

Baseline Cost Pembuatan Direct Methanol Fuel Cell Berskala Kecil (50-200 watt) sebagai Sistem Suplai Tenaga pada Alat Portabel

Yudan Whulanza

Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus Baru UI Depok 16424
E-mail: yudan@eng.ui.ac.id

Abstrak

Berbagai penelitian tentang fuel cell telah marak di berbagai penjuru dunia semenjak akhir taun 1980-an. Produsen kendaraan terkemuka didunia berlomba-lomba untuk mengadopsi teknologi ini untuk direkayasa sebagai sistem suplai tenaga untuk produk kendaraan mereka. Hal ini semakin dimungkinkan dengan ditemukannya bahan baku alternatif dan teknologi pembuatan yang dapat menekan biaya produksi pembuatan aplikasi fuel cell. Di Indonesia sendiri, beberapa institusi penelitian (BPPT, Lemigas, LIPI, PLN) telah memulai penelitian di area ini yang berujung dengan dibentuknya Konsorsium Fuel Cell Indonesia pada tahun 1999.

Paper ini mengetengahkan analisa ekonomi pembuatan direct methanol fuel cell (DMFC) portabel dengan asumsi adanya demand sebesar 100 unit per tahun. Dengan dasar ini dapat diperoleh baseline cost unit DMFC dengan berbagai kapasitas daya keluaran dengan range 50 watt-200 watt sebesar \$ 3,300 - \$ 11,300. Baseline cost juga memberikan gambaran besaran tiap komponen yang membentuk tiap unit DMFC. Biaya material memberikan kontribusi paling signifikan yang mencapai sampai 97% dari total biaya. Dari angka tersebut, komponen lempeng pereaksi atau Membrane Electrode Assembly (MEA) menyumbang sekitar 52%.

Kata kunci: sistem fuel cell, direct methanol fuel cell, baseline cost

Pendahuluan

Pengembangan *fuel cell* telah dimulai sejak diperkenalkannya prinsip elektrolisis yang dipelopori oleh Michael Faraday. Berdasar pembalikan prinsip elektrolisis tersebut, Grove berhasil mengkonversikan energi listrik yang berasal dari reaksi kimia di era tahun 1890-an. Beberapa rekayasa dilakukan oleh para ahli pada tahun 1930an untuk menciptakan sistem *fuel cell* (SFC) yang diaplikasikan pada bidang pertanian tetapi masih belum banyak dikenal dikarenakan masih sangat terbatas penggunaannya dan kurang fleksible karena menggunakan zat elektrolit cair [3].

Fuel cell mulai dibicarakan oleh khalayak lebih ramai ketika NASA pada tahun 1960an mengaplikasikan SFC pada modul Gemini sebagai asupan listrik pada saat modul tersebut mengorbit di ruang angkasa. Dengan waktu tinggal yang sangat lama diluar angkasa dan tanpa stasiun pengisi ulang bahan bakar membuat para ilmuwan NASA mencari alternatif sistem suplai tenaga yang sangat efisien dan hemat konsumsi bahan bakarnya walaupun dengan mengindahkan aspek biaya yang sangat tinggi pada masa itu [4].

Penelitian tentang *fuel cell* kembali marak pada akhir dekade tahun 1980-an hingga kini dengan rekayasa SFC yang semakin maju dan banyak dilirik sebagai pembangkit alternatif tenaga listrik untuk tujuan komersial dengan banyaknya terobosan yang membuat suatu SFC menjadi murah [8]. Pada paper ini diketengahkan perhitungan biaya dasar (*baseline cost*) yang dibutuhkan untuk memproduksi unit SFC dengan kapasitas 100 unit pertahun. SFC di-set menjadi *power generator* dengan daya sebesar 50 - 200 Watt. Dari daya yang terbangkitkan, sistem ditargetkan menjadi unit asupan daya untuk alat-alat portabel seperti telepon genggam, laptop, kamera, sistem komunikasi dan berbagai peralatan strategis lain-nya dalam range daya diatas.

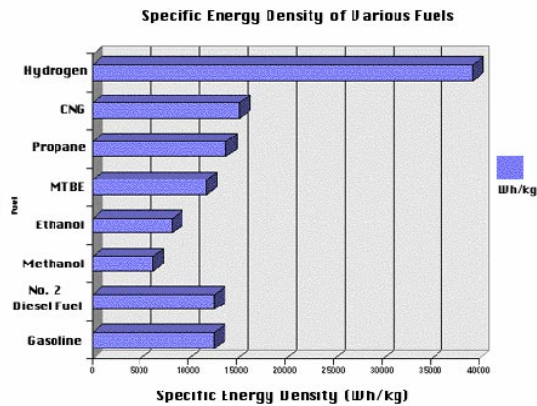
Metodologi

Penelitian dilakukan dengan pengetahuan proses produksi, perhitungan kebutuhan material unit dan menghimpun harga tiap-tiap komponen dari SFC. Kemudian berdasarkan dari target daya yang terbangkitkan, bisa direkontruksi daftar volume unit yang dibutuhkan untuk tiap-tiap satuan

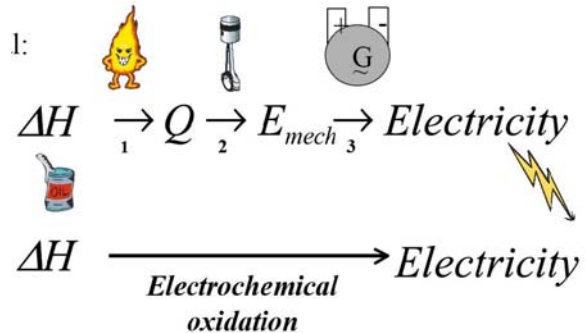
daya terbangkitkan (50-200 Watt). Asumsi yang digunakan adalah material mentah dari SFC didapatkan dengan sepenuhnya mengimpor. Proses perakitan, pengujian dan desain produk dilakukan sepenuhnya di Indonesia dengan tenaga lokal.

Teknologi Fuel Cell Secara Umum

SFC yang memakai bahan bakar hidrogen dan memiliki sedikit bagian bergerak, menjawab kebutuhan NASA pada saat proyek pesawat ruang angkasa Gemini diluncurkan. Gas hidrogen mempunyai densitas energi dua kali lebih besar (gambar 1) daripada bensin ataupun diesel, sehingga secara teoritis mampu bertahan lebih lama di ruang angkasa [2].



Gambar 1 Perbandingan kepadatan energi dari berbagai energy carrier [3]



Gambar 2 Perbedaan konversi energi pada SFC dan sistem pembangkit listrik konvensional [10]

Selain alasan di atas, SFC mempunyai efisiensi lebih tinggi karena memiliki perubahan bentuk energi yang lebih sedikit dibandingkan dengan motor bakar pada umumnya. Pada generator listrik konvensional, energi potensial kimia seperti bensin atau solar terlebih dahulu dirubah menjadi tenaga termal yang kemudian dirubah menjadi tenaga mekanis yang pada akhirnya untuk menjadi listrik perlu dikenai satu proses lagi pada generator listrik (gambar 2). Sedangkan pada SFC, energi kimia dirubah langsung menjadi energi listrik karena proses reaksi kimia yang menghasilkan listrik, atau dikenal pula dengan proses elektrokimia.

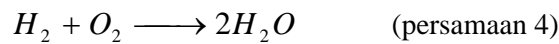
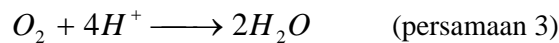
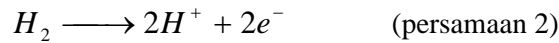
Proses elektrokimia dikenal dalam kehidupan sehari-hari dapat dikenali misalnya pada proses yang berlangsung pada sel aki. Pada sel aki, terdapat kutub positif (katoda) dan negatif (anoda). Pada anoda terjadi proses oksidasi yang melepas elektron, sedangkan pada katode berlangsung proses reduksi yang menerima elektron. Elektron yang terlepas di anoda dilewatkan oleh suatu kabel yang disambungkan ke katoda. Proses aliran elektron ini yang menyebabkan timbulnya arus listrik.

Terjadinya aliran elektron disebabkan karena adanya beda potensial diantara kutub anoda dan katoda, sesuai dengan prinsip Faraday bahwa suatu zat kimia mempunyai potensi listrik yang berbanding lurus dengan nilai bakarnya dan berbanding terbalik dengan jumlah elektron valensinya (persamaan 1). Aliran elektron akan didapati pada suatu reaksi yang mempunyai nilai beda potensial positif, disebut sebagai reaksi spontan. Beda nilai potensial ini lebih dikenal sebagai potensial elektroda atau dalam istilah tenaga listrik dikenal sebagai *electro motor force* (EMF) atau gaya gerak listrik. EMF ini yang pada akhirnya dimanfaatkan sebagai sumber listrik untuk memberi asupan pada berbagai beban listrik.

$$E^o = \frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{z \cdot F} \quad (\text{persamaan 1})$$

Dimana: E^o = potensial sel, volt
 ΔH = *heating value*, total energi termal yang tersedia, kJ/mol
 T = suhu, Kelvin
 ΔS = perubahan entropi, kJ/K
 Z = jumlah elektron yang berperan dalam reaksi elektrokimia
 F = konstanta Faraday, 96.500 As/mol

Pada SFC dengan hidrogen sebagai bahan bakar, reaksi yang terjadi pada kutub-kutubnya adalah:



Persamaan (4) adalah persamaan total yang dari persamaan (2) yang terjadi di katoda dan persamaan (3) yang terjadi di anoda. Dengan melakukan perhitungan akan didapatkan bahwa terjadi reaksi spontan dengan menghasilkan EMF sebesar kurang lebih 1 volt (tergantung dari kondisi operasi).

Pemilihan Jenis Fuel Cell

Sampai sejauh ini, pengelompokan SFC didasarkan pada jenis material elektrolit. Elektrolit terletak di antara katoda dan anoda yang berfungsi untuk mengalirkan elektron ke kabel antar kutub, tetapi meneruskan ion kimia (misalnya ion H^+). Perbedaan sifat materi yang digunakan sebagai elektrolit akan memberikan karakteristik tertentu pada tiap jenis SFC. Tabel 1 dibawah ini menunjukkan jenis dan sifat dasar dari tiap SFC [3]. Secara umum, *fuel cell* dibagi menjadi tiga kelas, yaitu operasi suhu rendah, menengah, dan tinggi. Pembagian kelas tersebut didasarkan pada suhu dimana elektrolit dapat berfungsi. Misalnya untuk *Polymer Electrolyte Fuel Cell* (PEFC), suhu kerja maksimal adalah 120°C, dikarenakan diatas suhu tersebut elektrolit membran polimer akan terdegradasi. Jadi secara umum suhu operasi akan berdampak pada:

- penggunaan katalis
- dinamika pembebanan (kemudahan *start-up/ shut-down*)
- aplikasi sistim
- kompleksitas SFC

Tabel 1. Pengelompokan *fuel cell* secara umum [3]

Kelas	Jenis/tipe	Elektrolit	Suhu kerja
Suhu rendah	<i>Alkaline fuel cell</i> (AFC)	Larutan soda	60-120 °C
	<i>Polymer electrolyte FC</i> (PEFC)	Membrane polimer penghantar proton	60-90 °C
Suhu menengah	<i>Phosporous acid FC</i> (PAFC)	Konsentrat asam fosfat	200 °C
Suhu tinggi	<i>Molten carbonate FC</i> (MCFC)	Campuran lithium karbonat dan natrium karbonat	650 °C
	<i>Solid oxide FC</i> (SOFC)	Keramik penghantar oksigen	700-1000 °C

Untuk aplikasi pembangkit daya kecil dan portabel, tipe PEFC lebih tepat karena dengan suhu operasi yang rendah, penggunaan material nonlogam yang relatif ringan sangat dimungkinkan.

Selain itu, untuk mencapai suhu operasi (sekitar 80°C), tidak dibutuhkan *start-up* energi yang besar. Diatas kelebihan tersebut, kelemahan yang timbul adalah kemutlakan pemakaian katalis platinum yang sangat mahal, dikarenakan kinetika reaksi yang kurang menguntungkan pada suhu rendah.

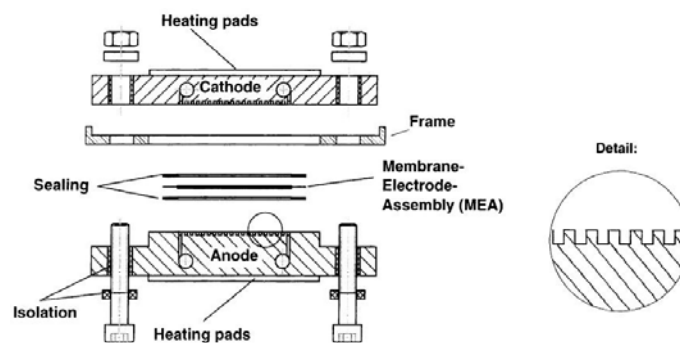
Selain hidrogen sebagai bahan bakar untuk SFC, dimungkin pula penggunaan *energy carrier* lain, seperti bensin, diesel, dan bahan hidrokarbon lain dengan ditambahkan unit pemroses bahan bakar (*fuel processor*) sebagai unit konverter hidrogen. Tetapi adanya unit ini, menyebabkan SFC makin kompleks dan berujung pula pada pada bahan dan biaya eksra. Untuk itu, telah dikembangkan jenis PEFC dengan metanol sebagai bahan bakar sebagai pengganti gas hidrogen. Secara teoritis, reaksi antara metanol dan oksigen akan memberikan beda potensial yang positif walaupun lebih kecil dibanding dengan gas hidrogen. SFC ini lebih umum disebut *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC), yang sekarang juga banyak dikembangkan karena memiliki beberapa kelebihan [1]:

- bahan bakar metanol mudah diperoleh dari konversi bahan mentah lain (*natural gas*) yang berlimpah
- penyimpanan bahan cari lebih mudah dilakukan dibandingkan dengan gas
- daya evaporasi yang sangat kecil
- distribusi akan lebih mudah karena telah tersedia infrastruktur suplai bahan bakar cair

Komponen Penyusun *Direct Methanol Fuel Cell*

Suatu SFC terdiri dari dua bagian besar yaitu:

- *fuel cell stack*; tempat terjadinya konversi energi, merupakan gabungan dari beberapa cell yang terdiri dari komponen-komponen (gambar 3):
 - *membrane electrode assembly*; terdiri dari katoda, membran polimer, anode
 - *bipolar plate* dan *end plate* pada tiap kutub
 - *teflon sealing*



Gambar 3. Komponen-komponen penyusun *fuel cell stack* [10]

- *balance of plant*; system pendukung/utilitas yang terdiri dari bagian utama:
 - pompa
 - filter
 - kompresor
 - regulator
 - *control board*
 - kabel
 - sensor

Hasil Perhitungan

Baseline cost terdiri dari komponen-komponen biaya tetap (*fixed cost*) dan biaya tidak tetap (*variable cost*). *Variable cost* adalah biaya yang berkorelasi langsung dengan volume produksi yang terdiri dari material mentah, biaya tenaga kerja, biaya produksi dan utilitas. Sedangkan biaya sewa tempat, penyusutan alat dan tenaga kerja tidak langsung adalah komponen yang diperhitungkan sebagai *fixed cost*.

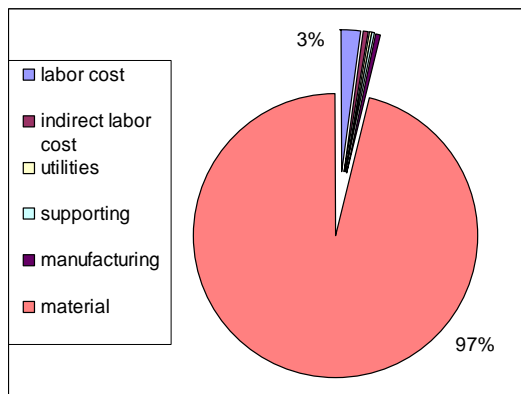
Untuk menghitung kebutuhan material mentah, diperlukan volume unit yang sesuai dengan target daya terbangkitkan. Daya terbangkitkan akan sangat bergantung pada luasan area SFC yang merupakan representasi dari jumlah katalis, polimer membrane, *bipolar plate* dan komponen lainnya pada *fuel cell stack*. Dari karakterisasi *stack* yang telah dilakukan bisa diasumsikan bahwa DMFC mempunyai *power density* sebesar 30 mW/cm². Dengan luasan area *cell* sebesar 10cm x 10cm, maka kebutuhan jumlah *cell* pada satu unit *stack* 50 watt dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Daya tiap cell} &= \text{cell area} \cdot \text{power desity} \\ &= 100 \text{ cm}^2 \cdot 30 \text{ mWatt/cm}^2 = 3 \text{ Watt} \end{aligned}$$

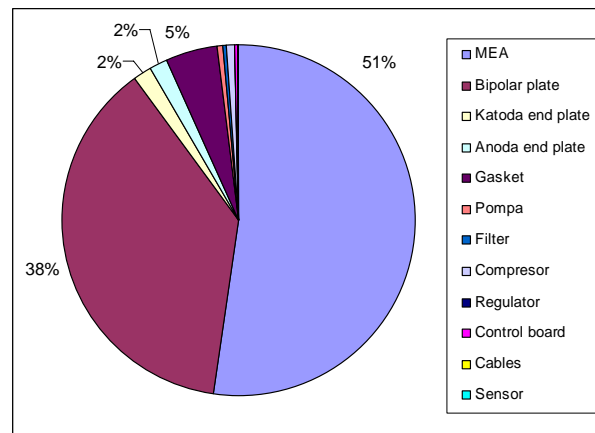
Untuk *stack* 50 watt, akan membutuhkan:

$$\begin{aligned} 50 \text{ Watt stack} &= \frac{50 \text{ Watt}}{3 \text{ Watt/cell}} \\ &= 17 \text{ cell} \end{aligned}$$

Selanjutnya dengan hitungan mundur, bisa didapatkan volume material tiap-tiap komponen yang berujung pada biaya total. Diagam kue pada gambar 4 menunjukkan bahwa material mentah menguasai biaya hingga 97 persen. Hal ini bisa terjadi karena biaya produksi dan tenaga kerja yang relatif murah untuk dilakukan di Indonesia. Hal ini sangat bertolak belakang dengan harga material yang sangat tinggi karena material masih diimpor.



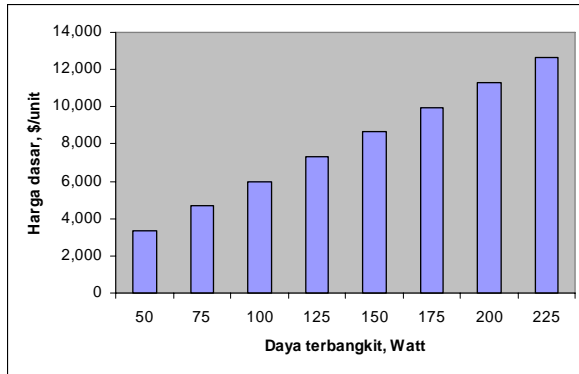
Gambar 4 Elemen-elemen penyusun biaya



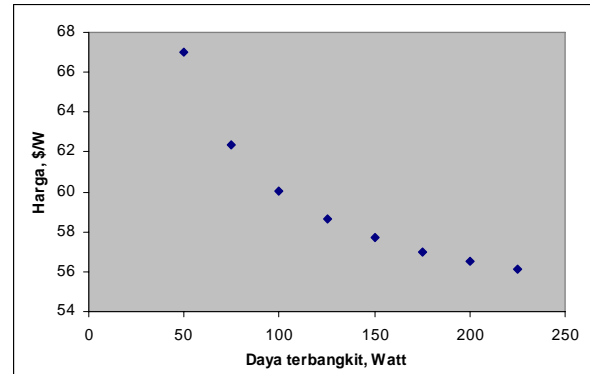
Gambar 5 Breakdown biaya material

Dari total material yang digunakan (gambar 5) hampir setengahnya (51%) diperuntukkan oleh material pembentuk *membrane electrode assembly* (MEA). Hal ini dikarenakan karena DMFC masih memerlukan katalis platina yang harganya berkisar (berbeda pada tiap kutub) antara 55-75 \$/gram dan memegang andil sebesar 85% dari total biaya MEA.

Grafik pada gambar 6 menunjukkan harga yang dihitung berdasarkan kapasitas produksi 100 unit/tahun untuk setiap unit SFC dengan daya sebesar 50-200 Watt. Untuk SFC dengan keluaran 50 watt, dibutuhkan biaya sebesar \$ 3,300 yang secara progresif akan semakin tinggi dengan makin besar daya yang terbangkitkan. Apabila membandingkan dengan produk yang telah dijual secara komersil, didapatkan untuk produk dengan daya terbangkit 20 Watt, harga yang ditawarkan berkisar \$ 3,600.



Gambar 6 *Baseline cost* SFC dengan kapasitas terbangkit 50-225 Watt



Gambar 7 Biaya satuan per daya terbangkit pada SFC 50-225 Watt

Grafik 7 memperlihatkan perhitungan biaya tiap daya keluaran, \$/watt, yang menunjukkan hubungan korelasi semakin turunnya biaya dengan makin besarnya keluaran daya yang dihasilkan pada satu unit SFC. Hal yang menarik adalah, adanya kecenderungan jenuhnya biaya per daya pada titik sekitar 56 \$/Watt untuk DMFC dengan daya keluaran diatas 200 W.

Kesimpulan

Analisa *baseline cost* menunjukkan bahwa biaya material memegang peranan yang sangat penting pada pembuatan produk DMFC. Hal ini membuka tantangan untuk menurunkan harga dengan memperbanyak *local content*, dikarenakan asumsi dasar yang dipakai diawal adalah digunakannya material mentah impor. Selain itu, perlu juga dijajaki untuk menghitung *baseline cost* pada volume produksi yang bervariasi dikarenakan adanya indikasi yang ada menunjukkan bahwa adanya biaya per daya terbangkit yang efektif pada nilai tertentu.

Daftar Pustaka

- [1] Apanel, G.; *Direct Methanol Fuel Cells – ready to Go Commercial?*, Fuel Cells Bulletin, Nov. 2004, 12-17.
- [2] Baldauf, M.; Lager, W.; Preidel, W.; and Waidhas, M.: *Brennstoffzellen : Entwicklung, Technologie, Anwendung*, CF Mueller Verlag, Huethig GmbH, Heidelberg 2001.
- [3] Blum, L.; *Fuel Cells – The Future for Dispersed Power Supply?*, Aachen University, 2004
- [4] Cameron, D.S.; Hards, G.A.; Thompsett, D.: *Direct Methanol Fuel Cells : Present Status and Future Prospects*, the Electrochemicals Society Inc., Energy Technology and Physical Electrochemicals Divisions Proceedings , 92-14, (1992),11-13.
- [5] Ferreira, A.C.; Petrov, K.; Srinivasan S.; *Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using Gas-Fed Methanol*, Sensor group Proceedings volume 93-8, the Electrochemical Society, Inc., 269-280.
- [6] Goodenough, J.B.: *Comments on Components of Methanol/Air Fuel Cells*, the Electrochemicals Society Inc., Energy Technology and Physical Electrochemical Divisions Proceedings vol. 92-14, NJ 1992, 141-153.
- [7] Kordesch, K.; Smader, G.; *Fuel Cell and Their Applications*, VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1996
- [8] Landgrebe, A.R.; Sen, R.K.: *Direct Methanol-Air Fuel Cell : An Overview of the Workshop*, the Electrochemicals Society Inc., Energy Technology and Physical Electrochemicals Divisions Proceedings vol. 92-14, NJ 1992, 5-15.
- [9] Little, A.D.; *Cost Analysis of Fuel Cell System for Transportation*, DOE Report, March 2000
- [10] Whulanza, Y.; *Electrostatic Stability Studies in the Catalyst Dispersion*, Aachen University, Thesis book, 2005.

