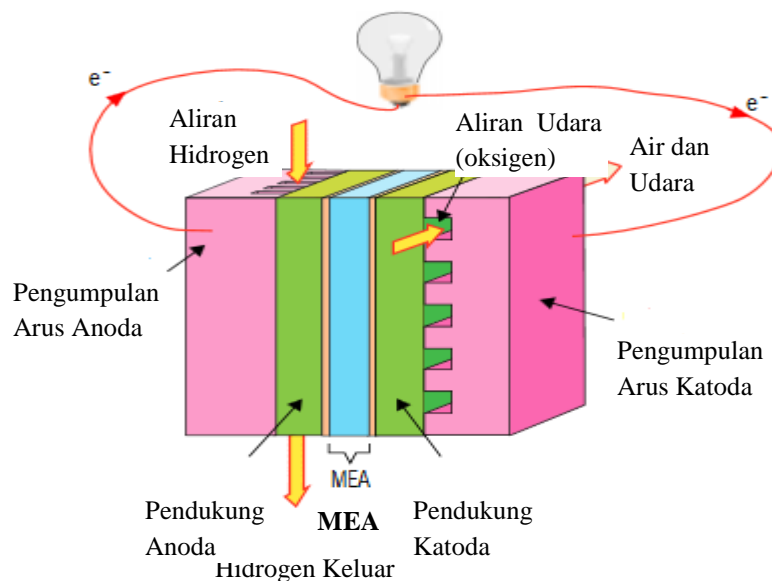


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fuel Cell

Fuel Cell adalah teknologi elektrokimia yang secara berkelanjutan mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik selama terdapat bahan bakar dan pengoksidan. *Fuel cell* tersusun atas 3 komponen utama yaitu anoda, katoda dan elektrolit (membran). Anoda berperan sebagai tempat terjadinya pemecahan hidrogen (H_2) menjadi proton dan elektron. Katoda berperan sebagai tempat terjadinya reaksi penggabungan antara proton, elektron dan oksigen untuk membentuk air. Elektrolit adalah suatu media untuk mengalirkan proton. Pada *fuel cells* berbahan bakar hidrogen, ketika molekul hidrogen melakukan kontak dengan anoda, molekul tersebut terpisah menjadi ion hidrogen dan elektron. Elektron mengalir melalui sirkuit luar menuju katoda dan menimbulkan aliran listrik. Ion hidrogen melewati elektrolit (membran) menuju katoda, lalu bergabung dengan elektron dan oksigen dari udara kemudian membentuk molekul air. Secara umum, prinsip kerja *fuel cell* dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut ini.



Gambar 2.1. Prinsip Kerja *Fuel Cell* (*Fuel Cell Power Green*, 1999)

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 merupakan investasi yang mahal, sedangkan pada *microbial fuel cell* dapat digantikan oleh pertumbuhan mikroorganisme didalamnya. Berikut pada tabel 2.1. Perbandingan selengkapnya antara MFC dengan *fuel cell* biasa.

Tabel 2.1 Perbandingan Kondisi Fuel Cell Biasa dengan MFC

Kondisi Operasi	Fuel Cell biasa	Microbial Fuel Cell
Katalis	Logam Mulia	Mikroorganisme/enzim
Ph	Larutan Asam (Ph<1)	Larutan netral (Ph 7 - 9)
Temperatur	>200°C	22-25°C
Elektrolit	Asam Fosfat	Larutan Fosfat
Kapasitas	Tinggi	Rendah
Efisiensi	40-60%	>40%
Tipe Bahan Bakar	Gas Alam	Karbohidrat dan hidrokarbon

Sumber: Idham (2009)

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.

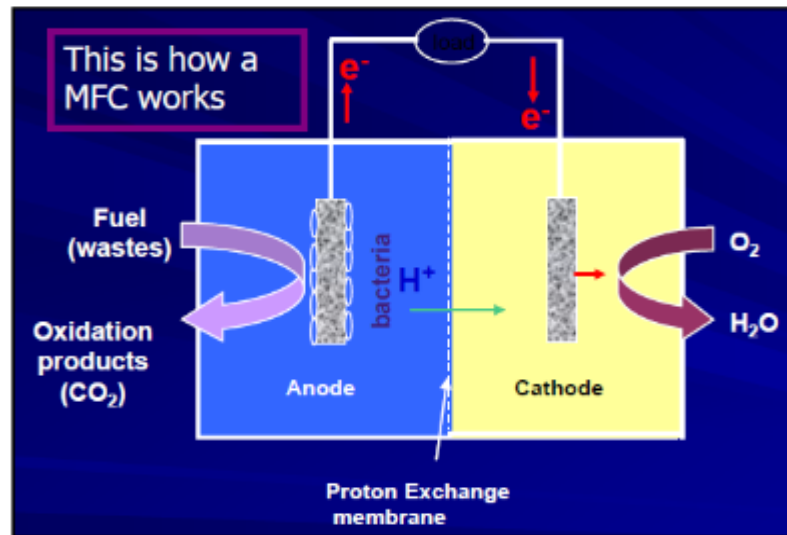
2.2.1 Prinsip Kerja MFC

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.

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.

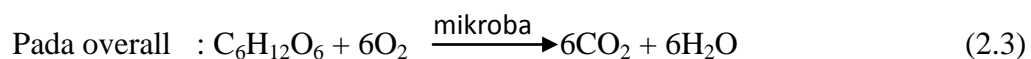
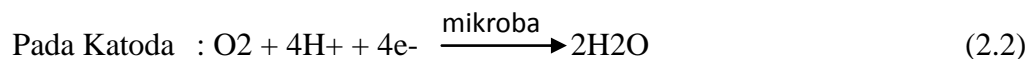
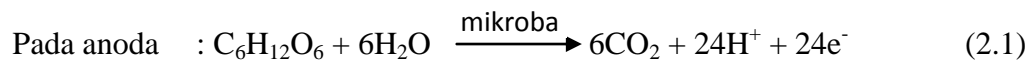
Secara umum mekanisme prosesnya adalah substrat dioksidasi oleh bakteri menghasilkan elektron dan proton pada anoda. Elektron ditransfer

melalui sirkuit eksternal, sedangkan proton didisfusikan 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. Prinsip Kerja MFC (Liu et ., al, 2004)

Reaksi yang berlangsung pada MFC dengan substrat berupa glukosa dan oksigen sebagai elektron aseptor adalah sebagai berikut:



Ada beberapa mekanisme yang melibatkan transfer elektron dari bakteri ke anoda (Liu, 2008), sebagai berikut:

- a. Transfer elektron langsung melalui protein membran luar sel

Pada mekanisme ini transfer elektron melibatkan sitokrom yang terdapat pada membran luar sel mikroba. Dalam hal ini diperlukan kontak langsung sitokrom dengan elektroda untuk mekanisme transfer elektron. Contoh mikroba yang menggunakan mekanisme ini adalah *geobacter sulfurreducens* dan *shewanella putrefaciens*.

b. Transfer elektron dengan mediator

Transfer elektron yang efisien dapat dicapai dengan menambahkan mediator seperti neutral red dan methylene blue, yang mampu melewati membran sel, menerima elektron dari pembawa elektron intraseluler, meninggalkan sel dalam bentuk tereduksi dan kemudian mengeluarkan elektron ke permukaan elektroda. Salah satu mikroba yang memerlukan mediator adalah *Escherichia coli*. Namun untuk limbah, mekanisme ini tidak sesuai karena akan memakan biaya dan kemungkinan adanya racun dari beberapa mediator. Mekanisme transfer elektron dengan mediator ditunjukkan dalam gambar 2.2

c. Transfer elektron melalui *bacteria nanowires*

penelitian akhir-akhir ini menunjukkan bahwa struktur seperti pili yang disebut nanowires yang tumbuh pada membran sel bakteri bisa terlibat langsung dalam transfer elektron ekstraseluler dan memungkinkan reduksi langsung dari sebuah aseptor elektron yang jauh. Nanowires ini telah teridentifikasi pada *G. sulfurreducens* PCA, *Shewanella oneidensis* MR-1, *Synechocystis* PCC6803, dan *Pelotomaculum thermopropionicum*. Mekanisme transfer elektron melalui bacterial nanowires ditunjukkan dalam gambar 2.3.

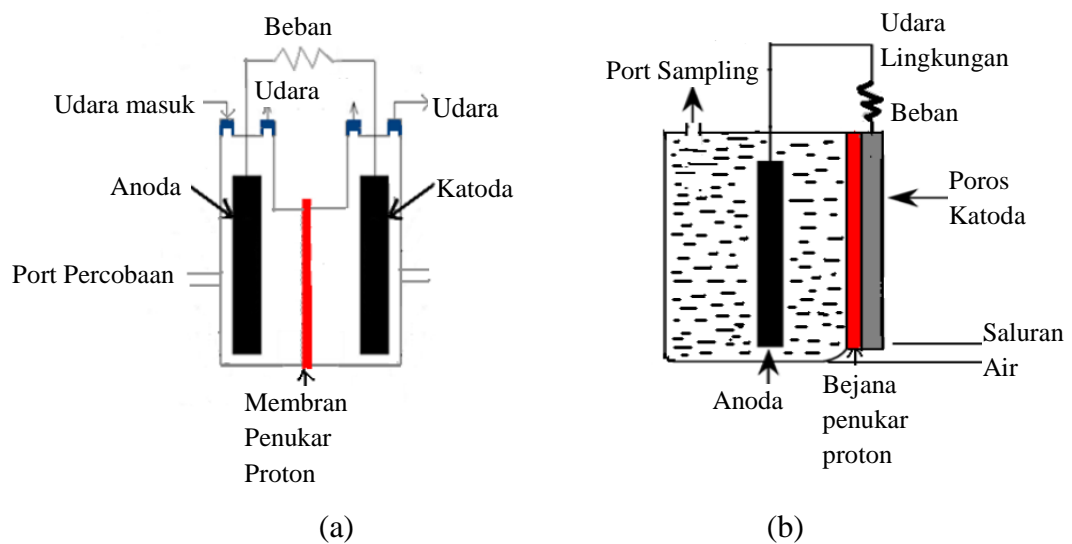
2.2.2 Jenis-jenis Sistem MFC

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

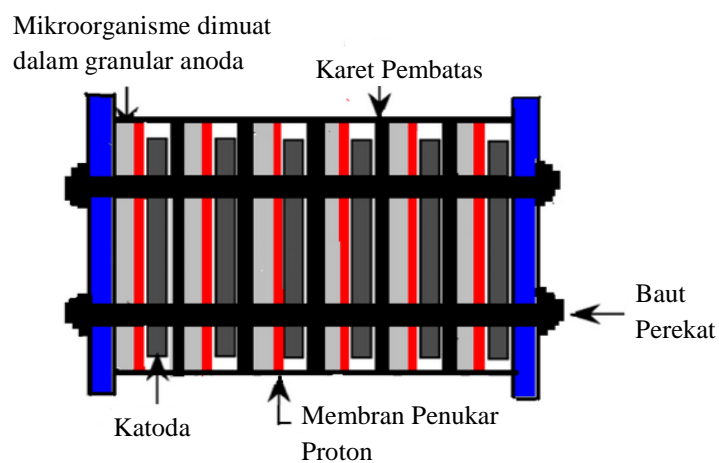
1. Berdasarkan Desain Kompartemen

Berdasarkan desain kompartemennya MFC terbagi menjadi tiga jenis, yaitu *dual chamber* MFC, *single chamber* MFC dan *stack* MFC. *dual chamber* MFC 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 membuat substrat dan larutan elektrolit bercampur sekaligus. Desain ini bisa menggunakan PEM ataupun tanpa PEM. Skema desain kompartemen MFC ditunjukkan dalam gambar 2.3. *Stack* MFC merupakan rangkaian dari beberapa unit MFC baik *dual chamber* maupun *single chamber* yang dirangkai secara seri, paralel, maupun seri paralel. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kapasitas daya yang bisa diproduksi. Skema MFC yang disusun secara stack ditunjukkan dalam gambar 2.4.



Gambar 2.3. a) Desain *dual chamber* MFC b) Desain *single chamber* MFC
(Karmakar et al., 2010)



Gambar 2.4. Desain *stack chamber* MFC
(Sahil Shaikh, 2016)

2. Berdasarkan Ada Tidaknya Membran Pada Desain MFC

Pada sistem MFC *dual chamber* PEM dibutuhkan untuk menghindari terjadinya difusi aseptor elektron yang beracun seperti ferisianida ke dalam ruang katoda sekaligus untuk memfasilitasi terjadinya 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 karena 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).

Microbial Fuel Cell tanpa membran merupakan salah satu alternatif untuk meminimalisir biaya yang terpakai. Sistem membran yang mahal dan rumit dapat dihindari dengan memanfaatkan adanya perkembangan biofilm yang terjadi di permukaan katoda. Biofilm merupakan sebuah pepoulasi 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 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 banyak pemeliharaan dan pekerjaan yang lebih rumit dan memakan biaya yang cukup tinggi. Selain itu kultur sel tunggal menghasilkan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan *mix culture*.

Untuk pengolahan air dan limbah, *mix culture* lebih dipilih daripada

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 *proteobacteria* yang dominan pada MFC sedimen sampai komunitas yang terdiri dari a, b, y, p, *Proteobacteria* dan kloni yang belum terkarakterisasi (Logan and Regen, 2006).

Beberapa penelitian menggunakan *mix culture* seperti memanfaatkan limbah industri bir (Mathuriya and Sharma, 2010; Wang et al., 2008), limbah domestik (Cheng et al., 2006; Li et al., 2007; Sukkasema et al., 2008; Yang et al., 2008), limbah penggilingan padi (Behera et al., 2010) dan limbah pertanian (Scott and Murano, 2007).

2.2.3. Material Elektroda

Teknologi MFC merupakan teknologi berdasar prinsip elektrokimia, sehingga diperlukan material elektroda yang terbagi dua, yaitu anoda dan katoda.

1. Anoda

Material anoda harus bersifat konduktif, *biocompatible* (bisa beradaptasi dengan makhluk hidup) dan secara kimia stabil di dalam larutan bioreaktor. Logam anoda dapat berupa *stainless steel non* korosif, tetapi tembaga tidak dapat digunakan akibat adanya toksisitas ion tembaga pada bakteri (Zahara, 2011).

Material 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, granula, 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 permukaan yang besar ($300\text{-}2000\text{m}^2/\text{g}$). karakteristik karbon yang ideal adalah pada rentang Ph antara 5-6 ($50\text{g/L H}_2\text{O}$, 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 konduktivitasnya yang rendah yaitu $10^{-10}/\Omega\cdot\text{m}$ - $10^{-15}/\Omega\cdot\text{m}$ (Zahara, 2011)

2. Katoda

Bahan yang digunakan sebagai katoda bisa berupa bahan karbon biasa seperti plat grafit namun bisa juga dilengkapi dengan katalis seperti platinum. Selain itu bisa juga digunakan kalium ferrisianida ($\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) yang dikenal sangat baik sebagai aseptor 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 $+ 0,36 \text{ V}$. 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.

2.2.4. 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). Berikut akan dijelaskan satu persatu.

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).

Penelusuran tentang efek substrat terhadap aktivitas mikroba dan pembentukan energi harus dilakukan baik pada sistem MFC dengan proses uji anoda sebagai faktor pembatas atau menggunakan potentiostat, yang bisa mengkarakterisasi potensial anoda pada arus yang ditentukan dan eliminasi keterbatasan yang dihasilkan hambatan internal dan/atau katoda. Penelitian harus diarahkan untuk optimasi komunitas mikroba aktif yang bisa menghasilkan peningkatan efisiensi transfer elektron dan degradasi substrat. Substrat inorganik seperti hidrogen sulfida telah dievaluasi dalam hal pembentukan energi listrik pada sistem MFC dengan tujuan menghilangkan kandungan sulfida yang dihasilkan secara anaerobik

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 pada MFC beroperasi pada pH mendekati netral untuk menjaga kondisi pertumbuhan optimal komunitas bakteri yang terlibat dalam pembentukan listrik.

b. Kekuatan Ionik

Kekuatan Ionik mempengaruhi konduktivitas larutan pada ruangan MFC sehingga mempengaruhi hambatan internal, yang akhirnya berefek pada performa MFC.

3. Temperatur

Kinetik bakteri, transfer massa proton melalui elektrolit dan laju reaksi oksigen pada katoda menentukan performa MFC dan semua tergantung pada temperatur. Biasanya, konstanta reaksi biokimia mengganda setiap kenaikan

temperatur 10 °C sampai tercapai temperatur optimal. Sebagian besar studi MFC dilakukan pada temperatur 28-35 °C.

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.

2.2.5 Aplikasi 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. Pengolahan 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 standard, 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 bagi 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 dengan metode fermentasi glukosa klasik.

2.3. Jembatan Garam

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.

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. Pada sistem MFC jembatan garam memiliki fungsi yang sama dengan PEM yaitu untuk mengalirkan proton dari anoda ke katoda. 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.

2.4 Limbah Cair 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. Limbah cair merupakan limbah yang terbanyak dihasilkan dan

berpotensi merusak dan mencemari lingkungan serta dapat menimbulkan bau yang tidak sedap bila dibiarkan (Nohong, 2010).

Sedangkan limbah padat pabrik pengolahan tahu berupa kotoran hasil pembersihan kedelai (batu, tanah liat, kulit kedelai, dan benda padat lain yang menempel pada kedelai). Limbah padat yang berupa kotoran berasal dari proses awal (pencucian) bahan baku kedelai dan umumnya limbah padat yang terjadi tidak begitu banyak (0,3% dari bahan baku kedelai). Sedangkan limbah padat yang berupa ampas tahu terjadi pada proses penyaringan kedelai. Ampas tahu yang terbentuk besarnya berkisar antara 25-35% dari produk tahu yang dihasilkan (Kaswinarni, 2007).

Limbah cair pada proses produksi tahu berasal dari proses perendaman, pencucian kedelai, pencucian peralatan proses pembuatan tahu, penyaringan dan pengepresan atau pencetakan tahu. Sebagian besar limbah cair yang dihasilkan oleh industri pembuatan tahu adalah cairan kental yang terpisah dari gumpalan tahu yang disebut dengan air dadih. Cairan ini mengandung kadar protein yang tinggi dan dapat segera terurai. Limbah ini sering dibuang secara langsung tanpa pengolahan terlebih dahulu sehingga menghasilkan bau busuk dan mencemari lingkungan (Kaswinarni, 2007)

Pencemaran lingkungan sebagian besar dilakukan oleh ulah tangan manusia, karena manusia tidak dapat dipisahkan dari lingkungan. Allah SWT menciptakan manusia sebagai kholifah di bumi. Sebagai kholifah manusia berkewajiban untuk menjaga dan melestarikan lingkungan, Allah SWT berfirman dalam surat al-Qashah ayat 77:

وَابْتَغِ فِيمَا آتَاكَ اللَّهُ الدَّارَ الْآخِرَةَ ۖ وَلَا تَنْسَ نَصِيبَكَ مِنَ الدُّنْيَا ۗ وَأَحْسِنَ
كَمَا أَحْسَنَ اللَّهُ إِلَيْكَ ۖ وَلَا تَبْغِ الْفُسَادَ فِي الْأَرْضِ ۗ إِنَّ اللَّهَ لَا يُحِبُّ
الْمُفْسِدِينَ

Artinya: “Dan carilah pada apa yang telah dianugerahkan Allah kepadamu (kebahagiaan) negeri akhirat, dan janganlah kamu melupakan bahagianmu dari (kenikmatan) duniawi dan berbuat baiklah (kepada

orang lain) sebagaimana Allah telah berbuat baik, kepadamu, dan janganlah kamu berbuat kerusakan di (muka) bumi. Sesungguhnya Allah tidak menyukai orang-orang yang berbuat kerusakan”.

Ayat tersebut menjelaskan bahwa manusia berkewajiban untuk menjaga dan memelihara lingkungan, sehingga kerusakan ataupun pencemaran lingkungan yang merugikan manusia dapat dihindari.

2.5 Kandungan Limbah Industri Tahu

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)

Bahan-bahan organik yang terkandung di dalam limbah industri cair tahu pada umumnya sangat tinggi. Senyawa-senyawa organik tersebut dapat berupa protein, karbohidrat dan lemak. Senyawa protein memiliki jumlah yang paling besar yaitu mencapai 40-60%, karbohidrat 25-50%, dan lemak 10%. Bertambah lama bahan-bahan organik dalam limbah cair tahu, maka volumenya semakin meningkat (Sugiharto, 1994)

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)

Senyawa organik tersebut yang berada pada limbah adalah senyawa yang dapat diuraikan secara sempurna melalui proses biologi secara aerob maupun anaerob. Sedangkan senyawa anorganik pada limbah adalah senyawa yang tidak dapat diuraikan melalui proses biologi (Nurullatifah, 2011)

Limbah cair tahu mengandung bahan organik berupa protein yang dapat terdegradasi menjadi bahan anorganik. Degradasi bahan organik melalui proses oksidasi secara aerob akan menghasilkan senyawa-senyawa yang lebih stabil. Dekomposisi bahan organik pada dasarnya melalui dua tahap yaitu bahan organik diuraikan menjadi bahan anorganik. Bahan anorganik yang tidak stabil mengalami

oksidasi menjadi bahan anorganik yang stabil, misalnya ammonia mengalami oksidasi menjadi nitrit dan nitrat

2.6 Mikroorganisme Pengurai Air Limbah Cair Tahu

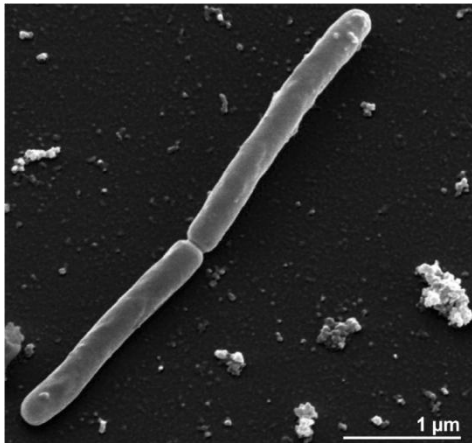
Dalam penanganan air limbah, mikroorganisme merupakan dasar fungsional untuk sejumlah proses penanganan. Proses penanganan biologi air limbah secara biologi disebut juga dengan bioremediasi. Bioremediasi adalah pemanfaatan mikroorganisme hidup untuk mengurangi bahan pencemar agar kurang toksik atau beracun, atau mengurangi zat-zat beracun agar lingkungan yang tercemar dapat direhabilitasi. Kelompok mikroorganisme tersebut adalah 1) Bakteri, 2) Fungi, 3) Algae, 4) Protozoa, 5) Rotifera, 6) Crustacea, dan 7) 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.

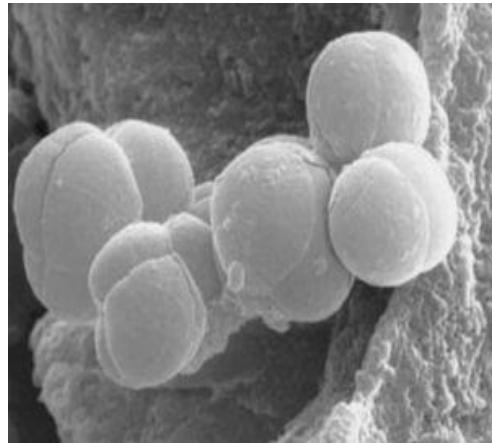
Sebagian besar mikroorganisme tidak dapat mentolerasi level pH diatas 9,5 atau dibawah 4. Secara umum Ph optimal untuk pertumbuhan adalah antara 6,5 dan 7,5. Kebanyakan bakteri adalah kemoheterotrofik yaitu menggunakan bahan organik sebagai sumber energi dan karbon. Beberapa spesies mengoksidasi senyawa-senyawa anorganik seperti NH_3 untuk energi dan CO_2 sebagai sumber karbon. Bakteri ini disebut kemoautotrof. Sebagai bakteri bersifat fotosintetik dan menggunakan sinar sebagai sumber energi dan CO_2 sebagai sumber karbon. Bakteri kemohetrotofik merupakan bakteri terpenting dalam penanganan air limbah karena bakteri-bakteri ini akan memecah bahan-bahan organik.

2.7 Bakteri yang terkandung dalam Limbah Tahu

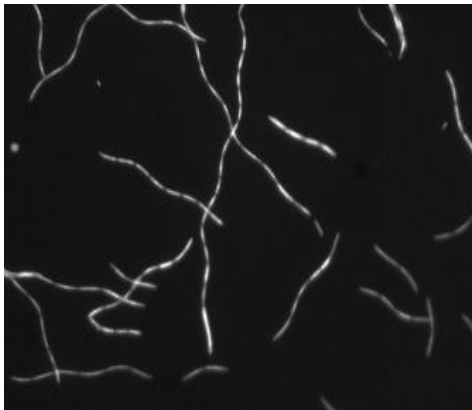
Berikut gambar 2.5-2.9 merupakan beberapa bakteri yang terkandung didalam limbah tahu, yang kemudian akan mendegradasi substrat untuk menghasilkan energi listrik (Susilawati IO, 2011)



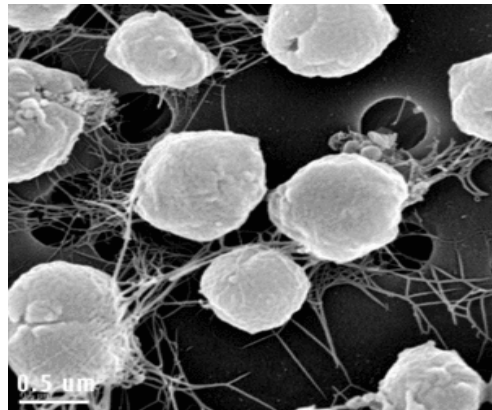
Gambar 2.5 Bakteri *Methanothermus*



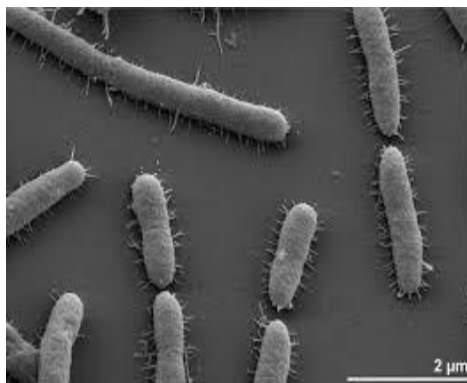
Gambar 2.6 Bakteri *Methanosphaera*



Gambar 2.7 Bakteri *Methanospirillum*



Gambar 2.8 Bakteri *Methanococcus*



Gambar 2.9 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. Bakteri akan mengalami beberapa keadaan sebelum pada akhirnya mati. Pertama bakteri dalam keadaan *lag phase* yaitu keadaan dimana bakteri akan berkembang biak secara konstan dan sedikit lambat pertumbuhannya karena adanya suasana baru pada air limbah tahu.

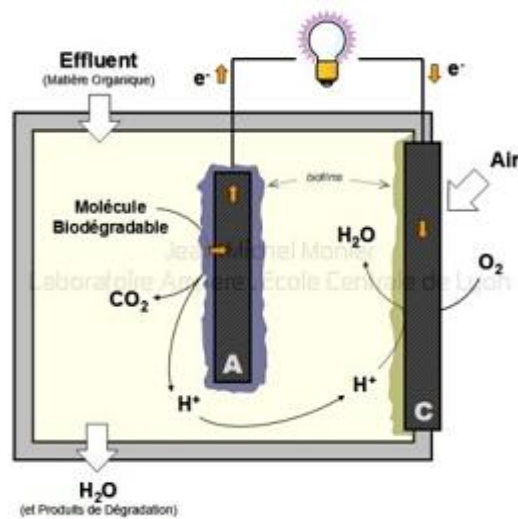
Setelah beberapa jam berjalan, selanjutnya bakteri mulai tumbuh berlipat ganda dan fase ini dikenal sebagai fase akselerasi (*acceleration phase*). Setelah tahap ini berakhir, maka terdapat bakteri yang tetap dan bakteri yang terus meningkat jumlahnya. Pertumbuhan yang dengan cepat setelah fase kedua ini disebut sebagai *log phase*. Selama *log phase* diperlukan banyak persediaan makanan, sehingga pada suatu saat terdapat pertemuan antara pertumbuhan bakteri yang meningkat dan penurunan jumlah makanan yang terkandung didalamnya.

Apabila tahap ini berjalan terus, maka akan terjadi keadaan dimana jumlah bakteri dan makanan tidak seimbang dan keadaan ini disebut sebagai *declining growth phase*. Pada akhirnya makanan akan habis dan kematian bakteri akan terus meningkat sehingga tercapai suatu keadaan di mana jumlah bakteri yang mati dan tumbuh mulai berkembang yang dikenal sebagai *statinary phase*. Setelah jumlah makanan habis dipergunakan, maka jumlah kematian akan lebih besar dari jumlah pertumbuhannya, maka keadaan ini disebut *endogeneous phase* dan pada saat ini bakteri menggunakan energi simpanan ATP untuk pernafasannya sampai ATP habis yang kemudian akan mati.

2.8 Konsep Limbah Menjadi Energi Listrik

Pada gambar 2.4 MFC dapat diisi dengan limbah yang banyak mengandung molekul mikroba seperti lumpur. Mikroba yang terdapat dalam

limbah tersebut kemudian akan mengoksidasi molekul biodegradabel menghasilkan elektron, proton dan CO_2 . Proton menuju ke katoda melalui larutan elektrolit. Sedangkan elektron akan menempel pada anoda, kemudian mengalir melalui sirkuit listrik ke katoda. Aliran elektron inilah yang menghasilkan daya listrik. Pada katoda elektron, proton, dan oksigen bergabung membentuk H_2O . Berikut adalah gambar 2.5 ilustrasi limbah yang akan diubah menjadi energi listrik melalui sistem MFC.



Gambar 2.10. Konersi limbah menjadi energi listrik dalam sistem single chamber MFC (Laboratorium Ampere Ecole Centrale de Lyon, 2012)

2.9 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 2007, Scott melakukan penelitian mengenai Microbial Fuel Cell dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh posisi geometrik anoda dan

katoda terhadap produksi listrik. Pada penelitian ini, digunakan reaktor dual chamber dengan elektroda kertas karbon. Faktor yang dibandingkan adalah bahan bakar, dengan dan tanpa mediator, serta dengan dan tanpa membran.

Velasquez (2009) melakukan penelitian MFC menggunakan reaktor *single chamber* dan lempengan grafit sebagai elektrodanya. Zat anolit diaduk menggunakan magnetic stirrer. Tujuan penelitiannya adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruhnya penambahan mediator terhadap transpor elektron dari sel bakteri ke anoda dalam rangka meningkatkan produksi kuat arus listrik. Mediator yang ditambahkan adalah FMN dan riboflavin. Hasilnya adalah bahwa MFC dengan menggunakan mediator mampu menghasilkan power density lebih tinggi dibandingkan dengan tidak menggunakan mediator.

Dengan bakteri yang sama Lanthier juga melakukan penelitian tentang MFC. Pada penelitian ini, digunakan bakteri *Shewanella oneidensis* yang ditumbuhkan selama 50 hari di dalam sistem MFC yang menggunakan batang grafit sebagai elektrodanya. Penelitian ini ia lakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh proses oksidasi senyawa laktat menjadi asetat di dalam kompartemen anoda pada sistem MFC. Bioreaktor yang digunakan dirancang secara anaerob dengan mengalirkan gas nitrogen dan karbon dioksida ke dalam kompartemen anoda, sedangkan pada kompartemen katoda dialirkan udara ke dalamnya.

Bakteri lain yang sering digunakan dalam MFC adalah *Geobacter sulfurreducens*. Trinh (2009) menggunakan kultur *G. Sulfurreducens* sebagai anoda pada reaktor dual chamber dengan asetat sebagai substrat. Elektroda di anoda berupa kertas karbon, sedangkan di katoda ditambahkan katalis Pt. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat bagaimana pengaruh temperatur dan *loading* katalis Pt pada elektroda di dalam katoda. *Power density* maksimum sebesar 418 – 470 Mw/m² dicapai saat temperatur optimum 30 – 32°C dan meningkat sebesar dua kali lipat setelah *loading* katalis Pt ditambahkan dari 0,5 menjadi 3 mg/cm².

Dengan menggunakan bakteri yang sama, Nein (2008) melakukan penelitian dengan tujuan membandingkan kinerja MFC pada kultur murni *G. Sulfurreducens* dengan kultur campuran. *G. Sulfurreducens* lebih tinggi

dibandingkan dengan kultur murni. Hasil ini diperoleh pada saat ukuran dan volume anoda diperkecil. Dalam penelitiannya, Nevin juga membandingkan kinerja kertas karbon dan grafit sebagai elektroda. Dibandingkan dengan kertas karbon, grafit dapat menghasilkan current density lebih besar. Namun lapisan biofilm yang ditimbulkan juga lebih tebal (50 μ m) dibanding dengan kertas karbon (3-18 μ m).

Penambahan riboflavin sebagai mediator juga dilakukan oleh Zahara (2011). Kultur *Saccharomyces cerevisiae* digunakan sebagai anoda pada reaktor dual chamber dengan elektroda grafit. Sedangkan pada katoda digunakan kalium ferisianida dan larutan bufer. Dari penelitian ini, diperoleh bahwa penambahan riboflavin mampu meningkatkan kuat arus dari 224 μ A menjadi 262 μ A. Selain itu, dilakukan pula upaya penambahan riboflavin dengan menggunakan minyak kelapa sawit dan dihasilkan peningkatan riboflavin sebesar 42,19%.

Selain menggunakan bakteri, *wastewater* juga dapat digunakan sebagai inokulum di anoda. You melakukan penelitian tentang MFC dari *wastewater* pada tahun 2006. You menggunakan 3 jenis larutan elektrolit sebagai perbandingan, yaitu permanganat, ferisianida, dan oksigen (dengan dan tanpa katalis Pt). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan permanganat sebagai akseptor elektron di katoda mampu menghasilkan *power density* maksimum sebesar 115,6 Mw/m². Nilai ini 4,5 kali *power density* dengan ferisianida (25,62 Mw/m²) dan 11,3 kali lebih besar dibanding oksigen (10,2 Mw/m²). Selain itu, dikaji pula pengaruh pH dan konsentrasi awal permanganat terhadap Open Circuit Potential (OCP). Dari percobaan ini diperoleh bahwa nilai OCP sebanding dengan konsentrasi awal permanganat dan berbanding terbalik dengan pH.

Guerro-Rangel (2010) juga menggunakan *wastewater* untuk meninjau pengaruh larutan elektrolit terhadap *power density* MFC. Kali ini, larutan yang dibandingkan adalah potassium permanganat, potassium ferisianida, dan potassium dikromat. Penelitian ini menggunakan dual chamber reaktor yang dihubungkan oleh jembatan garam (salt bridge) dengan grafit sebagai elektroda dan glukosa sebagai substrat. Hasilnya adalah potassium permanganat mampu

menghasilkan *power density* tertinggi, yaitu $7,29 \text{ Mw/m}^2$, diikuti oleh potassium ferisianida ($0,92 \text{ Mw/m}^2$) dan potassium dikromat ($0,79 \text{ Mw/m}^2$).

Penelitian MFC menggunakan *wastewater* juga dilakukan oleh Guo pada tahun 2008. Penggunaan *waste* sebagai biokatoda berfungsi menggantikan peran mediator dan katalis. Reaktor yang digunakan adalah dual chamber dengan grafit sebagai elektrodanya. Pada anoda terdapat *domestic waste water* sementara katoda dialiri oleh udara sebagai akseptor elektron. *Power density* yang dihasilkan dari sistem MFC ini adalah $19,53 \text{ W/m}^3$.

Peneliti lain yang menggunakan *waste* sebagai inokulum adalah Min (2008). Digunakan reaktor *dual chamber* dengan kertas karbon sebagai elektroda dan terdapat pengaliran udara secara kontinyu di katoda. Hal yang ingin ditinjau adalah pengaruh penambahan komposisi medium pada anoda dan peningkatan temperature terhadap *power density* yang dihasilkan. Dari ketiga temperature yang diuji, yaitu 15° , 22° , dan 30°C . penambahan bufer fosfat pada medium di anoda terbukti dapat meningkatkan *power density* 4 kali lebih besar dibandingkan kontrol, yaitu 320 mW/m^2 .

Di tahun yang sama, Ieropoulos (2008) juga meneliti *wastewater* dalam bentuk *sludge* pada reaktor *dual chamber* MFC yang dialiri substrat secara kontinyu (*continous flow*). Hal yang dikaji adalah pengaruh konfigurasi reaktor MFC terhadap produksi energi listrik. Ieropoulos menggunakan 10 reaktor identik yang dirangkaikan secara seri, paralel, dan seri-paralel. Tegangan maksimum sebesar 1400 mV diperoleh pada rangkaian seri, sedangkan kuat arus maksimum didapatkan dari rangkaian paralel, yaitu sebesar 23 mA/m^2 . Gabungan rangkaian seri-paralel menghasilkan *power density* tertinggi, yaitu $5,2 \text{ mW/m}^2$. Gabungan seri-paralel ini kemudian dimodifikasi dengan tidak mengalirkan substrat ke dalam reaktor (*fluidically isolated*) dan dihasilkan kenaikan *power density* menjadi $12,5 \text{ mW/m}^2$.

Penggunaan *wastewater* sebagai inokulum juga dilakukan oleh Li (2010). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh konfigurasi reaktor, larutan elektrolit, dan material elektroda terhadap energi listrik. Dalam hal konfigurasi, reaktor dual chamber tanpa membran memiliki resistansi internal

lebih rendah dan menghasilkan tegangan lebih tinggi daripada reaktor konvensional. Penggunaan ferisianida sebagai larutan katoda memberikan nilai tegangan yang lebih tinggi daripada katoda dengan nitrat. Berdasarkan material elektroda, karbon aktif granular menghasilkan *power density* 2,5 kali lebih besar daripada kertas karbon. Secara keseluruhan, reaktor *dual chamber* tanpa membran dengan elektroda karbon aktif granular memiliki daya keluaran yang tertinggi.

Pada tahun 2010, Lee meninjau pengaruh ukuran sel bakteri terhadap produksi energi listrik. Reaktor yang digunakan adalah single compartment, dimana katoda berada di luar sehingga dapat kontak langsung dengan udara atmosfer. Digunakan elektroda FeC untuk katoda dan elektroda *graphite felt* yang dimodifikasi dengan *Neutral Red* untuk anoda. Sebagai perbandingan, digunakan bakteri *Microbacterium sp.* dan *Pseudomonas sp.* Hasilnya adalah bakteri *Microbacterium sp.* yang memiliki ukuran lebih kecil dapat menghasilkan energi listrik 3-4 kali lebih besar daripada *Pseudomonas sp.* Dari penjelasan mengenai penelitian MFC diatas, *state of the art* mengenai penelitian saat ini telah terangkum pada tabel 2.2 dibawah ini.

Tabel 2.2. *State Of The Art* Penelitian

Parameter Operasi

Elektroda Grafit	Lee,2000. Syeila,2014	Guo,2008. Guerrero,2010			Zahara,2011.	Lanthier, 2007.	Novitasari, 2011	Kristin, 2012	
Elektroda Karbon	Ardhita, 2015	Min,2008 You,2006 Ieropoulos, 2008 Ge dan He 2016	Trinh,2009 Nevin,2008.	Scott,2007				Indratomo, 2017	Penelitian ini
Elektroda Platina			Trinh,2009						
<i>Mediator -Less</i>		Li,2010 Guerrero,2010						Kristin, 2012	Penelitian saat ini
<i>Single Chamber</i>	Lee,2000. Syeila,2014	Ge dan He 2016				Velazques- orta,2009.			
<i>Dual chamber</i>	Ardhita, 2015	Min,2008. Guo,2008. Li,2010. You,2006. Guerrero,2010 Ieropoulos, 2008	Trinh,2009. Nevin,2008.	Scott,2007	Zahara,2011	Lanthier, 2007.	Novitasari, 2011	Kristin, 2012 Indratomo, 2017	Penelitian saat ini
<i>Riboflavin</i>					Zahara,2011	Velazques- orta, 2009.			
	<i>Mix- Culture</i>	<i>Waste</i>	<i>G- Sulfurreducens</i>	<i>E. Coli</i>	<i>S. Cerevisiae</i>	<i>S- Oneidensis</i>	<i>L- bulgaricus</i>	Tempe Waste	Tahu Waste

Substrat