivasi dari awal perkuliahan hingga saat ini.
8. Almamaterku, Teknik Kimia angkatan 2015 Universitas Bosowa

9. Dan seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang juga turut memberikan bantuan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat kesalahan, oleh karena itu saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan penulisan ini.

Akhir kata, semoga tulisan ini bermanfaat bagi kita semua. Terima kasih.

Makassar, Juli 2019

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
INTISARI.....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan masalah.....	2
1.3 Tujuan penelitian.....	2
1.4 Manfaat penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Sel volta.....	4
2.2 Microbial fuel cell	5
2.3 Limbah industri tahu	14
2.4 State of the art	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Waktu dan lokasi penelitian	21
3.2 Sampel penelitian	21
3.3 Alat dan bahan penelitian.....	21
3.4 Variabel Penelitian	22
3.5 Prosedur penelitian.....	23
3.6 Diagram Alir Penelitian	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Hasil Penelitian	26
4.2 Pembahasan.....	34

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	39
5.1 Kesimpulan	39
5.2 Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA	40
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 State Of The Art.....	20
Tabel 3.1 Alat Penelitian.....	21
Tabel 3.2 Bahan Penelitian	22
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Tegangan (stainless steel).....	28
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Tegangan (karbon grafit).....	29
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Kuat Arus (stainless steel).....	30
Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Kuat Arus (karbon grafit).....	31
Tabel 4.5 Hasil Pengukuran <i>Power Density</i> (stainless steel).....	32
Tabel 4.6 Hasil Pengukuran <i>Power Density</i> (karbon grafit).....	33
Tabel 4.6 Tegangan, Kuat arus dan <i>Power Density</i> MFC dengan elektroda <i>stainless steel</i> dan karbon grafit.....	33

BOSOWA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rangkaian Sel Volta dan Jembatan Garam	4
Gambar 2.2 Skema Prinsip Kerja MFC	7
Gambar 2.3 Skema Single Chamber dan Dual Chamber MFC	8
Gambar 2.4 Skema Stack Chamber MFC	8
Gambar 2.5 Diagram Alir Pembuatan Tahu	15
Gambar 2.6 Bakteri Methanothermus	16
Gambar 2.7 Bakteri Methanosphaera.....	16
Gambar 2.8 Bakteri Methanospirillum	16
Gambar 2.9 Bakteri Methanococcus.....	16
Gambar 2.10 Bakteri Methanomicrobium	16
Gambar 3.1 Rancangan Alat Penelitian	23
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 4.1 Rangkaian Alat	26
Gambar 4.2 Grafik Hasil Pengukuran Tegangan (stainless steel).....	28
Gambar 4.3 Grafik Hasil Pengukuran Tegangan (karbon grafit).....	29
Gambar 4.4 Grafik Hasil Pengukuran Kuat Arus (stainless steel).....	30
Gambar 4.5 Grafik Hasil Pengukuran Kuat Arus (karbon grafit).....	31
Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengukuran <i>Power Density</i> (stainless steel).....	32
Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengukuran <i>Power Density</i> (karbon grafit).....	33
Gambar 4.8 Tegangan, Kuat arus dan <i>Power Density</i> MFC <i>stainless steel</i>	34
Gambar 4.9 Tegangan, Kuat arus dan <i>Power Density</i> MFC karbon grafit.	35

INTISARI

Tujuan penelitian ini untuk mengetahui potensi biolistrik limbah industri tahu dalam sistem MFC dengan menggunakan jenis elektroda yang berbeda yaitu *stainless steel* dan karbon grafit.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode *dual chamber*, dimana sistem MFC tersebut terdiri dari 2 bejana yang merupakan ruang anoda yang berisi limbah tahu dan ruang katoda yang berisi larutan elektrolit KMnO_4 . Kedua ruang ini dihubungkan dengan *salt bridge* sebagai penukar proton. Penggunaan dua jenis elektroda yang berbeda dilakukan untuk mengetahui pengaruh elektroda terhadap listrik yang dihasilkan dalam sistem MFC tersebut. Sistem MFC dioperasikan selama 48 jam dengan pengukuran tegangan dan arus setiap 6 jam.

Hasil penelitian menunjukkan voltase dan arus listrik semakin lama semakin menurun. Tegangan maksimum yang dihasilkan diperoleh pada jam ke-12 sebesar 3 Volt dengan kuat arus 0,0000375 A yang diberi hambatan luar sebesar 80.000Ω yaitu berasal dari sistem MFC dengan elektroda *stainless steel*. Sedangkan *power density* maksimum yang diperoleh yaitu sebesar $32,63 \text{ mW/m}^2$ yang berasal dari sistem MFC dengan elektroda karbon grafit.

Kata Kunci: *Microbial Fuel Cell, limbah tahu, stainless steel, karbon grafit, power density.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan konsumsi energi dalam negeri telah menambah daftar masalah nasional. Ancaman krisis energi menjadi masalah yang tidak bisa diabaikan. Salah satu penyebab krisis energi yaitu pilihan sumber energi yang digunakan *non renewable*. Sumber energi yang digunakan pada umumnya berbasis karbon sehingga dapat menyebabkan gas rumah kaca (*greenhouse*, GHG). Krisis energi memicu adanya konversi energi dari energi fosil (berbasis karbon) ke energi alternatif (berbasis hidrogen).

Bahan Bakar Hidrogen adalah sumber energi masa depan *ecoenergy* dengan proses pembakaran yang hanya menghasilkan air dan energi (listrik dan panas). Hidrogen dan listrik dapat menjadi komponen penting dalam upaya penurunan emisi CO₂ jika kedua komponen tersebut dapat diproduksi dari sumber bukan fosil, seperti *fuel cell*. Tidak hanya hidrogen, sekarang diketahui bahwa listrik juga dapat diproduksi secara langsung dari degradasi bahan organik seperti glukosa dan asetat, dari limbah cair domestik, bahkan dari sedimen laut dalam suatu teknologi *Microbial Fuel Cell* (MFC) [Herlian E. Putra, dkk]. *Microbial Fuel Cell* (MFC) merupakan salah satu tipe *fuel cell* yaitu teknologi pengolahan limbah cair yang dapat menghasilkan listrik sekaligus menurunkan kandungan organik dalam limbah. Sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC) mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan mikroorganisme sebagai katalis.

MFC adalah sistem atau alat yang menggunakan bakteri sebagai katalis untuk mengoksidasi bahan organik dan anorganik. Elektron diproduksi oleh bakteri dari substrat yang kemudian ditransfer ke anoda (kutub negatif) dan di alirkan ke katoda (kutub positif) yang disambungkan oleh perangkat konduktivitas termasuk resistor atau dioperasikan di bawah muatan untuk menghasilkan listrik yang dapat menjalankan alat. Aliran positif pengukur arus mengalir dari kutub positif ke negatif, arah yang berlawanan dengan aliran elektron [Agustin dkk, 2014]

Dalam sistem MFC, material organik dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk metabolisme bakteri. Penggunaan limbah cair organik dalam hal ini air limbah industri tahu sekaligus dapat mendegradasi senyawa organik di dalamnya sehingga penerapan sistem MFC ini lebih ramah lingkungan. Sistem MFC memang menghasilkan energi listrik yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik lainnya, namun karena kemampuannya untuk menghasilkan listrik sekaligus menurunkan kadar organik dalam limbah, MFC memiliki prospek yang cerah dalam perkembangan bioenergi ramah lingkungan. Penerapan sistem MFC diharapkan dapat menjadi satu langkah ke depan untuk mendapatkan sumber *renewable energy* sehingga dapat mengurangi konsumsi energi fosil.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana kapasitas listrik yang dihasilkan limbah industri tahu dalam sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC) dengan menggunakan jenis elektroda yang berbeda, yaitu karbon grafit dan *stainless steel*?
2. Bagaimana waktu optimum yang bisa digunakan dalam sistem MFC tersebut?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian dengan judul : “Potensi Biolistrik Limbah Industri Tahu Menggunakan Sistem *Microbial Fuel Cell*”, bertujuan untuk :

1. Mengetahui kapasitas listrik yang dihasilkan limbah industri tahu dalam sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC) menggunakan jenis elektroda yang berbeda, yaitu karbon grafit dan *stainless steel*.
2. Mengetahui waktu optimum yang bisa digunakan dalam sistem MFC tersebut.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Perancangan sistem MFC yang *low-cost* sehingga dapat diterapkan sebagai sumber energi alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.
2. Memberikan informasi mengenai potensi energi listrik sekaligus pengolahan limbah yang diperoleh melalui sistem MFC.
3. Dapat menjadi acuan untuk penelitian lebih lanjut atau metode lainnya.



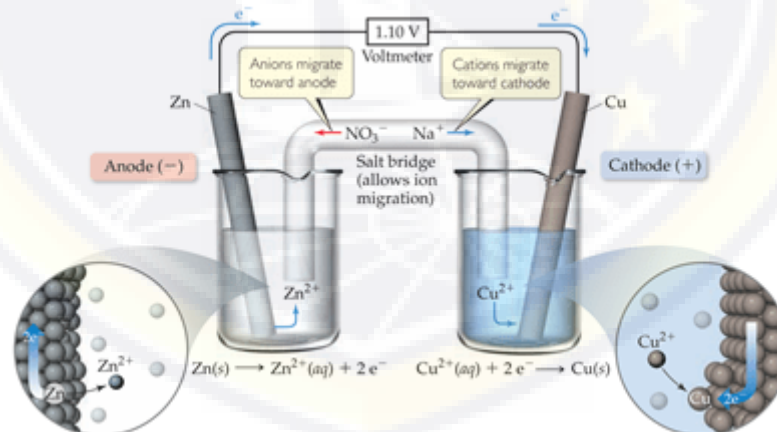
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Volta

Sel volta (sel galvanik) adalah sel elektrokimia di mana energi kimia dari reaksi redoks spontan diubah menjadi energi listrik. Reaksi redoks spontan yang dapat mengakibatkan terjadinya energi listrik ini ditemukan oleh Luigi Galvani dan Alessandro Guisepe Volta. Prinsip kerja sel volta dalam menghasilkan arus listrik adalah aliran transfer elektron dari reaksi oksidasi di anode ke reaksi reduksi di katode melalui rangkaian luar. Secara umum, sel volta tersusun dari:

1. Anode, yaitu elektrode tempat terjadinya reaksi oksidasi.
2. Katode, yaitu elektrode tempat terjadinya reaksi reduksi.
3. Elektrolit, yaitu zat yang dapat menghantarkan listrik.
4. Rangkaian luar, yaitu kawat konduktor yang menghubungkan anode dengan katode.
5. Jembatan garam, yaitu rangkaian dalam yang terdiri dari larutan garam. Jembatan garam memungkinkan adanya aliran ion-ion dari setengah sel anode ke setengah sel katode, dan sebaliknya sehingga terbentuk rangkaian listrik tertutup.



Gambar 2.1 Rangkaian Sel Volta dan Jembatan Garam
Sumber: Brown, Theodore L. et al. 2015

2.2 Microbial Fuel Cell (MFC)

MFC adalah sistem bioelektrokimia yang mampu membangkitkan energi listrik dari oksidasi substrat organik dan anorganik dengan bantuan katalis mikroorganisme. Microbial fuel cell memiliki komponen yang sama seperti fuel cell, yang tersusun dari beberapa komponen seperti anoda, katoda, dan elektrolit. Pada Microbial Fuel Cell, komponen anoda yang digunakan adalah kultur mikroorganisme. Penggunaan mikroorganisme dalam MFC ini memiliki tujuan yaitu untuk menggantikan fungsi enzim sehingga dihasilkan substrat yang lebih murah. Microbial Fuel Cell memiliki keuntungan yang lebih banyak dibandingkan fuel cell. Hal ini karena MFC dapat menghasilkan energi listrik dari sampah organik dan biomassa terbaru. Bakteri mampu menjadi katalis dan beradaptasi dengan baik terhadap bahan-bahan organik berbeda yang terdapat pada limbah lingkungan sehingga menghasilkan elektron. Penggunaan katalis yang digunakan pada fuel cell biasa berupa platina yang harganya relatif mahal, sedangkan pada microbial fuel cell dapat digantikan oleh pertumbuhan mikroorganisme di dalamnya.

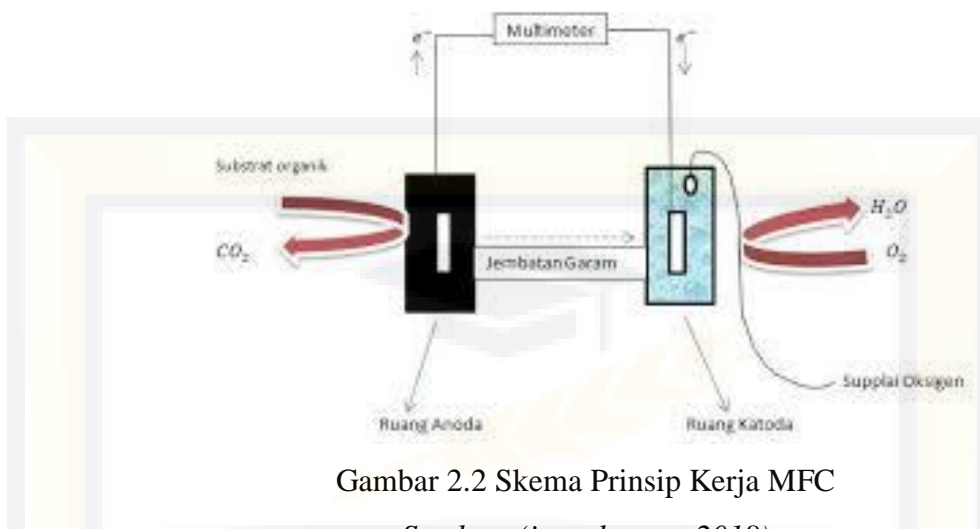
Berbagai macam bentuk bahan organik dapat digunakan sebagai substrat dalam microbial fuel cell, seperti asam lemak, pati, glukosa, protein dan asam amino, serta air limbah dari hewan dan manusia. Kinerja MFC dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, faktor-faktor yang mempengaruhi antara lain kecepatan degradasi substrat oleh bakteri, transfer proton dalam larutan dan kecepatan transfer elektron dari bakteri ke anoda. Selain itu, kinerja MFC juga dapat dipengaruhi oleh aktivitas mikroba dan substrat yang digunakan. Kinerja MFC dapat juga dipengaruhi oleh temperatur karena berkaitan langsung dengan kinetik bakteri, kecepatan reaksi oksigen yang dikatalis oleh katoda dan kecepatan transfer proton melalui larutan. Faktor lainnya adalah komponen penyusun MFC, seperti elektroda (anoda dan katoda) dan membran penukar proton, serta kelengkapan alat pada membran.

2.2.1 Prinsip Kerja MFC

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

Bakteri merupakan organisme yang sangat kecil yang bisa mengkonversi berbagai macam senyawa organik menjadi CO₂, air dan energi. Bakteri yang mempunyai kemampuan mentransfer elektron secara ekstraseluler disebut *exoelectrogen* [B. Logan]. Mikroba menggunakan energi yang dihasilkan untuk tumbuh dan melangsungkan aktivitas metabolisme. Pertumbuhannya pada umumnya sangat cepat sehingga dapat menghasilkan komunitas mikroorganisme dalam jumlah yang besar [Zhuwei Du, dkk 2016]. Sejumlah bakteri *exoelectrogen* dilaporkan membentuk struktur khusus yang dinamakan *nanowire* yang diperkirakan berfungsi sebagai penghantar elektron [B.E. Logan].

Dalam MFC, yang dapat digunakan sebagai donor elektron adalah zat hasil metabolisme mikroba atau elektron yang dilepaskan mikroba saat melakukan metabolismenya. Zat hasil metabolisme mikroba umumnya merupakan senyawa yang mengandung nitrogen, seperti etanol, metanol, atau gas metana. Senyawa ini dapat digunakan sebagai sumber hidrogen melalui serangkaian proses untuk memproduksi elektron dan menghasilkan arus listrik. Setiap aktivitas metabolisme yang dilakukan mikroba umumnya melibatkan pelepasan elektron bebas ke medium. Elektron ini dapat dimanfaatkan langsung pada anoda dalam MFC untuk menghasilkan arus listrik. Secara umum mekanisme prosesnya adalah substrat dioksidasi oleh bakteri menghasilkan elektron dan proton pada anoda. Elektron ditransfer melalui sirkuit eksternal, sedangkan proton didifusikan melalui separator membran menuju katoda. Pada katoda, reaksi elektron dan proton terhadap oksigen akan menghasilkan air. Berikut merupakan skema prinsip kerja MFC.

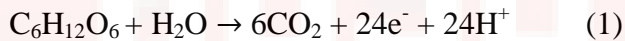


Gambar 2.2 Skema Prinsip Kerja MFC

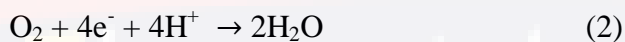
Sumber: (jurnal eproc.2018)

Reaksi yang terjadi pada MFC dengan contoh substrat glukosa diberikan pada persamaan (1) dan (2), yaitu:

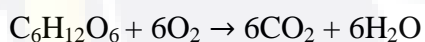
Reaksi pada anoda:



Reaksi pada katoda:



Reaksi overall:



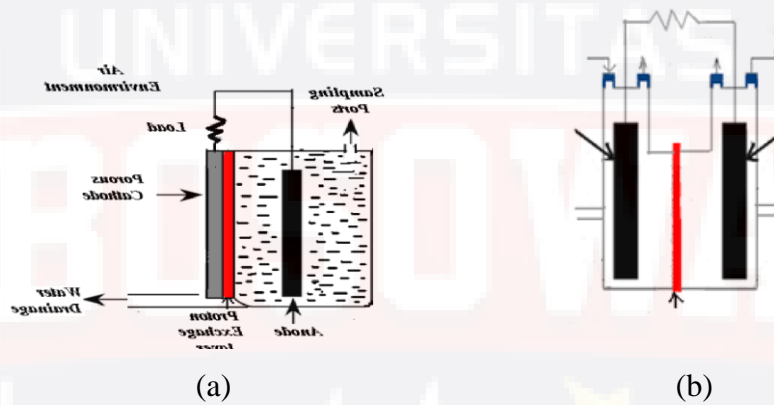
2.2.2 Jenis Sistem MFC

Sistem MFC dalam perkembangannya memiliki berbagai tipe sesuai dengan aplikasinya. Secara umum sistem MFC bisa dibedakan berdasarkan desain kompartemennya, penggunaan membran penukar elektron dan kultur mikroba yang digunakan dalam MFC tersebut.

1. Berdasarkan desain kompartemen

Berdasarkan kompartemennya terdapat tiga jenis MFC, yaitu *dual chamber* MFC, *single chamber* MFC dan *stack* MFC. *Dual chamber* MFC pada intinya memiliki dua ruang yang dipisahkan oleh membran penukar kation (PEM) atau jembatan garam. Ruang anoda merupakan ruangan yang

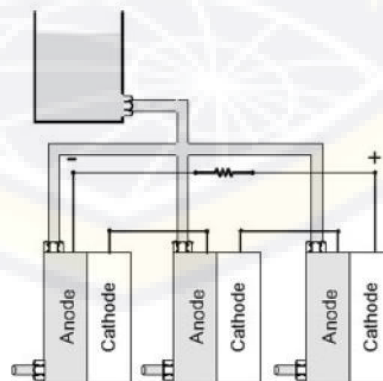
berisi substrat dan bakteri, sementara ruang katoda berisi larutan elektrolit. *Single chamber* MFC hanya memiliki satu ruang sehingga substrat dan larutan elektrolit bercampur. Desain ini bisa menggunakan PEM ataupun tanpa PEM. Sedangkan *Stack* MFC merupakan rangkaian dari beberapa unit MFC baik *dual chamber* maupun *single chamber* yang dirangkai seri, paralel ataupun seri paralel. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kapasitas daya yang bisa diproduksi. Berikut skema *single chamber* MFC dan *dual chamber* MFC yang ditunjukkan pada gambar 2.1 dan *stack chamber* MFC ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.3

(a) Skema *single chamber* MFC ; (b) skema *dual chamber* MFC

Sumber: (Karmakar *et.al.*, 2010)



Gambar 2.4 skema *stack chamber* MFC

Sumber: (Ieropoulos *et al.*, 2008)

2. Berdasarkan ada tidaknya membran

Pada sistem *dual chamber* MFC PEM dibutuhkan untuk menghindari difusi aseptor elektron yang beracun seperti ferisianida ke dalam ruang katoda sekaligus untuk memfasilitasi transfer proton atau kation lainnya ke ruang katoda. Sementara pada *single chamber* MFC, membran berfungsi untuk menghalangi difusi oksigen. Membran yang biasa digunakan adalah Nafion dan Ultrex CMI-7000. Hal ini dikarenakan konduktivitas proton yang tinggi serta kestabilan mekanis dan termal dari membran tersebut. Harga membran Nafion yang mahal membuat beberapa peneliti mencari alternatif yang lebih murah. Beberapa jenis *low-cost membrane* telah dicoba seperti tanah liat [Behera et al., 2010]. MFC tanpa membran merupakan salah satu alternatif untuk meminimalisir biaya. Sistem membran yang mahal dan rumit bisa dihindari dengan memanfaatkan perkembangan biofilm yang terjadi di permukaan katoda. Biofilm merupakan sebuah populasi bakteri yang bisa berfungsi sebagai membran untuk meminimalisir difusi oksigen ke anoda. Densitas daya yang lebih tinggi dapat diperoleh pada sistem MFC tanpa membran, karena kemampuan sistem dalam menurunkan hambatan internal.

3. Berdasarkan kultur yang digunakan

Sistem MFC menggunakan kultur sel tunggal telah banyak diteliti, diantaranya dengan menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* (Zahara, 2010), *E. coli* (Scott and Murano, 2007), *Geobacter sulfurreducens* (Yia et al., 2009). Penggunaan kultur sel tunggal memerlukan pemeliharaan dan pekerjaan yang lebih rumit dan memakan biaya. Selain itu kultur sel tunggal menghasilkan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan *mix culture*. Untuk pengolahan air dan limbah, *mix culture* lebih dipilih dari pada *single culture*. *Mix culture* bisa dengan mudah beradaptasi untuk menggunakan material organik kompleks dalam aliran limbah. Proses dengan menggunakan *mix culture* lebih mudah dioperasikan dan dikontrol. Komunitas bakteri yang berkembang pada sistem *mix culture* sangat beragam, mulai dari δ -*Proteobacteria* yang dominan pada MFC sedimen sampai

komunitas yang terdiri dari α -, β -, γ -, δ - *Proteobacteria*, dan kloni yang belum terkarakterisasi [Logan and Regan, 2006].

2.2.3 Material Elektroda

Teknologi MFC merupakan teknologi berbasis prinsip elektrokimia sehingga diperlukan material elektroda yaitu anoda dan katoda.

Material yang digunakan sebagai anoda harus bersifat konduktif, *biocompatible* (bisa beradaptasi dengan makhluk hidup), dan secara kimia stabil di dalam larutan bioreaktor. Logam anoda dapat berupa *stainless steel* nonkorosif, tetapi tembaga tidak dapat digunakan akibat adanya toksisitas ion tembaga pada bakteri [Zahara, 2011]. Material yang umum digunakan sebagai anoda pada sistem MFC adalah material berbasis karbon, karena sifat konduktivitasnya tinggi, stabil, strukturnya kuat, sifat permukaan yang sesuai untuk perkembangan biofilm dan luas permukaan yang memadai. Beberapa contohnya adalah grafit dalam bentuk batangan, lempeng, busa granular dan karbon aktif [Liu, 2008]. Lempengan atau batang grafit banyak dipakai karena relatif murah, sederhana dan memiliki luas permukaan tertentu. Karbon aktif adalah karbon dengan struktur *amorphous* atau monokristalin yang telah melalui perlakuan khusus sehingga memiliki luas permukaan yang sangat besar (300-2000 m²/g). Karakteristik karbon yang ideal adalah pada rentang pH antara 5-6 (50g/L H₂O, 20°C), titik leleh 3800 °C, dan ukuran partikel $\leq 50 \mu\text{m}$. Resin perekat berguna untuk merekatkan karbon aktif sehingga memiliki struktur yang kuat dan tidak rapuh selama MFC dioperasikan. Resin perekat ini digunakan karena memiliki konduktivitas yang rendah yaitu $10^{-10}/\Omega\cdot\text{m} - 10^{-15}/\Omega\cdot\text{m}$ [Zahara, 2011].

Pada ruang katoda, bahan yang dapat digunakan sebagai elektroda dapat berupa bahan karbon biasa seperti plat grafit namun bisa juga dilengkapi dengan katalis seperti platinum [Liu, 2008]. Selain itu bisa juga digunakan kalium ferrisianida (K₃[Fe(CN)₆]) yang dikenal sangat baik sebagai aseptor elektron dalam sistem MFC. (K₃[Fe(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 katoda karbon. Akan tetapi kerugian terbesar adalah terjadinya proses reoksidasi yang tidak sempurna oleh oksigen sehingga larutannya harus diganti secara teratur [Zahara, 2011].

2.2.4 Jembatan Garam

Jembatan garam yaitu memiliki fungsi yang sama seperti membran penukar proton [Bishop Smallman]. Jembatan garam biasanya berupa tabung berbentuk U yang diisi dengan agar-agar yang dijenuhkan dengan KCl. Jembatan garam berfungsi untuk menjaga kenetralan muatan listrik pada larutan. Karena konsentrasi larutan elektrolit pada jembatan garam lebih tinggi daripada konsentrasi elektrolit di kedua bagian elektroda, maka ion negatif dan ion positif dari jembatan garam berdifusi ke bagian lain yang kelebihan muatan negatif. Mekanisme ini terus berlangsung selama muatan listrik di kedua ruang tersebut tidak seimbang. Dengan adanya jembatan garam terjadi aliran elektron yang kontinu melalui kawat pada rangkaian luar dan aliran ion-ion melalui larutan sebagai akibat dari reaksi redoks yang spontan yang terjadi pada kedua elektroda. Desain jembatan garam yang baik adalah semakin tipis atau pendek maka jembatan garam akan semakin bagus karena proton akan lebih mudah mengalir dari anoda ke katoda.

2.2.5 Faktor Operasional Pada Sistem MFC

Terdapat beberapa faktor operasional yang mempengaruhi kinerja sistem MFC. Faktor tersebut meliputi substrat, sifat kimia larutan, temperature dan waktu tinggal (*hydraulic retention time*, HRT).

1. Substrat

Substrat merupakan faktor kunci untuk produksi listrik yang efisien dalam sistem MFC. Substrat yang digunakan mulai dari material organik sederhana sampai campuran kompleks seperti yang terdapat pada limbah cair. Meskipun substrat yang kaya dengan kandungan organik membantu pertumbuhan beragam mikroba aktif, namun substrat sederhana dianggap lebih baik untuk

produksi dalam waktu singkat. Beberapa substrat yang telah digunakan seperti asetat, glukosa, biomassa lignoselulosa dari sampah pertanian, limbah cair industri bir, limbah pati (tepung), selulosa dan kitin [Das and Mangwani, 2010].

2. Sifat Kimia Larutan

a. pH

pH merupakan faktor kritis untuk semua proses berbasis mikroba. Pada MFC, pH tidak hanya mempengaruhi metabolisme dan pertumbuhan bakteri tapi juga terhadap transfer proton, reaksi katoda, sehingga mempengaruhi performa MFC. Sebagian besar MFC beroperasi pada pH mendekati netral untuk menjaga kondisi pertumbuhan optimal komunitas mikroba yang terlibat dalam pembentukan listrik [Liu, 2008].

b. Kekuatan Ionik

Kekuatan ion mempengaruhi konduktivitas larutan pada ruangan MFC sehingga mempengaruhi hambatan internal, yang akhirnya berefek pada performa MFC [Liu, 2008].

3. Temperature

Kinetika bakteri, transfer massa proton melalui elektrolit dan laju reaksi oksigen pada katoda menentukan performa MFC dan semua tergantung kepada temperatur. Biasanya, konstanta reaksi biokimia mengganda setiap kenaikan temperatur 10^0 C sampai tercapai temperatur optimal. Sebagian besar studi MFC dilakukan pada temperatur 28-35 0 C [Liu, 2008].

4. *Hydraulic Retention Time* (HRT)

Hydraulic Retention Time (HRT) merupakan variabel penting lainnya dalam pengolahan limbah menggunakan MFC. HRT mempengaruhi penurunan kadar COD/BOD dan pembentukan daya pada MFC [Liu, 2008].

2.2.6 Aplikasi Sistem MFC

Sistem MFC sejauh ini sudah diaplikasi dalam beberapa bidang, diantaranya untuk pengolahan limbah cair dan penghasil energi listrik, biosensor, dan produksi bahan bakar sekunder.

1. Pengolah Limbah Cair dan Penghasil Energi Listrik

Teknologi MFC menarik untuk pengolahan limbah karena sistem ini memungkinkan kita untuk mengambil energi dari limbah untuk produksi listrik. MFC menggunakan mikroba tertentu memiliki kemampuan untuk menghilangkan kandungan sulfida yang merupakan salah satu parameter penting pada pengolahan limbah. Substrat MFC memiliki kandungan promotor pertumbuhan yang bisa meningkatkan pertumbuhan mikroba bioelektrokimia selama proses pengolahan limbah.

2. Biosensor

Sistem MFC dengan komunitas *consortium* anaerobik yang bisa diganti bisa digunakan sebagai biosensor untuk *on-line monitoring* senyawa organik. Meskipun beberapa metode konvensional telah digunakan untuk menghitung nilai BOD pada limbah, namun metode - metode tersebut tidak cocok untuk *on-line monitoring* dan kontrol proses pengolahan limbah secara biologis.

3. Produksi Bahan Bakar Sekunder

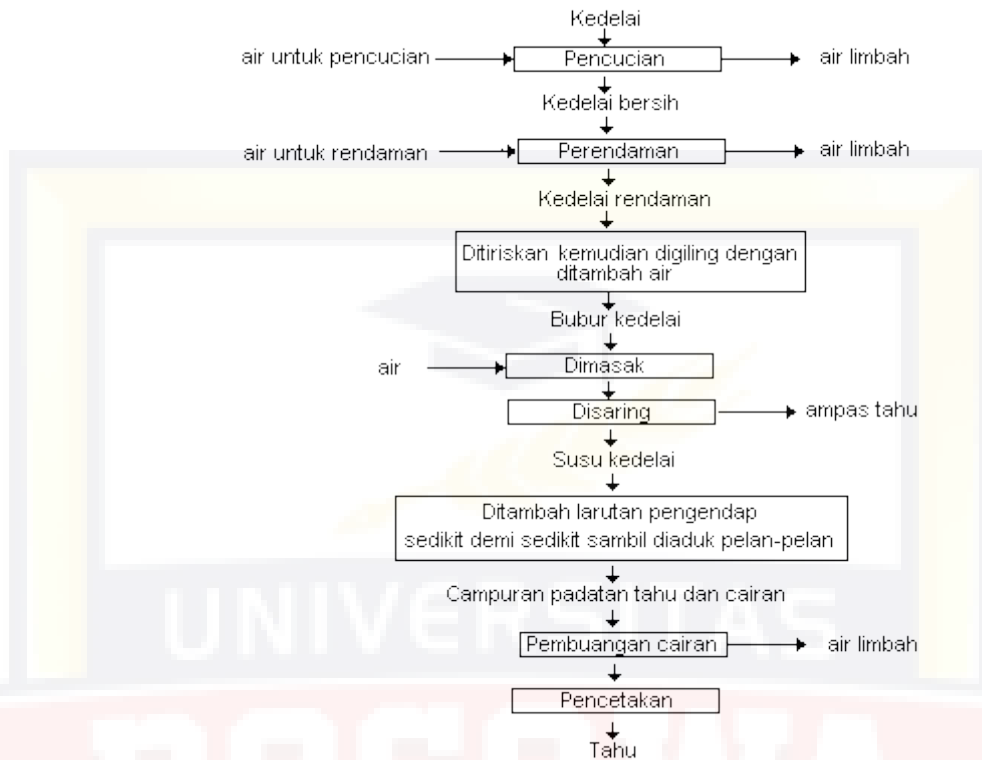
Dengan sedikit modifikasi, MFC bisa digunakan untuk memproduksi bahan bakar sekunder seperti hidrogen sebagai alternatif listrik. Pada kondisi eksperimen standar, proton dan elektron yang dihasilkan pada ruang anoda ditransfer ke katoda yang kemudian bisa berkombinasi dengan oksigen membentuk air. Pembentukan hidrogen secara termodinamika merupakan proses yang sulit pada sebuah sel untuk mengkonversi proton dan elektron menjadi hidrogen. Peningkatan potensial eksternal pada katoda bisa mengatasi kerumitan termodinamika dan bisa menghasilkan pembentukan hidrogen. Sebagai hasilnya, proton dan elektron pada anoda berkombinasi di

katoda membentuk hidrogen. MFC diperkirakan bisa memproduksi hidrogen ekstra dibandingkan dengan jumlah yang dikeluarkan oleh metode fermentasi glukosa klasik.

2.3 Limbah Industri Tahu

Limbah tahu berasal dari sisa pengolahan kedelai menjadi tahu yang terbuang karena tidak terbentuk dengan baik menjadi tahu sehingga tidak dapat dikonsumsi. Limbah tahu terdiri dari dua jenis limbah yaitu limbah cair dan limbah padat.

Kandungan limbah padat tahu yaitu protein (23,35%), lemak (5,54%), karbohidrat (26,92%), abu (17,03%), serat kasar (16,53%), dan air (10,53%) (Bapedal, 1994), sedangkan komposisi limbah cair tahu sebagian besar terdiri dari air (99,9%) dan sisanya terdiri dari partikel-partikel padat terlarut (dissolved solid) dan tidak terlarut (suspended solid) sebesar 0,1%. Partikel-partikel padat dari zat organik ($\pm 70\%$) dan zat anorganik ($\pm 30\%$). Zat-zat organik terdiri dari protein ($\pm 65\%$), karbohidrat ($\pm 25\%$), lemak ($\pm 25\%$) [Udin Djabu, 1991]. Limbah cair industri tahu mengandung bahan-bahan organik yang tinggi terutama protein dan asam-asam amino. Adanya senyawa-senyawa organik tersebut menyebabkan limbah cair industri tahu mengandung BOD, COD, dan TSS yang tinggi [Husin, 2003]. Gas-gas yang biasa ditemukan dalam limbah cair tahu adalah oksigen (O_2), Hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), karbondioksida (CO_2) dan metana (CH_4). Gas-gas tersebut berasal dari dekomposisi bahan-bahan organik yang terdapat dalam limbah cair tersebut [Herlambang, 2005].



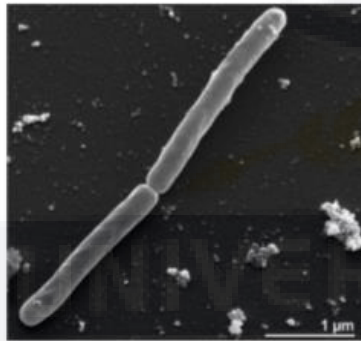
Gambar 2.5 diagram alir pembuatan tahu

sumber : <http://www.kelair.bppt.go.id/>

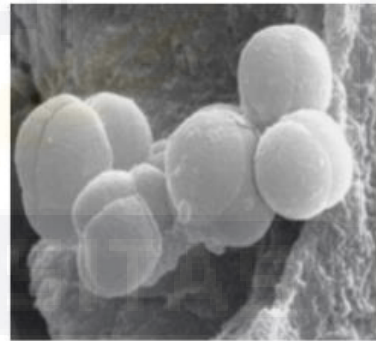
Dalam penanganan air limbah, mikroorganisme merupakan dasar fungsional untuk sejumlah proses penanganan. Proses penanganan biologi air limbah secara biologi disebut juga dengan bioremediasi. Bioremediasi adalah pemanfaatan mikroorganisme hidup untuk mengurangi bahan pencemar agar kurang toksik atau beracun, atau mengurangi zat-zat beracun agar lingkungan yang tercemar dapat direhabilitasi. Kelompok mikroorganisme tersebut adalah Bakteri, Fungi, Algae, Protozoa, Rotifera, Crustacea dan Virus. Bakteri merupakan kelompok mikroorganisme terpenting dalam penanganan air limbah. Kultur bakteri dapat digunakan untuk menghilangkan bahan organik dan mineral-mineral yang tidak diinginkan dari air limbah. Bakteri aerob dan fluktuatif, aktif dalam semua unit penanganan aerobik, sedangkan bakteri anaerob fakultatif dan obligatif, aktif dalam unit penanganan anaerobik. Bakteri terdapat dalam berbagai bentuk, biasanya modifikasi dari silinder atau avoid (bulat), dengan ukuran beberapa

mikrometer. Bakteri ini terdapat dalam proses penanganan limbah dalam bentuk gumpalan dari berbagai bentuk dan jenis. Temperature dan pH memainkan peranan penting dalam hidup matinya bakteri.

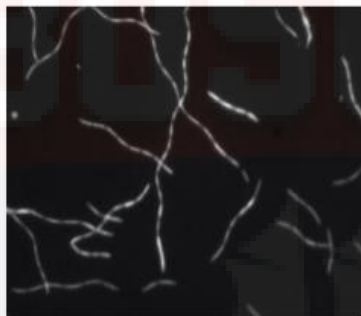
Beberapa bakteri yang terkandung didalam limbah tahu, yang kemudian akan mendegradasi substrat untuk menghasilkan energi listrik [Susilawati IO, 2011].



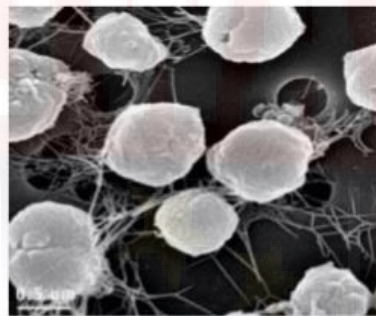
Gambar 2.6 Bakteri Methanothermus



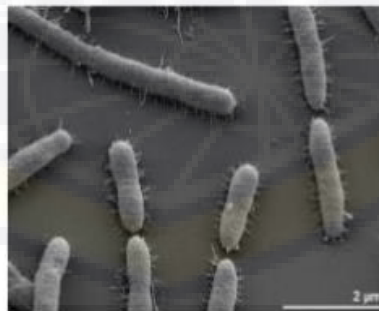
Gambar 2.7 Bakteri Methanosphaera



Gambar 2.8 Bakteri Methanospirillum



Gambar 2.9 Bakteri Methanococcus



Gambar 2.10 Bakteri Methanomicrobium

Bakteri diatas sangat diperlukan dalam sistem Microbial Fuel Cell untuk menguraikan bahan organik yang terkandung di dalam air limbah industri tahu. Oleh karena itu diperlukan jumlah bakteri yang cukup untuk dapat menguraikan limbah industri tahu menjadi energi listrik. Bakteri itu sendiri akan berkembang biak apabila jumlah bahan organik yang terkandung didalam limbah tahu cukup tersedia, sehingga pertumbuhan bakteri dapat dipertahankan secara konstan.

2.4 State of The Art

Berbagai penelitian telah banyak dilakukan untuk mengkaji potensi berbagai macam bakteri dalam menghasilkan energi listrik dengan spesifikasi yang berbeda-beda, mulai dari desain reaktor, jenis larutan elektrolit, penggunaan elektroda, sampai pada kondisi anaerob dan aerob. Berbagai variasi dalam sistem Microbial fuel cell tersebut dilakukan pasti memiliki tujuan yaitu untuk mencapai hasil arus listrik dan efisiensi yang lebih besar agar dapat terus dikembangkan potensinya dalam menghasilkan sumber energi listrik alternatif dan dapat diaplikasikan kedalam berbagai komponen.

Pada tahun 2012, Herlian E. Purba, dkk melakukan penelitian mengenai *Microbial Fuel Cell* dengan tujuan untuk melihat kinerja sistem MFC *dual chamber* pada pengolahan air limbah industri pangan, dalam hal ini tahu dan cucian beras (catering), dengan menggunakan tembaga sebagai elektroda, membran Poli Eter Eter Keton Tersulfonasi (SPEEK) sebagai media penukar kation. MFC diamati selama 80 jam. Tegangan maksimum yang dihasilkan pada media limbah tahu mencapai 80 mV (pada jam ke-28). Sedangkan pada air limbah cucian beras, tegangan maksimum terjadi pada jam ke-60 yaitu 234 mV. Selama proses 80 jam melalui sistem MFC pada media limbah tahu, COD mampu turun 49,33% dari 6750 mg/l menjadi 3420 mg/l. Sedangkan pada limbah cucian beras, COD turun 43,95% dari 18840 mg/l menjadi 10560 mg/l.

Pada tahun 2013, Tania Surya Utami, dkk juga melakukan penelitian MFC menggunakan reaktor MFC *single chamber* tanpa membran penukar ion serta digunakan limbah model dan limbah industri tempe sebagai substrat. Penelitian

ini mendapatkan hasil tegangan listrik paling maksimum yaitu reaktor MFC 2000 ml yang diberi hambatan luar sebesar 100Ω yaitu sebesar 0,80 V dengan kapasitas daya $1,13 \text{ mW/m}^2$ dan persentase penurunan kada COD sebesar 33,12%.

Agustin Hermayanti dan Irwan Nugraha melakukan penelitian MFC pada tahun 2014 yang difokuskan pada sistem MFC *dual chamber* yang dilengkapi jembatan garam sebagai penukar proton. Variasi konsentrasi larutan elektrolit dilakukan untuk melihat pengaruhnya terhadap perolehan listrik. Hasilnya diperoleh energi listrik maksimum berupa *power density* sebesar $11,941 \text{ mW/cm}^2$ pada variasi konsentrasi KMnO_4 0,10 M. Kenaikan nilai pH terjadi dari 3,5 menjadi 4,0 pada variasi konsentrasi KMnO_4 0,05 M.

Tahun 2015, Ayu Diah Syafaati melakukan penelitian MFC dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan isolat bakteri limbah cair tahu terhadap perolehan maksimum energi listrik yang dihasilkan dan mengetahui perubahan nilai pH, TSS, VSS dan COD melalui Stack MFC dibandingkan dengan Blanko Single Chamber. Hasil penelitian menunjukkan kuat arus listrik maksimum yang lebih besar yaitu 0,43 mA pada blanko dan 1,3 mA pada Stack MFC, masing-masing terjadi pada jam ke-12. Serta voltase maksimum yang dihasilkan sebesar 0,680 V pada blanko di jam ke-36 dan 0,587 V pada Stack MFC di jam ke-48. Nilai pH pada sistem stack MFC mengalami kenaikan hingga pH menjadi netral. Sementara nilai TSS awal pada limbah cair tahu saat Running MFC sebesar 330 mg/L dan mengalami kenaikan menjadi 1710-3890 mg/L.

Pada tahun 2016 Kris Herawan Timotius mengulas tentang potensi MFC dalam mengolah air limbah dan produksi energi listrik. Dalam tulisannya, diterapkan teknologi MFC sistem terbuka yang menyerupai pengolahan air limbah yang dilakukan oleh alam yang kemudian dinamakan *Sediment Microbial Fuel Cells* (SMFCs). Di kedua fase tersebut dipasang anoda berupa karbon organik (fase sedimen) dan katoda (fase air), dan jika keduanya dihubungkan akan menghasilkan aliran elektron yang menimbulkan energi listrik.

Penelitian tentang MFC masih terus dilakukan, pada tahun 2017 Bustami Ibrahim, dkk melakukan penelitian dengan tujuan mengukur kinerja sistem MFC pada limbah cair perikanan (dengan tambahan lumpur aktif) sekaligus

menurunkan beban limbahnya menggunakan elektroda yang berbeda yaitu aluminium, besi, karbon grafit serta kombinasi aluminium dan karbon grafit dengan metode *single chamber* MFC. Hasil elektrolisis selama 120 jam pengamatan mulai dari aluminium, besi, karbon grafit hingga kombinasi aluminium dengan karbon grafit berturut-turut adalah 0,23V, 0,17V, 0,19V, dan 0,34V. Hasil penelitian menunjukkan MFC mampu menurunkan rata-rata total nitrogen 61%, BOD 30,11%, COD 59,34% dan total amonia nitrogen 12,45%.

Setiap tahunnya dilakukan penelitian tentang MFC, dan pada tahun 2018 Lisa Utami, dkk melakukan penelitian dengan tujuan untuk mengetahui *power density* maksimum yang dihasilkan dalam proses MFC dan menentukan perubahan nilai pH limbah kulit pepaya sebelum dan sesudah MFC. Pada penelitian ini digunakan *dual chamber* MFC dengan menggunakan Membran Nafion 117 dan elektroda grafit. Hasil pengukuran tegangan maksimum (hari ke-17) berturut-turut 1,095V, 1,79A dan 121,70 mW/m². Nilai pH selama proses (20 hari) mengalami kenaikan dari 3,54 menjadi 6,64.

Tabel 2.1 State Of The Art

elektroda grafit	Agustin & Irwan, 2014	Tania Surya Utami,dkk, 2013		Bustami Ibrahim, 2017	Lisa Utami,dkk, 2018	penelitian saat ini
elektroda Cu			Herlian E.P, 2012			
elektroda Carbon	Ayu Diah S., 2015		Kris H. Timotius, 2016			
elektroda Kombinasi (Al, Fe, grafit)				Bustami Ibrahim, 2017		
elektroda stainless steel						penelitian saat ini
Single Chamber	Ayu Diah S., 2015	Tania Surya Utami,dkk, 2013		Bustami Ibrahim, 2017		
Dual Chamber	Agustin & Irwan, 2014		Herlian E.P, 2012		Lisa Utami,dkk, 2018	penelitian saat ini
Stack Chamber	Ayu Diah S., 2015					
Sediment MFC	Kris H. Timotius, 2016					
	limbah tahu	limbah tempe	limbah pangan	limbah ikan	limbah pepaya	limbah tahu

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan April hingga Juli, bertempat di Laboratorium Teknik Kimia Universitas Bosowa.

3.2 Sampel Penelitian

Sampel untuk penelitian ini adalah substrat berupa limbah cair industri tahu. Adapun limbah industri tahu yang digunakan diambil dari industri tahu yang terletak di Jalan Balang Baru, Makassar.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

Tabel 3.1 Alat Penelitian

No.	Alat	Fungsi
1.	Reaktor MFC	Menampung elektrolit dan substrat untuk sistem
2.	Multimeter	Mengukur tegangan yang dihasilkan sistem
3.	Kabel dan jepit Buaya	Menghubungkan arus listrik dari sistem menuju multimeter dan amperemeter
4.	Timbangan analitik	Menimbang bahan agar massa yang digunakan dalam penelitian menjadi akurat
5.	Gelas beaker	Wadah pengadukan larutan
6.	Gelas ukur	Mengukur volume larutan
7.	Erlenmeyer	Tempat mereaksikan larutan dan menyimpan larutan sementara
8.	Pipet ukur	Mengukur volume larutan dan memindahkan larutan tersebut

9.	Pipet tetes	Memindahkan larutan dalam jumlah yang kecil
----	-------------	---

3.3.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

Tabel 3.2 Bahan Penelitian

No.	Bahan	Fungsi
1.	Salt Bridge	Meloloskan proton dari kompartemen anoda ke kompartemen katoda
2.	Grafit	Menjadi elektroda dalam system
3.	<i>Stainless steel</i>	Menjadi elektroda dalam system
4.	Aquadest	Sebagai pelarut dan pengencer
5.	NaOH	Untuk preparasi elektroda
6.	HCl	Untuk preparasi elektroda
7.	Alkohol 70%	Untuk sterilisasi bejana
8.	KMnO ₄	Sebagai elektrolit
9.	Larutan NaCl	Sebagai bahan pembuatan salt bridge
10	<i>Nutrien Agar (NA)</i>	Sebagai bahan pembuatan salt bridge
11.	Cling Wrap	Sebagai penutup saat menyimpan larutan
12.	Alumunium Foil	Sebagai penutup saat menyimpan larutan

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini yaitu jenis elektroda.

3.4.2 Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini yaitu tegangan, kuat arus dan *power density*.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan dalam eksperimen ini terdiri dari preparasi awal yang terdiri dari persiapan substrat; preparasi jembatan garam; preparasi elektroda, preparasi reaktor dan eksperimen MFC, pengambilan data berupa kuat arus dan tegangan listrik serta perhitungan *power density*.

3.5.1 Persiapan Substrat

Substrat berupa limbah cair tahu diperoleh langsung dari buangan proses pembuatan tahu industri di Makassar. Air limbah ditampung dan dimasukkan ke dalam jerigen steril yang telah disterilisasi menggunakan alkohol 70%. Sterilisasi dilakukan dengan memasukkan alkohol 70% sebanyak 1/3 volume jerigen agar tidak membawa kontaminan saat pengambilan sampel limbah cair. Limbah cair yang telah ditampung selama 6 jam dalam jerigen, dipersiapkan untuk dimasukkan pada ruang anoda dalam sistem MFC.

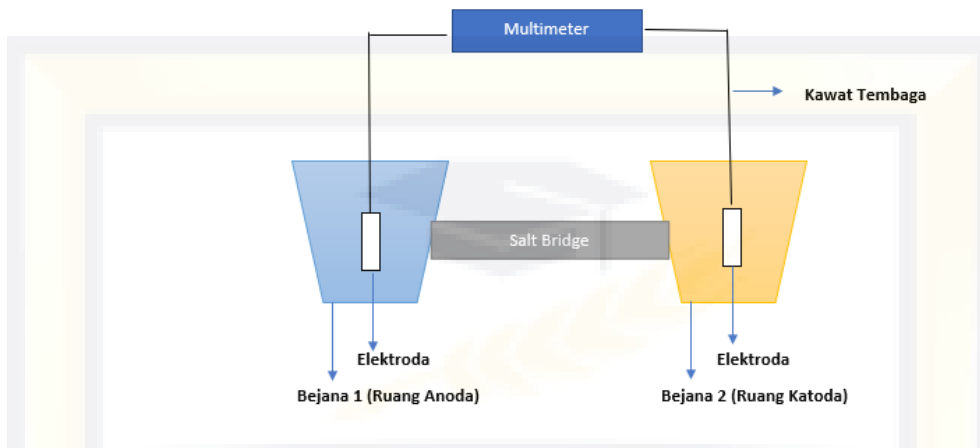
3.5.2 Preparasi Jembatan Garam

Jembatan garam dibuat dari campuran *Nutrient Agar* (NA) dengan garam NaCl. *Nutrient Agar* (NA) merupakan media untuk menumbuhkan dan mengembangbiakkan bakteri. NA terdiri dari ekstrak *beef*, pepton dan agar. Sebanyak 5 gram *Nutrien Agar* (NA) ditambahkan ke dalam 150 ml larutan NaCl 0,1 M kemudian dididihkan. Setelah homogen, larutan dituang ke dalam pipa yang telah disiapkan hingga agar mengeras.

3.5.3 Preparasi Elektroda

Elektroda grafit direndam dalam larutan HCl 1 M selama 24 jam kemudian dibilas menggunakan aquades dan di rendam dalam larutan NaOH 1 M selama 24 jam. Selanjutnya elektroda dibilas dengan aquades hingga pH netral. Elektroda disimpan dalam larutan aquades hingga saat akan digunakan.

3.5.4 Preparasi Reaktor MFC



Gambar 3.1 Rancangan Alat Penelitian

Dua bejana dari toples masing-masing dirangkai dengan sambungan pipa. Jembatan garam yang telah disiapkan, dihubungkan dengan 2 sambungan pipa tersebut. Kemudian elektroda yang siap digunakan dirangkai dengan kabel dan 2 bejana. Kabel dihubungkan juga pada multimeter digital untuk pengukuran tegangan listrik dan kuat arus listrik.

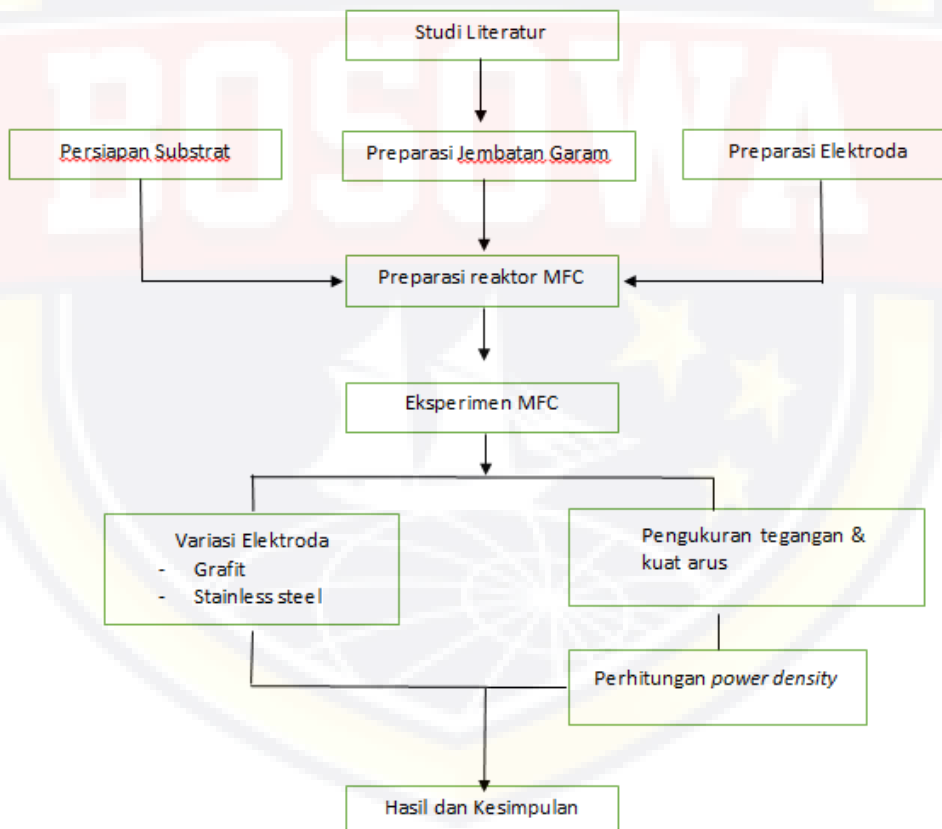
3.5.5 Eksperimen MFC

Sampel limbah cair sebanyak 1500 ml dimasukkan ke dalam ruang anoda dengan elektroda karbon grafit, sedangkan larutan elektrolit KMnO_4 0,1 M sebanyak 1500 ml dimasukkan ke dalam ruang katoda. Besar tegangan dan arus listrik diukur dengan menggunakan multimeter setiap 6 jam sekali. Data yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung *power density* sesuai rumus yang telah ditentukan. Sedangkan pengukuran pH dilakukan sebelum dan sesudah pengoperasian. Prosedur ini diulangi dengan menggunakan elektroda stainless steel.

Pada penelitian ini, dilakukan analisis pengaruh variasi parameter operasi terhadap kinerja MFC. Kinerja MFC ini dilihat dari kuat arus (I) dan tegangan (V) yang dihasilkan melalui pengukuran menggunakan digital multimeter. Dari data kuat arus dan tegangan, dapat diperoleh nilai *power density* (mW/m^2), yaitu daya per satuan luas permukaan elektroda. *Power density* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [Momoh *et al*, 2010].

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

3.6 Diagram Alir Penelitian

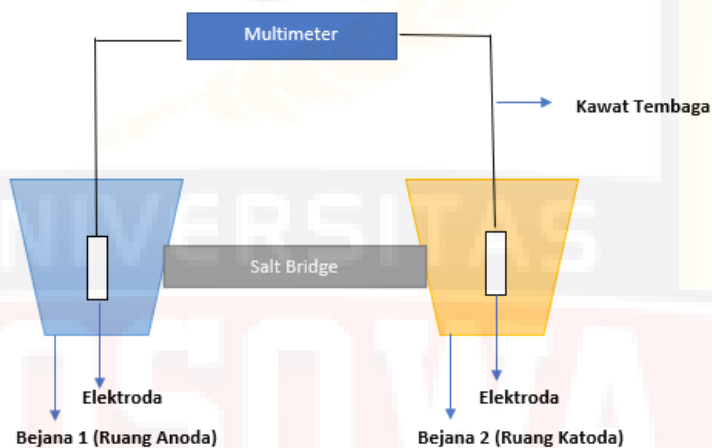


Gambar 3.2 diagram alir proses

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Adapun rangkaian alat yang digunakan pada sistem *Microbial Fuel Cell* terdiri dari:



Gambar 4.1 rangkaian alat

Dalam penelitian ini, sistem yang digunakan yaitu MFC *dual chamber* yang terdiri dari 2 ruang, yaitu ruang anoda dan ruang katoda. Ruang anoda dan katoda dibuat dari bejana plastik dengan ukuran yang sama yaitu 20 cm x 14 cm x 11 cm dengan kapasitas 2500 ml. Kedua ruang tersebut dipisahkan oleh jembatan garam (*salt bridge*) yang terbuat dari pipa PVC sepanjang 22 cm dengan diameter $\frac{3}{4}$ inch.

Pada sistem MFC ini menggunakan variasi elektroda untuk mengetahui pengaruh penggunaan jenis elektroda terhadap listrik yang dihasilkan. Elektroda yang digunakan yaitu elektroda grafit yang berasal dari batang karbon batu baterai dengan luas permukaan dari elektroda ini sebesar $15,3232 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ dengan diameter sebesar 0,8 cm dan panjang elektroda 5,7 cm dan elektroda stainless steel berbentuk spiral dengan luas permukaan $0,0072 \text{ m}^2$, diameter sebesar 2,6 cm dan panjang elektroda $74,2924 \text{ cm}^2$. Elektroda dipreparasi sebelum pemakaian untuk

netralisasi. Kabel tembaga Cu/PVC 2,5 mm² 450/750 V digunakan untuk menghubungkan elektroda ke multimeter.

Kemudian setelah instrument lengkap dipasang, eksperimen MFC dijalankan dengan menutup anoda dengan *plastic wrap* untuk menjaga kondisi lingkungan mikro anaerobik dan menutup kompartemen katoda dengan *aluminium foil* untuk mencegah terjadinya fotodekomposisi pada larutan KMnO₄. Sistem MFC dijalankan selama 48 jam dengan pengukuran tegangan dan arus menggunakan multimeter setiap 6 jam sekali serta pengukuran pH air limbah industri tahu sebelum dan sesudah pengoperasian. pH awal air limbah industri tahu yaitu 5,5.

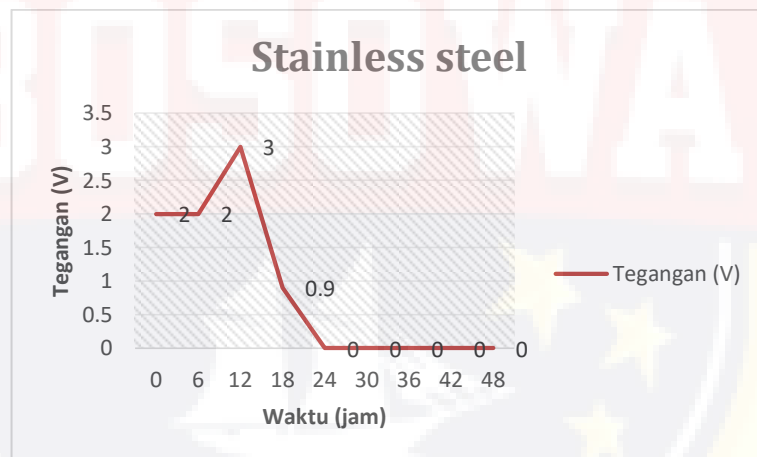
UNIVERSITAS

BOSOWA

1. Pengukuran Tegangan Listrik Menggunakan Multimeter

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Tegangan menggunakan elektroda stainless steel

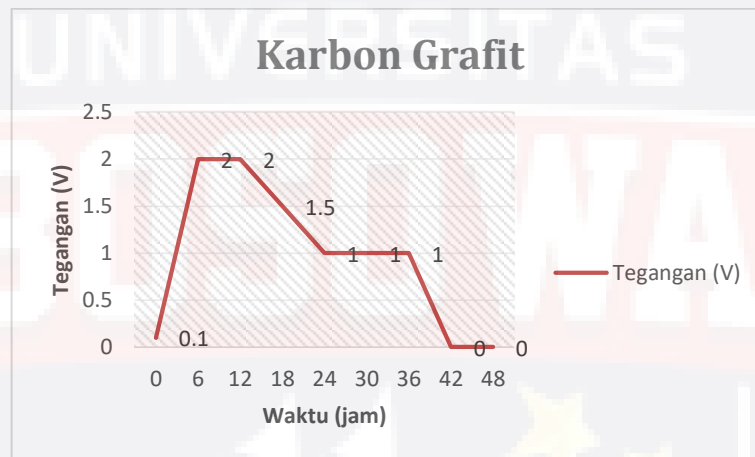
Jam ke-	Tegangan (V)
0	2
6	2
12	3
18	0,9
24	0
30	0
36	0
42	0
48	0



Gambar 4.2 Grafik hasil pengukuran tegangan menggunakan elektroda stainless steel

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Tegangan menggunakan elektroda karbon grafit

Jam ke	Tegangan (V)
0	0,1
6	2
12	2
18	1,5
24	1
30	1
36	1
42	0
48	0

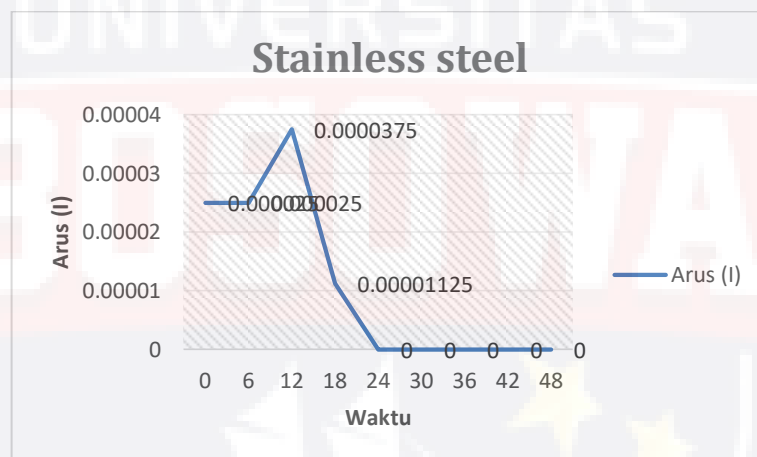


Gambar 4.3 Grafik hasil pengukuran tegangan menggunakan elektroda karbon grafit

2. Perhitungan Arus Listrik (I)

Tabel 4.3 Hasil perhitungan kuat arus dengan elektroda stainless steel

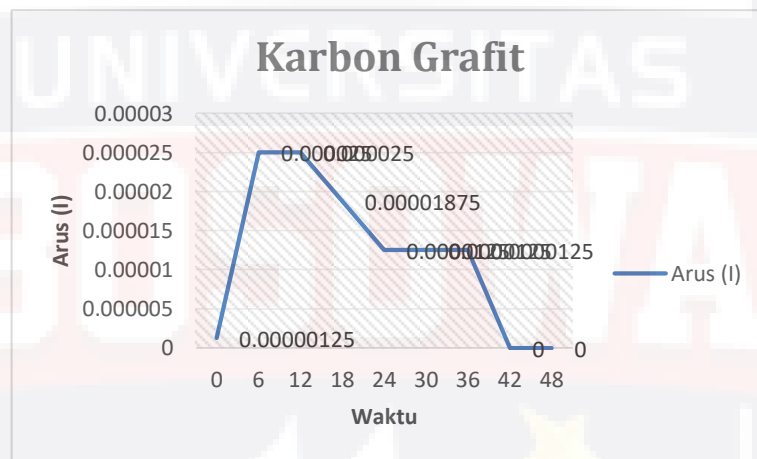
Jam ke-	Arus (A)
0	0,000025
6	0,000025
12	0,0000375
18	0,00001125
24	0
30	0
36	0
42	0
48	0



Gambar 4.4 Grafik hasil perhitungan kuat arus menggunakan elektroda stainless steel

Tabel 4.4 Hasil perhitungan kuat arus dengan elektroda karbon grafit

Jam ke-	Arus (I)
0	0,00000125
6	0,000025
12	0,000025
18	0,00001875
24	0,0000125
30	0,0000125
36	0,0000125
42	0
48	0

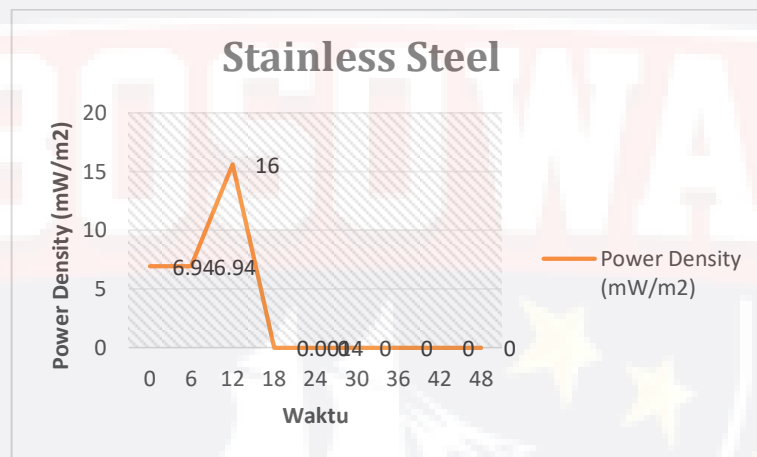


Gambar 4.5 Grafik hasil perhitungan kuat arus menggunakan elektroda karbon grafit

3. Perhitungan Power Density (mW/m^2)

Tabel 4.5 Hasil perhitungan power density dengan elektroda stainless steel

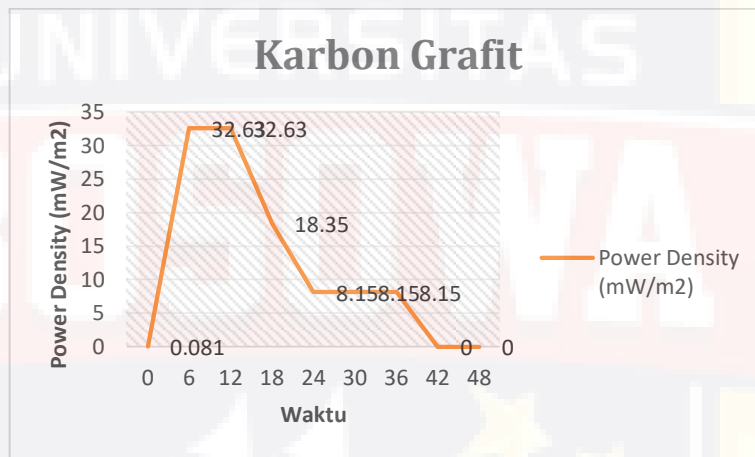
Jam ke-	Power Density (mW/m^2)
0	6,94
6	6,94
12	15,625
18	0,0014
24	0
30	0
36	0
42	0
48	0



Gambar 4.6 Grafik hasil perhitungan *power density* menggunakan elektroda stainless steel

Tabel 4.6 Hasil perhitungan power density dengan elektroda karbon grafit

Jam ke-	Power Density (mW/m ²)
0	0,081
6	32,63
12	32,63
18	18,35
24	8,15
30	8,15
36	8,15
42	0
48	0

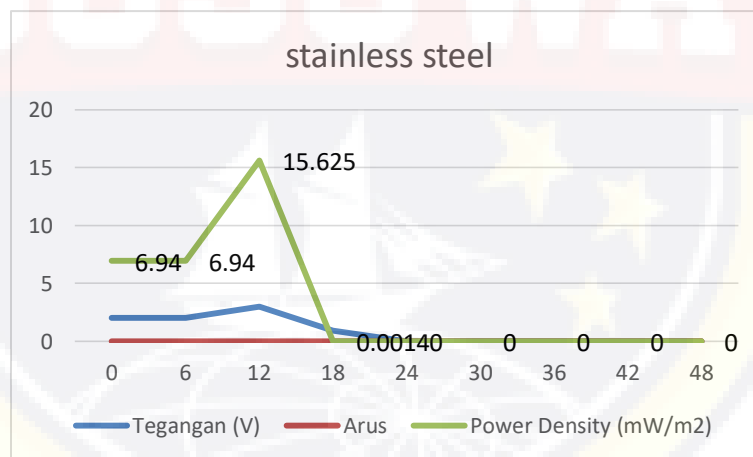


Gambar 4.7 Grafik hasil perhitungan *power density* menggunakan elektroda karbon grafit

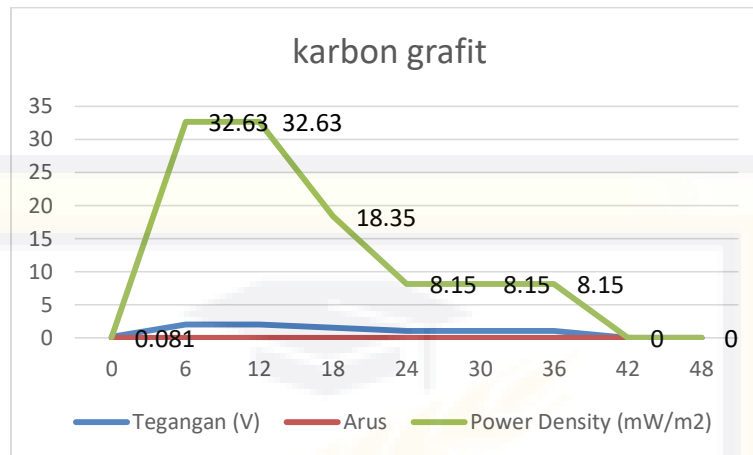
4.2 Pembahasan

Tabel 4.7 Tegangan, Arus dan Power Density MFC dengan elektroda stainless steel dan karbon grafit

Jam ke-	Stainless steel				Karbon Grafit			
	Tegangan (V)	Arus (A)	Power Density (mW/m ²)	pH	Tegangan (V)	Arus (A)	Power Density (mW/m ²)	pH
0	2	0.000025	6.94	5.5	0.1	0.00000125	0.081	5.5
6	2	0.000025	6.94		2	0.000025	32.63	
12	3	0.0000375	15.625		2	0.000025	32.63	
18	0.9	0.00001125	0.0014		1.5	0.00001875	18.35	
24	0	0	0		1	0.0000125	8.15	
30	0	0	0		1	0.0000125	8.15	
36	0	0	0		1	0.0000125	8.15	
42	0	0	0		0	0	0	
48	0	0	0	4.9	0	0	0	4.8

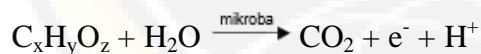


Gambar 4.8 Grafik Tegangan, arus dan power density MFC dengan elektroda stainless steel

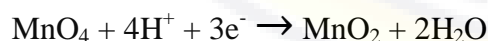


Gambar 4.9 Grafik Tegangan, arus dan power density MFC dengan elektroda karbon grafit

Pengoperasian sistem MFC dilakukan dengan menggunakan elektroda pada ruang anoda dan katoda. Produksi energi listrik yang dihasilkan selama pengoperasian sistem MFC di ukur menggunakan multimeter yang dihubungkan dengan kedua elektroda pada sistem MFC. Anoda dihubungkan dengan kutub negatif dan katoda dihubungkan dengan kutub positif dengan hambatan 80.000Ω. Proses metabolisme bakteri pada ruang anoda menghasilkan proton berupa H⁺, elektron dan CO₂. Proton menuju katoda dengan cara berdifusi melalui jembatan garam. Sedangkan elektron dibawa oleh mediator berupa riboflavin menuju elektroda sirkuit. Aliran elektron dari anoda menuju katoda ini menghasilkan daya listrik. Pada anoda, reaksi yang terjadi secara umum adalah:



Pada ruang katoda, elektron ditangkap oleh kalium permanganat dan bereaksi dengan H⁺ menghasilkan H₂O. Reaksi tersebut adalah:



Pada penelitian ini dibuat dua jenis elektroda yaitu karbon grafit dan stainless steel. Pengoperasian dilakukan dengan menggunakan 2 buah sistem MFC yang berisi elektroda karbon grafit dan stainless steel yang dijalankan selama 48 jam. Selama proses berlangsung, tidak dilakukan penambahan

substrat baru sebagai nutrisi mikroba, sehingga listrik yang diperoleh hanya berasal dari substrat yang diinginkan, yaitu air limbah tahu itu sendiri.

Perubahan arus listrik dan tegangan listrik selama 48 jam ditunjukkan pada gambar 4.8 dan 4.9. Produksi energi listrik diamati mulai dari awal operasi. Pengukuran pH juga dilakukan sebelum sistem MFC dijalankan yaitu sebesar 5,5.

Dari gambar 4.8 dan 4.9 tegangan dan arus listrik yang dihasilkan melonjak naik pada jam 0-12 dan pada jam 18-48 cenderung menurun. Untuk sistem MFC dengan elektroda stainless steel, tegangan yang dihasilkan pada awal pengoperasian langsung menunjukkan angka 2 V, kemudian naik pada jam 6-12, setelah itu listrik menurun dan pada jam ke 24-48 tidak ada listrik yang dihasilkan. Sedangkan pada sistem MFC dengan elektroda karbon grafit, diperoleh tegangan yang kecil di awal pengoperasian yaitu 0,1 V. Kemudian pada jam ke 6 tegangan naik dan stabil sampai jam ke-12. Tegangan mulai menurun pada jam ke-18 dan stabil pada jam ke 24-36 kemudian pada jam ke 42-48 tidak ada listrik yang dihasilkan. Tegangan dan kuat arus maksimum yang diperoleh melalui sistem MFC dengan elektroda stainless steel yaitu sebesar 3 V dan 0,0000375 A pada jam ke-12, sedangkan pada sistem MFC dengan elektroda karbon grafit yaitu 2 V dan 0,000025 A pada jam ke-12.

Peningkatan atau penurunan listrik yang dihasilkan ini berhubungan dengan jumlah elektron bebas yang dihasilkan oleh bakteri tersebut. Fluktuasi listrik yang dihasilkan dapat pula disebabkan oleh interaksi dan persaingan antara bakteri di dalam substrat. Penurunan yang terjadi pada akhir pengukuran sistem MFC disebabkan karena nutrisi di dalam substrat berkurang akibat aktivitas metabolisme bakteri seiring bertambahnya waktu.

Secara umum, bakteri memiliki empat fase pertumbuhan yaitu, fase *lag*, fase *log* atau eksponensial, fase *stasioner* dan fase kematian. Fase *lag* merupakan fase adaptasi bakteri terhadap lingkungan. Fase *log* atau eksponensial adalah fase meningkatnya jumlah bakteri secara eksponensial. Meningkatnya jumlah bakteri terjadi karena adanya pembelahan biner pada bakteri hingga menjadi dua sel. Kemudian pembelahan terjadi lagi pada tiap sel dan seterusnya [B.W Lay dan H. Sugyo 1992]. Melonjaknya tegangan dan arus listrik secara umum pada jam 0-12

inilah yang terjadi akibat fase *log* bakteri dimana pada fase ini bakteri membelah dengan cepat dan konstan. Bertambahnya jumlah sel bakteri ini memungkinkan semakin banyaknya proton dan elektron yang dapat dihasilkan dari proses metabolisme sehingga tegangan listrik yang terbaca semakin besar. Sementara pada jam ke 18-36, bakteri mengalami fase stasioner yaitu fase dimana kecepatan tumbuh sama dengan kecepatan mati sehingga jumlah bakteri konstan. Kemudian pada jam ke 42-48 bakteri mengalami fase kematian sehingga tidak ada listrik yang dihasilkan.

Untuk nilai *power density* dapat dilihat pada gambar 4.8 dan 4.9. Nilai *power density* merupakan daya per satuan luas permukaan elektroda. Pada pengoperasian sistem MFC dengan elektroda stainless diperoleh nilai *power density* berturut-turut $6,94 \text{ mW/m}^2$, $6,94 \text{ mW/m}^2$, $15,625 \text{ mW/m}^2$, $0,0014 \text{ mW/m}^2$, 0, 0, 0, 0, 0. Sedangkan pada pengoperasian sistem MFC elektroda grafit diperoleh $0,081 \text{ mW/m}^2$, $32,63 \text{ mW/m}^2$, $32,63 \text{ mW/m}^2$, $18,35 \text{ mW/m}^2$, $8,15 \text{ mW/m}^2$, $8,15 \text{ mW/m}^2$, $8,15 \text{ mW/m}^2$, 0, 0. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa semakin besar luas permukaan elektroda, semakin kecil nilai *power density* yang diperoleh. Berdasarkan voltase dan arus yang dihasilkan pada kedua sistem, MFC dengan elektroda stainless steel menghasilkan voltase dan arus yang lebih tinggi dibandingkan MFC dengan elektroda karbon grafit. Tetapi elektroda grafit memiliki *power density* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *stainless steel*. Stainless steel tersusun dari Mg, Cr dan Fe yang merupakan unsur yang berada di deret volta sebelah kiri sehingga mudah mengalami oksidasi. Stainless steel dapat bertahan dari serangan karat berkat interaksi bahan-bahan campurannya dengan alam. Penggunaan elektroda ini karena kandungan Cr yang besar sehingga dapat mencegah terjadinya proses korosi. Cr bereaksi dengan oksigen memegang peranan penting dalam pembentukan lapisan korosi. Sifat karbon grafit yang memiliki elektron yang telah terdelokalisasi dan tidak terikat pada atom tertentu memungkinkan elektroda ini membawa muatan listrik. Karbon grafit merupakan golongan non logam yang berasal dari alotrop karbon dengan nilai potensial standar $-1,59$. Nilai potensial standar yang tinggi pada karbon grafit menyebabkan

elektroda ini lebih tahan terhadap asam dan basa sehingga lebih tahan terhadap korosi [Kim et. al, 2005].

Hasil elektrisitas menunjukkan bahwa waktu optimum listrik yang dihasilkan yaitu pada jam ke 6-12 dengan sistem MFC elektroda karbon grafit berupa *power density* yang diperoleh sebesar $32,63 \text{ mW/m}^2$ dengan tegangan listrik 2 V dan kuat arus listrik sebesar 0,000025 A tetapi sistem MFC ini belum bisa menghidupkan lampu LED dikarenakan tegangan dan arus yang diperoleh masih rendah. Sedangkan untuk menghidupkan lampu LED (biru) diperlukan tegangan sebesar 3 V - 3,5 V dan kuat arus sebesar 0,01 A – 0,02 A.

Setelah pengoperasian sistem MFC selesai, pH air limbah tahu diukur kembali dan diperoleh hasil untuk limbah tahu yang keluar dari sistem MFC elektroda stainless steel dan karbon grafit berubah pHnya menjadi 4,9 dan 4,8 dengan pH awal 5,5. Menurunnya pH menunjukkan adanya pembentukan asam di ruang anoda. Asam yang dihasilkan berasal dari bioproses pada pembusukan limbah.

Dari penelitian ini dapat diketahui bahwa limbah tahu dengan volume 1,5 liter dapat menghasilkan tegangan listrik sebesar 3 V. Sehingga dapat diasumsikan bahwa untuk menghasilkan tegangan listrik 220 V, maka diperlukan limbah tahu sebanyak 110 liter. Untuk menghasilkan listrik yang lebih besar dan cukup untuk menghidupkan lampu LED, diperlukan ruang anoda dan katoda yang lebih besar dengan volume limbah yang lebih besar pula. Semakin besar volume limbah, maka semakin banyak pula ruang untuk bertumbuhnya mikroorganisme. Dengan adanya jumlah mikroorganisme yang lebih banyak, proses oksidasi akan berjalan semakin cepat sehingga jumlah elektron dan proton yang dihasilkan lebih banyak dan meningkatkan produksi listrik yang dihasilkan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian menggunakan sistem *Microbial Fuel Cell* (MFC) dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Limbah industri tahu dapat digunakan sebagai substrat dalam sistem MFC untuk menghasilkan listrik dengan elektroda *stainless steel* dan karbon grafit. Limbah industri tahu sebanyak 1,5 liter yang digunakan dalam sistem MFC ini mampu menghasilkan tegangan listrik sebesar 3 V. Kapasitas biolistrik maksimum yang dihasilkan yaitu pada sistem MFC dengan elektroda karbon grafit berupa *power density* sebesar 32,63 mW/m².
2. Waktu optimum yang bisa digunakan dalam kedua sistem MFC tersebut yaitu pada jam ke 12. Pada sistem MFC elektroda *stainless steel* diperoleh tegangan 3 V dan kuat arus 0,0000375 A, sedangkan pada sistem MFC elektroda karbon grafit diperoleh tegangan 2 V dan kuat arus 0,000025 A.

5.2 Saran

Sehubungan dengan penelitian ini maka disarankan kepada peneliti selanjutnya untuk:

1. Menambah variasi jenis elektroda dan perencanaan rangkaian alat *Microbial Fuel Cell* (MFC) yang lebih efisien lagi agar potensi biolistrik yang dihasilkan lebih tinggi dibanding penelitian saat ini.
2. Penambahan volume substrat pada ruang anoda agar sistem MFC mampu menghasilkan listrik yang lebih besar.
3. Menjaga kondisi substrat yang akan digunakan dan mengetahui perkembangan mikroorganisme dalam substrat tersebut.
4. Menambahkan media penyimpanan energi ke dalam rangkaian alat MFC.

DAFTAR PUSTAKA

- BPPT. *Limbah Industri tahu*. <http://www.kelair.bppt.go.id/Sitpa/Artikel/Limbahtt/limbahtt.html> (diakses 15 April 2019).
- Das and Mangwani 2010. *Recent developments in microbial fuel cells : a review*. Scientific & Industrial Research 69: 727-731.
- Du, Zhuwei., Haoran. Li., Tingyue, Gu. 2016. *A state of art review on microbial cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy*. Biotech Adv 25: 464-482.
- Hamza, Nabeel. 2016. *Microbial Electrolysis Cell*. <http://www.quora.com/where-can-I-get-bacteria-to-make-a-microbial-fuel-cell> (diakses 19 April 2019).
- Hermayanti, Agustin dan Nugraha, Irwan. 2014. *Potensi Perolehan Energi Listrik dari Limbah Cair Industri Tahu dengan Metode Salt Bridge Microbial Fuel Cell: J Sains Dasar 2014 3 (2): 162-168*. Yogyakarta, 17 November.
- Ibrahim, Bustami , Suptijah, Pipih , Adjani, Noor Zhalindri. 2017. *Kinerja Microbial Fuel Cell Penghasil Biolistrik Dengan Perbedaan Jenis Elektroda Pada Limbah Cair Industri Perikanan: JPHPI 2017, Vol. 20 No.20*. Bogor, 11 Juli 2017.
- Khafis, Muhammad. https://www.academia.edu/8034354/DAMPAK_LIMBAH_PABRIK_TAHU_TERHADAP_LINGKUNGAN_SUNGAI_3 (diakses pada 18 April 2019).
- Liu, H. 2008. *Microbial Fuel Cell: Novel Anaerobic Biotechnology for Energy Generation from Wastewater*. Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production : Principles and Applications. S. K. Khanal. Iowa, Blackwell Publishing: 221-243.
- Octavia, Paramitha., Kirom, M.Ramdlan., Iskandar, Fauzi Reza. 2018. *Pengaruh elektroda pada kinerja microbial fuel cell terhadap kerapatan daya listrik yang dihasilkan dengan menggunakan lumpur bakau sebagai*

substrat: e-Proceeding of Engineering : Vol.5, No.2 Agustus 2018 Page 2350.

Putra, E. Herlian dkk.2012. *Pemanfaatan Sistem Microbial Fuel Cell Dalam Menghasilkan Listrik Pada Pengolahan Air Limbah Industri Pangan: Pusat Penelitian Kimia Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia*. Bandung.

Smallman R.E, Bishop R.J. *Metarlugi Fisik Modern dan Rekayasa Material (edisi 6)*. Jakarta: Erlangga.

Utami, Surya Tania, Arbianti, Rita, Hardiyani, Puri Sekar. 2013. *Potensi Microbial Fuel Cell Sebagai Pengolah Limbah Cair Industri Tempe: Prosiding SNTK TOPI 2013*. Pekanbaru, 27 November.

McCarthy, John. *Hidrogen*. https://id.wikipedia.org/wiki/Bahan_bakar_hidrogen (diakses pada 15 April 2019).

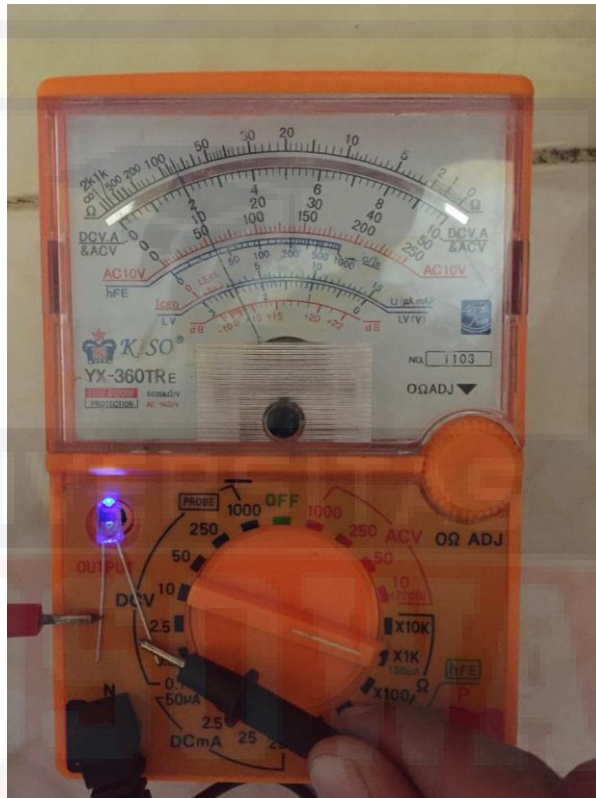
Brown, Theodore L. et al. 2015.. *Sel Volta*. <https://www.studiobelajar.com/sel-volta/> (diakses pada 14 April 2019).

Yuliasuti, Rieke. <http://baristandsurabaya.kemenperin.go.id/tinjauan-tentang-perkembangan-teknologi-microbial-fuel-cell.html> (diakses pada 16 April 2019)

Zahara. 2010. *Pemanfaatan Saccharomyces cerevisiae Dalam Sistem Microbial Fuel Cell Untuk Produksi Energi Listrik*.

A. LAMPIRAN PERHITUNGAN

1. Mengukur Nilai Hambatan LED



Nilai yang ditunjukkan jarum = 80
Skala pengali = 1 k
Maka besar hambatan = $80 \times 1K = 80 K = 80.000 \Omega$

2. Menghitung Besar Arus yang dihasilkan

Untuk menghitung besar arus yang dihasilkan digunakan rumus:

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

dimana: I = Arus (A)
V = Tegangan (V)
R = Resistansi (Ω)

a. Pengukuran Arus sistem MFC elektroda stainless steel

Diketahui: nilai hambatan LED yang digunakan yaitu sebesar 80.000Ω

Jam ke-	Tegangan (V)
0	2
6	2
12	3
18	0,9
24	0
30	0
36	0
42	0
48	0

Pada jam ke-0 dengan tegangan 2 V menghasilkan arus sebesar:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{2V}{80.000 \Omega} = 0,000025 \text{ A}$$

Pada jam ke-6 dengan tegangan 2 V menghasilkan arus sebesar:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{2V}{80.000 \Omega} = 0,000025 \text{ A}$$

Pada jam ke-12 dengan tegangan 3 V menghasilkan arus sebesar:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{3V}{80.000 \Omega} = 0,0000375 \text{ A}$$

Pada jam ke-18 dengan tegangan 0,9 V menghasilkan arus sebesar:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0,9V}{80.000 \Omega} = 0,00001125 \text{ A}$$

Pada jam ke- 24-48 tidak ada tegangan yang dihasilkan sehingga tidak dapat mengukur arus

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0V}{80.000 \Omega} = 0 \text{ A}$$

b. Pengukuran Arus sistem MFC elektroda karbon grafit

Diketahui: nilai hambatan LED yang digunakan yaitu sebesar 80.000Ω

Jam ke	Tegangan (V)
0	0,1
6	2
12	2
18	1,5
24	1
30	1
36	1
42	0
48	0

Pada jam ke-0 dengan tegangan 0,1 V menghasilkan arus sebesar:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0,1 V}{80.000 \Omega} = 0,00000125 \text{ A}$$

Pada jam ke-6 dengan tegangan 2 V menghasilkan arus sebesar:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{2 V}{80.000 \Omega} = 0,000025 \text{ A}$$

Pada jam ke-12 dengan tegangan 2 V menghasilkan arus sebesar:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{2 V}{80.000 \Omega} = 0,000025 \text{ A}$$

Pada jam ke-18 dengan tegangan 1,5 V menghasilkan arus sebesar:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1,5 V}{80.000 \Omega} = 0,00001875 \text{ A}$$

Pada jam ke-24 dengan tegangan 1 V menghasilkan arus sebesar:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1 V}{80.000 \Omega} = 0,0000125 \text{ A}$$

Pada jam ke-30 dengan tegangan 1 V menghasilkan arus sebesar:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1 V}{80.000 \Omega} = 0,0000125 \text{ A}$$

Pada jam ke-36 dengan tegangan 1 V menghasilkan arus sebesar:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1 V}{80.000 \Omega} = 0,0000125 \text{ A}$$

Pada jam ke- 42 dan 48 tidak ada tegangan yang dihasilkan sehingga tidak dapat mengukur arus

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0 \text{ V}}{80.000 \Omega} = 0 \text{ A}$$

3. Menghitung nilai *Power Density* (mW/m²)

Untuk menghitung *power density* menggunakan rumus berikut:

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

dimana: I = Arus (mA)

V= Tegangan (V)

A = luas permukaan elektroda (m²)

a. Mengitung Power Density sistem MFC elektroda karbon stainless steel

Diketahui: jari-jari elektroda = 1,3 cm

Elektroda berbentuk spiral, diasumsikan bentuknya seperti tabung sehingga menggunakan rumus luas permukaan tabung:

$$2\pi rL$$

Dimana r = jari-jari; L = panjang lengkungan elektroda

Lengkungan elektroda berbentuk lingkaran, maka :

$$\begin{aligned} &= \pi r^2 \\ &= 3,14 \times (1,3)^2 \text{ cm} \\ &= 5,3066 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Jumlah lengkungan elektroda yaitu 14 lengkungan, maka:

$$\begin{aligned} &= 14 \times 5,3066 \text{ cm}^2 \\ &= 74,2924 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Maka luas permukaan elektroda = $2 \pi rL$

$$\begin{aligned} &= 2 \times 3,14 \times 1,3 \text{ cm} \times 74,2924 \text{ cm}^2 \\ &= 606,523 \text{ cm}^3 = 0,0072 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Pada jam ke-0 dengan tegangan 2 V dan arus 0,000025 A (0,025 mA) didapatkan power density sebesar:

$$\text{Power density} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{0,025 \times 2}{0,0072} = \mathbf{6,94 \text{ mW/m}^2}$$

Pada jam ke-6 dengan tegangan 2 V dan arus 0,000025 A (0,025 mA) didapatkan power density sebesar:

$$\text{Power density} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{0,025 \times 2}{0,0072} = \mathbf{6,94 \text{ mW/m}^2}$$

Pada jam ke-12 dengan tegangan 3 V dan arus 0,0000375 A (0,0375 mA) didapatkan power density sebesar:

$$\text{Power density} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{0,0375 \times 3}{0,0072} = \mathbf{15,625 \text{ mW/m}^2}$$

Pada jam ke-18 dengan tegangan 0,9 V dan arus 0,00001125 A (0,01125 mA) didapatkan power density sebesar:

$$\text{Power density} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{0,00001125 \times 0,9}{0,0072} = \mathbf{0,0014 \text{ mW/m}^2}$$

Pada jam ke 24-48 tidak ada listrik yang dihasilkan.

b. Mengitung Power Density sistem MFC elektroda karbon grafit

Diketahui: tinggi elektroda = 5,7 cm dan jari-jari elektroda = 0,4 cm

$$\begin{aligned} \text{Maka luas permukaan elektroda} &= 2 \pi r (r + t) \\ &= 2 \times 3,14 \times 0,4 \text{ cm} (0,4 \text{ cm} + 5,7 \text{ cm}) \\ &= 15,3232 \text{ cm}^2 = 15,3232 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Pada jam ke-0 dengan tegangan 0,1 V dan arus 0,00000125 A (0,00125 mA) didapatkan power density sebesar:

$$\text{Power density} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{0,00125 \times 0,1}{15,3232 \times 10^{-4}} = \mathbf{0,081 \text{ mW/m}^2}$$

Pada jam ke-6 dengan tegangan 2 V dan arus 0,000025 A (0,025 mA) didapatkan power density sebesar:

$$\text{Power density} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{0,025 \times 2}{15,3232 \times 10^{-4}} = \mathbf{32,63 \text{ mW/m}^2}$$

Pada jam ke-12 dengan tegangan 2 V dan arus 0,000025 A (0,025 mA) didapatkan power density sebesar:

$$\text{Power density} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{0,025 \times 2}{15,3232 \times 10^{-4}} = \mathbf{32,63 \text{ mW/m}^2}$$

Pada jam ke-18 dengan tegangan 1,5 V dan arus 0,00001875 A (0,01875 mA) didapatkan power density sebesar:

$$\text{Power density} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{0,01875 \times 1,5}{15,3232 \times 10^{-4}} = \mathbf{18,35 \text{ mW/m}^2}$$

Pada jam ke-24 dengan tegangan 1 V dan arus 0,0000125 A (0,0125 mA) didapatkan power density sebesar:

$$\text{Power density} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{0,0125 \times 1}{15,3232 \times 10^{-4}} = \mathbf{8,15 \text{ mW/m}^2}$$

Pada jam ke-30 dengan tegangan 1 V dan arus 0,0000251 A (0,0125 mA) didapatkan power density sebesar:

$$\text{Power density} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{0,0125 \times 1}{15,3232 \times 10^{-4}} = \mathbf{8,15 \text{ mW/m}^2}$$

Pada jam ke-36 dengan tegangan 1 V dan arus 0,0000125 A (0,0125 mA) didapatkan power density sebesar:

$$\text{Power density} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{0,0125 \times 1}{15,3232 \times 10^{-4}} = \mathbf{8,15 \text{ mW/m}^2}$$

Pada jam ke 42 dan 48 tidak ada listrik yang dihasilkan.

B. LAMPIRAN DOKUMENTASI PENELITIAN



Gambar L.1 Pengambilan air limbah Tahu di Industri tahu Balang Baru



Gambar L.2 pH awal limbah tahu



Gambar L.3 Reaktor MFC



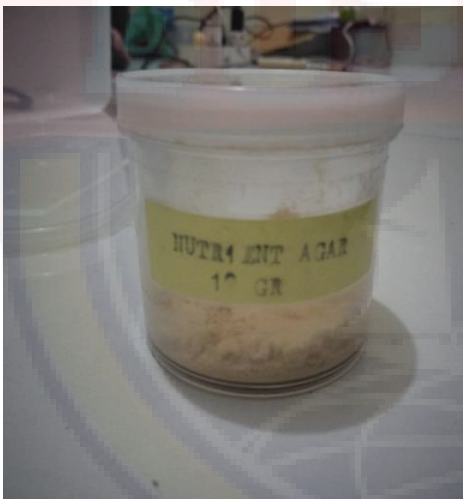
Gambar L.4 Elektroda Stainless steel



Gambar L.5 Elektroda Grafit



Gambar L.6 Elektrolit KMnO_4



Gambar L.7 Natrium Agar (NA)



Gambar L.7 Penimbangan NA



Gambar L.9 Pembuatan membran



Gambar L.10 Salt Bridge



Gambar L.10 Rangkaian Alat *Microbial Fuel Cell*



Gambar L.11 Tegangan 2 Volt
Elektroda stainless steel (0-6 jam)



Gambar L.12 Tegangan 3 Volt
Elektroda stainless steel (jam ke 12)



Gambar L.13 Tegangan 0,9 Volt
Elektroda stainless steel (jam ke-18)



Gambar L.14 Tegangan 0 Volt
Elektroda stainless steel (jam 24-48)



Gambar L.15 Tegangan 0,1 Volt Elektroda karbon grafit (jam ke 0)



Gambar L.16 Tegangan 2 Volt Elektroda karbon grafit (jam ke 6-12)



Gambar L.17 Tegangan 1,5 Volt Elektroda stainless steel (jam ke-18)



Gambar L.18 Tegangan 1 Volt
Elektroda karbon grafit (jam 24-36)



Gambar L.19 Tegangan 0 Volt
Elektroda stainless steel (jam 42-48)



Gambar L.20 pH akhir system MFC
Elektroda karbon grafit



Gambar L.21 pH akhir system MFC
Elektroda stainless steel