



PROGRAM KREATIVITAS MAHASISWA

**ALTERNATIF BARU SUMBER PEMBANGKIT LISTRIK
DENGAN MENGGUNAKAN SEDIMEN LAUT TROPIKA
MELALUI TEKNOLOGI *MICROBIAL FUEL CELL***

**BIDANG KEGIATAN :
PKM GAGASAN TERTULIS (PKM-GT)**

Diusulkan oleh :

Ketua	: Fitriani Idham	C34053096	2005
Anggota	: Sofia Halimi	C34052160	2005
	Siti Latifah	G44062700	2006

**INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2009**

**HALAMAN PENGESAHAN
USULAN PROGRAM KREATIVITAS MAHASISWA**

- 1. Judul Kegiatan** : Alternatif Baru Sumber Pembangkit Listrik dengan Menggunakan Sedimen Laut Tropika Melalui Teknologi *Microbial fuel cell*
- 2. Bidang Kegiatan** : PKM Gagasan Tertulis (PKM-GT)
- 3. Ketua Pelaksana Kegiatan**
- a. Nama Lengkap : Fitriani Idham
 - b. NIM : C34053096
 - c. Jurusan : Teknologi Hasil Perairan
 - d. Universitas/Institut/Politeknik : Institut Pertanian Bogor

Menyetujui,
Pembina Kemahasiswaan
Departemen Teknologi Hasil Perairan
dan Ketua Departemen

Uju, S.Pi, M.Si
NIP. 132 282 668

Wakil Rektor
Bidang Akademik dan Kemahasiswaan

Prof. Dr. Ir. Yonny Koesmaryono, MS
NIP. 131 473 999

Bogor, 1 April 2009

Ketua Pelaksana Kegiatan

Fitriani Idham
NIM. C34053096

Dosen Pendamping

Bambang Riyanto, S.Pi., M.Si
NIP. 132 206 247

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan karya tulis dengan judul **Alternatif Baru Sumber Pembangkit Listrik dengan Menggunakan Sedimen Laut Tropika Melalui Teknologi *Microbial Fuel Cell***. Tulisan ini merupakan sebuah pemikiran baru dalam pemanfaatan salah satu sumber daya alam bahari Indonesia dengan potensi yang sangat besar, yaitu sedimen laut tropika.

Terima kasih penulis sampaikan kepada orang tua kami atas dukungan dan doanya. Terima kasih yang tidak terhingga kepada Bapak Bambang Riyanto, S.Pi., M.Si yang telah memberikan bimbingan, pengarahan, dan semangat selama penulisan karya tulis ini.

Karya tulis ini kami curahkan sebagai kontribusi kami dalam rangka mencari solusi kelangkaan bahan bakar berbasis fosil. Semoga karya tulis ini menjadi sebuah bentuk nyata kami sebagai generasi penerus bangsa dalam menciptakan kelestarian lingkungan menuju kehidupan yang lebih baik. Semoga karya tulis ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Bogor, 1 April 2009

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
PENDAHULUAN.....	1
Latar Belakang	1
Manfaat Penulisan.....	4
TELAAH PUSTAKA.....	5
<i>Fuel cell</i>	5
<i>Microbial fuel cell</i> (MFC).....	6
METODE PENULISAN.....	8
Penentuan Gagasan	8
Jenis dan Sumber Tulisan	8
Metode Penulisan.....	8
ANALISIS DAN SINTESIS	9
Teknologi <i>Microbial fuel cell</i>	9
Potensi Sedimen Laut Tropika Sebagai Alternatif Substrat MFC	10
Rancangan Alat SMFC (<i>Sediment Microbial Fuel Cell</i>).....	12
Tantangan dan Hambatan Pengembangan SMFC	13
SIMPULAN DAN SARAN	15
Simpulan	15
Saran	15
DAFTAR PUSTAKA	16
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	21
LAMPIRAN.....	25

DAFTAR TABEL

Nomor	<i>Teks</i>	Halaman
1.	Jenis <i>fuel cell</i> anorganik	6

DAFTAR GAMBAR

Nomor	<i>Teks</i>	Halaman
1.	Prinsip kerja <i>fuel cell</i>	5
2.	<i>Microbial fuel cell</i>	6
3.	Bakteri pada SMFC.....	12
4.	Model produksi listrik MFC pada sedimen laut.....	13

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
1. Metode analisis dan sintesis	25
2. Penggunaan berbagai substrat dan mikroorganisme dalam MFC.....	26
3. Disain reaktor MFC	27
4. Faktor-faktor yang berpengaruh pada berbagai zona perairan.....	28
5. Rata-rata karakteristik sedimen pada estuari Great Ouse	29
6. Nilai karakteristik sedimen muara Sungai Bantan Tengah.....	30
7. Gambaran jumlah arus dan daya yang dihasilkan dari SMFC.....	31

RINGKASAN

FITRIANI IDHAM, SOFIA HALIMI, SITI LATIFAH. Alternatif Baru Sumber Pembangkit Listrik dengan Menggunakan Sedimen Laut Tropika Melalui Teknologi *Microbial Fuel Cell*. Dibimbing oleh BAMBANG RIYANTO.

Wilayah Indonesia yang terbentang dari Sabang dan Marauke memiliki luas 8,1 juta km² hampir sebanding dengan luas daratan Amerika Serikat. Dilihat dari segi fisik, sebenarnya hanya sepertiga wilayah Indonesia yang berada di atas permukaan laut, yaitu berupa belasan ribu pulau besar dan kecil. Namun di dalam perairan, merupakan wilayah negeri Nusantara yang besar, memiliki potensi kelautannya yang berlimpah. Peta cekungan sedimen tersier Indonesia memperlihatkan bahwa Indonesia memiliki 60 cekungan sedimen, yakni 16 cekungan merupakan sumber produksi minyak dan gas bumi Indonesia dan sisanya sebanyak 44 cekungan merupakan harapan masa depan yang belum tergali potensinya. Ekspedisi Bandamin II tahun 2003, serangkaian penelitian berupa pengukuran batimetri, konduktivitas, suhu dan kedalaman (*Conductivity, Temperature, Depth* (CTD)), pengambilan contoh batuan dasar laut, serta pemotretan kondisi bawah laut, memperlihatkan bahwa sampel batuan pada kedalaman 500-600 meter di bawah permukaan laut di sekitar gunung api Komba ditemukan batuan yang mengandung andesit dan basalt. Selain itu, teridentifikasi adanya mineral-mineral sulfida pirit, barit, dan markasit. Kehadiran mineral logam ini merupakan indikator kemungkinan terbentuknya mineral-mineral logam lain yang memiliki nilai ekonomis tinggi.

Gejala pemanasan global dan krisis energi dunia telah menyadarkan tentang perlunya pemenuhan terhadap kebutuhan energi dunia. Peranan laut sebagai sumber energi terbarukan (*renewable resources*) sangat diperlukan. Kekayaan energi hayati laut yang sedang dikembangkan yakni energi termal dari energi panas matahari dan energi mekanik dari pasang surut dan gelombang, masih belum banyak diterapkan di Indonesia. Data Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM) tahun 2006 menyebutkan pemakaian energi *mix* di Indonesia saat ini adalah lebih dari 90 % menggunakan energi fosil, yaitu minyak bumi 51,66 %, gas bumi 28,57 %, batu bara 15,34 %, sedangkan sumber energi lain meliputi tenaga air 3,11 %, panas bumi 1,32 %, serta energi baru dan terbarukan (EBT) lainnya, hanya sekitar 0,2 %. Berdasarkan sumber energi, bentuk listrik merupakan energi yang paling praktis digunakan, namun konversi teknologi pembakaran dan *gasification* yang biasa digunakan dalam pembangkit listrik berdampak terhadap penipisan cadangan bahan bakar fosil dan peningkatan jumlah CO₂ di atmosfer, sedangkan konversi dari biogas menjadi listrik memiliki efisiensi yang rendah, yaitu kurang dari 40% (Rittmann 2008). Tantangan dalam pengembangan pembangkit listrik adalah menemukan teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Fuel cell adalah alat elektrokimia yang secara kontinyu mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik (Shukla *et al.* 2004). Berbagai macam *fuel cell* telah dikembangkan, antara lain *biofuel cell* yang meliputi *microbial fuel cell* (MFC) dan enzim *fuel cell* (Kordesch dan Simader 2001). MFC merupakan alat untuk mengonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan reaksi katalitik dari mikroorganisme (Allan dan Benneto 1993). MFC membangkitkan listrik dengan mengoksidasi bahan organik secara anaerob melalui bantuan bakteri. Aktivitas katalitik dan transfer proton dilakukan dengan menggunakan enzim atau tambahan mediator (Kordesch dan Simader 2001). Sebagian besar bakteri yang telah diidentifikasi mampu menghasilkan listrik pada *fuel cell* adalah bakteri pereduksi logam. Penelitian terakhir menunjukkan pembangkit listrik MFC dapat dihasilkan oleh bakteri penghasil mediator atau penukar elektron dari sekelompok bakteri yang terdiri dari *Alcaligenes faecalis*, *Enterococcus faecium*, dan *Pseudomonas aeruginosa* (Rabaey *et al.* 2004). Sedangkan bahan organik dapat digunakan sebagai substrat dalam *microbial fuel cell*, adalah glukosa (Liu dan Logan 2004), pati (Min dan Logan 2004), asam lemak (Liu *et al.* 2005), asam amino dan protein (Logan *et al.* 2005), dan air limbah dari manusia dan hewan (Liu *et al.* 2004). Secara umum mekanisme prosesnya adalah substrat dioksidasi oleh bakteri sehingga menghasilkan elektron dan proton pada anoda. Elektron ditransfer melalui sirkuit eksternal, sedangkan proton didifusikan melalui larutan menuju katoda. Pada katoda, reaksi elektron dan proton terhadap oksigen akan menghasilkan air (Cheng *et al.* 2006).

Tujuan penulisan karya tulis ini adalah untuk mempelajari potensi sedimen laut tropika sebagai sumber pembangkit listrik dengan menggunakan teknologi *microbial fuel cell*.

Jenis dan sumber data yang digunakan dalam penulisan ini sebagian besar berasal dari jurnal ilmiah dan buku terbaru terbitan 5 tahun terakhir. Adapun metode penulisan meliputi perumusan masalah, analisis dan sintesis masalah, simpulan dan saran. Tahapan analisis dan sintesis meliputi pengembangan teknologi *fuel cell* dan alternatif teknologi *microbial fuel cell*, potensi sedimen laut tropika, teknologi *microbial fuel cell* dengan substrat sedimen laut tropika (rancangan alat *sediment microbial fuel cell-SMFC*) serta mempelajari berbagai peluang dan tantangan yang mungkin terjadi.

Hasil analisis memperlihatkan bahwa secara umum sedimen laut dunia menempati 70% dari total wilayah bumi dan memiliki peran yang sangat penting terhadap siklus karbon dan nutrisi makhluk hidup dan kehidupan di muka bumi ini (Rochelle *et al.* 1994). Penggunaan sedimen sebagai substrat, menjadi salah satu teknologi baru MFC, yaitu *sediment microbial fuel cell* (SMFC) (Reimers *et al.* 2001). Indonesia memiliki wilayah laut dan pesisir yang sangat luas. Estuaria misalnya, merupakan salah satu bagian wilayah pesisir Indonesia yang memiliki tingkat kesuburan cukup tinggi dan tersebar hampir di seluruh pulau-pulau di Indonesia. Adanya aliran air tawar yang terjadi secara terus menerus dari hulu sungai dan proses gerakan pasang surut yang mengangkut mineral-mineral, bahan

organik, dan sedimen, menyebabkan wilayah estuaria memiliki produktifitas yang lebih tinggi daripada laut lepas dan perairan tawar. Kandungan bahan organik yang tinggi pada estuaria merupakan potensi sumber daya dalam SMFC. Reimers *et al.* (2001) menyatakan bahwa sedimen pada dasar benua (<1000 m) mengandung 2-3 % karbon organik (bobot kering). Reimers *et al.* (2001) juga menyatakan bahwa bahan organik, HS^- , dan Fe^{2+} merupakan sumber energi dalam pembangkit listrik dan oksigen pereduksi yang diperoleh dalam bentuk air atau H_2O_2 . Sedangkan Ryckelynck *et al.* (2005) FeS dan FeS_2 merupakan bahan kimia utama yang digunakan oleh bakteri untuk membangkitkan listrik. Mikroorganisme yang berperan dalam SMFC dapat berupa bakteri pereduksi sulfat seperti *Desulfobulbus* spp. dan *Desulfocapsa* spp.

Holmes *et al.* (2004) menyatakan bahwa pada berbagai jenis sedimen, yaitu sedimen laut, sedimen rawa asin, dan sedimen air tawar diperoleh hasil *Deltaproteobacter* merupakan bakteri yang dominan terdapat pada anoda SMFC. Sedangkan hasil penelitian lain menunjukkan bahwa sebagian besar bakteri yang dapat menghasilkan energi listrik adalah bakteri pereduksi logam, seperti *Geobacter sulfurreducens* (Pham *et al.* 2003), *Geobacter metallireducens* (Bond dan Lovley 2003), *Shewanella putrefaciens* (Kim *et al.* 2002), *Clostridium butyricum* (Park *et al.* 2001), *Rhodospirillum rubrum* (Chaudhuri dan Lovley 2003), dan *Aeromonas hydrophila* (Pham *et al.* 2003).

Prinsip kerja dari MFC dengan substrat sedimen laut sangat sederhana, yaitu menempatkan dua elektroda yang saling terhubung, yaitu anoda pada sedimen yang bersifat anaerobik dan katoda pada air laut yang mengandung oksigen terlarut (Lovley 2006). Salinitas air laut memberikan konduktivitas yang baik pada elektroda (Logan 2008). Transfer massa dipengaruhi oleh berbagai proses alami, seperti difusi, sedimen yang tersuspensi, dan gelombang pasang surut. Sedangkan voltase yang dihasilkan, dipengaruhi oleh gradien alami reduksi-oksidasi pada sedimen yang kaya bahan organik dengan air yang kaya oksigen (Tender *et al.* 2008).

SMFC dari segi teknis telah cukup berkembang, hal ini dapat ditinjau dari banyaknya penelitian yang telah dilakukan. Reimers *et al.* (2001) menggunakan anoda fiber grafit yang ditanam pada sedimen laut dan dihubungkan dengan katoda yang berada dalam air laut (aerob) sehingga menghasilkan *power density* 10 mWm^{-2} selama 240 hari. Tender *et al.* (2002) menggunakan sistem laboratorium sejenis dengan menggunakan anoda dan katoda grafit. Sistem tersebut dapat menghasilkan *power density* rata-rata 20 mWm^{-2} pada permukaan anoda sebelum 4 bulan dengan nilai maksimum mencapai 28 mWm^{-2} . Reimers *et al.* (2006) melakukan percobaan SMFC lanjutan dengan menggunakan *carbon brush* sebagai katoda dan menghasilkan 34 mWm^{-2} selama 125 hari.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Kondisi geografis Indonesia dan ketentuan Konvensi Hukum Laut (UNCLOS) tahun 1982 menunjukkan wilayah Indonesia yang terbentang dari Sabang dan Marauke memiliki luas 8,1 juta km², yang hampir sebanding dengan luas daratan Amerika Serikat. Dilihat dari segi fisik, sebenarnya hanya sepertiga wilayah Indonesia yang berada di atas permukaan laut, yaitu berupa belasan ribu pulau besar dan kecil sebanyak 17.504 buah. Namun di balik itu, di dalam perairan, merupakan wilayah negeri Nusantara yang besar, dengan potensi kelautannya yang berlimpah.

Peta cekungan sedimen tersier Indonesia versi Ikatan Ahli Geologi Indonesia tahun 2008 menyebutkan bahwa Indonesia memiliki 60 cekungan sedimen, dimana saat ini 16 cekungan merupakan sumber produksi minyak dan gas bumi Indonesia. Sisanya sebanyak 44 cekungan merupakan harapan masa depan yang belum tergali potensinya. Ekspedisi Bandamin 2001 di sekitar perairan Pulau Flores dan Wetar Nusa Tenggara Timur mengenai keberadaan sumber hidrotermal di dasar laut, dapat diketahui adanya rangkaian gunung api dasar laut di sekitar pulau vulkanik Komba yang terbentuk akibat interaksi pertemuan lempeng India-Australia, Pasifik dan Eurasia. Ekspedisi Bandamin II tahun 2003, serangkaian penelitian berupa pengukuran batimetri, konduktivitas, suhu dan kedalaman (*Conductivity, Temperature, Depth (CTD)*), pengambilan contoh batuan dari dasar laut, serta pemotretan kondisi bawah laut memperlihatkan bahwa sampel batuan pada kedalaman 500-600 meter di bawah permukaan laut di sekitar gunung api Komba tersebut ditemukan batuan yang mengandung andesit, dan basalt. Batuan tersebut terbentuk akibat proses hidrotermal silisifikasi dan kloritifikasi. Selain itu, teridentifikasi adanya mineral-mineral sulfida pirit, barit, dan markasit. Kehadiran mineral logam ini merupakan indikator kemungkinan terbentuknya mineral-mineral logam lain yang memiliki nilai ekonomis tinggi.

Gejala pemanasan global dan krisis energi dunia, telah menyadarkan bahkan telah menjadi kesepakatan dunia yang dituangkan dalam *World Summit on Sustainable Development* tahun 2002, tentang perlunya pemenuhan terhadap kebutuhan energi masyarakat dunia. Peranan laut sebagai sumber energi terbarukan (*renewable resources*) saat ini sangat dibutuhkan. Kekayaan energi hayati laut yang sedang dikembangkan antara lain energi termal dari energi panas matahari dan energi mekanik dari pasang surut dan gelombang yang terdiri dari *Oscillating Water Column* dan *Wave Surge* atau *Focusing Devices*, namun masih belum banyak diterapkan di Indonesia. Data Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM) tahun 2006 menyatakan bahwa penggunaan energi di Indonesia sama seperti penggunaan energi di dunia, yang makin meningkat dengan pesat sejalan dengan pertumbuhan penduduk, perekonomian maupun perkembangan teknologi. Pemakaian energi mix di Indonesia saat ini lebih dari 90 % menggunakan energi fosil, yaitu minyak bumi 51,66 %, gas bumi 28,57 %, batu bara 15,34 %, sedangkan sumber energi lain meliputi tenaga air 3,11 %, panas bumi 1,32 %, serta energi baru dan terbarukan (EBT) yang hanya sekitar 0,2 %.

Berdasarkan sumber energi, bentuk listrik merupakan energi yang paling praktis digunakan (Rittmann 2008). Faaij (2006) menyampaikan bahwa terdapat berbagai teknologi konversi yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik ini, yaitu pembakaran, *gasification*, dan fermentasi (gas metan). Namun teknologi konversi pembakaran dan *gasification* berdampak terhadap penipisan cadangan bahan bakar fosil dan peningkatan jumlah CO₂ di atmosfer, sedangkan konversi dari biogas menjadi listrik memiliki efisiensi yang rendah, yaitu kurang dari 40% (Rittmann 2008). Tantangan dalam pengembangan pembangkit listrik adalah menemukan teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Fuel cell adalah alat elektrokimia yang secara kontinyu mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik (Shukla *et al.* 2004). Secara umum, *fuel cell* memiliki beberapa keunggulan, seperti memiliki efisiensi yang tinggi yang dapat digunakan pada berbagai skala pembangkit energi, jika hidrogen digunakan sebagai bahan bakar maka polusi emisi dapat dikurangi, tidak membutuhkan alat-alat penggerak, seperti pompa, kompressor, dan *blower*. Selain itu *fuel cell* dapat

menggunakan berbagai jenis bahan bakar, serta memiliki kecepatan yang hampir sama dengan baterai dalam memberikan listrik (Mench 2008).

Ada berbagai macam *fuel cell* yang telah digunakan dan dikembangkan. Setiap jenis *fuel cell* membutuhkan bahan bakar yang berbeda. *Fuel cell* berbasis biologi memiliki konsep yang sangat berbeda dengan *fuel cell* pada umumnya. *Fuel cell* berbasis biologi menggunakan biokatalis untuk mengonversi bahan kimia menjadi energi listrik. *Fuel cell* ini dibagi menjadi dua kategori, yaitu *microbial fuel cell* (MFC) dan enzim *fuel cell* (Kordesch dan Simader 2001). Tidak seperti *fuel cell* dengan bahan kimia, *fuel cell* berbasis biologi dioperasikan pada kondisi lunak, yaitu pada suhu dan tekanan lingkungan (Logan 2008).

Microbial fuel cell (MFC) merupakan salah satu cara untuk memproduksi energi secara berkesinambungan dalam bentuk listrik dari bahan-bahan yang dapat didegradasi. MFC adalah alat untuk mengonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan reaksi katalitik dari mikroorganisme (Allan dan Benneto 1993). MFC membangkitkan listrik dengan mengoksidasi bahan organik secara anaerob melalui bantuan bakteri. Aktivitas katalitik dan transfer proton dilakukan dengan menggunakan enzim atau tambahan mediator (Kordesch dan Simader 2001).

Air limbah dan lumpur dari reaktor anaerob mengandung bakteri yang dapat menghasilkan listrik pada MFC. Sebagian besar bakteri yang telah diidentifikasi mampu menghasilkan listrik pada *fuel cell* adalah bakteri pereduksi logam, seperti *Geobacter sulfurreducens* (Pham *et al.* 2003), *Geobacter metallireducens* (Bond dan Lovley 2003), *Shewanella putrifaciens* (Kim *et al.* 2002), *Clostridium butyricum* (Park *et al.* 2001), *Rhodospirillum rubrum* (Chaudhuri dan Lovley 2003), dan *Aeromonas hydrophila* (Pham *et al.* 2003). Penelitian terakhir menunjukkan pembangkit listrik MFC dapat dihasilkan oleh bakteri penghasil mediator atau penukar elektron dari sekelompok bakteri yang terdiri dari *Alcaligenes faecalis*, *Enterococcus faecium*, dan *Pseudomonas aeruginosa* (Rabaey *et al.* 2004).

Pada dasarnya, berbagai bentuk bahan organik dapat digunakan sebagai substrat dalam *microbial fuel cell*, seperti glukosa (Liu dan Logan 2004), pati

(Min dan Logan 2004), asam lemak (Liu *et al.* 2005), asam amino dan protein (Logan *et al.* 2005), dan air limbah dari manusia dan hewan (Liu *et al.* 2004). Secara umum mekanisme prosesnya adalah substrat dioksidasi oleh bakteri menghasilkan elektron dan proton pada anoda. Elektron ditransfer melalui sirkuit eksternal, sedangkan proton didifusikan melalui larutan menuju katoda. Pada katoda, reaksi elektron dan proton terhadap oksigen akan menghasilkan air (Cheng *et al.* 2006).

Sedimen laut, terutama perairan tropika mengandung berbagai macam bahan organik dan anorganik, sama halnya sedimen laut subtropik. Salah satu sedimen laut adalah sedimen estuaria. Berdasarkan hasil penelitian Trimmer *et al.* (1998), kandungan bahan organik pada sedimen estuaria Great Ouse meliputi karbon organik (0,09-2,58) % dan total N (0,02-0,19) mg/l. Selain itu sedimen laut mengandung mikroorganisme tertentu yang berpotensi untuk dimanfaatkan dalam teknologi berbasis MFC. Shantaram *et al.* (2005) menyatakan bahwa jumlah bahan organik yang cukup besar pada sedimen laut dan penambahan bahan organik secara konstan menjadikan umur penggunaan sedimen laut sebagai substrat MFC sangat lama. Pemanfaatan sedimen laut tropika sebagai substrat menjadi semakin penting untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pada lokasi yang terpencil dan sulit untuk dijangkau, misalnya pada alat sensor yang ditanam didasar laut.

Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan karya tulis ini adalah untuk mempelajari potensi sedimen laut tropika sebagai sumber pembangkit listrik dengan menggunakan teknologi *microbial fuel cell*.

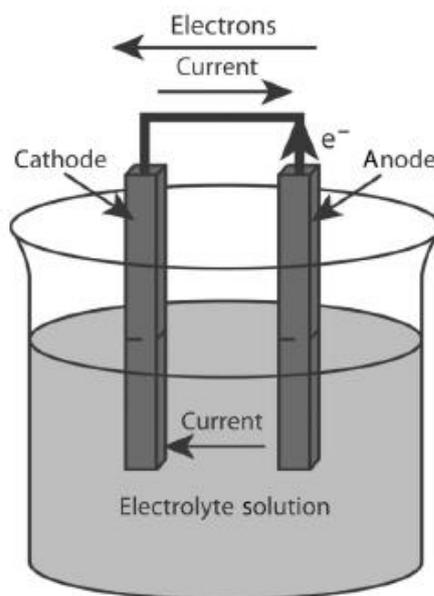
Manfaat Penulisan

Memberikan pengetahuan dan informasi mengenai potensi sedimen laut tropika dan alternatif pengembangannya melalui teknologi *microbial fuel cell* sehingga dapat bermanfaat sebagai pembangkit listrik baru.

TELAAH PUSTAKA

Fuel cell

Fuel cell adalah merupakan teknologi elektrokimia yang secara kontinu mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik selama terdapat bahan bakar dan pengoksidan (Shukla *et al.* 2004). Dalam *fuel cell*, reaksi oksidasi terjadi pada anoda dan reaksi reduksi terjadi pada katoda. Reaksi oksidasi menghasilkan elektron yang dialirkan menuju katoda melalui sirkuit eksternal. Sirkuit menjadi sempurna dengan adanya pergerakan ion positif melalui elektrolit menuju ruang katoda (Bullen *et al.* 2006). Secara umum, prinsip kerja *fuel cell* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Prinsip kerja *fuel cell* (Mench 2008).

Fuel cell konvensional beroperasi dengan menggunakan bahan kimia anorganik sederhana, seperti hidrogen dan metanol (MeOH), dan menghasilkan energi, air, dan karbondioksida (pada kasus metanol). *Fuel cell* konvensional dianggap bersuhu rendah jika beroperasi pada kisaran suhu 80°C (Bullen *et al.* 2006). Saat ini berbagai jenis *fuel cell* telah diteliti dan dikembangkan. Berbagai tipe *fuel cell* dapat dilihat pada Tabel 1.

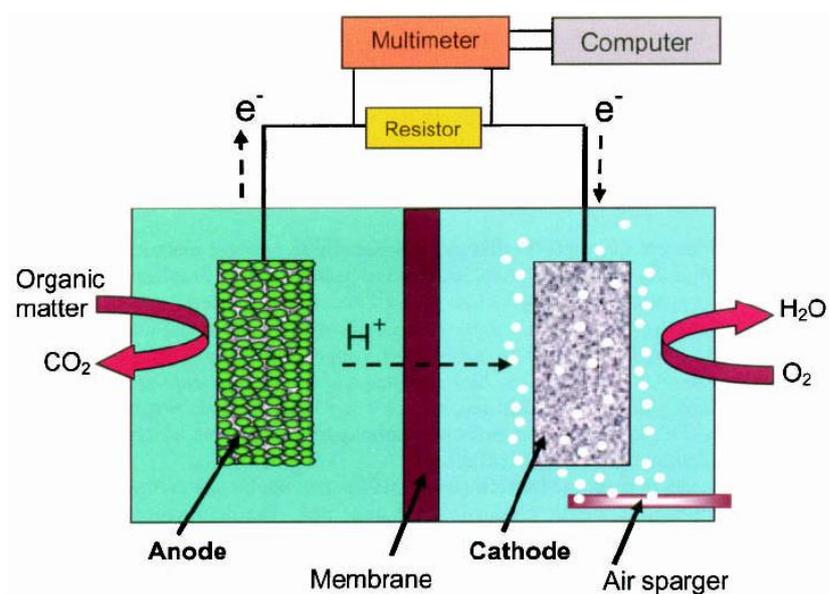
Tabel 1. Jenis *fuel cell* anorganik

Tipe <i>Fuel cell</i>	Ion	Suhu Operasi (°C)
Alkalin (AFC)	OH^-	50-200
Proton exchange membran (PEMFC)	H	50-100
Phosphoric acid (PAFC)	H	220
Molten carbonat (MCFC)	CO_3^{2-}	650
Solid oxide (SOFC)	O^{2-}	500-1000

Sumber: Larminie dan Dicks (2000)

Microbial fuel cell (MFC)

Microbial fuel cell merupakan salah satu dari *fuel cell* berbasis biologi. Penggunaan mikroba dalam *fuel cell* ini menggantikan fungsi dari enzim, sehingga dihasilkan substrat yang lebih murah (Shukla *et al.* 2004). Prinsip kerja MFC mirip dengan hidrogen *fuel cell*, yaitu terdapat aliran proton dari ruang anoda menuju ruang katoda melalui membran elektrolit dan aliran elektron yang bergerak ke arah yang sama melalui kabel konduksi (Hoogers 2002). Prinsip kerja MFC secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. *Microbial fuel cell* (Logan 2008).

Elektron diperoleh dari substrat yang telah dioksidasi dan ditransfer ke anoda (Reguera *et al.* 2005). Ada beberapa mekanisme transfer elektron dari bakteri menuju elektroda, yaitu menggunakan mediator eksternal seperti tionin

dan *neutral red* yang biasanya mahal dan beracun, transfer elektron secara langsung dari dinding bakteri ke anoda, menggunakan mediator yang dihasilkan oleh bakteri (Rabaey dan Verstraete 2005), dan menggunakan bakteri yang dapat menghantarkan listrik (Gorby *et al.* 2006). Elektron yang diterima di anoda kemudian dialirkan melalui sirkuit eksternal sebelum bereaksi dengan penerima elektron di katoda. Berbagai kajian terakhir MFC dilakukan terhadap elektroda (Cheng 2006^a, Cheng 2006^b), membran (Cheng 2006b), desain reaktor MFC (Liu dan Logan 2004), jenis bakteri yang digunakan (Nimje *et al.* 2009), jenis substrat yang digunakan (Lu *et al.* 2009, Moon *et al.* 2006) dan variasi parameter (Liu *et al.* 2005).

METODE PENULISAN

Penentuan Gagasan

Karya tulis ini mengangkat gagasan tentang alternatif baru sumber pembangkit listrik dengan menggunakan sedimen laut tropika melalui teknologi *microbial fuel cell*. Gagasan ini didasarkan pada potensi dasar laut Indonesia yang besar dan belum banyak digali serta dapat menjadi sumber energi baru yang potensial. Pengembangan energi alternatif berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 32 Tahun 2008 hanya meliputi pengembangan biodiesel dan bioetanol serta energi lain seperti *Coal Bed Methane* (CBM). Kekayaan energi hayati laut seperti energi termal dan energi pasang surut dan gelombang masih belum banyak juga dikembangkan di Indonesia.

Jenis dan Sumber Tulisan

Jenis dan sumber data yang digunakan adalah data sekunder, yang sebagian besar berasal dari jurnal ilmiah dan buku terbaru terbitan 5 tahun terakhir. Jurnal yang dirujuk meliputi Jurnal *Fuel Cell* (<http://www3.interscience.wiley.com>), Jurnal *Environmental Science Technology* (<http://pubs.acs.org>), dan Jurnal *Bioresource Technology* (www.sciencedirect.com). Buku yang menjadi sumber pustaka meliputi *Microbial Fuel Cells* (2008), *Fuel Cell Engines* (2008), dan *Fuel Cells and Their Applications* (2001), dan Atlas Geologi Indonesia (2008).

Metode Penulisan

Metode penulisan meliputi perumusan masalah, analisis dan sintesis masalah, simpulan dan saran. Tahapan analisis dan sintesis meliputi pengembangan teknologi *fuel cell* dan alternatif teknologi *microbial fuel cell*, potensi sedimen laut tropika, teknologi *microbial fuel cell* dengan substrat sedimen laut tropika (rancangan alat *sediment microbial fuel cell* SMFC) serta mempelajari berbagai peluang dan hambatan yang mungkin terjadi. Secara lengkap analisis sintesis tulisan yang dilakukan dapat dilihat pada Lampiran 1.

ANALISIS DAN SINTESIS

Teknologi *Microbial fuel cell*

Salah satu alternatif baru sumber pembangkit listrik yang dapat dikembangkan adalah *microbial fuel cell* (MFC). Teknologi *microbial fuel cell* merupakan pendekatan baru pembangkit tenaga listrik. Pengetahuan tentang kemampuan bakteri membangkitkan listrik telah diketahui sejak seratus tahun yang lalu oleh Potter pada tahun 1911. MFC merupakan sistem bioelektrokimia yang dapat membangkitkan listrik dari oksidasi substrat organik dan anorganik dengan bantuan katalisis mikroorganisme (Logan *et al.* 2006).

Menurut Lovley (2006) MFC memiliki keuntungan yang lebih banyak dibandingkan *fuel cell* abiotik. Hal ini dikarenakan MFC dapat menghasilkan listrik dari sampah organik dan biomassa terbaru, karena adanya kemampuan bakteri pengkatalis untuk beradaptasi dengan baik terhadap bahan organik berbeda yang terdapat pada limbah lingkungan sehingga menghasilkan elektron. Penggunaan katalis yang digunakan pada *fuel cell* abiotik berupa platina merupakan investasi yang mahal, sedangkan pada MFC dapat digantikan oleh pertumbuhan mikroorganisme (Rabaey dan Verstroete 2005).

Berbagai jenis substrat telah digunakan dalam MFC, mulai dari bahan organik sederhana (glukosa) hingga limbah rumah tangga. Tiap-tiap jenis substrat memiliki komposisi kima, kekuatan ion, pH, dan jenis bakteri yang berbeda. Jenis mikroorganisme yang terlibat juga berpengaruh terhadap kondisi lingkungan yang dibutuhkan, jenis substrat yang didegradasi, dan kemampuan dalam menghantarkan elektron. Menurut Liu *et al.* (2005) faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kinerja MFC adalah kecepatan degradasi substrat, kecepatan transfer elektron dari bakteri ke anoda, dan transfer proton dalam larutan. Sedangkan Chauduri dan Lovley (2003) menyatakan bahwa kinerja MFC dapat dipengaruhi oleh aktivitas mikroba dan substrat yang digunakan. Selain itu kinerja MFC ini dapat juga dipengaruhi oleh suhu, karena berkaitan langsung dengan kinetik bakteri, kecepatan reaksi oksigen yang dikatalis oleh Pt pada

katoda, dan kecepatan transfer proton melalui larutan (Liu *et al.* 2005). Percobaan MFC pada berbagai jenis substrat dan bakteri dapat dilihat pada Lampiran 2.

Liu *et al.* 2005 menyatakan juga bahwa faktor lain yang mempengaruhi kinerja MFC adalah komponen penyusunnya, seperti elektroda (anoda dan katoda) dan membran penukar proton, serta kelengkapan membran (Chauduri dan Lovley 2003). Jenis bahan dan struktur anoda berdampak pada penempelan mikroba, transfer elektron, dan pada beberapa kasus oksidasi substrat. Bahan yang biasa digunakan sebagai anoda adalah karbon (*carbon cloth* atau *graphite felt*) karena stabil terhadap kultur mikroba, memiliki konduktivitas yang tinggi, dan luas permukaan yang besar (Watanabe 2008). Namun penggunaan elektroda berbasis karbon pada katoda akan mengakibatkan ketidakefisienan (Kim *et al.* 2007), sehingga perlu dilakukan pelapisan dengan katalis, misalnya platinum (Pham *et al.* 2004). Berbagai disain reaktor MFC dapat dilihat pada Lampiran 3.

Potensi Sedimen Laut Tropika Sebagai Alternatif Substrat MFC

Sedimen laut merupakan wilayah dasar perairan yang menutupi 70% permukaan bumi dan berperan penting dalam siklus karbon dan nutrien bagi kehidupan di dunia ini (Rochelle *et al.* 1994). Penggunaan sedimen sebagai substrat MFC merupakan teknologi baru MFC, yaitu *sediment microbial fuel cell* (SMFC) (Reimers *et al.* 2001). Substrat yang dapat digunakan sebagai sedimen MFC meliputi sedimen dasar laut, sedimen rawa asin, dan sedimen estuaria.

Indonesia memiliki wilayah pesisir yang sangat luas, sebesar 1.428.600 ha. (Amien 2000). Estuaria merupakan bagian wilayah pesisir yang memiliki tingkat kesuburan yang tinggi. Adanya aliran air tawar yang terjadi secara terus menerus dari hulu sungai dan gerakan pasang surut, mengangkut mineral dan bahan organik, sehingga menyebabkan estuaria memiliki produktifitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan perairan laut lepas dan perairan tawar (Supriadi 2001), faktor-faktor yang berpengaruh terhadap zona perairan dapat dilihat pada Lampiran 4. Reimers *et al.* (2001) menyatakan bahwa sedimen dasar benua (<1000 m) mengandung 2-3 % karbon organik (bobot kering) dengan kecepatan akumulasi karbon organik sebesar 0,05-40 g C/m²/tahun (Walsh *et al.* 1985).

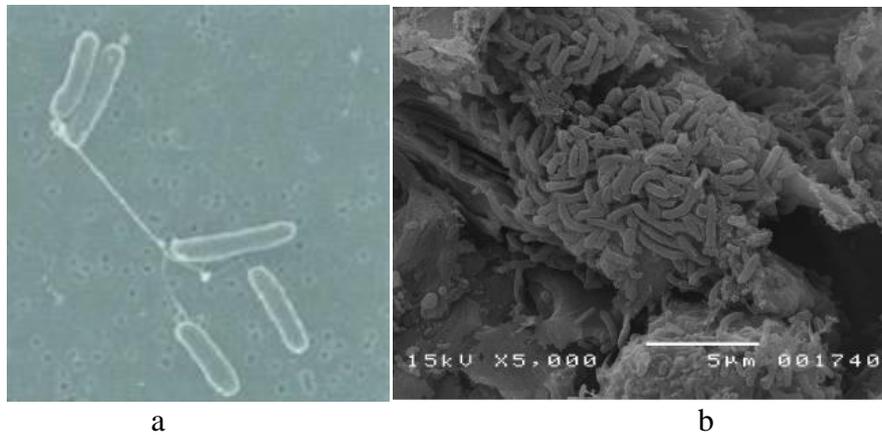
Selanjutnya Trimmer *et al.* (1998) menyatakan kandungan bahan organik pada sedimen estuaria Great Ouse adalah karbon 0,09-2,58 % dan total N 0,02-0,19 mg/l, data selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 5.

Efriyeldi (1999) memperlihatkan bahwa karakteristik sedimen pada muara Sungai Bantan Tengah di Bengkalis Propinsi Riau mengandung C organik sebesar 0,18-1,8 %, nitrat 0,077-0,140 mg/l, dan ortofosfat 0,744-1,794 mg/l. Data selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 6. Disampaikan juga bahwa daerah yang berada di bagian luar muara dengan kedalaman yang relatif dangkal serta air yang selalu bergoncang, cenderung memiliki karakteristik sedimen pasir yang tinggi, hal ini identik dengan kandungan total karbon organik yang rendah. Daerah dalam muara dan dekat mulut muara memiliki karakteristik sedimen dengan total bahan organik, dan persentase lumpur atau liat yang tinggi.

Sedimen laut yang lain adalah sedimen tepi laut. Jorgensen (1983) menyatakan bahwa sedimen tepi laut cenderung memiliki kandungan yang tinggi (10^8 - 10^9 g C m⁻² yr⁻¹). Reimers *et al.* (2001) membuat hipotesis bahwa bahan organik, HS⁻, dan Fe²⁺ merupakan sumber energi pembangkit listrik dan oksigen pereduksi dalam bentuk air atau H₂O₂. Sedangkan berdasarkan Ryckelynck *et al.* (2005), FeS dan FeS₂ merupakan bahan kimia utama yang digunakan oleh bakteri.

Mikroorganisme yang berperan dalam sedimen MFC dapat berupa bakteri pereduksi sulfat yang terdiri dari *Desulfobulbus* spp. dan *Desulfocapsa* spp. (Ryckelynck *et al.* 2005). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Holmes *et al.* (2004) pada berbagai jenis sedimen, yaitu sedimen laut, sedimen rawa asin, dan sedimen air tawar diperoleh hasil bahwa *Deltaproteobacter* merupakan bakteri yang dominan terdapat pada anoda sedimen MFC dan beberapa jenis bakteri lain yang diidentifikasi, yaitu *Gammaproteobacteria*, *Cytophagales*, dan *Firmicutes*. Sedangkan hasil penelitian yang lain menunjukkan sebagian besar bakteri yang dapat menghasilkan energi listrik adalah bakteri pereduksi logam, yaitu *Geobacter sulfurreducens* (Pham *et al.* 2003), *Geobacter metallireducens* (Bond dan Lovley 2003), *Shewanella putrefaciens* (Kim *et al.* 2002), *Clostridium butyricum* (Park *et al.* 2001), *Rhodoferrax ferrireducens*

(Chaudhuri dan Lovley 2003), dan *Aeromonas hydrophila* (Pham *et al.* 2003). Bakteri yang digunakan dalam SMFC dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Bakteri pada SMFC. (a) *Shewanella oneidensis* (Logan 2008).
(b) *Geobacter sulfurreducens* (Bond dan Lovley 2003).

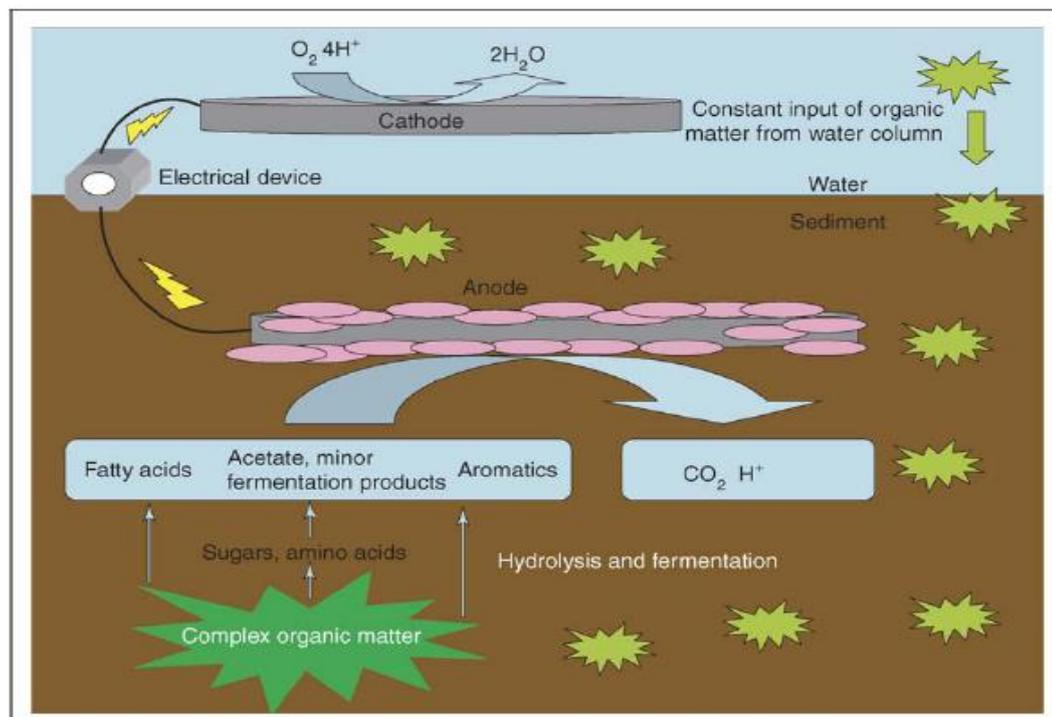
Rancangan Alat SMFC (*Sediment Microbial Fuel Cell*)

Prinsip kerja dari MFC dengan substrat sedimen laut sangat sederhana, yaitu menempatkan dua elektroda yang saling terhubung, yaitu anoda pada sedimen yang bersifat anaerobik dan katoda pada air laut yang mengandung oksigen terlarut (Lovley 2006). Salinitas air laut memberikan konduktivitas yang baik pada elektroda (Logan 2008). Ilustrasi prinsip kerja SMFC pada sedimen laut dapat dilihat pada Gambar 4.

Current density pada SMFC dibatasi oleh transfer massa bahan organik dari sedimen ke anoda. Transfer massa dipengaruhi oleh berbagai proses alami, seperti difusi, sedimen yang tersuspensi, dan gelombang pasang surut. Sedangkan voltase yang dihasilkan dipengaruhi oleh gradien alami reduksi-oksidasi pada sedimen yang kaya bahan organik dengan air yang kaya oksigen (Tender *et al.* 2008).

SMFC dari segi teknis telah cukup berkembang, hal ini dapat ditinjau dari banyaknya penelitian yang telah dilakukan. Reimers *et al.* (2001) menggunakan anoda fiber grafit yang ditanam pada sedimen laut dan dihubungkan dengan katoda yang berada dalam air laut (aerob) sehingga menghasilkan *power density* 10 mWm^{-2} selama 240 hari. Tender *et al.* (2002) menggunakan sistem

laboratorium sejenis dengan menggunakan anoda dan katoda grafit. Sistem tersebut dapat menghasilkan power density rata-rata 20 mWm^{-2} pada permukaan anoda sebelum 4 bulan dengan nilai maksimum mencapai 28 mWm^{-2} . Reimers *et al.* (2006) melakukan percobaan MFC lanjutan dengan menggunakan *carbon brush* sebagai katoda sehingga menghasilkan 34 mWm^{-2} selama 125 hari. Berbagai penelitian perkembangan SMFC dapat dilihat pada Lampiran 7.



Gambar 4. Model produksi listrik MFC pada sedimen laut (Lovley 2006).

Tantangan dan Hambatan Pengembangan SMFC

Jumlah energi maksimal yang dapat dihasilkan oleh MFC belum diketahui karena tingginya tahanan dalam yang menjadi pembatas (Logan dan Regan 2006). Namun jumlah energi yang dihasilkan tersebut sudah cukup untuk menjalankan peralatan kelautan yang membutuhkan atau mengkonsumsi energi dalam jumlah rendah, misalnya sensor oseanografi, alat monitoring, dan sistem telemetri (Shantaram *et al.* 2005). Selain itu SMFC dapat digunakan pada tempat yang terpencil dan sulit dijangkau karena memiliki umur pakai yang panjang (Reimers *et al.* 2001).

MFC juga dapat digunakan sebagai penghasil hidrogen murni, yaitu dengan melakukan modifikasi pada sistem MFC. Modifikasi yang dilakukan adalah menjaga agar katoda bebas dari oksigen sehingga aliran proton (H^+) dari anoda tidak akan membentuk air pada katoda (Logan 2004).

Pemanfaatan teknologi MFC juga telah diterapkan pada pengolahan air limbah untuk menurunkan nilai *chemical oxygen demand* (COD). Pada pengolahan *Starch Processing Wastewater* (SPW) (Ghangrekar dan Shinde 2006) dan *artificial wastewater* (Moon *et al.* 2006), MFC mampu menurunkan COD berturut-turut sebesar 9703 mg/l menjadi 4852 mg/l dan 100 mg/l menjadi < 2 mg/l. Selain itu MFC juga telah digunakan sebagai sensor *biological oxygen demand* (BOD).

Kelebihan bahan organik tanah yang berada di bawah air dan adanya proses alami akan memberikan dampak yang negatif terhadap lingkungan akuatik dan sekitarnya. Akumulasi suatu bahan dapat berdampak pada komunitas akuatik dengan berkurangnya oksigen serta peningkatan emisi gas rumah kaca. Selain itu, sedimen juga dapat terkontaminasi dengan senyawa organik, seperti hidrokarbon (De Schampelaire *et al.* 2008). Penggunaan SMFC juga dapat digunakan sebagai alat bioremediasi dengan memanfaatkan bakteri pendegradasi. Penggunaan biokatoda untuk bioremediasi nitrat *in-situ* telah dilakukan oleh Gregory *et al.* (2004) dengan menggunakan kultur campuran dan murni dari *Geobacter metallireducens* pada sistem anoksik.

Prinsip kerja dari MFC yang menggunakan mikroorganisme hidup dalam reaksi elektrokimia menjadikan sistem MFC sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan yang dapat membunuh mikroorganisme tersebut (Mench 2008). Struktur dan aktivitas mikroba dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti pH, potensial oksidasi reduksi, kekuatan ion, dan suhu. Parameter-parameter tersebut juga berpengaruh terhadap proses lain dalam MFC, seperti efisiensi transfer proton dan kinerja anoda (Torres *et al.* 2008). Kepadatan energi yang dihasilkan MFC juga masih sangat rendah dibandingkan dengan *fuel cell* konvensional (Mench 2008).

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Dasar laut Indonesia yang sangat luas, berpotensi besar sebagai sumber energi pembangkit tenaga listrik baru. Namun potensi ini belum banyak dikembangkan. Peningkatan peran energi alternatif sebagai solusi pemerintah dalam mengatasi krisis energi, hanya meliputi pengembangan biodiesel, bioetanol dan energi lain seperti CBM. Kekayaan energi hayati laut seperti energi termal dan energi pasang surut dan gelombang masih belum banyak juga dikembangkan. Penggunaan sedimen laut sebagai substrat MFC dapat menjadi salah satu bentuk teknologi penghasil energi baru yang berasal dari sumberdaya hayati kelautan.

Sedimen dasar perairan memiliki karakteristik yang sangat beragam, tergantung dimana wilayah tersebut berada. Sebagai salah satu sumber MFC, sedimen dasar estuaria memiliki produktifitas yang sangat tinggi dibandingkan dengan sedimen dasar laut lepas dan perairan tawar. Aliran air tawar yang terjadi secara terus menerus dari hulu sungai dan gerakan pasang surut dapat mengangkat mineral dan bahan organik yang besar, seperti karbon organik, HS^- , dan Fe^{2+} . Sedangkan sedimen laut, sedimen rawa asin, dan sedimen air tawar diketahui mengandung bakteri *Deltaproteobacter*, yang merupakan bakteri dominan MFC. Secara teknis, prinsip kerja MFC dengan sedimen perairan laut sangat sederhana, yaitu menempatkan dua elektroda yang saling terhubung, yaitu anoda pada sedimen yang bersifat anaerobik dan katoda pada air laut yang mengandung oksigen terlarut. Konduktivitas elektroda yang baik dapat ditimbulkan dari kondisi salinitas air laut yang ada. Secara umum dapat diketahui bahwa teknologi ini terus berkembang, yang dilihat dari banyaknya penelitian yang dilakukan.

Saran

SMFC merupakan salah satu bentuk baru teknologi penghasil energi yang dapat dikembangkan di Indonesia, yang memiliki sumberdaya laut yang luas. Analisis karakteristik potensi sumberdaya sedimen laut sebagai sumber energi perlu segera dilakukan, terutama perairan laut wilayah estuaria dan juga laut lepas.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen RM dan Bennetto HP. 1993. Microbial fuel cells: elctricity production from carbohydrates. *J. Appl. Biochem. Biotechnol.* 39: 27-40.
- Amien LI. 2000. Atlas Sumberdaya Tanah Eksploitasi Indonesia Skala 1: 1 000 000. [Prosiding Pemberdayaan Potensi Regional Melalui Pendekatan Zone Agroekologi]. Jambi [4-5 Oktober 1999], Banjarmasin [27-28 Oktober 1999], Malang [8-9 November 1999]. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat.
- Bond DR dan Lovley DR. 2003. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attatched to electrodes. *J. Applied Envimental Microbiology* 69: 1548-1555.
- Bullen RA, Arnot TC, Lakeman JB, dan Walsh FC. 2006. Biofuel cell and their development. *J. Biosensors and Bioelectronics* 21: 2015-2045.
- Capone DG dan Kiene RP. 1988. Comparison of microbial dynamics in maine and freshwater sediments: contrasts in anaerobic carbon metabolism. *J. Limnol. Oceanography* 33: 725-749.
- Chadhuri SK dan Lovley DR. 2003. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cell. *J. Nat. Biotechnol.* 21: 1229-1232.
- Chang, IS, Moon H, Jang, JK, dan Kim BH. 2005. Improvement of a microbial fuel cell performance as BOD sensor using respiratory inhibitors. *J. Biosensors & Bioelectronics* 20: 1856-1859.
- Cheng S, Liu H, dan Logan BE. 2006^a. Increased performance of single-chamber microbial fuel cell using an improved cathode structure. *J. Electrochemistry Communications* 8: 489-494.
- Cheng S, Liu H, dan Logan BE. 2006^b. Power densities using different cathode catalysis (Pt and CoTMPP) and polymer binders (Nation and PTFE) in single chamber microbial fuel cell. *J. Environ. Science Technology* 40: 364-369.
- Choi Y, Jung E, Park H, Park SR, Jung S *et al.* 2004. Condruction of microbial fuel cell using thermophilic microorganisms, *Bacillus licheniformis* and *Bacillus thermoglucosidasius*. *J. Korean Chem. Soc.* 25: 813-818.

- De Schamphelaire L, Rabaey K, Boeckx P, Boon N, dan Verstraete W. 2008. Outlook for benefits of sediment microbial fuel cell with two bio-electrodes. *J. Microbial Biotechnology* 1: 446-462.
- Faaij A. 2006. Modern biomass conversion technologies. *J. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 343–375.
- Efriyeldi. 1999. Sebaran spaik sedimen dan kualitas air muara sungai Bantan Tengah, Bengkalis kaitannya dengan budidaya KJA (keramba jaring apung). *Nature Indonesia* 2: 85-92.
- Ghangrekar MM dan Shinde VB. 2006. Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production. *J. Bioresource technology* 98: 2879-2885.
- Gorby YA, Yanina S, McLean JS, Rosso KM, Moyles D, *et al.* 2006. Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *J. Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 103: 11358–11363.
- Gregory KB, Bond DR dan Lovley DR. 2004. Graphite electrodes as electron donors for anaerobic respiration. *J. Environ. Microbiol.* 6: 596-604.
- Holmes DE, Bond DR, O’Neil RA, Reimers CE, Tender LM, dan Lovley DR. 2004. Microbial community associates with electrodes harvesting electricity from a variety of aquatic sediments. *J. Microbial Ecol.* 48: 178-190.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, editor. New York: Cambridge University Press.
- Jorgensen BB. 1983. *Processes at the sediment water interface*, p. 477-509. Zn B. Bolin and R. B. Cook, editor. *The major biogeochemical cycles and their interactions*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Kim HJ, Park HS, Hyun MS Chang IS, Kim M, dan Kim BHA. 2002. Mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *J. Enzyme Microbiology Technology* 30: 145-152.
- Kim BH, Cheng IS, dan Gadd GM. 2007. Challenges in microbial fuel cell development and operation. *J. Appl. Microbiol. Biotechnol* 76: 485-494.
- Kordesch K dan Simander G. 2001. *Fuel Cell and Their Application*. New York: VCH.

- Larminie J dan Dicks A. 2000. *Fuel Cell System Explained*, 1st ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Lin S dan Morse JW. 1991. Sulfate reduction and iron sulfide mineral formation in Southern East China continental slope sediment. *Am. J. Sci.* 29: 55-89.
- Liu H dan Logan BE. 2004. Electricity generation using an air cathode single-chamber microbial fuel cell in the presence and absence of proton exchange membrane. *J. Environmental Science Technology* 38: 4040.
- Liu H, Ramnarayanan R, dan Logan BE. 2004. Production of electricity during wastewater using a single-chamber microbial fuel cell. *J. Environmental Science Technology* 38: 2281-2285.
- Liu H, Cheng S, dan Logan BE. 2005. Power generation in fed-batch microbial fuel cell as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration. *J. Environmental Science and Technology* 39: 5488-5493.
- Logan BE. 2004. Extracting hydrogen and electricity from renewable resources [review]. *J. Environmental Science and Technology* 38:160A–167A.
- Logan BE. 2008. *Microbial Fuel Cell*. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd.
- Logan BE, Murano C, Scott K, Gray ND, dan Head IM. 2005. Electricity generation from L-cysteine in microbial fuel cell. *Water Res.* 39: 945-952.
- Lovely DR. 2006. Bug Juice: Harvesting electricity with microorganisms. *J. Nat Rev Microbiol* 4:497-508.
- Lu N, Zhou S, Zhuang L, Zhang J, dan Ni J. 2009. Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology. *J. Biochemical Engineering* 43: 246-251.
- Mench MW. 2008. *Fuel Cell Engines*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc
- Min B dan Logan BE. 2004. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *J. Environmental Science and Technology* 38: 5809-5814.
- Moon H, Chang IS, dan Kim BH. 2006. Continuous electricity production from artificial wastewater using a mediator-less microbial fuel cell. *J. Bioresource Technology* 97: 621-627.
- Park HS, Kim BH, Kim HS, Kim HJ, Kim GT, Kim M, Chang IS, Park YK, dan Chang HI. 2001. A Novel electrochemically active and Fe (III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Clostridium butyricum* isolated from microbial fuel cell. *J. Anaerobe. Lett.* 7: 297-306.

- Pham CA, Jung SJ, Phung NT, Lee J, Chang IS, Kim BH, Yi H, dan Chun J. 2003. A novel electrochemically active and Fe (III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Aeromonas hydrophila*, isolated from microbial fuel cell. *J. FEMS Microbiol. Lett.* 223: 129-134.
- Pham TH, Jang JK, Chang IS, dan Kim BH. 2004. Improvement of cathode reaction of a mediator-less microbial fuel cell. *J. Microbiol. Biotechnol.* 14: 324-329.
- Potter MC. 1911. Electrical effect accompanying the decomposition of organic compound. *J. Proc. R. Soc. Ser. B*, 84: 260-276.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. 2008. *Atlas : Geologi dan Potensi Sumber Daya Mineral dan Energi Kawasan Indonesia*. Bandung : Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Rabaey K dan Verstraete W. 2005. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *J. Trends Biotechnol.* 23: 291-298.
- Rabaey K, Boon N, Siciliano SD, Verhaege M, dan Verstraete W. 2004. Biofuel cell select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. *J. Applied Environmental Microbiology* 70: 5373-5382.
- Reimers CE, Tender LM, Fertig S, dan Wong W. 2001. Harvesting energy from the marine sediment-water interface. *J. Environmental Science Technology* 35:192-195.
- Reimers CE, Tender LM, Fertig S, dan Wang W. 2001. Harvesting energy from the marine sediment-water interface. *J. Environmental Science Technology*. 35: 192-195.
- Ren Z, Ward TE, dan Regan JM. 2007. Electricity production from cellulose in a microbial fuel cell using a defined binary culture. *J. Environmental Science Technology* 41: 4781-4786.
- Rittmann BE. 2008. Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms. *J. Biotechnology and Bioengineering* 100: 203-212.
- Rochelle PA, Cragg BA, Fry JC, Parkes RJ, dan Weightman AJ. 1994. Effect of sample handling on estimation of bacterial diversity in marine sediments by 16S rRNA gene sequence analysis. *J. FEMS Microbiol Ecol.* 15:215-226.
- Ryckelyck N, Stecher III HA, dan Reimers CE. 2005. Understanding the anodic mechanism of a seafloor fuel cell: interactions between geochemistry and microbial activity. *J. Biogeochemistry* 76: 113-139.

- Shantaram A, Beyenal H, Raajan R, Veluchamy A, dan Lewandowski Z. 2005. Wireless sensors powered by microbial fuel cells. *J. Environ. Sci. Technol.* 39: 5037-5042.
- Shukla AK, Suresh P, Berchmans S, dan Rajendran A. 2004. Biological fuel cells and their applications. *J. Current Science* 87: 455-468.
- Supriadi IH. 2001. Dinamika estuaria tropik. *Oseana* 26: 1-11.
- Tender LM, Gray SA, Grooveman E, Lowy DA, Kauffman P, Helhado J, Tyce RC, Flynn D, Petrecca R, dan Dobarro J. 2008. The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: powering a meteorological buoy. *J. Power Sources* 179: 571-575.
- Torres CI, Kato MA, dan Rittmann BE. 2008. Proton transport inside the biofilm limits electrical current generation by anoda-respiring bacteria. *J. Biotechnol. Bioeng.* 100: 872-881.
- Trimmer M, Nedwell DB, Sivyer DB dan Malcolm SJ. 1998. Nitrogen fluxes trough the lower estuary of the river Great Ouse, England: the role of the bottom sediments. *J. Marine Ecology* 163:109-124.
- Walsh JJ, Premuzic ET, Gaffiney JS, Rowe GT, Hartbottle G, Stoenner RW, Balsam WL, Betzer PR, dan Macko SA. 1985. Organic storage of CO₂ on the continental slope off the mid-Alantic bight, the southeastern Bearing sea, and Peru coast. *J. Deep-Sea Res.* 32: 853-883.
- Watanabe K. 2008. Recent developments in microbial fuel cell technologies for sustainable bioenergy. *J. Bioscience and Bioengineering* 106: 528-536.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

KETUA

Nama : Fitriani Idham
NRP : C34053096
Tempat, Tanggal Lahir : Bontang, 17 Agustus 1987
Agama : Islam
Alamat Orang Tua : Jl. S. Hasanuddin Rt. I No. 11 Bontang, Kalimantan Timur, 75332
Alamat Kost : Jl. Perwira No. 100 Dramaga-Badoneng Bogor, Jawa Barat 16680
No. Telp/ Hp : 085213430292
E mail : phithreedham@yahoo.co.id
Jurusan/ Semester : Teknologi Hasil Perairan / Semester 8
Riwayat Pendidikan : SD Islam Yabis Bontang 1993-1999
SLTP YPK Bontang 1999-2002
SMA YPK Bontang 2002-2005
Pelatihan yang Pernah Diikuti : Blue Ocean 2006
Pelatihan Pembuatan Produk Perikanan 2007
Bedah Buku Saatnya Dunia Berubah 2008
Pelatihan Kewirausahaan IPB 2008
Seminar Bioenergi 2008
Seminar ISO 22000 2008
Seminar Pembangunan Ekonomi Ciayumajakuning Wilayah III jabar 2008
Sosialisasi Standarisasi 2008
Karya Tulis : Fortifikasi Protein Tepung Ikan pada *Weaning Food* Instan Berbahan Tepung Maizena sebagai Alternatif MP-ASI Lokal 2008
Pelatihan Pertanian Modern untuk Menciptakan Karakter Unggulan Insan Pesantren di Pesantren Darul Fallah, Ciampea, Bogor 2008
Lamun Laut (*Seagrass*) Tropis Alternatif Baru Sumber Serat Kertas *air Filter* Kendaraan Bermotor 2008
Inovasi Produk Kreatif Mainan untuk pendidikan Anak-Anak Usia Dini dari Aneka Kulit Ikan Tersamak sebagai Bentuk Percontohan Pemberdayaan Wanita Nelayan di Desa Eretan Kulon, Indramayu 2008

Pengalaman Organisasi	:	BEM-KM	2006
		Rohis Kelas THP 42	2006
		FKM-C	2006
		PSDM Himasilkan	2007
		Reporter Majalah EMULSI	2007
Pengalaman Kepanitiaan	:	Panitia Kuliah Umum	2006
		Kewirausahaan	
		Panitia Seminar dan Pelatihan Kewirausahaan	2006
		Panitia Petimas Uber	2006
		Panitia MUBES Himasilkan	2007
		Panitia DENAH	2007
		Panitia P3KM	2007
		Panitia Gerakan Makan Ikan	2007
		Panitia Bina Desa	2008
		Panitia Gerakan Makan Ikan	2008

ANGGOTA

Nama	: Sofia Halimi	
NRP	: C34052160	
Tempat, Tanggal Lahir	: Surabaya, 15 Oktober 1987	
Agama	: Islam	
Alamat Orang Tua	: Jl. Tandes Lor II No. 34 Surabaya Jawa Timur, 60187	
Alamat Kost	: Jl. Babakan Raya III No. 36 Dramaga, Bogor Jawa Barat 16680	
No. Telp/ Hp	: 085231918714	
E mail	: sophie_enk@yahoo.com	
Jurusan/ Semester	: Teknologi Hasil Perairan / Semester 8	
Riwayat Pendidikan	: SDN Tandes Kidul II	1993-1999
	SLTP Wachid Hasyim 7	1999-2002
	MAU Amanatul Ummah	2002-2005
Pelatihan yang Pernah Diikuti	: Seminar Agroindustri	2006
	Pelatihan Jurnalistik	2007
	Seminar CSR	2007
	Bedah Buku Saatnya Dunia Berubah	2008
	Pelatihan Kewirausahaan IPB	2008
	Seminar ISO 22000	2008
	Pelatihan ISO 22000	2008
	Sosialisasi Standarisasi	2008
	The 7th NSPC	2008
Karya Tulis	: Fortifikasi Protein Tepung Ikan pada <i>Weaning Food</i> Instan Berbahan Tepung Maizena sebagai Alternatif MP-ASI Lokal	2008
	Pelatihan Pertanian Modern untuk Menciptakan Karakter Unggulan Insan	2008
	Pesantren di Pesantren Darul Fallah, Ciampea, Bogor	
Pengalaman Organisasi	: Rohis Kelas THP 42	2006
	FKM-C	2006
	FKM-C	2007
	APSC Himasilkan	2008
Pengalaman Kepanitiaan	: Panitia OMBAK	2007
	Panitia DENAH	2008
	Panitia OMBAK	2008
	Panitia SANITASI	2008
	Panitia PROPER-K	2008
	Pelatih Pembuatan Nugget Ikan dalam Kegiatan Pengabdian Masyarakat di Ponpes Al-Hikmah 2, Brebes yang diselenggarakan oleh DEPAG	2008

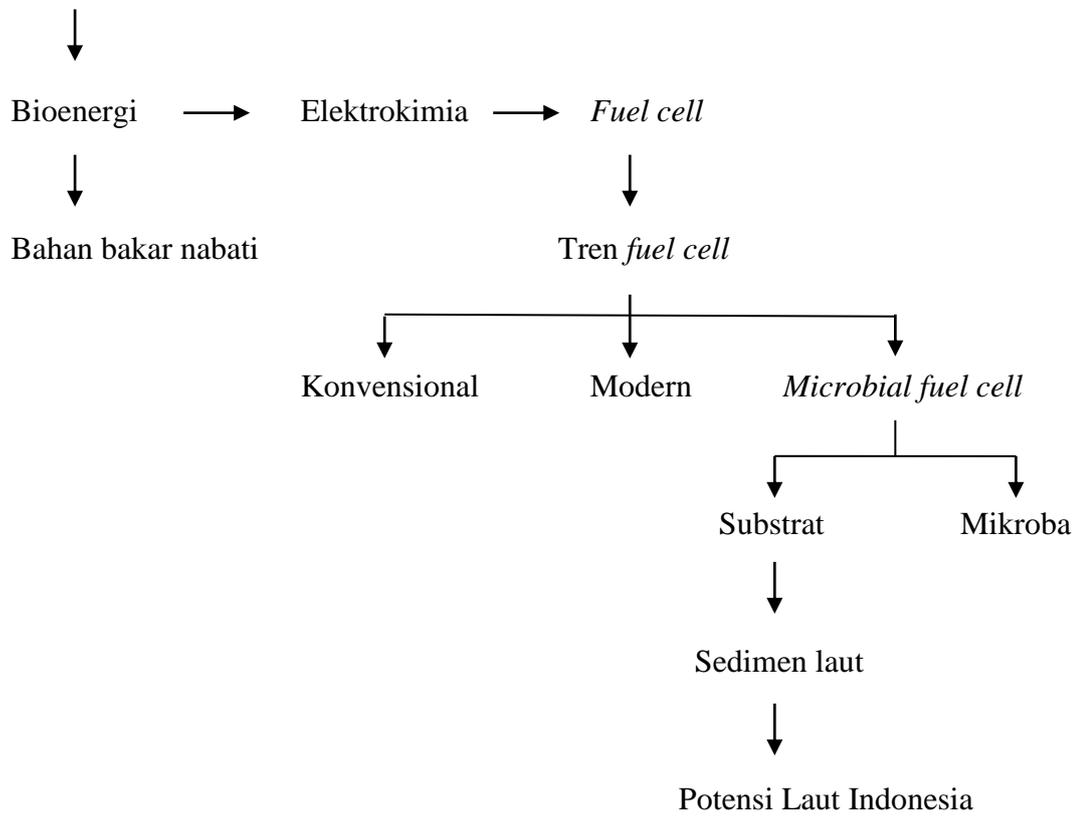
ANGGOTA

Nama	:	Siti Latifah	
NRP	:	G44062700	
Tempat, Tanggal Lahir	:	Pandeglang, 14 Maret 1989	
Agama	:	Islam	
Alamat Orang Tua	:	Jl. Raya Labuan, Cigondang Kramat Pandeglang, Banten	
Alamat Kost	:	Jl. Babakan Lio, Bogor Jawa Barat, 16680	
No. Telp/ Hp	:	081318560302	
E mail	:	sweetyla_tieva@yahoo.com	
Jurusan/ Semester	:	Kimia / Semester 6	
Riwayat Pendidikan	:	SDN Cipicung 03	1996-2000
		MTSN I Pandeglang	2000-2003
		MAN I Pandeglang	2003-2006
Pelatihan yang Pernah Diikuti	:	Pelatihan Karya Tulis Ilmiah	2008
Karya Tulis	:	Pemanfaatan Ubi Jalar sebagai Mie Instan dengan Indeks Gula Rendah	2008
Pengalaman Organisasi	:	IMASIKA	2008
		HAMKA	2008
		FORCES IPB	2008
		BEM KM IPB	2009
Pengalaman Kepanitiaan	:	Panitia Pesta Sains	2008
		Panitia ISS3	2006
		Panitia Chemistry Club	2007
		Panitia Magic Chemistry	2007

LAMPIRAN

Lampiran 1. Metode analisis dan sintesis

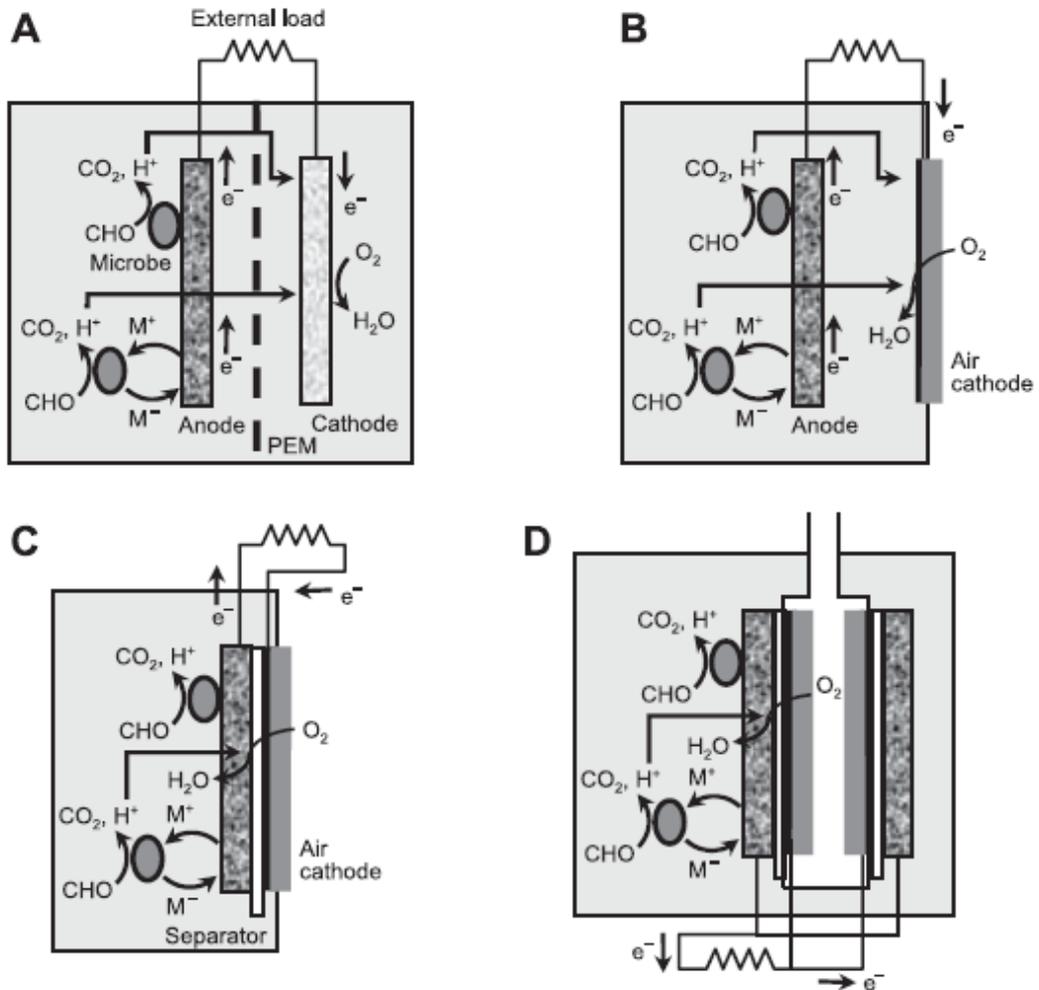
Permasalahan energi dunia



Lampiran 2. Penggunaan berbagai substrat dan mikroorganisme dalam MFC

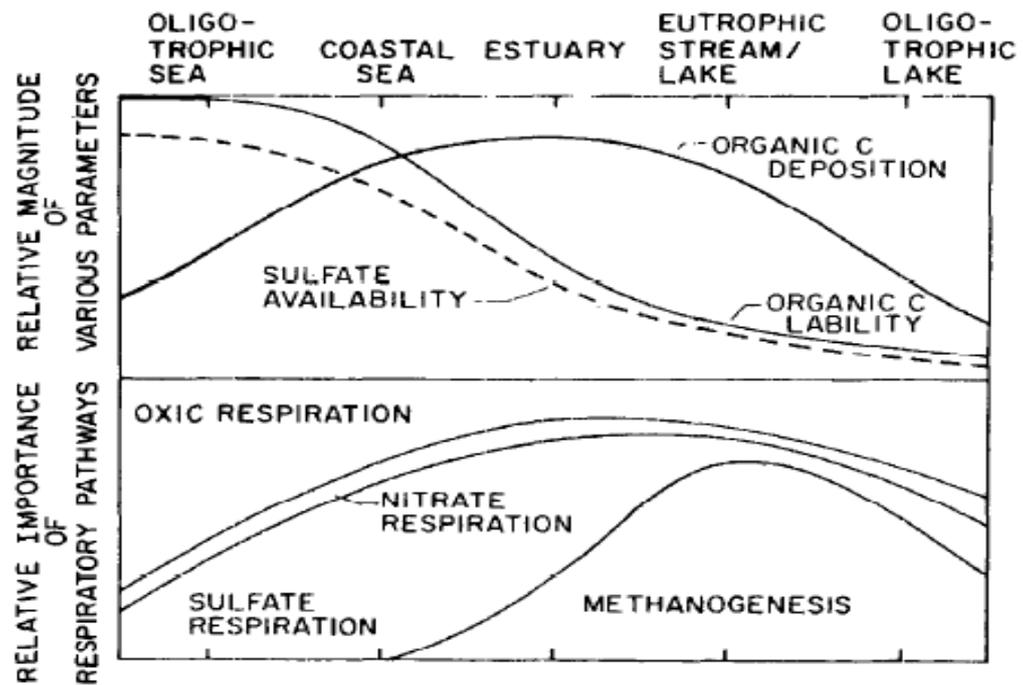
Jenis Substrat	Biokatalis	Referensi
Galaktosa, maltosa, sukrosa, trehalose	<i>Proteus vulgaris</i>	Kim <i>et al.</i> (2000)
Pati (<i>Starch</i>)	<i>Clostridium butyricum</i> atau <i>C. beijerinckii</i>	Niessen <i>et al.</i> (2004)
Asetat	<i>E. coli</i>	Park <i>et al.</i> (2000)
Endapan kotoran	<i>E. coli</i> K12	Liu <i>et al.</i> (2004)
Glukosa	<i>Rhodospirillum rubrum</i> <i>ferrireduncens</i>	Chaudhuri dan Lovley (2003)

Lampiran 3. Disain reaktor MFC



- (A) MFC dua ruang dengan oksigen sebagai penerima elektron pada katoda
 (B) MFC satu ruang dengan katoda udara (Liu dan Logan 2005)
 (C) MFC satu ruang dengan katoda udara dan *cloth electrode assembly separator*
 (D) *A cassette-electrode MFC* (Shimoyama *et al.* 2008)
 M, Mediator; CHO, organics; PEM, proton exchange membrane.

Lampiran 4. Faktor-faktor yang berpengaruh pada berbagai zona perairan



Sumber: Capone dan Kiene (1988)

Lampiran 5. Rata-rata karakteristik sedimen pada estuari Great Ouse

Site	Particle size ^a (>50% w/w)	Water content (g H ₂ O g ⁻¹ sed.)	Specific gravity (g cm ⁻³ sed.)	Porosity (cm ³ H ₂ O cm ⁻³ sed.)	Organic C (% dry wt)	Total N (% dry wt)	C:N ratio (mol:mol)
4	Very fine sands	0.23 ± 0.01	1.69 ± 0.06	0.38 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.02 ± 0.01	5:1
5	Silt/clays	0.33 ± 0.03	1.75 ± 0.14	0.57 ± 0.03	0.78 ± 0.23	0.07 ± 0.02	13:1
6	Very fine sands	0.21 ± 0.01	1.81 ± 0.07	0.38 ± 0.01	0.21 ± 0.03	0.02 ± 0.00	17:1
7	Silt/clays	0.44 ± 0.03	1.39 ± 0.05	0.61 ± 0.02	2.23 ± 0.35	0.14 ± 0.02	19:1
8	Silt/clays	0.26 ± 0.02	1.73 ± 0.04	0.45 ± 0.03	0.44 ± 0.17	0.03 ± 0.01	18:1
9	Fine sands	0.39 ± 0.03	1.46 ± 0.06	0.56 ± 0.02	0.36 ± 0.08	0.06 ± 0.02	8:1
10	Silt/clays	0.41 ± 0.12	1.49 ± 0.13	0.61 ± 0.13	1.14 ± 0.79	0.09 ± 0.07	15:1
11	Silt/clays	0.37 ± 0.09	1.68 ± 0.10	0.62 ± 0.10	1.72 ± 0.51	0.14 ± 0.05	14:1
12	Fine sands	0.20 ± 0.05	1.95 ± 0.08	0.39 ± 0.08	0.37 ± 0.19	0.02 ± 0.02	22:1

^aWentworth classification (Tait 1981): fine sands 250–125 µm, very fine sands 125–63 µm, silt/clays <63 µm

Sumber: Trimmer *et al.* (1998)

Lampiran 6. Nilai karakteristik sedimen muara Sungai Bantan Tengah

Sta.	pasir (%)	lumpur (%)	Liat (%)	Bahan organik total (%)	C-organik (%)	Redoks potensial /Eh (mv)	pH	nitrat (mg/l)	ortofosfat (mg/l)
1	19,04	58,47	22,5	3,1	1,8	15,5	7,27	0,113	1,575
2	17,84	60,85	21,32	2,17	1,26	17,5	7,06	0,14	1,004
3	17,63	57,28	25,09	2,48	1,8	21,5	6,78	0,101	1,094
4	55,69	36,21	9,1	2,14	1,35	38,5	6,51	0,079	1,794
5	75,15	20,11	4,75	1,89	1,1	7,5	7,06	0,134	1,269
6	36,2	52,18	11,63	2,67	1,55	13,5	6,92	0,119	0,897
7	73,93	15,13	11,44	0,71	0,42	15,5	6,98	0,107	1,16
8	75,23	21,95	2,83	1,58	0,92	14,5	7,12	0,111	0,744
9	89,64	7,93	2,44	0,31	0,18	5,5	7,08	0,107	0,81
10	86,12	11,62	2,26	1,96	0,99	7	7,06	0,086	1,007
11	70,38	24,89	4,73	1,37	0,79	8	7,03	0,077	1,203

Keterangan :

Sta. = stasiun

Stasiun 1, 2, 3 dan 6 = dalam muara dan dekat mulut muara

Stasiun 5, 7, 8, 9, 10 dan 11 = bagian luar muara

Stasiun 4 = mulut muara

Sumber: Efriyeli (1999)

Lampiran 7. Gambaran jumlah arus dan daya^a yang dihasilkan dari SMFC

Operating characteristics of the SMFC ^b	Power density (mW m ⁻² EFA)	Power density (mW m ⁻² ES)	Current density (mA m ⁻² EFA)	Current density (mA m ⁻² ES)	Reference
• Marine sediment in laboratory					Reimers <i>et al.</i> (2001)
• Platinum mesh or carbon fibres	10				
• Marine environments					Tender <i>et al.</i> (2002); Ryckelynck <i>et al.</i> (2005)
Estuarine (constant voltage)	28	9	104	35	
Salt marsh (constant current)	26	9	100	34	
• Graphite disk with holes					
• Marine sediment in laboratory					Bond <i>et al.</i> (2002)
• Graphite disk		16			
• Laboratory incubations					Holmes <i>et al.</i> (2004b)
Marine				20	
Salt marsh				7	
Freshwater				9	
• Graphite disk					
• Coastal site					Lowy <i>et al.</i> (2006)
• Graphite disk with AQDS	98	47	560	266	
with Mn ²⁺ and Ni ²⁺	105	47	350	158	
(maximum non-sustainable results ^a)					
• Ocean cold seep					Reimers <i>et al.</i> (2006)
• Vertical graphite rod	1100	34	2647	82	
• Estuarine environment					Nielsen <i>et al.</i> (2007)
Forced advection	233	0.18	466	0.35	
Natural advection	140	0.71	350	1.77	
• Carbon brush					
• Laboratory seawater incubation					Rezaei <i>et al.</i> (2007)
• Pillow-shaped carbon cloth filled with Chitin 80	51	8	184	31	
• Laboratory incubation of river sediment amended with sucrose solution and a rotating cathode	25	12.5	5	2.5	He <i>et al.</i> (2007)
• Carbon cloth					
• Freshwater matrix planted with rice plants					De Schamphelaire <i>et al.</i> (2008)
• Graphite felt	33	16	55	26	
• Freshwater rice paddy field					Kaku <i>et al.</i> (2008)
• Graphite felt	3	1.5	15	7	
• Field deployment in salt marsh, powering a meteorological buoy	387	16	1105	46	Tender <i>et al.</i> (2008)
• Array of vertical graphite plates					

^a keseluruhan hasil merupakan rata-rata, kecuali pada Lowy *et al.* (2006).

^b karakteristik operasi pada SMFC berturut-turut menyebutkan: tipe sedimen dan tipe elektroda anoda, ES, permukaan elektroda; AQDS, anthraquinone-1,6-disulfonic acid.

Sumber: De Schamphelaire *et al.* 2008