

**PENGOLAHAN AIR LIMBAH DAN PRODUKSI LISTRIK
SECARA SIMULTAN OLEH *MICROBIAL FUEL CELLS*
(MFCS)**

***SIMULTANEOUS WASTEWATER TREATMENT AND
ELECTRICITY PRODUCTION USING MICROBIAL FUEL
CELLS (MFCS)***

Kris Herawan Timotius

**Universitas Kristen Krida Wacana
kh_timotius@ukrida.ac.id**

Abstrak

Kebutuhan akan listrik dan pengolahan air limbah merupakan dua permasalahan yang dihadapi oleh masyarakat modern. *Microbial Fuel Cells* (MFCs) memiliki potensi untuk mengatasi kedua permasalahan tersebut secara simultan. Proses pengolahan air limbah dilakukan dengan teknologi MFCs sehingga energi listrik dapat dihasilkan. Makalah ini ditulis dengan tujuan untuk mengulas potensi MFCs dalam mengolah air limbah, baik limbah rumah tangga maupun industri, serta untuk memproduksi energi listrik. Untuk pengolahan air limbah diharapkan dapat diterapkan teknologi MFCs dengan sistem terbuka yang menyerupai pengolahan air limbah yang dilakukan oleh alam. Pengolahan limbah oleh alam biasanya dalam bentuk kolam, empang, atau tanah genangan (*wetland*). Habitat tersebut memiliki dua fase, yaitu sedimen di bawah dan air di atasnya. Proses tersebut diikuti untuk MFCs, yang kemudian dinamakan *Sediment Microbial Fuel Cells* (SMFCs). Di kedua fase tersebut dipasang anoda (fase sedimen) dan katoda (fase air), dan jika keduanya dihubungkan maka akan dihasilkan aliran elektron yang menimbulkan energi listrik.

Kata kunci: Energi alternatif, *Microbial Fuel Cells*, pengolahan air limbah, produksi listrik, *Sediment Microbial Fuel Cells*

Abstract

The need of electricity and wastewater treatment are two main aspects of modern society. Microbial Fuel Cells (MFCs) has the potential to solve these two problems simultaneously. Wastewater treatment with MFCs Technology at the same time can produce electrical energy. This research article is written to describe the potential of MFCs to treat wastewater from various sources, such as from household or industry, and to produce electrical energy. The MFCs open system can be applied for the above purposes. This technology resembles the wastewater treatment in the nature. Our nature has the capacity to treat wastewater, such as ponds, lakes, and wetlands. These habitats have two phases: the sediment phase (lower) and aqueous phase (upper). The SMFCs resembles this natural process. In those phases, the anode is placed in the sediment phase, and cathode is placed in aqueous phase. If both electrodes are connected, then electrical energy is produced.

Keywords: *alternative energy, MFCs, Microbial Fuel Cells, wastewater treatment, electricity production, SMFCs, Sediment Microbial Fuel Cells*

Tanggal Terima Naskah : 19 Oktober 2016
Tanggal Persetujuan Naskah : 16 November 2016

1. PENDAHULUAN

Penggunaan bahan bakar minyak atau bahan bakar fosil (*fossil fuels*) yang telah berlangsung lama telah menimbulkan kekhawatiran bagi banyak pihak. Penggunaan bahan bakar minyak yang sangat intensif telah mengakibatkan cadangan atau persediaan bahan bakar fosil menipis dan suatu saat pasti tidak dapat memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat. Tidak hanya persediaannya yang menipis, penggunaan bahan bakar fosil oleh manusia dengan segala aktivitasnya juga menimbulkan atau mengakibatkan adanya gas rumah kaca (*greenhouse gasses*, GHGs), seperti metan, karbondioksida, nitrous oxide, dan halokarbon [1].

Peningkatan berbagai gas rumah kaca tersebut diperkirakan menjadi penyebab utama dari perubahan iklim dunia ini. Perubahan iklim tersebut diamati dengan fakta adanya peningkatan suhu bumi. Peningkatan suhu tersebut menimbulkan peningkatan permukaan air laut. Keadaan tersebut juga disertai dengan banyaknya kejadian banjir dan kekeringan di berbagai wilayah di bumi ini [1].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan pendekatan konsep bioekonomi. Ekonomi berbasis biologi (*biobased economy*) menjadi penting bagi keberlanjutan kehidupan manusia di bumi ini. Dalam bioekonomi, biomassa digunakan sebagai sumber produksi energi, bahan bakar (*fuel*), dan senyawa-senyawa kimia tertentu. Pertumbuhan biomassa memerlukan CO₂ sehingga dapat mengurangi kadar CO₂ di udara. Jika biomassa dibakar, maka akan dilepaskan atau dihasilkan CO₂. Oleh karena itu, penerapan bioekonomi dapat berperan untuk mengurangi emisi atau pelepasan GHGs.

Selain angin dan matahari, biomassa sebagai sumber bioekonomi banyak tersedia di alam. Berbeda dengan angin dan matahari, biomassa dapat disimpan dan digunakan saat diperlukan pada saat yang tepat. Hingga saat ini, sebagian besar biomassa dibakar walaupun terdapat beberapa teknologi yang dapat mengkonversi biomassa menjadi listrik, bahan bakar, dan senyawa-senyawa kimia. Sebagai contoh, peruraian anaerob (*anaerob digestion*) untuk produksi energi dan listrik, serta fermentasi untuk produksi bahan bakar [1].

Salah satu dampak dari pembangunan dan pertambahan jumlah penduduk adalah pertambahan air limbah (*waste water*) yang semakin melimpah. Air limbah dapat dihasilkan oleh aktivitas rumah tangga, pertanian, atau industri. Air limbah seharusnya tidak dibuang begitu saja tetapi perlu diolah atau didaur ulang agar dapat digunakan kembali. Alam sesungguhnya dapat mengolah air limbah. Tetapi banyaknya air limbah membuat alam tidak mampu sepenuhnya mengolah air limbah yang dihasilkan oleh manusia. Pengolahan limbah yang dikembangkan selama ini melibatkan proses kimia, fisikawi, dan mikrobiologis. Saat ini, diupayakan pengolahan air limbah dengan menggunakan teknologi *Microbial Fuel Cells* (MFCs) yang dimodifikasi sesuai dengan kondisi proses pengolahan air limbah. Penerapan MFCs tidak hanya membantu proses pengolahan air limbah tetapi juga menghasilkan energi listrik sejalan atau simultan dengan proses pengolahan limbah.

Teknologi *Microbial Fuel Cells* merupakan salah teknologi energi alternatif yang mampu menghasilkan gas hidrogen dari biomassa atau materi limbah organik. MFCs juga dinamakan *Microbial Electrolysis Cell* karena adanya proses *microbial electrolysis*. Proses tersebut berlangsung dalam suatu reaktor yang dinamakan *Microbial Electrolysis Cells* (MECs). Dalam MFCs, dihasilkan elektron-elektron dari biomassa oleh mikroorganisme, terutama bakteri [20]. Konsep MFCs sangat menarik dan menjadi topik penting saat ini karena adanya kesadaran terhadap perlunya peningkatan penggunaan sumber energi alternatif. Dalam MFCs, energi kimia ditransformasi menjadi energi listrik secara efisien dengan bantuan mikroorganisme sebagai katalisator. MFCs tidak menghasilkan produk akhir yang bermasalah.

Tujuan dari penulisan makalah ini adalah untuk membahas kelayakan MFCs untuk produksi listrik dari proses pengolahan air limbah. Untuk itu akan dibahas

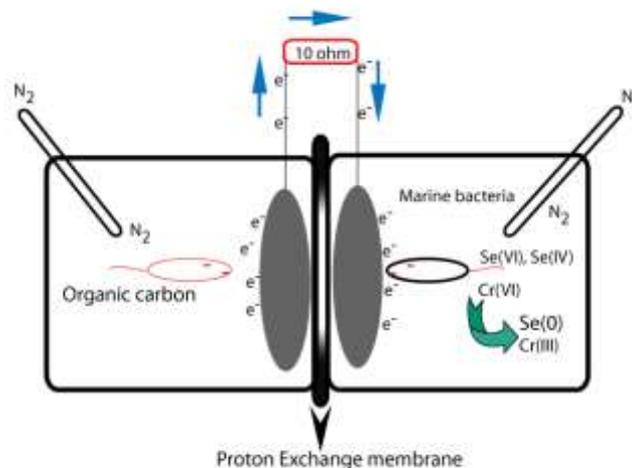
exoelectrogen (bakteri yang mampu menghasilkan listrik), *Microbial Fuels Cells*, penerapan MFCs untuk pengolahan air limbah dan juga untuk produksi listrik.

2. METODE

Penulisan makalah ini dilakukan dengan melakukan studi makalah ilmiah yang dari Sciencedirect, terkait dengan *Microbial Fuel Cells* dan *waste water treatment*. Artikel yang dicari dibatasi pada publikasi setelah tahun 2011. Dengan metode ini diperoleh 184 artikel, dan kemudian dipilih 16 artikel yang sangat relevan dengan tema yang dibahas. Selanjutnya, ditambah sejumlah artikel yang diperoleh dari berbagai sumber lainnya, sehingga diperoleh 26 artikel.

3. EXOELECTROGEN

Telah lama diketahui bahwa bakteri dapat menghasilkan listrik tetapi baru dalam dekade terakhir ini saja mendapatkan perhatian yang lebih serius. Perhatian ini muncul akibat dari desakan perlunya peningkatan sumber energi baru dan perkembangan teknologi *Microbial Fuel Cells*. Dalam MFCs, bakteri dipisahkan dari asektor elektron terminal pada katoda sehingga hanya elektron yang ditransfer ke anoda (Gambar 1). Bakteri yang mempunyai kemampuan mentransfer elektron secara ekstraseluler disebut *exoelectrogen* [2], [3], [4], [5].



Gambar 1. Skema *Microbial Fuel Cells* (MFCs) sistem tertutup [6]

Komunitas bakteri yang membentuk *biofilm* pada MFCs sangat beragam. Komunitas tersebut dapat bertahan hidup karena terjadinya metabolisme alternatif, yaitu fermentasi, metanogenesis, dan penggunaan asektor elektron alternatif. Bakteri yang aktif secara elektrokimia dalam MFCs terutama termasuk bakteri pereduksi besi, misalnya *Shewanella* dan *Geobacter*, tetapi analisis menunjukkan adanya keanekaragaman yang sangat besar. Berbagai contoh jenis bakteri elektrogen dapat dilihat pada Tabel 1. Pertumbuhan komunitas mikroorganisme tersebut sering membentuk *biofilm* atau lapisan di *electrode* atau permukaan padat [7]. Selain bakteri jenis alga dan yeast tertentu (*Sacharomyces cerevisiae*) juga dapat digunakan sebagai *exoelectrogen* [2], [8], [9].

Mikroorganisme adalah organisme yang berukuran sangat kecil (mikroskopis), termasuk bakteri, yeasts, jamur benang (*mold*) dan bakteri, yang mampu berperan di berbagai proses alami dan bioteknologi, termasuk MFCs. Pertumbuhannya pada umumnya sangat cepat sehingga dapat menghasilkan komunitas mikroorganisme dalam

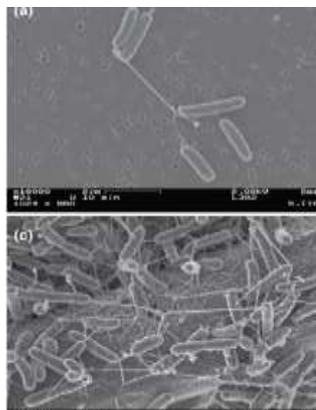
jumlah yang besar [10]. Sejumlah bakteri *exoelectrogen* dilaporkan membentuk struktur khusus yang dinamakan *nanowire* (Gambar 2). *Nanowire* tersebut diperkirakan berfungsi sebagai penghantar elektron [5].

Sejumlah mikroorganisme dapat digunakan untuk menghasilkan aliran listrik melalui MFCs. *Biofilm* pada anoda dapat menghasilkan daya listrik sekitar 6,9 W per m² area anoda. MFCs digunakan dan didesain untuk menghasilkan energi listrik secara elektrokimia. Proses oksidasi pada anoda dan proses reduksi pada katoda mampu menghasilkan energi listrik. MFCs tidak memerlukan katalis metal pada anoda, melainkan mikroorganisme yang secara biologis mampu mengoksidasi materi organik dan mentransfer elektron ke anoda. Sementara itu, proton dipisahkan dan ditransfer ke katoda. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa semua materi yang dapat dibiodegradasi dapat digunakan sebagai MFCs. Bakteri pada *Microbial Fuel Cell* tidak secara langsung mentransfer electron yang dihasilkan ke aseptor elektron terminalnya, melainkan menyalurkan ke elektroda (anoda). Elektron-elektron kemudian dikonduksikan mendekati katoda sehingga menghasilkan energi listrik.

Berbagai jenis *Geobacter sulfurreducens* digunakan untuk membentuk *biofilm* pada elektroda agar proses transfer elektron dan proton dapat lebih lancar untuk produksi listrik. Dalam perkembangan lebih lanjut, muncul ide menggunakan MFCs untuk proses desalinasi air laut, sekaligus untuk menghasilkan listrik, gas hidrogen, metan, dan sebagainya. Bagian tanah anoksik dari sawah dimana terjadi proses reduksi besi juga diperkirakan dapat menjadi proses penerima elektron terminal yang penting. Keberadaan bakteri pereduksi besi di tanah sawah belum banyak diteliti, terutama kemungkinannya untuk digunakan sebagai bahan MFCs tipe *Sediment Biofuel Cells*.

Bakteri mampu tumbuh pada substrat organik dalam MFCs dan menghasilkan elektron yang dapat ditransfer ke suatu elektroda dimana mereka dipanen sebagai energi listrik. Populasi bakteri tertentu berinteraksi dengan elektroda. Interaksi tersebut merupakan faktor kritis dalam efektivitas MFCs. Sejumlah permasalahan riset yang perlu dicari pemecahan masalahnya adalah:

- a. Apakah jenis mikroorganisme elektrogen sangat mempengaruhi kinerja MFCs?
- b. Bagaimana bakteri dapat menggunakan elektroda sebagai aseptor elektron terminalnya?
- c. Bagaimana proses transfer elektron dapat berlangsung dengan cepat dan tepat?
- d. Apakah diperlukan senyawa organik tertentu, misalnya antibiotika dan senyawa humus, yang berfungsi sebagai mediator transfer elektron sehingga dapat memfasilitasi transfer elektron.
- e. Apakah beberapa mikroorganisme dapat mentransfer elektron secara langsung tanpa penggunaan mediator dan menggunakan sturktur khusus sel (*nanowire*) secara langsung?



Gambar 2. Foto *Scanning Electron Micrograph* (SEM) *Shewanella oneidensis* yang menunjukkan adanya serabut nano (*nanowire*) yang menghubungkan sel-sel dalam keadaan keterbatasan aseptor elektron [5]

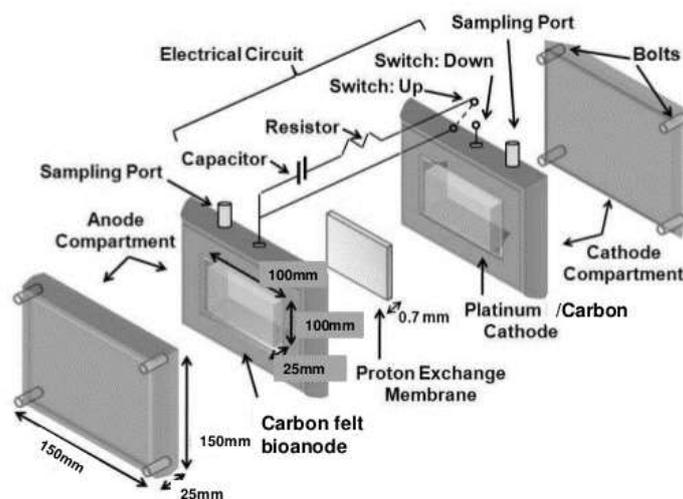
Tabel 1. Beberapa contoh bakteri eksoelektrogen

No	Nama bakteri
1	<i>Aeromonas hydrophila</i>
2	<i>Alcaligenes faecalis</i>
3	<i>Athrobacter polychromogenes</i>
4	<i>Comamonas testosteroni</i>
5	<i>Corynebacterium glutamicum</i>
6	<i>Enterococcus gallinarum</i>
7	<i>Geobacter metallireducens</i>
8	<i>Geobacter sulfurreducens</i>
9	<i>Leptotrix spp</i>
10	<i>Pseudoaltermonas spp.</i>
11	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
12	<i>Pseudomonas putida</i>
13	<i>Shewanella affinis</i>

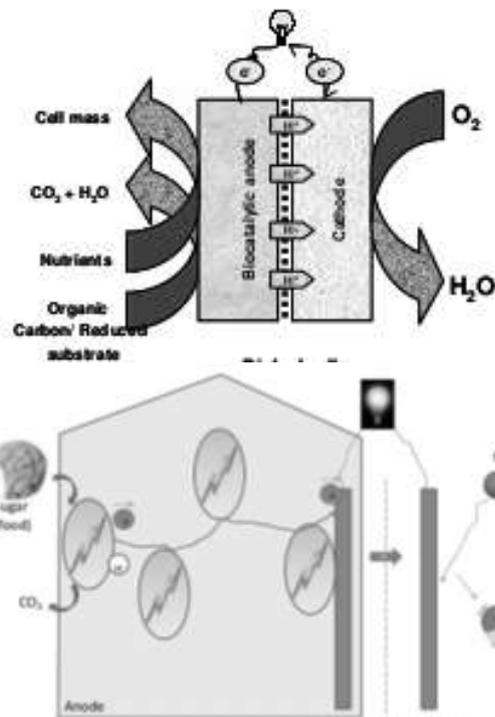
4. MICROBIAL FUEL CELLS (MFCs) DAN SEDIMENT MICROBIAL FUEL CELLS (SMFCs)

MFC adalah suatu bioreaktor yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Hal ini dapat terjadi karena adanya peruraian ikatan kimia tertentu di suatu senyawa organik sehingga dihasilkan elektron dan proton, serta hidrogen melalui reaksi-reaksi katalitik yang dimiliki oleh mikroorganisme terutama bakteri dalam keadaan anaerob [11]. Dari peruraian materi organik tersebut dapat dihasilkan energi listrik melalui sistem MFCs.

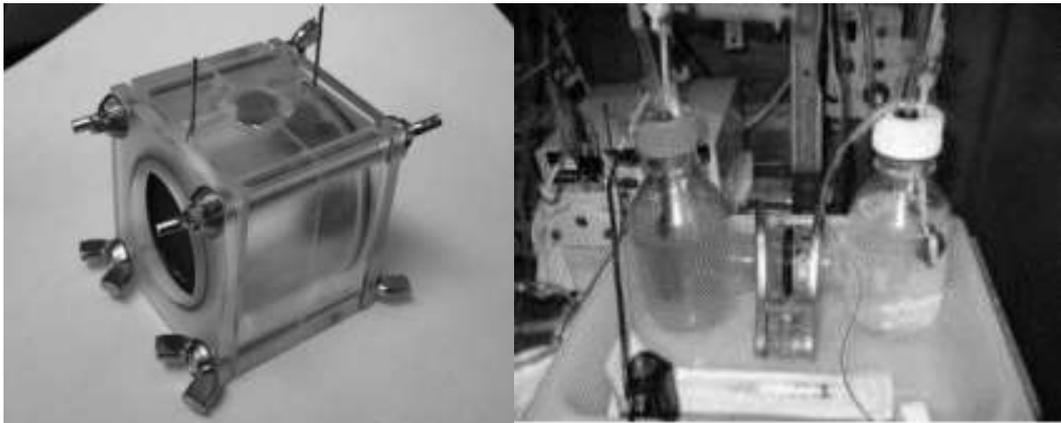
MFCs adalah peralatan yang menggunakan bakteri sebagai katalisator untuk mengoksidasi materi organik dan anorganik, serta menghasilkan aliran listrik [4]. Elektron dihasilkan oleh bakteri dari senyawa tersebut dan ditransfer ke anoda (terminal negatif), kemudian mengalirkannya ke katoda (terminal positif) melalui materi konduktor yang dinamakan resistor (Gambar 1, 3, 4). Elektron yang dihasilkan oleh bakteri dapat ditransfer ke anoda melalui mediator elektron, dan dengan bantuan membran tertentu atau *nanowire*.



Gambar 3. Skema dan komponen atau bagian-bagian dari MFCs



Gambar 4. Skema mekanisme kerja MFCs [12]

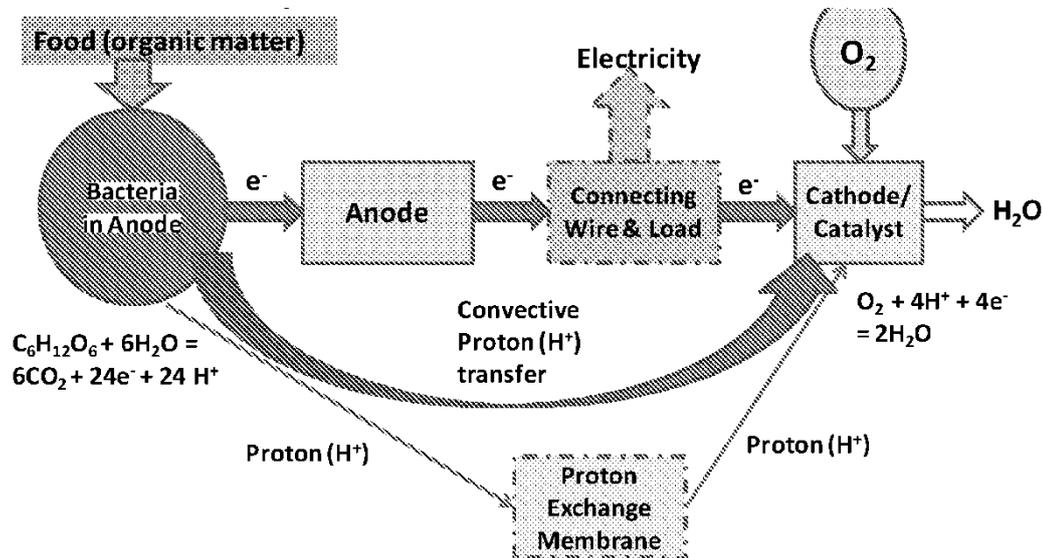


Gambar 5. *Microbial Fuel Cell* kamar tunggal (SCMFC, *Single-Chambered Fuel Cell*) (kiri) dan sistem dua kamar (kanan) [4], [13]

Secara umum, dikenal berbagai tipe MFCs, antara lain *photoautotrophic-type cells*, *heterotrophic-type biofuel cells*, *engineered MFCs (high power)*, dan *sediment biofuel cells*. *Photoautotrophic-type cells* atau *Plant Microbial Fuel Cell (Plant-MFCs)* adalah teknologi baru yang menjanjikan karena menghasilkan sumber bioenergi baru yang terbarukan dan berkelanjutan; dapat diterapkan di lahan basah dan tanah yang miskin sehingga tidak berkompetisi dengan lahan pertanian; menghasilkan banyak energi sehingga diharapkan dapat menyamai atau melebihi teknologi konvensional minyak bumi/fosil. Mikroorganisme tertentu yang mampu mentransfer elektron dan proton secara ekstraseluler dapat dimanfaatkan untuk produksi listrik. Prinsip dasarnya, pohon atau tanaman akan memanfaatkan energi matahari dan mengeluarkan sejumlah senyawa kimia pada akarnya. Bakteri di rhizosfir akan mengubah atau mengoksidasi senyawa tersebut, menghasilkan elektron dan proton secara terpisah, dengan bantuan membran pertukaran ion dan anoda serta katoda, sehingga dapat dihasilkan listrik. Istilah

heterotrophic-type biofuel cells digunakan untuk sistem yang tanpa menggunakan tanaman air.

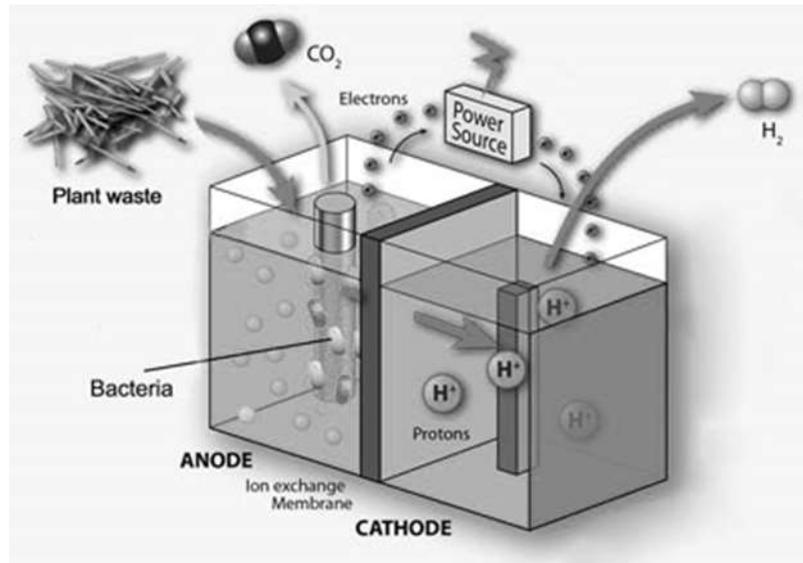
EMFCs (*engineered MFCs*) didesain untuk menghasilkan daya yang kuat. Untuk itu, diperlukan mikroorganisme *exoelectrogen* yang berfungsi optimal, elektroda yang baik, dan pengendalian proses dengan baik (Gambar 6).



Gambar 6. *Engineered Microbial Fuel Cells* (EMFCs) (Patent WO-2013144660A2)

5. PENGOLAHAN AIR LIMBAH DENGAN MENGGUNAKAN TEKNOLOGI SMFCS SERTA UNTUK PRODUKSI LISTRIK

Air limbah adalah air yang dibuang dari rumah tangga, pertanian, atau industri setelah digunakan untuk kegiatan atau proses tertentu. Air limbah tersebut perlu diolah dengan metode tertentu sebelum dilepas ke alam bebas agar dapat digunakan kembali. Kualitas air limbah sering diukur dari kandungan *Chemically Oxygen Demand* (COD), *Biologically Oxygen Demand* (BOD), *Total Soluble Solid* (TSS), dan pH. Air limbah dari berbagai sumber, misalnya air limbah dari perusahaan air minum, pabrik gula, pengolahan susu, rumah tangga-kota, industri kertas, memiliki ciri-ciri yang berbeda [14]. Kandungan bahan pencemar juga berbeda-beda tergantung dari sumbernya [15], [16]. Efisiensi dan efektifitas pengolahan limbah secara umum diukur dari parameter tersebut. MFCs juga sudah diteliti kemampuannya tidak hanya untuk air limbah [13], [17], tetapi juga untuk menghilangkan kontaminan atau bahan pencemar tertentu, misalnya logam berat dan juga untuk limbah padat organik [18], [19]. Limbah rumah tangga, seperti urin dan tinja, juga telah diteliti untuk dapat digunakan sebagai substrat MFCs [20]. (Gambar 7).



Gambar 7. Skema MFCs [21]

Peralatan MFC terdiri atas dua kompartmen utama yang terpisah atau dipisahkan secara elektrokimia, yaitu kompartmen anoda dan kompartmen katoda (Gambar 7). Telah dikembangkan terrestrial MFCs yang menggunakan anoda terpisah dari katoda karena adanya lapisan sedimen atau tanah (Gambar 8) [21]. Kompartmen anoda mengandung mikroorganisme yang memetabolisme substrat tanpa oksigen, misalnya glukosa, yang menghasilkan karbondioksida dan elektron seperti dalam reaksi no 1 berikut ini.

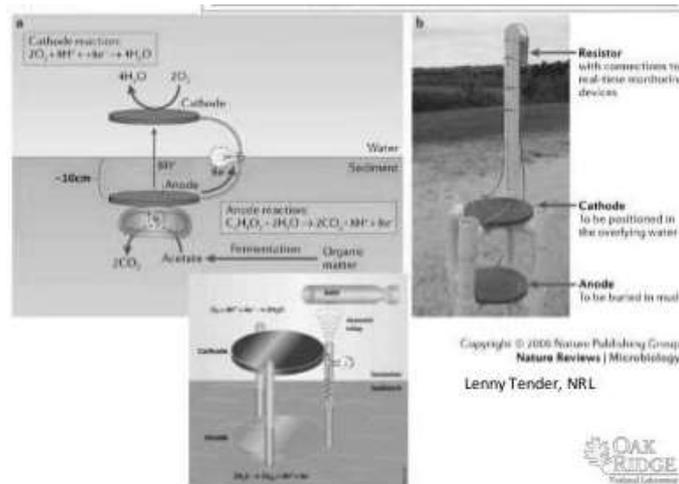


Jika terdapat persediaan oksigen dari udara, maka reaksinya sebagai berikut:



MFCs dapat dibedakan menjadi dua tipe, yaitu tipe tertutup yang umumnya menggunakan membran pertukaran kation (CEM, *Cation Exchange Membrane*) yang juga disebut PEM (*Proton Exchange Membrane*), dan SMFCs (*Sediment MFCs*) yang merupakan sistem terbuka, suatu sistem tanpa membran [5], [18].

Sediment MFCs menggunakan karbon organik yang tersedia di sedimen sebagai sumber energi. SMFCs sangat bermanfaat untuk memperoleh energi dari sedimen (bagian bawah yang mengendap), dan dapat berfungsi dalam waktu yang sangat lama (Gambar 8). Untuk pengolahan air limbah dimana materi organik-tanah telah diuji sebagai peralatan *membrane-less single chamber microbial fuel cells* (SMFC) yang menghasilkan bioelektrisitas simultan dengan biotransformasi limbah organik. Hasil yang diperoleh masih relatif rendah, yaitu dapat mencapai 330 mV [4], [18].



Gambar 8. *Sediment Microbial Fuel Cells* (SMFCs) (sumber OakRidge)

Teknologi MFC telah dicoba di beberapa negara maju, baik untuk produksi listrik maupun untuk pengolahan limbah organik maupun anorganik. Teknologi memerlukan *electrochemically active microorganisms* (EAM) sebagai katalisator untuk proses produksi energi listrik. Di wilayah yang limbah organiknya dominan (80%), limbah tersebut dapat menjadi sumber makanan bagi mikroorganisme MFCs. Di banyak wilayah di negara sedang berkembang, limbah sering hanya dikumpulkan dan ditumpuk di tempat pembuangan akhir (*landfills*), dan tidak diolah. Pengolahan limbah tersebut untuk produksi gas metan juga masih terbatas. Dalam skala kecil, teknologi MFCs mampu menghasilkan listrik dari limbah organik atau air limbah. Dalam skala besar, teknologi MFCs belum banyak diterapkan. Beberapa peneliti telah menggunakan teknologi MFCs untuk mengolah bahan pencemar, misalnya phenol, chromium (logam berat), dan pentachlorophenol (pestisida) [18].

SMFCs dapat diterapkan untuk pengolahan limbah, apalagi jika dikombinasikan dengan kekhasan habitat tertentu, misalnya sistem pengolahan limbah, sawah, kolam, dan danau. Terdapat sejumlah keuntungan, yaitu:

- Air limbah menyediakan senyawa organik sebagai sumber elektron untuk proses oksidasi pada anoda dan mendukung proses produksi listrik;
- Proses produksi listrik dapat sekaligus menghilangkan senyawa rekalsitran yang terdapat di sedimen atau air limbah;
- Listrik yang dihasilkan dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi dari unit pengolahan limbah atau untuk menjalankan berbagai sensor yang diperlukan untuk *monitoring* sistem pengolahan

SMFCs tanpa tanaman menyerupai habitat danau atau lautan, kecuali *supply* air limbah yang berlangsung terus-menerus. SMFCs juga dapat ditemui pada air akuakultur. Penyediaan air limbah menjadi *input* atau masukan yang terdapat pada sedimen maupun fase cair. Adanya senyawa organik pada fase cair menimbulkan dua masalah, yaitu:

- Sejumlah elektron tidak mampu digunakan untuk produksi listrik sebab anoda biasanya terbenam pada sedimen, dan
- Senyawa organik memicu pertumbuhan bakteri heterotrof pada katoda sehingga menurunkan kinerja katoda karena adanya kompetisi dalam konsumsi oksigen (DO , *dissolved oxygen*) dan menutupi permukaan elektroda sehingga mengganggu transfer oksigen.

Jika digunakan tanaman pada SMFCs, maka akan menyerupai habitat lahan basah (*wetland*). Sistem ini disebut sebagai *constructed wetland-microbial fuel cells* (CW-MFCs). Sejumlah tanaman air dapat digunakan. Tanaman dapat menyediakan karbon yang dilepas lewat akarnya, membantu pembentukan biofilm. Dua tanaman telah dicoba,

yaitu *Ipomoea aquatica* dan *Phragmites australis*. Di Indonesia banyak tanaman air yang mungkin dapat digunakan. Adanya tanaman juga dapat mendukung pertumbuhan bakteri dan pembentukan *biofilm* [22].

Aliran atau masukan air limbah juga harus diperhatikan. Aliran air limbah dapat dibedakan mejadi dua, yaitu *surface flow* dan *subsurface flow*. Pada CW-MFCs, yang terjadi hanya *subsurface flow*. *Surface flow* tidak diharapkan karena kurang cocok untuk aplikasi SMFCs. *Subsurface flow* membuat bahan organik mengendap pada anoda dulu, kemudian terjadi aliran bahan-bahan (*effluent*) ke katoda sehingga membuat pemisahan yang efektif bagi kedua elektroda, anoda dan katoda. Terdapat sejumlah studi telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari pola aliran air limbah yang masuk ke sistem SMFCs [22].

Harus diakui bahwa energi yang dihasilkan belum cukup banyak. Oleh karena itu, sejumlah peneliti hanya ingin berfokus pada pengolahan limbah dan kurang memperdulikan jumlah energi yang dihasilkan. Peneliti yang lain tetap berusaha untuk memaksimalkan proses pembentukan energi secara maksimal.

Pengolahan limbah dengan penggunaan SMFCs. SMFCs yang digunakan dapat dilakukan dalam sistem terbuka dengan skala besar. MFCs-sedimen (*Sediment MFCs*, SMFCs) tidak menggunakan membran, menempatkan anoda di sedimen dan katoda di fase airnya (Gambar 8). Kadang dapat digunakan tanaman air karena daerah sekitar akarnya (*rhizosfir*) dihuni oleh mikroorganisme. Akar mengeluarkan sejumlah senyawa organik yang menjadi substrat bagi *exoelectrogen*.

Di Indonesia sejumlah limbah mungkin dapat digunakan, yaitu limbah industri tempe, tahu, dan air kelapa, serta limbah industri alkohol, limbah padat organik dari pasar, yang diperkirakan masih banyak mengandung senyawa organik yang bisa menjadi sumber makanan *exoelectrogen*.

6. KESIMPULAN

Dari pembahasan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- a. SMFCs memiliki potensi untuk dapat digunakan dalam pengolahan air limbah, terutama air limbah yang mengandung materi organik. Diharapkan bahwa teknologi SMFCs dapat digunakan untuk pengolahan limbah organik, cair maupun padat, sehingga dapat berperan sebagai salah satu pengganti bahan bakar fosil.
- b. Produksi energi listrik oleh SMFCs masih rendah dan memerlukan riset yang lebih intensif dalam berbagai aspek terkait, mulai dari *exoelectrogen*, desain peralatan, faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi, dan elektroda yang digunakan.
- c. Penggunaan teknologi MFCs dipelajari lebih banyak di negara maju daripada negara yang sedang berkembang. Untuk pengembangannya di masa mendatang sangat diperlukan penelitian yang melibatkan peneliti dengan berbagai latar belakang. Negara sedang berkembang, dengan ciri khasnya, perlu memulai penerapan teknologi MFCs karena yang dilakukan di negara maju tidak begitu saja dapat diterapkan di negara sedang berkembang.

REFERENSI

- [1]. Sleutels, Tom, H.J.A. 2010. *Microbial Electrolysis. Kinetics and Cell Design* [Disertation]. Netherlands: Wageningen University.
- [2]. Kumar, Ravinder, Singh, Lakhveer., Ab.Wahid, Zularman. 2015. "Role of Microorganisms in Microbial Fuel Cells for Bioelectricity Production". *Microbial Factories V.C.Kalia* (Ed.) DOI 10.1007/978-81-322-0_9
- [3]. Kumar, Ravinder, Singh, Lakhveer., Ab.Wahid, Zularman., Mohd Fachil Md. Din. 2015. "Exoelectrogens in microbial fuel cells toward bioelectricity generation: a review". *Int J Energy Res* 39: 1048-1067.
- [4]. Logan, B.E. 2006. "Simultaneous wastewater treatment and biological electricity generation". *Water Sci Tech* 52(1-2) 31-37.
- [5]. Logan, B.E., M. Regan, John. 2006. "Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells". *Trends Microbiol* 14(12) 512-518.
- [6]. Ken, Nealson. (no information about the year of publication). "Microbial Fuel Cells and Bacteria-Mediated Chemistry: Alternative Technology Development at the USC Wrigley Institute". USC Wrigley Institute for Environmental Studies, California.
- [7]. Millo, Diego. 2012. "Spectroelectrochemical analyses of electroactive microbial biofilms". *Biochem Soc Trans* 40, 1284-1284.
- [8]. Das, Merina Paul. 2015. "Bioelectricity production using algae in microbial fuel cell". *Der Pharma Chemica* 7(11) 8-10
- [9]. Jafary, T., Najafpour, G.D., Ghoreyshi, A.A., Haghparast, F., Rahimnejad, M., Zare, H. 2011. "Bioelectricity power generation from organic substrate in a Microbial Fuel Cells using *Saccharomyces cerevisiae* as Biocatalysts". World Renewable Energy Congress, Sweden.
- [10]. Frisk, Megan L. 2010. "Multifaceted microbes". *Trends Biotech* 29(2) 51-52.
- [11]. 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.
- [12]. Borole, Abhijet P., 2015. "Microbial Fuel Cells and Microbial electrolyzers". *The Electrochem. Society Interface Fall 2015*, 55-59.
- [13]. Logan, Bruce E., Hamelers, Bert., Rozendal, Rene., Schröder, Uwe., Keller, Jurg., Freguia, Stefano., Aelterman, Peter., Verstrate, Willy., Rabaey, Kornell. 2006. "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology". *Environ Sci Tech* 40(17) 5181-5190.
- [14]. Samsudeen, N., Radhakrishnan, T.K., Matheswaran, M. 2015. "Bioelectricity production from microbial fuel cell using mixed bacterial culture isolated from distillery wastewater". *Bioreour Technol* 195:242-7.
- [15]. Marthuriya, Abhilasha, V.N.Sharma. 2009. "Bioelectricity production from various wastewaters through microbial fuel cell technology". *J Biochem Tech* 291, 133-137.
- [16]. Zhang, Q., J.Hu, DJ Lee, 2016. "Microbial fuel cells as pollutant treatment units: Research updates". *Bioresour Technol* 217:121-8. DOI 10.1016/j.biotech.2016.02.006.Epub 2016 Feb 6.
- [17]. Aelterman, P., Rabaey, K., Clauwaert, P. Verstraete, W. 2006. "Microbial Fuel Cells for wastewater treatment". *Water Sci Tech* 54(8) 9-15.
- [18]. Logroño, Washington, Geovany Ramírez, Celso Recalde, Magdy Echeverría, Ana Cunachib, 2015. Bioelectricity generation from vegetables and fruits wastes by using single chamber microbial fuel cells with high Andean soils. *Energy Procedia* 75, 2009 – 2014

- [19]. Singh, Shweta, Pandey, Anjana., Dwivedi, C.K., 2016. “Bioelectricity Production from Various Feedstocks Using Pure Strain of *Bacillus firmus*”. *Int. J Renew Energy Dev (IJRED)* 5(2) 119-127.
- [20]. Gude, Gnaneswar, Veera. 2016. “Wastewater treatment in microbial fuel cells – an overview”. *J Cleaner Prod* 122: 287-307.
- [21]. Mohan, S.Venkata, R.Saravanan, S.Veer Reghavulu. Mohanakrishna, G., Sarma, P.N. 2008. “Bioelectricity production from wastewater treatment in dual chambered microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched mixed microflora: Effect of catholyte”. *Bioresour Tech* 99(3) 596-603.
- [22]. Xu, Bojun, Ge, Zheng., He, Zhen. 2015. “Sediment microbial fuel cells for wastewater treatment: challenges and opportunities”. *Environmental Science: Water Res Tech* 1: 279-284.