

**FABRIKASI MOBIL ENERGI KIMIA BERBAHAN  
BAKAR ETANOL DENGAN *DIRECT ETHANOL FUEL  
CELL* (DEFC) SEBAGAI TENAGA PENGGERAK**

**SKRIPSI**

Oleh

**NIKEN WULANDARI**

**04 04 06 045 4**



**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GENAP 2007/2008**

**FABRIKASI MOBIL ENERGI KIMIA BERBAHAN  
BAKAR ETANOL DENGAN *DIRECT ETHANOL FUEL  
CELL* (DEFC) SEBAGAI TENAGA PENGGERAK**

**SKRIPSI**

Oleh

**NIKEN WULANDARI**

**04 04 06 045 4**



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN  
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GENAP 2007/2008**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

**FABRIKASI MOBIL ENERGI KIMIA BERBAHAN BAKAR ETANOL  
DENGAN *DIRECT ETHANOL FUEL CELL* (DEFC) SEBAGAI TENAGA  
PENGGERAK**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 9 Juli 2008

Niken Wulandari

NPM 04 04 06 045 4

## **PENGESAHAN**

Skripsi dengan judul :

**FABRIKASI MOBIL ENERGI KIMIA BERBAHAN BAKAR ETANOL  
DENGAN *DIRECT ETHANOL FUEL CELL* (DEFC) SEBAGAI TENAGA  
PENGGERAK**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 9 Juli 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 9 Juli 2008

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA

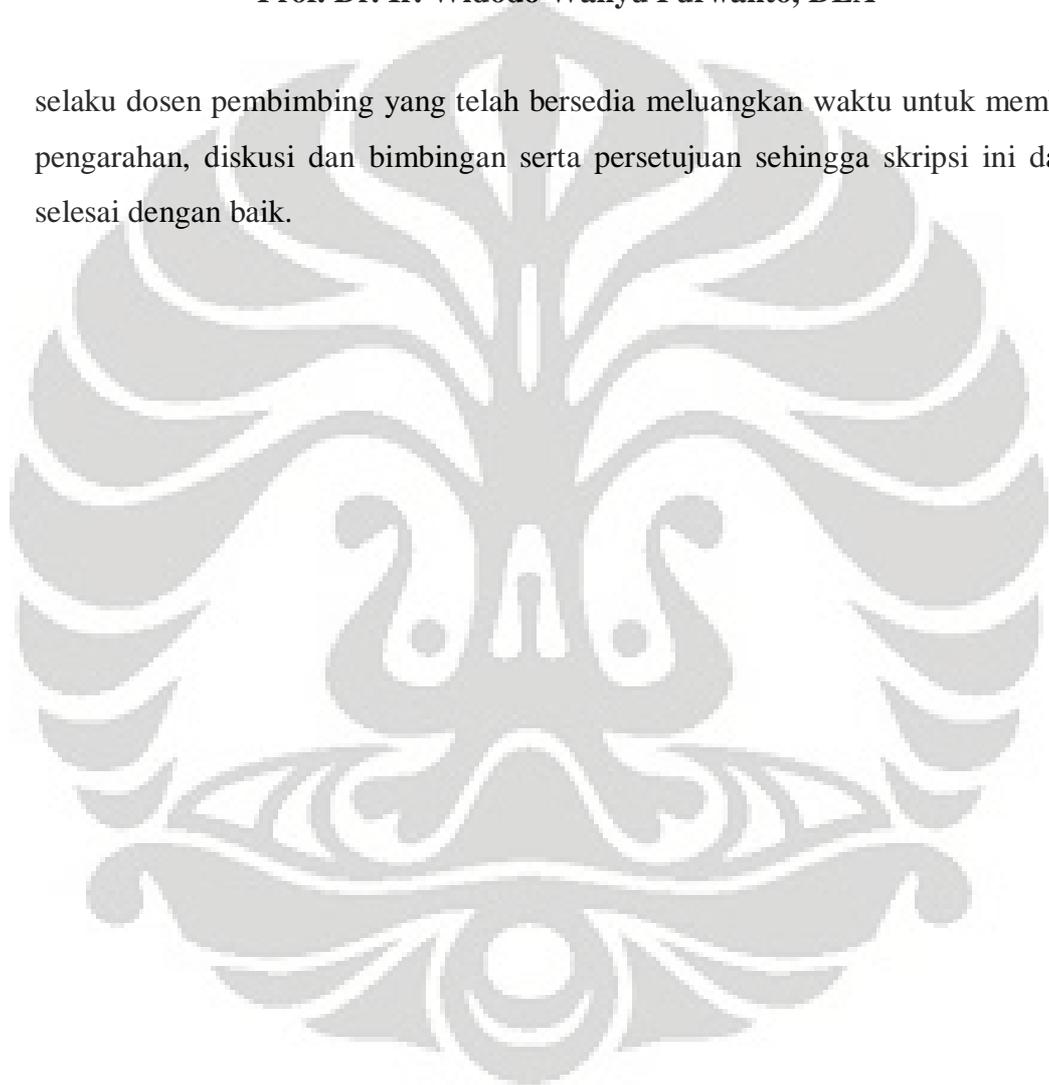
NIP 131 627 864

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

**Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA**

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.



Niken Wulandari  
NPM 04 04 06 045 4  
Departemen Teknik Kimia

Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. Widodo W Purwanto, DEA

**FABRIKASI MOBIL ENERGI KIMIA BERBAHAN BAKAR ETANOL  
DENGAN *DIRECT ETHANOL FUEL CELL* (DEFC) SEBAGAI TENAGA  
PENGGERAK**

**ABSTRAK**

Kebutuhan manusia akan energi semakin meningkat. Sehingga perlu ada energi alternatif untuk mensubstitusi bahan bakar fosil yang digunakan saat ini. Sumber energi alternatif yang sedang dikembangkan saat ini adalah etanol. Etanol dapat dijadikan bahan bakar pada *fuel cell*. Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC) merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang sangat potensial untuk digunakan dalam aplikasi peralatan portable. Salah satu aplikasi dari DEFC ini adalah pada Chemical Energy Car (Chem E Car) yang merupakan prototipe mobil berbahan bakar dari energi kimia. DEFC ini dapat mengkonversi etanol secara langsung menjadi energi listrik

Dalam penelitian ini dilakukan fabrikasi mobil energi kimia beserta komponen-komponen penyusunnya. Untuk bahan bakar DEFC digunakan energi alternatif yakni etanol. Etanol yang digunakan adalah etanol 2M serta dengan bantuan katalis komersial, yakni Pt-Ru/C untuk anoda dan Pt/C untuk katoda. Tahapan penelitian ini meliputi perancangan seluruh komponen mobil energi kimia; fabrikasi komponen mobil energi kimia seperti: cell stack, MEA (Membrane Electrode Assembly), tangki etanol, kerangka mobil; perakitan dari seluruh komponen mobil energi kimia; pengujian dari mobil energi kimia ini. Hasil uji DEFC pada temperatur 25<sup>0</sup>C menghasilkan voltase maksimum 0,506 V dengan densitas arus 0,011 mA/cm<sup>2</sup> dan densitas arus maksimum 4,165 mA/cm<sup>2</sup> pada 0,004 V. Dengan daya dari voltase dan arus yang dihasilkan tersebut belum dapat menggerakkan dinamo mobil energi kimia. Sehingga mobil tersebut belum dapat berjalan.

Fabrikasi mobil energi kimia ini diharapkan dapat membantu tercetusnya penelitian lebih lanjut tentang DEFC dan mobil energi kimia. Sehingga manusia dapat menggunakan energi alternatif dan dapat diperbaharui, secara komersial. Selain itu diharapkan ketergantungan akan penggunaan bahan bakar fosil akan berkurang.

**Kata kunci : Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC), Mobil energi kimia, Etanol**

Niken Wulandari NPM 04 04 06 045 4 Chemical Engineering Department	Counselor <u>Prof. Dr. Ir. Widodo W Purwanto, DEA</u>
<b>FABRICATION OF CHEMICAL ENERGY CAR WITH ETHANOL AS A FUEL AND DIRECT ETHANOL FUEL CELL (DEFC) AS A DRIVING FORCE</b>	
<p><b>ABSTRACT</b></p> <p>Human needs of energy always increase every time. Alternative energy is needed to substitute the fossil fuel. One of the sources of alternative energy is ethanol. Ethanol can be used as a fuel in fuel cell. Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC) is one of type of fuel cell which is very potential to be used in portable equipment. One of the applications of DEFC is chemical energy car (Chem E-Car) which is the prototype of car with chemical as a fuel. DEFC can convert energy of ethanol directly become an electricity.</p> <p>In this research, we did the fabrication of chemical energy car and all the components. DEFC used ethanol as its fuel, which is one of alternatives energy. The ethanol that we used is ethanol 2M and commercial catalyst, Pt-Ru/C for anode and Pt/C for cathode to produce the electricity. The step of this research consist of design all the components of the Chem E-Car; fabrication of cell stack, MEA (Membrane Electrode Assembly), ethanol's tank, chassis; assembly all the components; and take the test of this Chem E-Car. The results shows that DEFC performance at temperature 25<sup>0</sup>C give the maximum voltage 0,506 V when the current density is 0,011 mA/cm<sup>2</sup> and the maximum current density is 4,165 mA/cm<sup>2</sup> at 0,004 V. The power from DEFC system still can't make the dynamo running. So the car still can't move.</p> <p>We hope from this fabrication of chemical energy car can help the next research in DEFC and chemical energy car. So human can use alternative energy which is renewable. Beside that hopefully, the use of fossil fuel will decrease.</p>	
<p><b>Key Word : Chemical Energy Car, Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC), Ethanol</b></p>	

## DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iii
PENGESAHAN.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
DAFTAR SINGKATAN .....	xv
DAFTAR ISTILAH.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. LATAR BELAKANG.....	1
1.2. RUMUSAN MASALAH .....	3
1.3. TUJUAN PENELITIAN .....	3
1.4. BATASAN MASALAH .....	3
1.5. SISTEMATIKA PENULISAN.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. MOBIL ENERGI KIMIA.....	5
2.1.1. Sejarah Perkembangan Mobil Energi Kimia .....	5
2.1.2. Pertandingan -Pertandingan Mobil Energi yang Pernah Diselenggarakan	6
2.2. SEL BAHAN BAKAR.....	8
2.2.1. Sejarah Penemuan Sel Bahan Bakar .....	8
2.2.2. Deskripsi Sel Bahan Bakar .....	9
2.2.3. Cara Kerja Sel Bahan Bakar .....	11
2.2.4. Macam-Macam Sel Bahan Bakar.....	12
2.3. DIRECT ETHANOL FUEL CELL (DEFC).....	16
2.3.1. Efisiensi Termodinamika Etanol.....	17

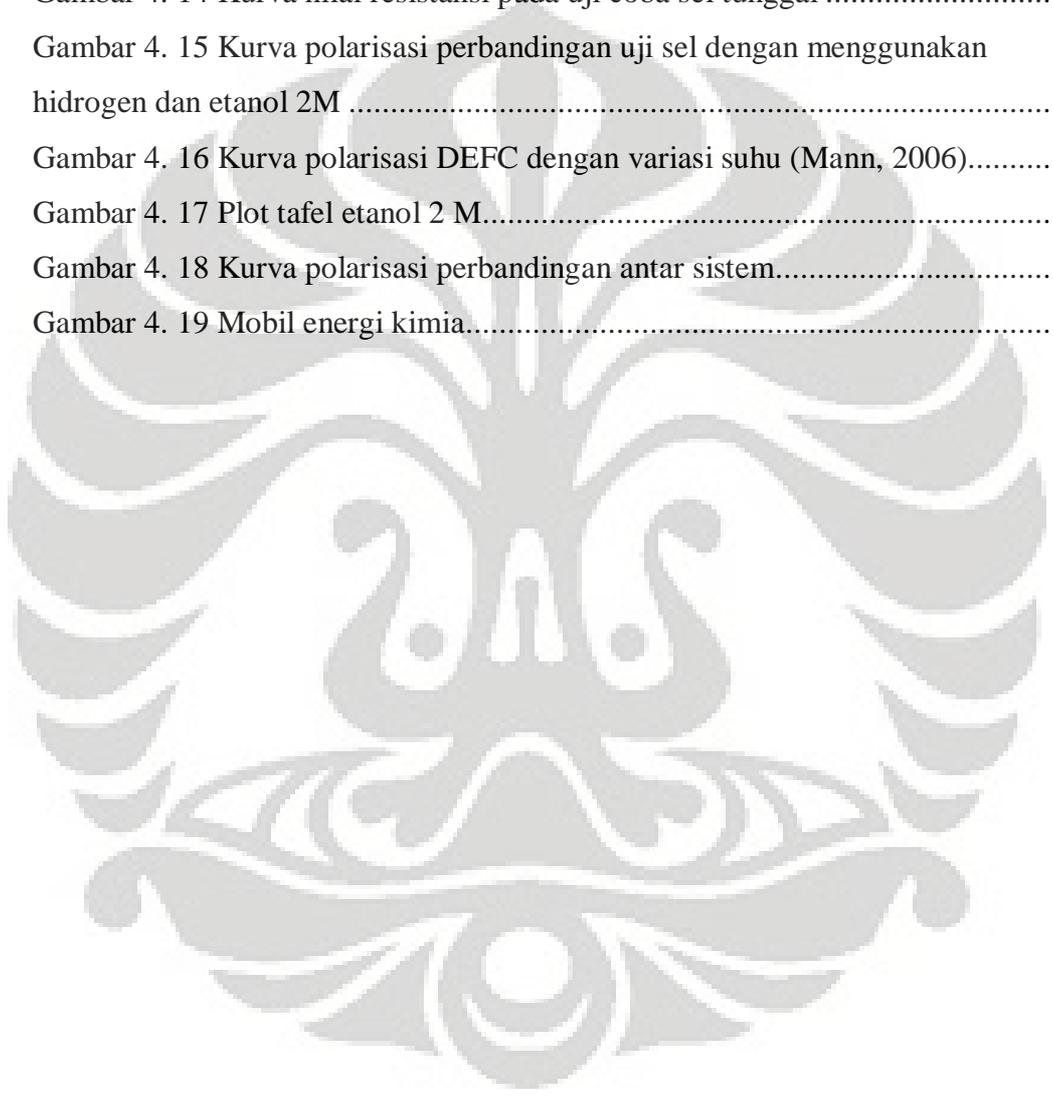
2.3.2. Daya, Energi Mekanis, dan Gaya Hambatan pada Mobil Kimia dengan DEFC.....	19
2.3.2.1. Daya yang Dihasilkan Dari DEFC .....	19
2.3.2.2. Energi Mekanis.....	20
2.3.2.3. Gaya Hambatan (Drag Force) .....	21
2.3.3. Struktur DEFC .....	22
2.3.3.1. Pelat Bipolar (Bipolar Plate) .....	23
2.3.3.2. MEA (Membrane Electrode Assembly) .....	26
2.3.3.3. Pelat Penutup (End Plate) .....	29
2.4 PERFORMA AKTUAL .....	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	32
3.1. SKEMA PENELITIAN.....	32
3.2. RINCIAN KEGIATAN PENELITIAN .....	33
3.2.1. Merancang Mobil Energi Kimia .....	33
3.2.1.1. Desain Cell Stack.....	34
3.2.1.2. Desain MEA .....	38
3.2.1.3. Desain Tempat Penyimpanan Etanol.....	39
3.2.1.4 Desain Badan Miniatur Mobil.....	40
3.2.2 Procurement (Pembelian dan Pengadaan Alat).....	41
3.2.3. Fabrikasi Mobil Energi Kimia ( <i>Chemical Energy Car</i> ) .....	41
3.2.3.1 Fabrikasi Cell stack .....	41
3.2.3.2. Fabrikasi MEA ( Membrane Electrode Assembly) .....	43
3.2.3.4 Fabrikasi Kerangka Mobil Energi Kimia.....	46
3.2.4 Assembling (Perakitan) .....	46
3.2.5 Uji Coba.....	47
3.2.5.1 Uji Coba Laju Alir Etanol.....	47
3.2.5.2 Aktivasi MEA .....	47
3.2.5.3 Uji Coba Kinerja Mobil Energi Kimia .....	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	48
4.1. PERHITUNGAN KOMPONEN MOBIL ENERGI KIMIA .....	48
4.1.1. Perhitungan Kebutuhan Daya .....	48
4.1.2. Perhitungan Luas MEA .....	49

4.1.3. Penentuan Jumlah Etanol dan Oksigen yang Diperlukan.....	50
4.2. HASIL DESAIN CELL STACK DEFC .....	50
4.2.1. Pelat Bipolar.....	51
4.2.2. Pelat Penutup.....	52
4.2.3. Aksesoris DEFC .....	53
4.2.3.1. Seal .....	53
4.2.3.2. Baut.....	53
4.2.3.3. Instalasi Listrik .....	54
4.2.4. Fabrikasi MEA .....	54
4.3. HASIL DESAIN TANGKI .....	56
4.3.1. Tangki Etanol.....	56
4.3.2. Tangki Oksigen .....	57
4.4. PENGUJIAN DEFC.....	57
4.4.1. Aktivasi Katalis .....	57
4.4.2. Pengujian Sel Tunggal.....	58
4.4.3. Plot Tafel .....	62
4.4.4. Perbandingan Pengujian Sel Tunggal.....	63
4.5. FABRIKASI MOBIL ENERGI KIMIA .....	65
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	66
5.1. KESIMPULAN.....	66
5.2. SARAN .....	66
DAFTAR PUSTAKA .....	68
LAMPIRAN 1 .....	70
LAMPIRAN 2 .....	72
LAMPIRAN 3 .....	73

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Mobil energi kimia tim Sydney University (Anonim, 2005) .....	6
Gambar 2. 2 Mobil energi kimia pada perlombaan Chem E-Car Malaysia (FKKKSA 2007).....	8
Gambar 2. 3 Skematik dan cara kerja sel bahan bakar (Carrette 2001).....	10
Gambar 2. 4 Skematik dari DEFC ( <i>Direct Ethanol Fuel Cell</i> ) (Lamy, 2002).....	16
Gambar 2. 5 Mobil F1 (kiri) dan truk (kanan) .....	22
Gambar 2. 6 Berbagai jenis bidang aliran: a. jenis pin, b. paralel, c. serpentine, d. terintergrasi, e. terinterdigitasi, f. terbuat dari lembaran logam (Li, 2005).....	25
Gambar 2. 7 Struktur MEA 5 lapis (Dohle 2000) .....	26
Gambar 2. 8 Struktur PTFE backbone tersulfonasi (Quadt 2004) .....	28
Gambar 2. 9 Klaster ion PTFE tersulfonasi (Revee 2002).....	28
Gambar 2. 10 Karakter ideal dan aktual <i>fuel cell</i> (EG&G, 2002) .....	30
Gambar 3. 1 Skema diagram alir penelitian mobil kimia .....	33
Gambar 3. 2 Rancangan pelat bipolar.....	35
Gambar 3. 3 Rancangan active area.....	35
Gambar 3. 4 Spesifikasi parit .....	36
Gambar 3. 5 Rancangan pelat penutup .....	36
Gambar 3. 6 Desain seal.....	38
Gambar 3. 7 Desain MEA.....	39
Gambar 3. 8 Desain <i>cell stack</i> keseluruhan (tampak atas).....	39
Gambar 3. 9 Desain tempat penyimpanan etanol.....	40
Gambar 3. 10 Rancangan mobil energi kimia.....	41
Gambar 4. 1 Ilustrasi gaya pada mobil energi kimia .....	48
Gambar 4. 2 Stack DEFC.....	51
Gambar 4. 3 Stack DEFC (tampak atas) .....	51
Gambar 4. 4 Pelat bipolar untuk katoda dan anoda .....	52
Gambar 4. 5 Pelat penutup katoda dan anoda .....	52
Gambar 4. 6 Seal.....	53
Gambar 4. 7 Baut.....	53

Gambar 4. 8 Instalasi listrik .....	54
Gambar 4. 9 MEA yang telah difabrikasi .....	54
Gambar 4. 10 Tabung etanol .....	56
Gambar 4. 11 Tabung oksigen.....	57
Gambar 4. 12 Kurva polarisasi hasil uji sel dengan hidrogen.....	58
Gambar 4. 13 Kurva polarisasi hasil uji sel dengan etanol 2 M.....	58
Gambar 4. 14 Kurva nilai resistansi pada uji coba sel tunggal .....	59
Gambar 4. 15 Kurva polarisasi perbandingan uji sel dengan menggunakan hidrogen dan etanol 2M .....	60
Gambar 4. 16 Kurva polarisasi DEFC dengan variasi suhu (Mann, 2006).....	62
Gambar 4. 17 Plot tafel etanol 2 M.....	62
Gambar 4. 18 Kurva polarisasi perbandingan antar sistem.....	64
Gambar 4. 19 Mobil energi kimia.....	65



## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Antar Jenis Sel Bahan Bakar (Nomura 1995).....	13
Tabel 2. 3 Potensial listrik dari reaksi oksidasi etanol (Mann 2006) .....	17
Tabel 2. 4 Data termodinamika oksidasi elektrokimia (kondisi standar) (Lamy 2002) .....	18



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	<b>Perhitungan Kebutuhan Etanol dan Oksigen</b>	70
Lampiran 2	<b>Data Hasil Uji Sel Tunggal dengan Hidrogen</b>	72
Lampiran 3	<b>Data Hasil Uji Sel Tunggal dengan Etanol 2 M</b>	73



## DAFTAR SINGKATAN

Simbol	Akronim
DEFC	Direct Ethanol Fuel Cell
E-Car	Energy Car
MEA	Membran Electrode Assembly



## DAFTAR ISTILAH

Simbol	Keterangan	Satuan
P	Daya	W
I	Arus	A
V	Tegangan	V
W	Energi	J
F	Gaya	N
$\Delta s$	Selisih jarak tempuh	m
t	Waktu tempuh	s
$F_d$	Gaya hambatan (drag force)	N
$\rho$	Densitas	kg/m <sup>3</sup>
v	kecepatan suatu benda	m/s
A	luas area	m <sup>2</sup>
$C_d$	Koefisien hambatan	--
M	Massa	kg
$\mu_g$	Koefisien gesek	--
g	percepatan gravitasi	m/s <sup>2</sup>
$\eta$	selisih antara tegangan ideal dengan aktual	V
T	suhu	K
$\alpha$	koefisien transfer elektron	--
n	jumlah elektron	--
F	nilai faraday	C
R	hambatan	$\Omega$
i	densitas arus	A/cm <sup>2</sup>
$i_0$	<i>exchange current density</i>	A/cm <sup>2</sup>
$i_L$	batas densitas arus	A/cm <sup>2</sup>

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. LATAR BELAKANG

Kebutuhan manusia akan bahan bakar fosil semakin meningkat setiap harinya, baik untuk kendaraan, maupun kebutuhan hidup lainnya. Namun, cepat atau lambat, bahan bakar fosil dan gas bumi dapat habis karena sifatnya yang tidak terbaharukan. Selain itu, bahan bakar fosil juga menimbulkan emisi yang berbahaya untuk kesehatan. Efek lain yang ditimbulkan adalah efek rumah kaca yang menimbulkan pemanasan global. Sehingga diperlukan suatu bahan bakar alternatif yang dapat menggantikan posisi bahan bakar fosil serta gas bumi tersebut. Maka patut dipikirkan alternatif yang memungkinkan untuk dikonsumsi oleh masyarakat banyak untuk jangka waktu yang panjang.

Adanya permasalahan tersebut, membuat banyak pihak berusaha untuk melakukan suatu usaha pencarian energi alternatif yang dapat menjadi solusi dari permasalahan tersebut. Oleh sebab itu dibutuhkan suatu inovasi dari sumber energi alternatif yang ramah lingkungan serta menggunakan bahan bakar yang dapat diperbaharui. Adapun beberapa alternatif bahan bakar, yang bersifat dapat diperbaharui, yang sedang diteliti dan dikembangkan saat ini adalah metanol, etanol, hidrogen, serta *biofuel*.

Sumber energi alternatif yang sedang dikembangkan saat ini adalah etanol. Etanol ini dapat digunakan sebagai bahan bakar pada *fuel cell*. *Fuel cell* adalah suatu sel elektrokimia yang dapat merubah energi kimia menjadi energi listrik dan dapat digunakan menjadi energi lainnya. Adapun penelitian sebelumnya, yang telah dilakukan oleh mahasiswi Teknik Kimia Universitas Indonesia, adalah membuat *Chem E-car* yang menggunakan *fuel cell* dengan bahan bakar hidrogen.

Mobil kimia (*Chem E-car*) adalah suatu prototipe dari mobil yang menggunakan *fuel cell* (sel bahan bakar) sebagai tenaga penggerak dan suatu bahan kimia sebagai bahan bakarnya. Dari hasil penelitian sebelumnya tentang

*Chem e-car* yang berbahan hidrogen, masih ditemukan berbagai kekurangan. Penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar untuk *fuel cell* memiliki masalah tersendiri, yakni masalah penyimpanan gas hidrogen itu sendiri. Hidrogen yang dibutuhkan tidaklah sedikit, dan dalam wujud gas, volume hidrogen akan jauh lebih besar dari pada wujud cairnya. Sedangkan jika hidrogen disimpan dalam wujud cair, maka diperlukan suhu yang sangat rendah, dan hal ini sangatlah sulit untuk dilakukan. Permasalahan lainnya adalah masalah kecepatan yang dihasilkan oleh mobil kimia tersebut masih lambat (Utari 2006). Selain itu, penampilan yang kurang menarik dan faktor friksi yang masih besar.

Penelitian kali ini adalah membuat mobil kimia dengan menggunakan *fuel cell* yang berbahan bakar etanol secara langsung (*Direct Ethanol Fuel Cell, DEFC*). Perlu diketahui bahwa penelitian *fuel cell* dengan bahan bakar etanol sebenarnya sudah dilakukan oleh universitas lain, sehingga pada penelitian kali ini adalah mencari komposisi yang ideal dari etanol untuk dijadikan sebagai bahan bakar alternatif, serta bentuk penyimpanannya dan memperkecil faktor friksi dari mobil kimia tersebut.

*Direct Ethanol Fuel Cell* (DEFC) adalah sumber energi masa depan yang dapat digunakan pada peralatan *portable*, seperti telepon genggam, kamera, serta laptop. Jika dibandingkan dengan PEMFC, DAFC (*Direct Alcohol Fuel Cell*) – yang terdiri dari DMFC dan DEFC – memiliki beberapa keunggulan, diantaranya yaitu tidak digunakannya *reformer* untuk menghasilkan bahan bakar ( $H_2$ ) dari alkohol (metanol maupun etanol) terlebih dahulu tetapi alkohol langsung diumpungkan ke dalam sel bahan bakar. Dengan menggunakan etanol energi spesifik yang dihasilkan adalah 8 kWh/kg, sedangkan metanol adalah 6,1 kWh/kg (Lamy 2002).

Penggunaan etanol sebagai bahan bakar, didasarkan pada permasalahan yang sudah dipaparkan sebelumnya. Sesuai dengan riset yang telah banyak dilakukan oleh banyak pihak, diketahui bahwa etanol dapat dibuat dari tumbuh-tumbuhan. Salah satu contohnya adalah jagung, dimana keberadaan jagung dapat diperbaharui. Selain itu emisi yang dihasilkan dari proses ini tidaklah berbahaya seperti yang dihasilkan dari bahan bakar fosil. Sehingga etanol dapat dijadikan suatu alternatif dari bahan bakar masa depan.

Dilihat dari sisi energi, penelitian ini sejalan dengan kebijaksanaan konservasi energi nasional melalui peningkatan efisiensi sistem konversi energi dan peningkatan penggunaan etanol sebagai bahan bakar alternatif dan dapat diperbaharui. Selain itu, dari segi lingkungan, polusi udara adalah masalah utama yang diakibatkan oleh pembakaran fosil. Pengembangan teknologi *fuel cell* menjadi suatu hal yang menarik untuk menjawab tantangan permasalahan lingkungan dan penggunaan energi yang lebih berkelanjutan.

## **1.2. RUMUSAN MASALAH**

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka pada penelitian ini dapat dirumuskan masalahnya adalah bagaimana merancang mobil energi kimia sehingga menghasilkan daya yang besar untuk dapat menggerakkan *Chem E-car* dengan menggunakan bahan bakar etanol dan bekerja pada suhu.

## **1.3. TUJUAN PENELITIAN**

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Merancang komponen mobil energi kimia dan memfabrikasikannya menjadi mobil energi kimia.
2. Mengetahui kinerja DEFC pada suhu ruang ( $25^{\circ}\text{C}$ ).
3. Mengukur kecepatan mobil energi kimia dengan menggunakan DEFC dan berbahan bakar etanol

## **1.4. BATASAN MASALAH**

Pembatasan masalah yang akan dibahas adalah:

1. Bahan bakar yang digunakan untuk menggerakkan *Chem-E-Car*. Dalam penelitian ini dibatasi pada bahan bakar yang digunakan adalah etanol dengan tenaga penggerak *Direct Ethanol Fuel Cell* (DEFC).
2. Kinerja DEFC diuji pada suhu  $25^{\circ}\text{C}$ .

3. Fabrikasi MEA (*Membrane Electrode Assembly*) dengan menggunakan Nafion®, katalis komersil yang digunakan PtRu/C untuk anoda serta Pt/C untuk katoda.

## 1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

- Bab I : PENDAHULUAN  
Menjelaskan mengenai latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.
- Bab II : TINJAUAN PUSTAKA  
Menjelaskan mengenai mobil energi kimia serta perkembangannya, sejarah dan perkembangan sel bahan bakar, prinsip kerja sel bahan bakar, serta *Direct Ethanol Fuel Cell* (DEFC).
- Bab III : METODOLOGI PENELITIAN  
Menjelaskan tentang tahapan-tahapan yang harus dilakukan selama kegiatan penelitian, serta alat dan bahan yang diperlukan selama penelitian.
- Bab IV : HASIL DAN PEMBAHASAN  
Menjelaskan tentang hasil yang didapatkan dari penelitian dan analisis terhadap hasil penelitian tersebut
- Bab V : KESIMPULAN DAN SARAN  
Menjelaskan tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan saran untuk kemajuan penelitian berikutnya.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. MOBIL ENERGI KIMIA**

Mobil kimia (*Chemical Energy Car, Chem E-car*) adalah suatu prototipe dari mobil yang menggunakan *fuel cell* (sel bahan bakar) sebagai tenaga penggeraknya dan suatu bahan kimia sebagai bahan bakarnya. Mobil kimia ini dibuat sebagai suatu inovasi pencarian energi alternatif pengganti bahan bakar fosil. Dengan inovasi mobil ini pula diharapkan akan lebih ramah akan lingkungan. Hal ini dikarenakan bahan bakar yang digunakan akan menghasilkan air dan jikalau pun ada emisi, maka emisi yang dihasilkan tidak sebanyak emisi pada kendaraan bermotor yang ada saat ini.

##### **2.1.1. Sejarah Perkembangan Mobil Energi Kimia**

Mobil energi kimia mulai terdengar pada sekitar akhir tahun 90-an. Saat itu, para pemimpin *American Institute of Chemical Engineer (AIChE)* berusaha untuk menarik perhatian publik terhadap teknik kimia. Salah satu caranya adalah dengan mengadakan suatu pertandingan yang menjadi aplikasi dari ilmu teknik kimia. Pertandingan tersebut adalah pertandingan pembuatan mobil energi kimia.

Langkah ini mendapat sambutan yang hangat, dan sebagai hasilnya disetujui untuk mengadakan suatu lomba yang kini dikenal sebagai "*E Car Competition*". Pertandingan mobil kimia ini pun mulai diadakan tiap tahun semenjak tahun 1999 di Amerika Utara. Tiap tahunnya AIChE mensponsori sekitar 10 perlombaan E Car tingkat daerah di USA. Pemenang E Car tingkat daerah ini secara otomatis memiliki kesempatan untuk mengikuti pertandingan E Car Nasional yang diadakan tiap akhir tahun. Semenjak tahun 2003, muncul ketertarikan dari sarjana-sarjana Teknik Kimia di luar Amerika Serikat akan perlombaan E Car ini. Atas dasar itulah akhirnya pada bulan Juli tahun 2005 diadakan perlombaan E Car tingkat Internasional di Glasgow Scotland.

### 2.1.2. Pertandingan -Pertandingan Mobil Energi yang Pernah Diselenggarakan

Adapun pertandingan mobil energi kimia yang telah dilaksanakan di dunia, antara lain:

- *Freshman Chem ECar Competition* yang diselenggarakan oleh Universitas Nevada Reno

Dr. Coronella's Freshman merancang sebuah lomba untuk mendisain mobil yang digerakan oleh reaksi kimia dengan persyaratan mobil rancangan tersebut tidak lebih besar dari box sepatu dan dapat bergerak sejauh 50 sampai 100 kaki. Tiap team memiliki dana sekitar 50 dolar untuk membuat mobil tersebut. Perlombaan itu diikuti oleh 7 team. Beberapa mobil digerakan oleh reaksi yang sama tapi dengan cara yang berbeda. Reaksi yang paling populer yaitu campuran antara vinegar dan baking soda serta kombinasi antara dry ice dengan air.

- Pertandingan E Car yang diselenggarakan di Melbourne, 2001

Pertandingan ini diikuti oleh banyak peserta, salah satunya adalah dengan sel elektrokimia, dengan larutan sulfuric acid dan potasium dikromat serta seng sebagai elektrodanya. Mobil ini digerakkan dengan motor dimana tenaga penggerakannya adalah sel elektrokimia ini, dan mobil akan berhenti seiring dengan habisnya reaktan.



Gambar 2. 1 Mobil energi kimia tim Sydney University (Anonim, 2005)

- Pertandingan *E Car* yang diselenggarakan di Adelaide pada tahun 2002.

Rancangan E car yang menarik ialah reaksi kimia dengan menghasilkan gas under pressure. Tekanan dilepaskan melalui oscillating piston dan cylinder driving dari flywheel yang kemudian menjadi "driving wheel " pada mobil

tersebut. Pressure vessel, oscilating piston serta cylinder dan flywheel diperoleh dari mesin mainan. Mobil tersebut berhenti karena berkurangnya reagent.

- Pertandingan *E Car* yang diselenggarakan di Nagoya pada tahun 2002.  
Reaksi kimia yang paling menarik adalah reaksi kimia yang menghasilkan gas under pressure. Tekanan dilepas melalui sebuah plastic engine driving a propeller yang kemudian mendorong mobil tersebut. Mobil tersebut berhenti karena berkurangnya reagent.
- Pertandingan *E Car* yang diselenggarakan di Monash pada tahun 2003.  
Rancangan E Car yang menarik ialah mobil dengan sumber energi dari sel kering (dry cell) buatan sendiri yang menggerakkan motor elektrik. Cell terdiri dari elektroda platinum. Salah satu elektroda dilapisi dengan tembaga yang berasal dari larutannya. Ketika mobil tersebut bergerak, tembaga tersebut terlepas dari elektroda dan kembali ke larutannya. Ketika semua tembaga telah terlepas, motor elektrik tersebut akan bergerak semakin lambat sampai akhirnya berhenti bergerak. Berhentinya mobil dikontrol oleh jumlah tembaga yang melapisi elektroda platinum.
- Pertandingan *E Car* yang diselenggarakan di Adelaide pada tahun 2003.  
Rancangan E Car yang menarik ialah E Car yang digerakan oleh petrol Engine Driving a Propelar. Berhentinya mobil dikontrol oleh jumlah udara yang terbakar dalam proses pembakaran. Proses pembakaran ini dikontrol oleh kantong plastic yang dihubungkan dengan mesin tempat udara masuk.
- Pertandingan E Car yang diselenggarakan di Malaysia pada tahun 2006  
Rancangan E Car yang dilakukan oleh mahasiswa UTM, menggunakan *fuel cell* dengan tebaga penggerak PEMFC dan bahan bakar sodium borohidrid dengan katalis Ru. Mobil ini akan berhenti sejalan dengan berkurangnya reagent yang digunakan.



**Gambar 2. 2 Mobil energi kimia pada perlombaan Chem E-Car Malaysia (FKKSA 2007)**

- Pertandingan E Car yang diselenggarakan di Indonesia pada tahun 2007  
Pertandingan yang pertama kali diadakan di Indonesia, pada bulan Maret 2007, diikuti oleh tiga peserta. Yang menarik adalah mobil energi kimia yang digerakkan dengan bahan bakar urin manusia. Namun mobil ini menghasilkan asap (emisi). Peserta lainnya adalah menggerakkan mobil energi kimia dengan bahan bakar hidrogen yang merupakan hasil hidrolisis dari natrium borohidrid. Berhentinya mobil dikontrol oleh berkurangnya reagent.

## **2.2. SEL BAHAN BAKAR**

### **2.2.1. Sejarah Penemuan Sel Bahan Bakar**

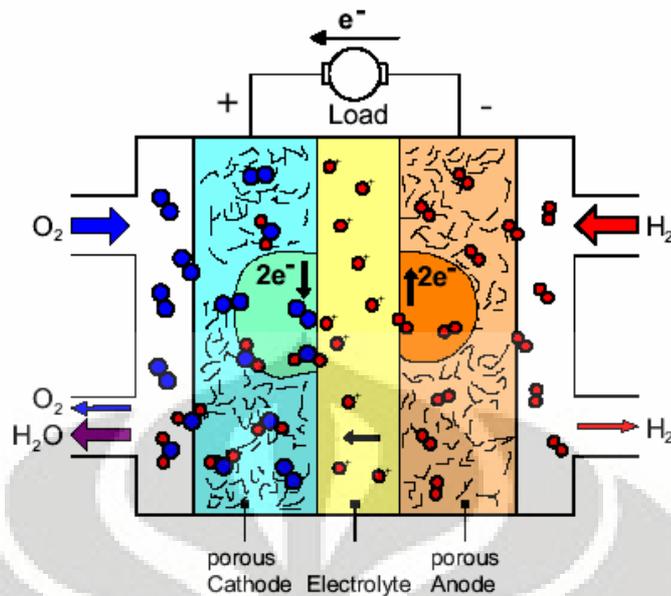
Penemuan sel bahan bakar sebagai sistem konversi energi diawali pada pertengahan abad ke-19. Penemuan sel bahan bakar ini diprakarsai oleh Sir William Grove, namun prinsip kerja sel bahan bakar lebih dahulu diprakarsai oleh Christian Friedrich Schönbein (1829-1868) (Carrette 2001). Sebenarnya perkembangan teknologi sel bahan bakar ini sudah dikenal sejak lama. Namun sumber daya alam seperti bahan bakar fosil masih sangat berlimpah dan murah, sehingga sumber energi yang utama.

Pada awal abad ke-20 konversi energi kimia menjadi energi listrik semakin menjadi perhatian penting sejalan dengan bertambahnya penggunaan energi listrik. Saat ini di seluruh dunia sedang dihadapkan pada permasalahan energi masa depan. Terlebih lagi untuk negara yang sedang berkembang dimana pembangunan yang berjalan cepat dan pertambahan penduduk yang berlipat ganda sehingga membutuhkan dukungan energi yang memadai. Energi tersebut diperlukan untuk pertumbuhan kegiatan industri, transportasi, rumah tangga dan jasa.

Selain itu saat ini sumber energi yang berasal dari bahan bakar fosil semakin tipis persediannya. Sehingga teknologi sel bahan bakar ini terus dikembangkan untuk menggantikan sumber energi utama saat ini. Selain itu masalah polusi, yang berasal dari gas buang kendaraan bermotor berbahan bakar fosil, juga menjadi alasan utama perkembangan teknologi ini. Dan dengan adanya teknologi sel bahan bakar ini diharapkan ketergantungan manusia terhadap bahan bakar fosil akan berkurang.

### **2.2.2. Deskripsi Sel Bahan Bakar**

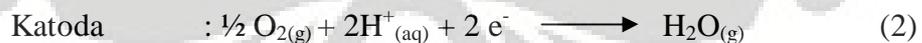
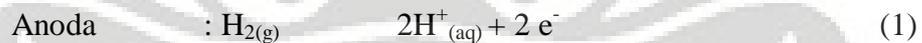
Sel bahan bakar adalah sel elektrokimia yang merubah energi kimia dari suatu reaksi kimia menjadi energi listrik (EG&G 2002). Struktur dasar dari sel bahan bakar ini terdiri dari lapisan elektrolit yang berupa katoda dan anoda. Skematik dari bentuk sel bahan dapat direpresentasikan oleh Gambar 2.3



Gambar 2. 3 Skematik dan cara kerja sel bahan bakar (Carrette 2001)

Pada sel bahan bakar ini, bahan bakar akan masuk ke anoda (elektroda negatif) dan oksidannya (misalnya oksigen) akan masuk ke katoda (elektroda positif). Reaksi kimia akan terjadi pada kedua elektroda tersebut dan akan menghasilkan arus listrik. Anoda merupakan tempat berlangsungnya reaksi oksidasi gas bahan bakar dan katoda sebagai tempat tempat berlangsungnya reaksi reduksi gas oksidator.

Reaksi kimia yang terjadi pada kedua elektroda adalah:



Sel bahan bakar memiliki beberapa keunggulan berdasarkan prinsip kerjanya yaitu (Rifki 2005):

1. Mampu mengkonversi energi kimia langsung menjadi energi listrik dengan efisiensi yang tinggi, bahkan pada kapasitas yang kecil sekalipun (Efisiensi

tidak dibatasi oleh Siklus Carnot seperti pada mesin pembakaran internal / *Internal Combustion Engine, ICE*)

2. Tidak melalui proses pembakaran seperti pada ICE
3. Tidak terdapat komponen bergerak, sehingga keandalan teknisnya dapat disejajarkan dengan baterai
4. Efisiensi naik dengan penurunan temperatur operasi dan efisiensi tersebut lebih baik pada beban rendah
5. Beroperasi tanpa bising dan hampir tanpa polutan
6. Strukturnya *compact*, lebih ringan dan kecil dibanding dengan perangkat sistem pembangkit listrik lain, kecuali baterai
7. Waktu yang diperlukan untuk konstruksi dan instalasi pembangkit listrik lebih pendek dibanding sistem pembangkit konvensional
8. Biaya transmisi lebih rendah karena dapat ditempatkan di berbagai lokasi sesuai kebutuhan.

Selain kelebihan, tentunya sel bahan bakar ini memiliki kekurangan. Adapun kekurangannya adalah sebagai berikut:

1. Harga jual yang relatif lebih tinggi dari listrik yang ada saat ini
2. Belum tersedianya infrastruktur yang memadai, atau biaya pengadaannya tinggi, menyebabkan biaya fabrikasi menjadi mahal.
3. Untuk sel bahan bakar jenis PEMFC, hidrogen tidak tersedia dengan mudah untuk digunakan sebagai bahan bakar serta sulit untuk menyimpan hidrogen dalam wujud cair.

### **2.2.3. Cara Kerja Sel Bahan Bakar**

Seperti yang telah dijabarkan sebelumnya, sel bahan bakar adalah alat yang digunakan untuk membangkitkan energi tanpa adanya pembakaran, tetapi dengan suatu reaksi kimia. Sebagai contoh adalah hidrogen dan oksigen.

Dalam hal ini hidrogen masuk ke dalam sel bahan bakar melalui sisi anoda, dan berpisah menjadi proton dan electron dengan menggunakan katalis (platinum). Elektron dari hidrogen tersebut diarahkan searah untuk menghasilkan energi listrik. Sedangkan protonnya akan melewati membran dan akan masuk ke

dalam sisi katoda. Pada katoda ini, elektron dan proton dari hidrogen akan bertemu kembali, dan bergabung membentuk hidrogen. Setelah itu hidrogen ini akan tercampur dengan oksigen untuk menghasilkan air dan panas. Dengan menaruh masing – masing dari *fuel cell* ini secara sejajar dan bertumpukan kedalam wadah, dimana kemudian membuat sistem operasi disekitar wadah tersebut, maka akan dapat membuat cukup energi untuk memutar motor dimana dapat menjalankan kendaraan.

#### **2.2.4. Macam-Macam Sel Bahan Bakar**

Sampai saat ini telah berkembang beberapa jenis sel bahan bakar (*fuel cell*) , beberapa diantaranya yaitu:

- 1) AFC (Alkaline Fuel Cell)
- 2) PEMFC (Polymer Electrolyte Membran Fuel Cell)
- 3) PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)
- 4) MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)
- 5) SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)
- 6) PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- 7) DAFC (Direct Alcohol Fuel Cell)

Tabel 2. 1 Perbandingan Antar Jenis Sel Bahan Bakar (Nomura 1995)

		Alkaline Electrolyte Fuel Cell (AFC)	Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell (SPEFC)	Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)	Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	
Elektrolit	Elektrolit	Kalium hidroksida	Resin pertukaran kation, membran terhidrasi (Nafion, XUS 13204.10)	Larutan cair (immobilized liquid): asam fosforik	Immobilized liquid molten alkaline (lithium/potassium) carbonate	Ceramic stabilized zirconia	
	Ion Konduktor / Charge Carrier	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>	
	Temperatur Operasi	50 ~ 150 °C	80 ~ 120 °C	190 ~ 220 °C	600 ~ 700 °C	800 ~ 1000 °C	
	Penggunaan	Impregnasi pada suatu matriks seperti asbestos atau kalium titanat	Pada lapisan membrane yang tipis	Impregnasi pada suatu matriks seperti SiC	Impregnasi pada suatu matriks seperti LiAlO <sub>2</sub>	Pada lapisan membrane yang tipis	
Elektroda	Katalis		Basis Ni atau Ag	Basis Pt	Basis Pt	Basis Ni	Porovskites
	Material Pembentuk Elektroda	Anoda	Layar Au atau Ag, pelat Ni berpori, pelat karbon berpori	Pelat karbon, lapisan Niobium, pelat Titanium	Pelat karbon berporus	Paduan sintered Ni-Cr	Ni-ZrO <sub>2</sub> cermets
		Katoda	Idem	Idem	Idem	Pelat oksida Ni berpori	La <sub>1-x</sub> Sr <sub>x</sub> MnO <sub>3</sub> dll
	Lapisan Pelindung Air		Katoda yang dilapiskan polytetrafluor oethylene (PTFE)	Grafrit dan layar PTFE di katoda	Katoda dilapiskan PTFE	Tidak perlu	Tidak perlu
	Reaksi di anoda		H <sub>2</sub> +2OH <sup>-</sup> → 2H <sub>2</sub> O+2e	H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> +2e	H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> +2e	H <sub>2</sub> +CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> → H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub> +2e	H <sub>2</sub> +O <sup>2-</sup> → H <sub>2</sub> O+2e
	Reaksi di katoda		½O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O+2e → 2OH <sup>-</sup>	½O <sub>2</sub> +2H <sup>+</sup> +2e → H <sub>2</sub> O	½O <sub>2</sub> +2H <sup>+</sup> +2e → H <sub>2</sub> O	½O <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> +2e → CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	½O <sub>2</sub> +2e → O <sup>2-</sup>
	Reaksi Total		H <sub>2</sub> +½O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> +½O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> +½O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> +½O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> +½O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O

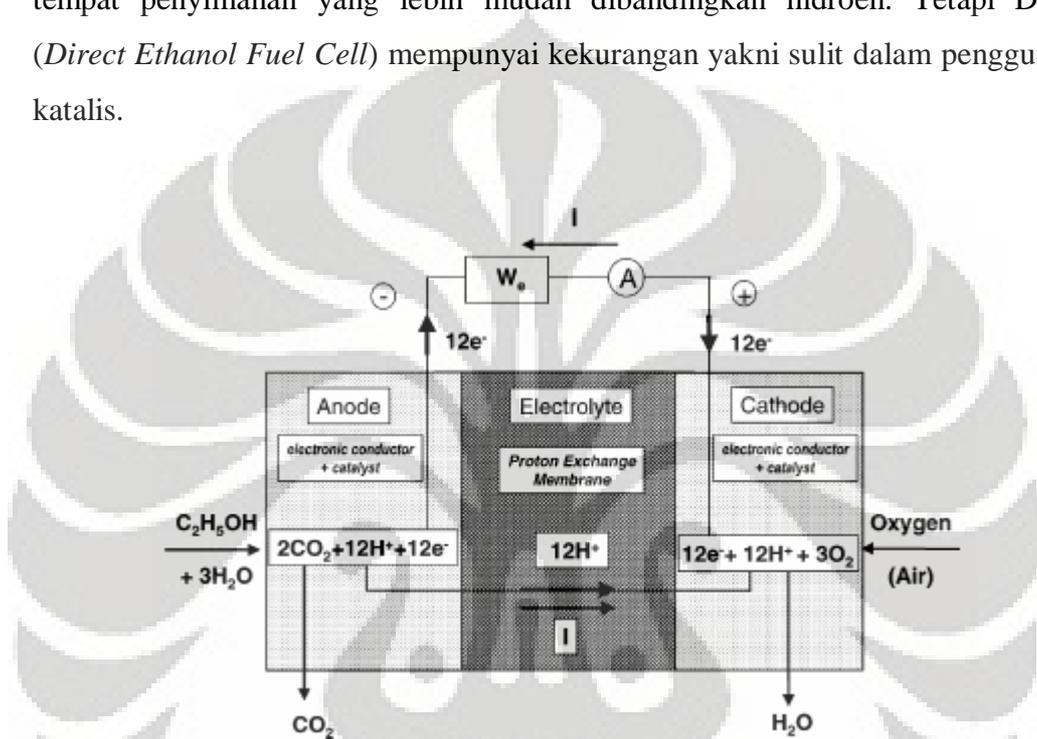
Bahan Bakar (gas anoda)		H2 murni	H2 (kandungan CO2 dibolehkan, tapi CO tidak)	H2 (kandungan CO2 dibolehkan, tapi CO tidak)	H2 and CO (kandungan CO2 diperbolehkan)	H2 and CO (kandungan CO2 diperbolehkan)
Oksidan		O <sub>2</sub> atau udara (kandungan CO <sub>2</sub> diperbolehkan)	O <sub>2</sub> atau udara	Udara	Udara	Udara
Sumber bahan bakar		H2 yang berasal dari hasil samping industri elektrolisis, dekomposisi air (proses Termokimia, elektrolisis)	Gas bumi, turunan Nafta dan metanol	Gas bumi, turunan Nafta dan metanol	Gas bumi, petroleum, batubara dan metanol	Gas bumi, petroleum, batubara dan metanol
Spesi Gas lainnya	CO	--	Meracuni (>10 ppm)	Meracuni (>0.5%)	Bahan bakar	Bahan bakar
	CH <sub>4</sub>	--	Diluents	Diluents	Diluents	Bahan bakar
	CO <sub>2</sub> & H <sub>2</sub> O	Diluent	Diluents	Diluents	Diluents	Diluents
	S sbg (H <sub>2</sub> S & COS)	--	Belum diketahui	meracuni (>50 ppm)	meracuni (>0.5 ppm)	meracuni (>1.0 ppm)
Proses reformasi internal		Tidak dimungkinkan	Tidak dimungkinkan	Tidak dimungkinkan	Mungkin	Mungkin
Reformasi eksternal untuk CH <sub>4</sub>		--	Ya	Ya	Tidak	Tidak
Manajemen air hasil produksi		--	Evaporatif	Evaporatif	Dalam bentuk gas buang	Dalam bentuk gas buang
Manajemen panas produksi		--	Gas proses + medium pendingin	Gas proses + medium pendingin	Internal reforming + process gas	Internal reforming + process gas
Densitas energi per unit sel	Hidrogen / oksigen	400 x 0.9	600 x 0.8	--	--	--
	Hidrogen / udara Tereformasi	150 x 0.8 (H <sub>2</sub> / udara)	400 x 0.7	240 x 0.7	150 x 0.8	300 x 0.7
Efisiensi sistem (HHV)		~60%	~50%	35~45%	45~60%	50% ~
Tahap pengembangan		10kW pada penggunaan khusus	10kW pada penggunaan khusus	4.5MW: Field test 11MW: under field test	25kW class: stack test 100kW class: under stack test	3kW class: stack test 25kW class: under field test

Keuntungan	Arus listrik, densitas energi, dan efisiensi tinggi	Arus listrik dan densitas energi tinggi, waktu operasi lama, operasi pada temperature ruang	Secara teknologi maju, NOx rendah dan tidak ada Sox	Efisiensi tinggi, proses bahan bakar internal, tidak perlu katalis logam mulia	Efisiensi tinggi, bahan bakar internal, high grade waste heat, waktu operasi lama
Kekurangan	Tidak toleran terhadap CO2	Tidak toleran CO, manajemen air, penggunaan katalis logam mulia	Efisiensi rendah, waktu operasi terbatas, katalis logam mulia	Elektrolit tidak stabil, waktu operasi pendek, CO2 recycling	Temperatur operasi tinggi, konduktivitas ion relatif rendah
Penerapan Teknologi	Energi ruang angkasa, militer	Transportasi, kogenerasi	Industri pembangkit listrik	Produksi listrik, kogenerasi	Produksi listrik, kogenerasi



### 2.3. DIRECT ETHANOL FUEL CELL (DEFC)

Hasil oksidasi dari etanol menghasilkan 12 elektron setiap molekul etanolnya yang potensial untuk dijadikan sumber energi. Etanol sendiri memiliki densitas energi volumetrik sebesar  $21 \text{ MJ L}^{-1}$  sedangkan energi dari gasolin sebesar  $31 \text{ MJ L}^{-1}$  (Mann 2006). Etanol sebagai bahan bakar cair mempunyai tempat penyimpanan yang lebih mudah dibandingkan hidrogen. Tetapi DEFC (*Direct Ethanol Fuel Cell*) mempunyai kekurangan yakni sulit dalam penggunaan katalis.



Gambar 2. 4 Skematik dari DEFC (*Direct Ethanol Fuel Cell*) (Lamy, 2002)

Pada Gambar 2. 4 dapat dilihat skematik dari perjalanan molekul etanol hingga menghasilkan energi. Campuran etanol dengan air akan masuk melalui anoda. Sedangkan oksigen (udara) akan masuk melalui katoda. Sebelum memasuki membran (Nafion) terjadi pemisahan antara elektron dan proton. Proton akan memasuki membran, sedangkan elektron akan menghasilkan energi. Dan kemudian, elektron serta proton akan bertemu kembali di katoda dan ditambah dengan oksigen, maka akan dihasilkan air sebagai hasil reaksinya.

**Tabel 2. 2 Potensial listrik dari reaksi oksidasi etanol (Mann 2006)**

	Stable Desorbed Products					
	H <sub>2</sub> O + CH <sub>3</sub> CHO	H <sub>2</sub> O + CH <sub>3</sub> COOH	H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> + CH <sub>3</sub> OH	2H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> + CH <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> + HCOOH	3H <sub>2</sub> O + 2CO <sub>2</sub>
$\Delta G^0$ (kJ)	-191	-413	-622	-803	-1044	-1324
n	2	4	6	8	10	12
$E^0$ (V)	0,99	1,07	1,07	1,04	1,08	1,14

### 2.3.1. Efisiensi Termodinamika Etanol

Reaksi oksidasi dari etanol yang terjadi di anoda adalah



Reaksi ini mempunyai nilai potensial  $E^0_4 = 0,084 \text{ V}$  (Lamy 2002). Perhitungan nilai tersebut didapatkan dari energi standar pembentukannya (Lamy 2002):

$$-\Delta G^0_4 = 2\Delta G^f_{\text{CO}_2} - \Delta G^f_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} - 3\Delta G^f_{\text{H}_2\text{O}} \quad \text{.....2. 1}$$

$$-\Delta G^0_4 \text{ (kJ / mol)} = -2 \times 394,4 + 174,8 + 3 \times 237,1 = 97,3$$

$$-E^0_4 = -\Delta G^0_4 / 12F = 97,3 \cdot 10^3 / (12 \times 96485) = 0,084 \text{ V} \quad \text{.....2. 2}$$

Hasil dari reaksi ini adalah karbon dioksida yang harus dipisahkan dari anoda tersebut. Proton-proton yang selalu terbentuk akan bermigrasi melewati PEM (proton exchange membrane) dan mencapai katoda. Adapun reaksinya



Dan potensial pada katodanya adalah:

$$-E^0_5 = -\Delta G^0_5 / 2F = 237,1 \cdot 10^3 / (2 \times 96485) = 1,229 \text{ V}$$

Atau reaksi pembakaran etanol keseluruhannya adalah:



Dengan

$$\Delta G^0 \text{ (kJ / mol)} = 6\Delta G^0_5 - \Delta G^0_4 = -1325 \text{ (kJ / mol)}$$

Maka energi standar equilibriumnya adalah:

$$E_{eq}^{\circ} (V) = -\frac{\Delta G^{\circ}}{nF} = \frac{1325 \times 10^3}{12 \times 96485}$$

$$= E_2^{\circ} - E_1^{\circ} = 1.229 - 0.084 = 1.145 \quad \text{.....2. 3}$$

Dan diharapkan sistem ini mempunyai nilai efisiensi sebesar:

$$\varepsilon_{rev} = \frac{\Delta G^{\circ}}{\Delta H^{\circ}} = \frac{1325}{1367} = 0,969 \quad \text{.....2. 4}$$

Data termodinamika oksidasi elektrokimia (kondisi standar)

**Tabel 2. 3 Data termodinamika oksidasi elektrokimia (kondisi standar) (Lamy 2002)**

Bahan Bakar	$\Delta G^{\circ}_f$ (kJ/mol)	$E^{\circ}_f$ (V vs SHE)	$\Delta G^{\circ}$ (kJ/mol)	$E^{\circ}_{sel}$ (V)	$W_e$ (kWh/kg)	$\Delta H^{\circ}$ (kJ/mol)	$\eta_{rev}$
CH <sub>3</sub> OH	-9.3	0.016	-702	1.213	6.09	-726	0.967
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	-97.3	0.084	-1325	1.145	8.00	-1367	0.969
C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH	-281	0.162	-1853	1.067	8.58	-2021	0.916
C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH	-464	0.200	-2381	1.029	8.93	-2676	0.890

Berdasarkan Tabel 2. 3 alkohol mempunyai densitas energi,  $W_e$ , yang sangat baik dimana nilainya tidak jauh berbeda dengan hidrokarbon dan gasolin (10-11 kWh/kg) (Lamy 2002), sehingga bahan bakar alkohol bisa menjadi energi alternatif untuk kendaraan listrik.

Selain itu, alasan bahan bakar alkohol khususnya etanol dapat dijadikan energi alternatif untuk kendaraan adalah berdasarkan efisiensinya. Perhitungan efisiensi etanol dapat dilihat pada penjelasan sebelumnya. Sedangkan pada mobil atau kendaraan pada umumnya yang menggunakan mesin pembakaran internal, perhitungan efisiensinya dapat didefinisikan dengan siklus Carnot sebagai efisiensi maksimum,  $\varepsilon_r^{thermal}$  sebagai berikut (Carrette 2001):

$$\varepsilon_r^{thermal} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \text{.....2. 5}$$

dimana  $T_1$  adalah temperatur (dalam Kelvin) maksimum dari fluida di dalam mesin dan  $T_2$  (dalam Kelvin) adalah panas yang dilepaskan oleh fluida. Nilai  $T_2$  yang terendah tidak pernah kecil, biasanya lebih besar dari 290 K. Untuk operasi turbin uap yang bekerja pada suhu 400°C, dengan air yang dikeluarkan di

kondensator bertemperatur 50 °C, maka efisiensi Carnotnya adalah (Larminie 2000):

$$\varepsilon = \frac{(673 - 323) K}{673 K} = 0,52 = 52\%$$

*Internal combustion engine* memiliki efisiensi yang lebih kecil dibandingkan dengan *fuel cell* karena energi termal yang dihasilkan oleh *internal combustion engine* tidak langsung dikonversikan menjadi energi listrik tetapi harus dikonversikan dahulu menjadi energi mekanik. Karena hal inilah maka kerugian-kerugian yang terjadi pada *internal combustion engine* lebih besar dari pada *fuel cell*.

Sehingga jika dibandingkan antara *fuel cell* dengan mesin pembakaran internal, terdapat perbedaan efisiensi yang cukup besar, yakni 96,7 % dengan 52%. Dengan perbandingan ini, maka *fuel cell* dapat dijadikan suatu alternatif dalam dunia transportasi pada khususnya di masa yang akan datang.

### **2.3.2. Daya, Energi Mekanis, dan Gaya Hambatan pada Mobil Kimia dengan DEFC**

#### *2.3.2.1. Daya yang Dihasilkan Dari DEFC*

Daya yang dihasilkan dari suatu *fuel cell* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = I \cdot V \quad \text{.....2. 6}$$

dengan

P = daya (Watt, W)

I = arus (Ampere, A)

V = tegangan (Volt, V)

Dalam perkembangannya, DEFC sudah dilakukan berbagai penelitian. Dalam penelitian-penelitian tersebut, didapatkan berbagai hasil yang berhubungan dengan daya yang dihasilkan. Dengan menggunakan 1 M etanol yang bertekanan di bawah 4 bar (absolut), diumpankan ke dalam anoda dan oksigen bertekanan di bawah 5,5 bar ke dalam katoda, dan temperatur 145 °C, dihasilkan daya sebesar

110 mW/cm<sup>2</sup> yang berasal dari tegangan dan arus masing-masing 0,32 V dan 350 mA/cm<sup>2</sup> (Lamy 2002). Sehingga besarnya daya total yang dihasilkan adalah *power density* yang dikalikan dengan luas area MEA yang dibentuk.

### 2.3.2.2. Energi Mekanis

Energi mekanis adalah energi yang dibutuhkan oleh suatu benda untuk dapat berpindah dari titik satu ke titik lainnya. Energi mekanis dapat dirumuskan sebagai berikut

$$W = F \cdot \Delta s \quad \text{.....2. 7}$$

Atau dapat juga dituliskan dalam bentuk lainnya:

$$W = P \cdot t = I \cdot V \cdot t \quad \text{.....2. 8}$$

Sehingga

$$P \cdot t = F \cdot \Delta s$$

$$P_{\min} = F_{\min} \times v \quad \text{.....2. 9}$$

Dimana nilai gaya minimal yang dibutuhkan hingga mobil bergerak ( $F_{\min}$ ) dapat dihitung dengan persamaan:

$$F_{\min} = f_g = \mu_g \cdot m \cdot g \quad \text{.....2. 10}$$

Dimana

W = energi (J)

$\Delta s$  = selisih jarak tempuh (m)

t = waktu tempuh (s)

F = gaya (N)

$\mu_g$  = koefisien gesek

g = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

v = kecepatan mobil (m/s)

m = massa (kg)

P = daya (Watt)

V = tegangan (V)

I = arus (A)

Berdasarkan data pada jurnal Lamy 2002, besarnya energi spesifik dari etanol adalah 8 kWh/kg. Artinya dibutuhkan energi sebesar 8 kWh dari etanol tersebut untuk menggerakkan 1 kg beban. Maka daya yang dibutuhkan oleh mobil energi kimia ini agar dapat berjalan bergantung kepada kecepatan serta massa pada mobil tersebut. Dari daya minimum ini, maka dapat dihitung luas area aktif yang diperlukan sehingga bisa mencapai daya yang dibutuhkan.

### 2.3.2.3. Gaya Hambatan (Drag Force)

Gaya hambatan atau drag force yang dialami oleh suatu benda, dipengaruhi oleh beberapa faktor. Dan hal ini dapat dilihat melalui persamaan berikut:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_d \hat{v} \quad \dots 2.11$$

Dimana

$F_d$  = gaya hambatan (drag force), N

$\rho$  = densitas fluida, kg/m<sup>3</sup>

$v$  = kecepatan suatu benda, m/s

$A$  = luas area, m<sup>2</sup>

$C_d$  = koefisien hambatan

Sehingga gaya hambatan ini akan dipengaruhi oleh kecepatan suatu benda yang bergerak, serta luas area dari benda yang “menabrak” fluidanya, densitas fluida tersebut, serta bentuk dari benda tersebut. Untuk sebuah mobil, koefisien hambatannya berkisar antara 0,25 sampai 0,45 (Wikipedia 2007). Gaya hambatan ini akan timbul jika kecepatan benda yang bergerak cukup tinggi. Mobil yang melaju dengan kecepatan 80 km/j akan memiliki gaya hambatan hanya sebesar 10 hp. Sedangkan mobil yang berkecepatan 160 km/j akan memiliki gaya hambatan sebesar 80 hp. Jadi gaya hambatan akan terasa jika kecepatan mobil ini tinggi.

Hal yang paling berpengaruh terhadap gaya hambatan ini adalah kecepatan dan luas area mobil. Sebagai contoh adalah mobil pada formula 1 (F1), mobil tersebut mempunyai kecepatan mencapai 300 km/j, sehingga secara perhitungan maka gaya hambatannya akan semakin besar. Oleh karena itu dibuat model yang menghasilkan luas area mobil yang ”menabrak” udara sekecil mungkin. Ini akan

membuat gaya hambatan menjadi lebih kecil. Dengan kecepatan yang sama antara truk dengan mobil F1, maka gaya hambatan pada truk akan jauh lebih besar daripada mobil F1. Hal ini dikarenakan luas area yang berkontak dengan udara pada truk jauh lebih besar daripada mobil F1 (dapat dilihat pada gambar).



**Gambar 2. 5 Mobil F1 (kiri) dan truk (kanan)**

Namun pada prototipe mobil energi kimia, gaya hambatan tidaklah berpengaruh cukup besar. Hal ini dikarenakan kecepatan yang dihasilkan oleh prototipe mobil energi kimia ini tidaklah terlalu besar. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, kecepatan dari mobil energi kimia ini sebesar 2 cm/s (Utari 2006). Sehingga nilai gaya hambatan dengan udara tidak akan besar. Namun aspek bentuk dari mobil ini perlu diperhatikan. Bentuk mobil yang menyerupai mobil F1, tentunya akan lebih baik. Aspek ini akan sangat diperhatikan untuk membuat mobil yang berkecepatan tinggi.

### **2.3.3. Struktur DEFC**

Struktur dalam satu sel DEFC tidak jauh berbeda dengan struktur sel bahan bakar lainnya seperti DMFC. Struktur DEFC terdiri dari beberapa bagian penting, yaitu *cell stack* yang terdiri atas pelat bipolar (*bipolar plate*) dan pelat penutup (*end plate*). Pelat bipolar (elektroda) yang fabrikasinya dibuat lajur aliran (*flowfield*) untuk gas atau cairan bahan bakar; *membrane electrode assembly* (MEA) yang terdiri dari lapisan difusi gas (*gas diffusion layer*, GDL) atau sering juga disebut *porous gas-backing layer*, lapisan katalis (*active layer*), dan membran; dan yang terakhir adalah pelat penutup (*endplate*).

### 2.3.3.1. Pelat Bipolar (*Bipolar Plate*)

Kebanyakan dari sel bahan bakar, terdiri dari suatu struktur pelat (*stack structure*) yang tersusun atas beberapa pelat bipolar, yang juga sering disebut pelat pemisah atau pelat lajur aliran (*flow field plate*). Pelat bipolar ini memiliki fungsi sebagai pengambil arus (*current collector*) dan menyediakan lajur lairan (*flowfield*) bagi reaktan. Pelat dibuat dari suatu material ringan, kuat, *gas impermeable* dan mampu menghantarkan elektron. Adapun contoh dari material pelat bipolar ini adalah grafit, logam (stainless steel dan aluminium), pelat komposit. Namun yang sering digunakan adalah grafit padat. Hal ini dikarenakan grafit memiliki densitas yang relatif lebih ringan, konduktivitas listriknya baik, mudah dibentuk (fabrikasi), dan kestabilan kimiawi yang tinggi (non-korosif) (Larminie 2000, Kinoshita 2001, Mennola 2000)

Adapun fungsi yang pertama dari pelat bipolar adalah pengambil arus (*current collector*). Elektron yang diproduksi oleh oksidasi hidrogen harus dilewatkan melalui anoda, *backing layer* dan *plate* sebelum mereka dapat keluar dari sel itu dan elektron mengalir sepanjang suatu sirkuit luar dan masuk kembali ke dalam *fuel cell* di lempeng katode.

Sedangkan fungsi yang kedua adalah menyediakan suatu bidang aliran (*flow field*) untuk reaktan. Sisi pelat yang dekat dengan *backing layer* berisi saluran yang dibentuk secara teliti ke dalam pelat itu. Saluran digunakan untuk membawa komponen reaktan gas dari tempat masuk ke dalam *fuel cell* hingga sampai pada tempat keluarnya reaktan tersebut. Pola dari daerah aliran di dalam *plate* yaitu lebar dan kedalaman saluran mempunyai suatu dampak besar atas efektivitas distribusi komponen reaktan gas yang melewati *active area* dari pada MEA. Desain bidang aliran juga mempengaruhi persediaan air pada membran dan penghilangan air dari katode.

Ada beberapa tipe desain dari bidang aliran (*flow field*) (Li 2005) ini, yakni:

#### 1. Bidang aliran jenis pin

Pada desain ini, pelat katoda dan anoda mempunyai susunan pin yang bulat atau kotak dan menonjol keluar pelat. Gas reaktan mengalir melalui lekukan yang dibentuk oleh pin yang biasanya disusun secara berseri ataupun paralel.

Desain ini dibuat untuk reaktan dengan penurunan tekanan yang rendah. Kekurangan dari desain ini adalah dapat menyebabkan distribusi reaktan yang tidak merata, sehingga tidak cukup untuk memproduksi air dan menghasilkan performa sel yang kurang baik.

2. Bidang aliran paralel

Terdiri dari saluran yang disusun paralel dan terhubung antara masukan dan keluaannya. Voltase yang dihasilkan tidak stabil dan rendah jika sudah digunakan dalam jangka waktu tertentu. Air pun sering berkumpul di dalam saluran dimana tidak ada atau sedikit gas yang lewat, sehingga distribusi aliran gas menjadi tidak baik. Beban yang melewati *fuel cell* ketika pelat anoda dan katoda dipasang paralel tidak seragam. Adanya variasi dalam area kontak menyebabkan kerusakan dari komponen selnya.

3. Bidang aliran serpentine

Desain ini mendorong reaktan untuk mengalir memasuki area aktif, untuk mengeliminasi masalah aliran yang stagnan. Adanya perbedaan tekanan selama perjalanan menyebabkan adanya gradien konsentrasi dari inlet ke outlet. Adanya tekanan yang hilang membantu dalam mengubah air menjadi uap. Tekanan total yang hilang selama perjalanan akan meningkatkan jumlah uap air yang akan dibawa dengan dialirkannya sejumlah gas reaktan.

4. Bidang aliran terintegrasi

Reaktan dan bidang aliran pendingin berada dalam satu pelat permukaan yang sama. Bidang aliran gas melewati are aktif di MEA dan bidang aliran pendingin mengelilingi aliran gas. Distribusi temperatur tidak merata sepanjang permukaan *fuel cell*.

5. Bidang aliran terinterdigitasi

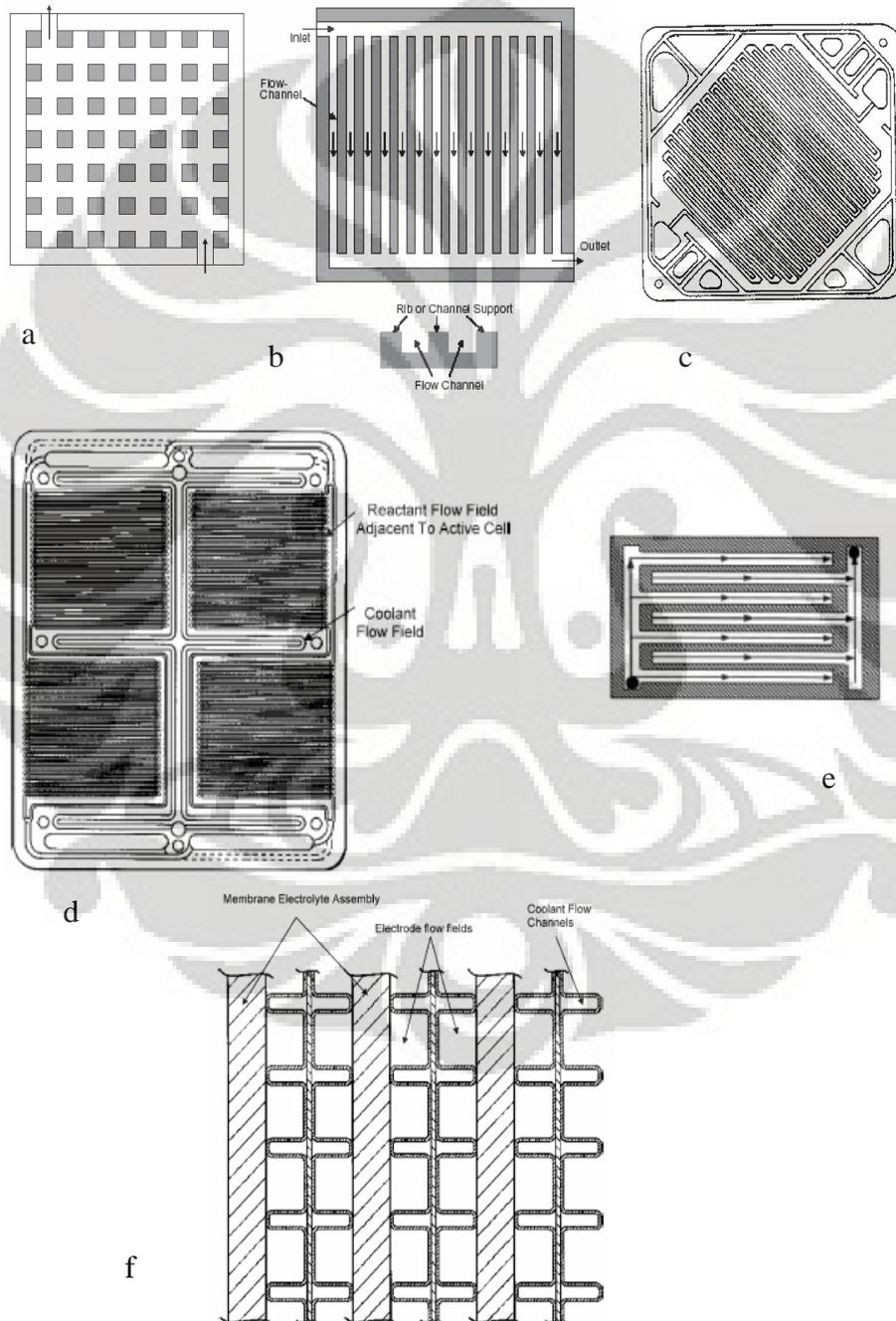
Aliran reaktan adalah paralel dengan permukaan elektroda. Transfer massa terbatas, sehingga menyulitkan untuk menghilangkan air yang terjebak di dalam pori-pori.

6. Desain flow-field yang terbuat dari lembaran logam

Logam yang digunakan adalah titanium, crom, stainless steel, dll. Lembaran logam yang tipis dan ringan, sehingga lembaran logam yang digunakan harus

ditekan hingga tipis. Aliran cairan pendingin berada di dalam, dan reaktan berada di permukaan luar.

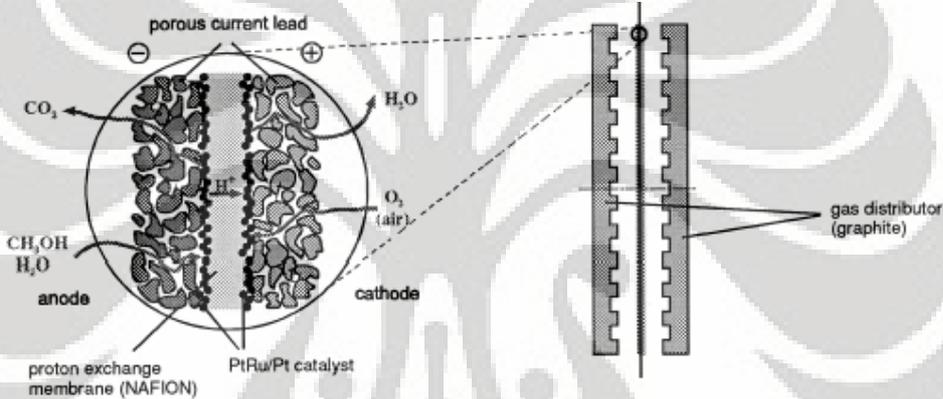
Dari keenam jenis bidang aliran tersebut, jenis bidang aliran serpentine adalah yang terbaik, karena mempunyai waktu kontak yang lebih lama antara reaktan dengan katalis, sehingga dapat menghasilkan arus dan voltase yang lebih baik.



Gambar 2. 6 Berbagai jenis bidang aliran: a. jenis pin, b. paralel, c. serpentine, d. terintegrasi, e. terinterdigitasi, f. terbuat dari lembaran logam (Li, 2005)

### 2.3.3.2. MEA (Membrane Electrode Assembly)

Suatu MEA terdiri dari sebuah membran dan dua buah elektroda, yang masing-masing berada pada sisi-sisinya. Elektroda berisi dengan partikel-partikel katalis. Peranan katalis (elektrokatalis) sangat penting dalam sel bahan bakar (*fuel cell*) bertemperatur rendah. Partikel-partikel katalis harus dapat berkontak dengan konduktor elektronik dan protonik. Secara tradisional, MEA telah dikembangkan dan dibuat dengan penggabungan secara impregnasi antara lapisan-berpori difusi gas (porous gas diffusion layer, GDL) dengan katalis. Susunan MEA ini disebut dengan MEA dengan lima lapisan (GDL-katalis anoda-membran-katalis katoda-GDL). Sedangkan untuk MEA tiga lapis, GDL tidak dipergunakan (Mennola 2000).



Gambar 2. 7 Struktur MEA 5 lapis (Dohle 2000)

#### A. Lapisan Difusi Gas (*Gas Diffusion Layer, GDL*)

Lapisan ini juga biasa disebut dengan istilah *backing layer* atau *porous gas-backing layer*. Suatu material GDL harus bersifat porous dan konduktif terhadap listrik. Material yang umum digunakan adalah kain karbon (*carbon cloth*) dan kertas karbon (*carbon paper*). GDL merupakan lapisan kontak listrik antara elektrokatalis dengan pelat lajur aliran bahan bakar. Dengan adanya GDL menyebabkan reaktan berdifusi ke lapisan katalis. Pada saat yang bersamaan, GDL juga harus melepaskan air yang terbentuk di katoda ke lajur gas. Suatu GDL dikarakterisasikan dengan sifat fisiknya: ketebalan, adanya area hidrofobik dan hidrofilik, resistansi sifat aliran dan listrik (*dry resistance to flow and electric properties*). Resistansi terhadap aliran dalam kondisi kering harus diminimisasi, sedangkan konduktivitas listriknya dimaksimumkan. Atas dasar tersebut, semakin

tipis GDL maka semakin bagus kinerja dari GDL tersebut. Ketebalan GDL secara komersial yaitu antara 300-400  $\mu\text{m}$  (Mennola 2000).

## **B. Elektrokatalis (Katalis)**

Bagian ini disebut juga dengan istilah *active layer*, karena di sini terjadi proses oksidasi-reduksi dari reaktan. Seperti sel bahan bakar pada umumnya, elektrokatalis DEFC terdiri atas katalis anoda dan katalis katoda. Katalis yang digunakan untuk kedua elektroda tersebut pada umumnya menggunakan senyawa logam transisi, biasanya menggunakan senyawa berbasis logam platina (Pt) berpenyangga (*supported*) atom karbon.

### **B.1 Katalis Anoda**

Pada anoda reaksi yang terjadi adalah reaksi elektro-oksidasi etanol untuk memproduksi proton dan elektron. Meskipun reaksi tersebut mempunyai harga energi bebas Gibbs yang negatif (reaksi dapat berlangsung secara termodinamika) namun secara kinetika, reaksi tersebut berjalan sangat lambat. Oleh karena itu, digunakan katalis untuk meningkatkan kinetika reaksi.

Katalis yang digunakan untuk proses oksidasi etanol pada umumnya sama seperti tipe sel bahan lainnya yaitu senyawa berbasis logam platina (Pt). Namun Pt sangat mahal harganya dan mudah “teracuni” oleh CO. CO yang teradsorpsi (“meracuni”) di Pt menjadi jenuh dan ruang aktif semakin kecil. Oleh karena itu, diperlukan logam kedua atau ketiga untuk bekerja sama dalam mengoksidasi CO. Berdasarkan hal tersebut, maka pengembangan katalis anoda merupakan hal yang sangat penting dalam meningkatkan kinerja dari DEFC. Perkembangan teknologi katalis saat ini adalah campuran Pt dengan logam-logam lainnya, seperti: Ru, Re, Rh, Os, Mo, Pb, Bi, dan Sn. Kombinasi biner, terner, kuarterner dengan Pt membentuk katalis paduan logam seperti: PtRu, PtSn, PtRh, PtRe, PtRuOs, PtRuRh, PtRuIr, PtRuWO<sub>2</sub>, PtRuSn dan PtRuSnW (Mennola 2000).

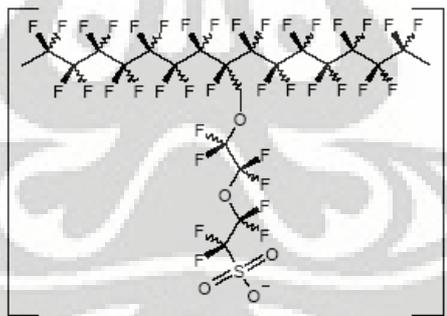
### **B.2 Katalis Katoda**

Pada katoda reaksi yang terjadi adalah reaksi reduksi oksigen (*Oxygen Reduction Reaction*, ORR). Untuk katalis katoda, katalis yang digunakan pada umumnya adalah katalis Pt dengan menggunakan penyangga (*supporter*) karbon

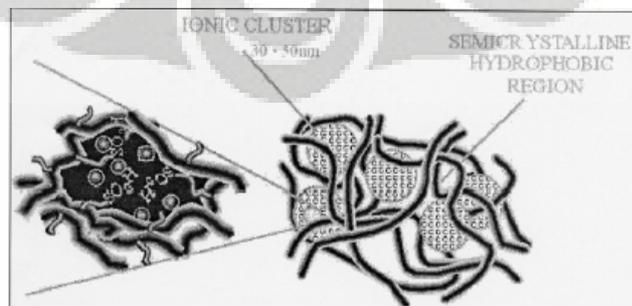
Vulcan XC-72R. Komposisi logam terhadap karbon katalis ini adalah 60% Pt dan 40% karbon.

### C. Membran (Elektrolit)

Suatu *proton exchange membrane* dibuat dari fluoropolimer tersulfonasi. Membran yang umum dipakai pada DAFC (dan juga pada DEFC) hingga sekarang adalah Nafion<sup>®</sup> produk dari DuPont. Namun, perusahaan lain seperti Dow, Flemion<sup>®</sup> dari Asahi Glass Co, Aciplex<sup>®</sup> dari Asahi Chem Co Ltd., dan Gore juga memproduksi elektrolit yang sejenis (Rifki 2005). Bahan dasar dari polimer ini adalah etilen yang terflorinasi dengan mensubstitusikan semua atom hidrogen dengan fluorine untuk menghasilkan *polytetrafluoroethylene* (PTFE). ICI menjual PTFE dengan nama dagang Teflon<sup>®</sup> dan salah satu tujuan utama dari sifat fisiknya adalah kekuatan ikatan antara karbon dan fluorin yang akan membuat ketahanan yang tinggi terhadap reaksi kimia (Larminie 2000). Hal ini juga memberikan sifat hidrofobik yang berguna bagi sel bahan bakar untuk mengendalikan air hasil produksi keluar dari sistem sel bahan bakar. Dalam aplikasinya sebagai membran sel bahan bakar, PTFE disulfonasi dengan HSO<sub>3</sub> seperti gambar berikut ini:



Gambar 2. 8 Struktur PTFE backbone tersulfonasi (Quadt 2004)



Gambar 2. 9 Klaster ion PTFE tersulfonasi (Reeve 2002)

Ikatan-ikatan sisi ini ( $\text{HSO}_3^-$ ) aktif dan bersifat hidrofilik (menyukai air), dengan demikian air akan terabsorb dan berat polimer bisa meningkat 50%. Proton-proton dapat melalui polimer pada saat air membentuk asam lemah dengan group  $\text{SO}_3^-$ . Untuk memperoleh konduktivitas sekitar  $0.1 \text{ S.cm}^{-1}$ , maka 20-25 molekul air harus terabsorb dengan setiap sisi rantai  $\text{SO}_3^-$ . Kriteria untuk membran sel bahan bakar adalah (Quadt 2004, Larminie 2000).

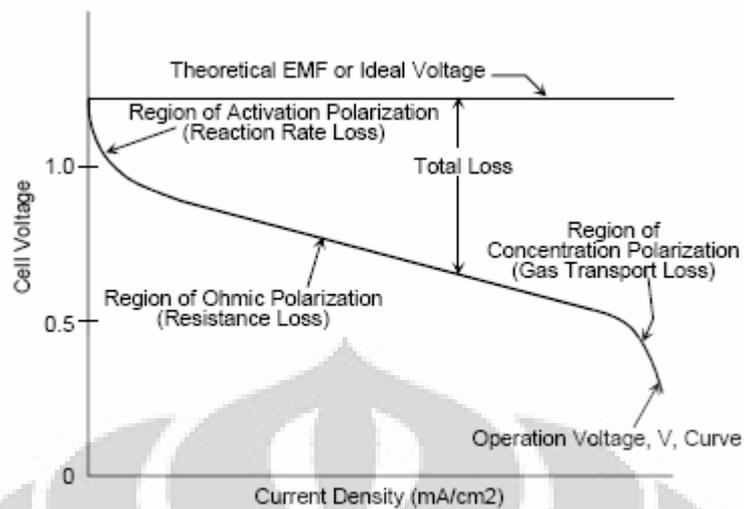
1. Memiliki ketahanan kimia yang tinggi
2. Kuat secara mekanis, untuk memperoleh lapisan tipis (hingga  $50\mu\text{m}$ )
3. Bersifat asam
4. Dapat mengabsorb sejumlah besar air
5. Konduktor proton yang baik (jika terhidrasi maka ion  $\text{H}^+$  dapat bergerak dengan bebas dalam material)

#### 2.3.3.3. Pelat Penutup (*End Plate*)

Pelat penutup pada sel DEFC berjumlah dua buah yang terdapat pada sisi anoda dan sisi katoda. Fungsi dari pelat ini adalah sebagai penjepit kedua elektroda atau mengencangkan sel DEFC. Ukuran dari pelat ini sama dengan pelat bipolar. Bedanya adalah pelat ini tidak memiliki *active area*. Diantara pelat penutup dan pelat bipolar diletakkan pemanas (*heating pad*) untuk mengatur suhu reaksi pada DEFC.

## 2.4 PERFORMA AKTUAL

Suatu *fuel cell* pada idealnya memiliki voltase yang cenderung konstan pada suatu nilai tertentu seiring dengan peningkatan densitas arusnya. Namun pada kenyataannya, nilai voltase suatu *fuel cell* akan turun seiring peningkatan densitas arusnya tersebut, seperti yang terlihat pada Gambar 2. 10. Pada kurva polarisasi aktual tersebut dapat dibagi menjadi tiga bagian. Bagian pertama yaitu polarisasi aktivasi ( $\eta_{\text{act}}$ ), polarisasi ohmic ( $\eta_{\text{ohm}}$ ), dan polarisasi konsentrasi ( $\eta_{\text{conc}}$ ).



Gambar 2. 10 Karakter ideal dan aktual *fuel cell* (EG&G, 2002)

Dari kurva tersebut yang telah dibagi menjadi tiga bagian, maka masing-masing wilayah memiliki persamaan grafiknya masing-masing.

1. Polarisasi aktivasi

*Loss* pada polarisasi aktivasi terjadi pada densitas arus yang rendah. Adanya aktivasi yang hilang menunjukkan peningkatan arus.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad \text{.....2. 12}$$

Sehingga dari persamaan tersebut kita bisa mendapatkan nilai *exchange current density* ( $i_0$ ). Nilai *exchange current density* ( $i_0$ ) inilah yang akan menunjukkan performa aktivasi dari aktivasi katalis pada fuelcell.

2. Polarisasi ohmic

Pada polarisasi ohmic menunjukkan adanya peningkatan arus dimana hambatan sel tetap, dan pada kurva ditunjukkan pada daerah yang agak landai dan dapat membentuk suatu garis yang linier.

$$\eta_{ohm} = i.R \quad \text{.....2. 13}$$

3. Polarisasi konsentrasi

Polarisasi konsentrasi menunjukkan daerah dimana reaktan sulit mengalir di dalam sel, namun tetap terjadi peningkatan densitas arus, sehingga tegangan yang dihasilkan akan turun secara drastis.

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad \text{.....2. 14}$$

Dari persamaan tersebut bisa didapatkan nilai batas arus yang dihasilkan oleh fuelcell tersebut, karena akan terjadi arus maksimal yang dihasilkan oleh *fuel cell*.

Keterangan:

$\eta = V_{\text{ideal}} - V_{\text{actual}} =$  selisih antara tegangan ideal dengan aktual (V)

T = suhu (K)

$\alpha =$  koefisien transfer elektron

n = jumlah elektron

F = nilai faraday = 96,5 C

R = hambatan (ohm,  $\Omega$ )

i = densitas arus ( $A/cm^2$ )

$i_0 =$  exchange current density ( $A/cm^2$ )

$i_L =$  batas densitas arus ( $A/cm^2$ )



## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1. SKEMA PENELITIAN**

Secara umum, penelitian ini dapat dibagi menjadi lima tahapan besar yaitu:

1. Merancang mobil energi kimia

Pada proses perancangan ini, tahapan yang terjadi adalah menentukan desain dari *cell stack*, menentukan luasan MEA yang digunakan, serta komposisi dari bahan bakar etanol yang akan digunakan. Dan hal yang paling utama adalah menentukan besarnya daya yang ingin dihasilkan dari mobil kimia ini.

2. Pengadaan dan pembelian barang

Tahapan ini adalah membeli barang-barang yang dibutuhkan dalam proses perancangan mobil kimia. Barang-barang yang diperlukan biasanya merupakan barang yang harus dipesan terlebih dahulu.

3. Fabrikasi mobil kimia

Pada tahapan fabrikasi ini, adalah membuat *cell stack* dan MEA, membuat tempat penyimpanan etanol, serta kerangka dari mobil kimia.

4. Assembling (pemasangan)

Pada tahapan ini hal yang dilakukan adalah memasang seluruh rangkaian menjadi satu kesatuan. Serta ditambahkan berbagai macam aksesoris yang penting, seperti roda mobil kimia.

5. Aktivasi MEA

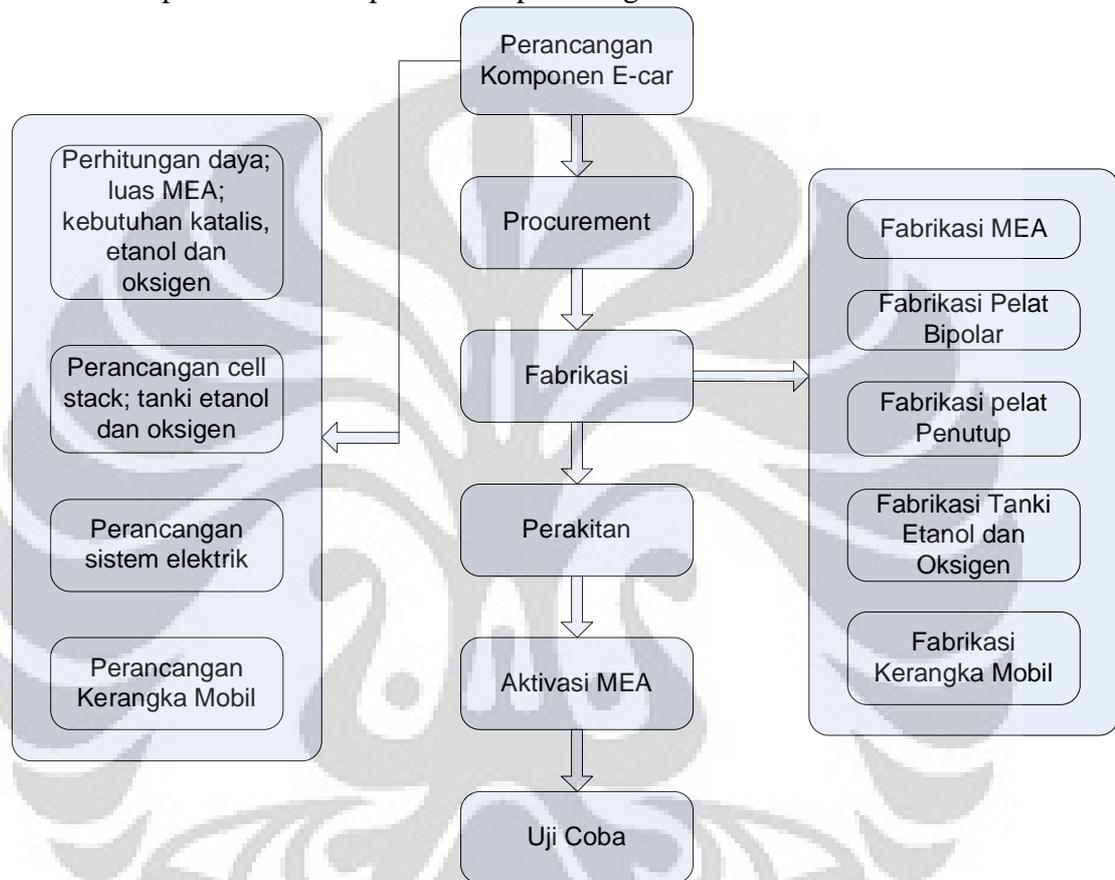
Pada tahapan ini hal yang dilakukan adalah humidifikasi MEA dan aktivasi katalis untuk meningkatkan kinerja dari DEFC.

6. Uji coba kinerja mobil kimia

Pada tahap ini dilakukan pengambilan data penelitian, pengolahan data serta analisis hasil untuk mengetahui kinerja dari mobil kimia yang berbahan bakar etanol ini.

Kelima tahapan di atas beserta alurnya dapat dilihat dengan jelas melalui diagram alir penelitian pada Gambar 3.1. Penelitian akan dilakukan di bengkel dan Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia FTUI.

Skema dari penelitian ini dapat terlihat pada diagram alir berikut:



**Gambar 3.1 Skema diagram alir penelitian mobil kimia**

## 3.2. RINCIAN KEGIATAN PENELITIAN

### 3.2.1. Merancang Mobil Energi Kimia

Tujuan kegiatan ini adalah membuat rancangan komponen-komponen pada mobil energi kimia. Perancangan ini dibuat sebagai pedoman fabrikasi yang akan dilakukan pada tahapan selanjutnya.

### 3.2.1.1. Desain Cell Stack

Desain yang akan dibuat mencakup desain bagian utama *cell stack* yang terdiri dari:

1. Pelat Bipolar (*Bipolar Plate*)
2. Pelat Penutup (*End Plate*)

serta aksesoris atau bagian pelengkap *cell stack* yang terdiri dari:

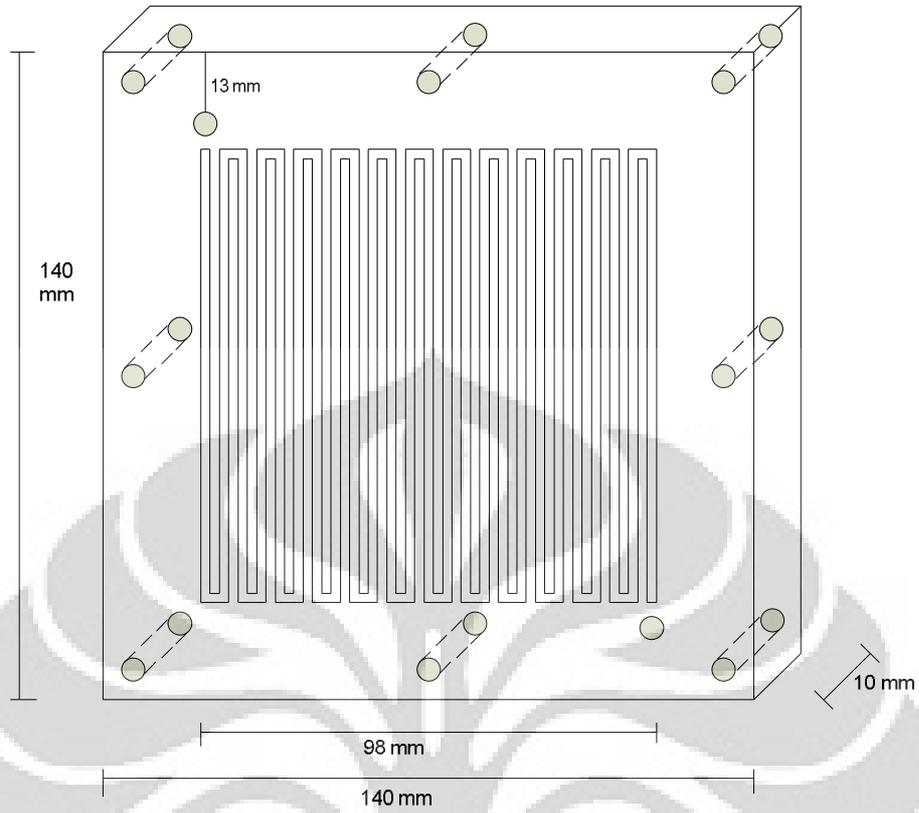
1. Selongsong baut
2. *Seal*

#### A. Desain Bagian Utama Cell Stack

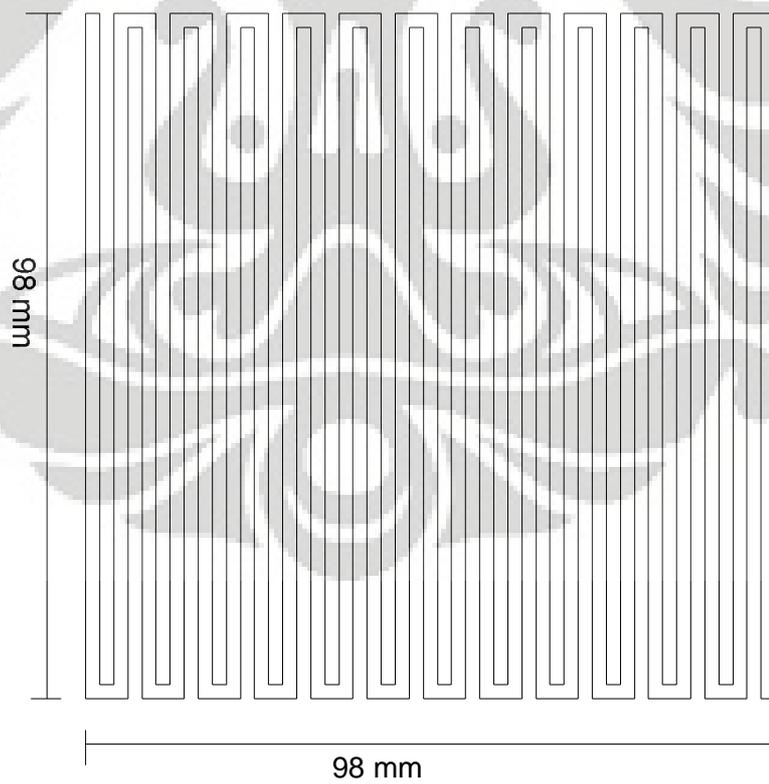
Bagian utama DEFC yang akan dibuat ini terdiri atas dua bagian yaitu:

##### 1. Desain Pelat Bipolar (*Bipolar Plate*)

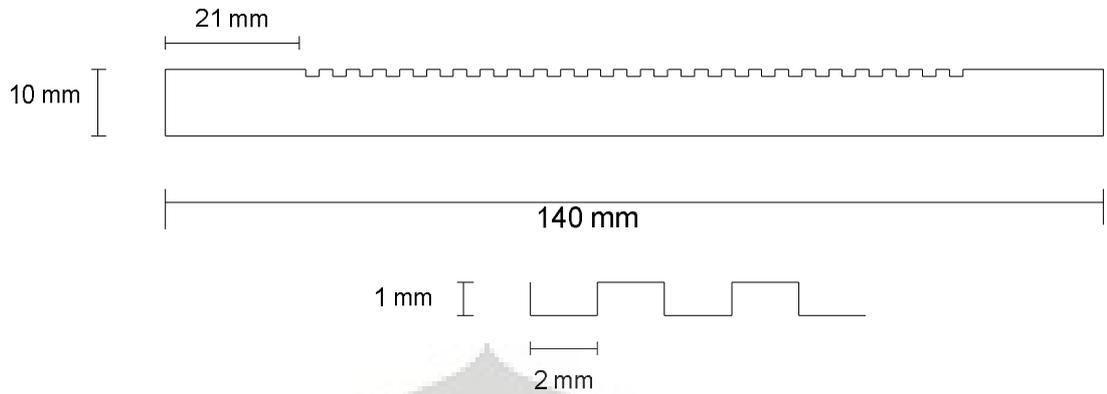
Pelat bipolar yang akan dibuat berukuran sebesar 140 mm x 140 mm dan mempunyai ketebalan sebesar 10 mm. Tepat di tengah lempengan tersebut terdapat *active area* dengan ukuran 98 mm x 98 mm yang merupakan suatu bidang aliran (*flow field*) yang berkelok-kelok dengan lebar 2 mm dan kedalaman 1 mm. Bidang aliran tersebut menggunakan tipe *serpentine channel* yang dibuat berkelok-kelok dengan tujuan agar penyerapan hidrogen ke dalam lapisan katalis menjadi lebih efektif dan efisien karena waktu tinggalnya lebih lama. Sebagai tempat pengambilan arus listrik dibuat juga dua buah lubang sedalam 10 mm dan pada lubang ini nantinya akan dipasang kabel tembaga yang sesuai dengan ukuran lubang tersebut.



**Gambar 3. 2 Rancangan pelat bipolar**



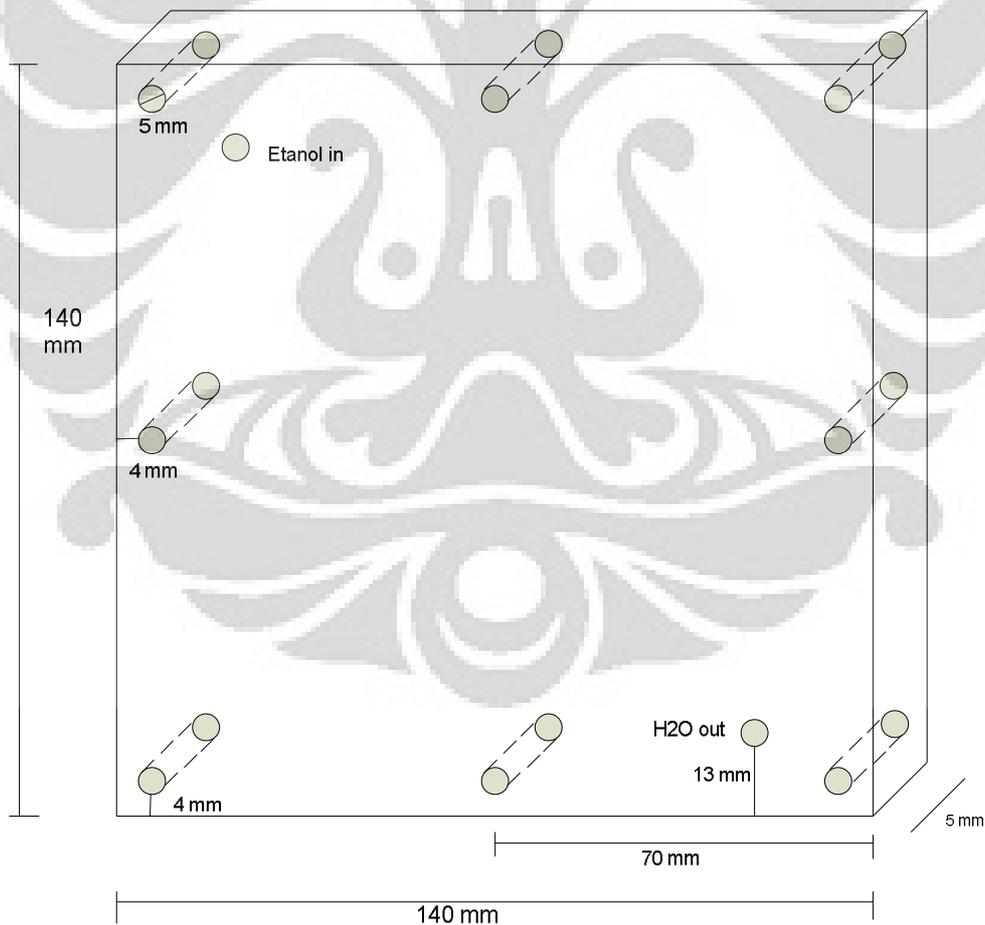
**Gambar 3. 3 Rancangan active area**



**Gambar 3. 4 Spesifikasi parit**

2. Desain Pelat Penutup (*End Plate*)

Pelat Penutup berupa lempengan yang ditempelkan ke pelat anoda dan pelat katoda untuk menjepit dan mengencangkan sel DEFC. Jumlah pelat penutup yang dibuat adalah 2 buah. Desain ukurannya hampir sama dengan pelat bipolar .

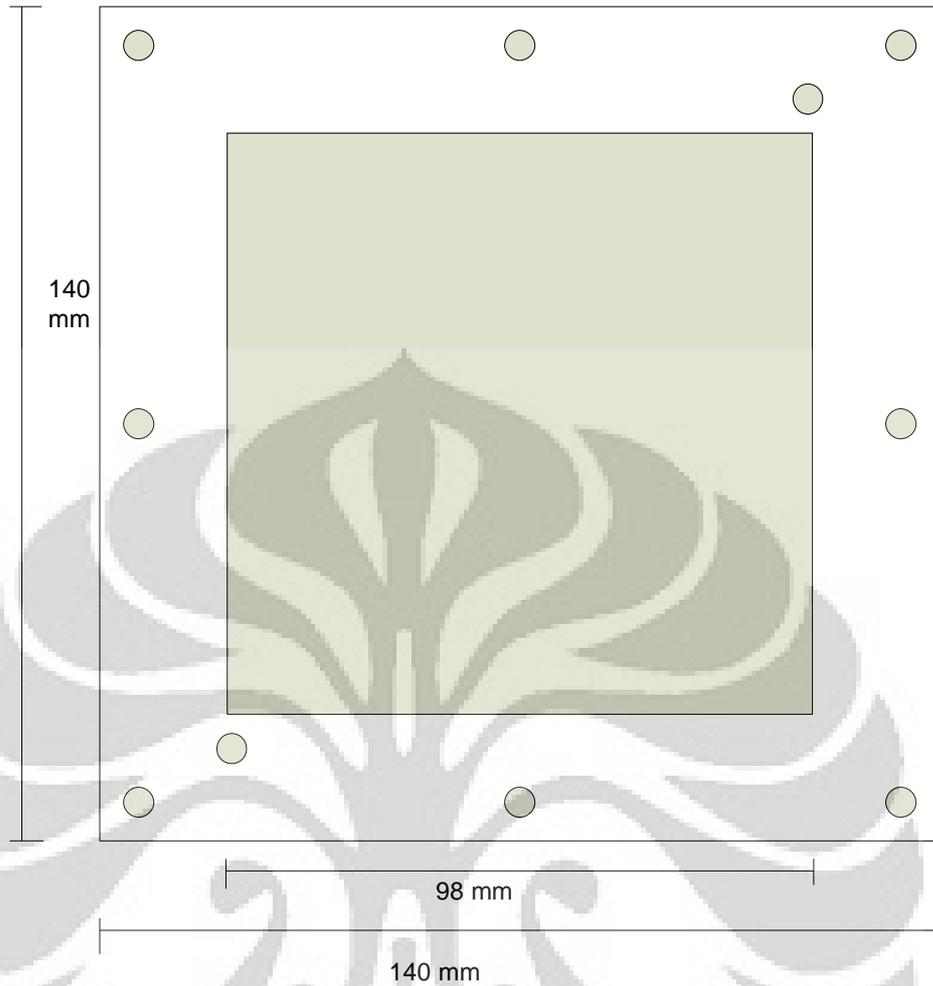


**Gambar 3. 5 Rancangan pelat penutup**

## B. Desain Aksesoris DEFC

Aksesoris DEFC yang akan dibuat mencakup empat bagian, yaitu selongsong baut, *seal*, isolator panas dan *strip heater*.

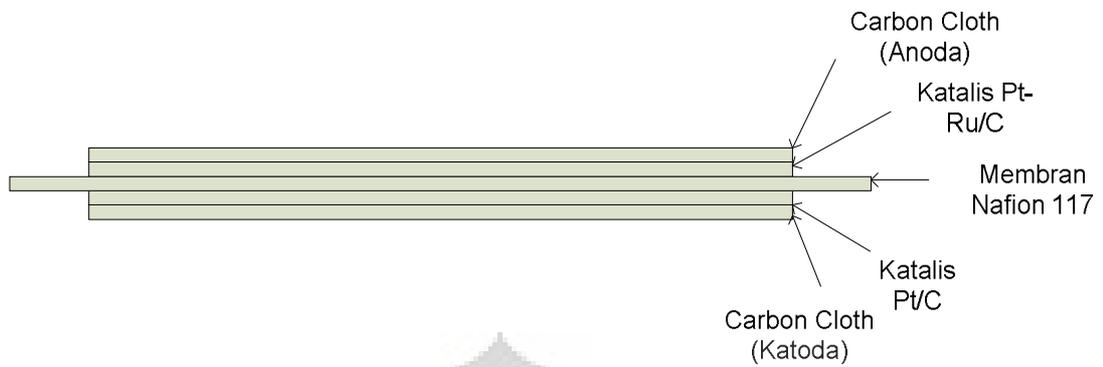
1. Selongsong baut dibuat untuk melapisi baut-baut yang menghubungkan pelat bipolar dan pelat penutup untuk menghindari terjadinya hubungan singkat antara anoda maupun katoda karena pelat anoda DEFC menghasilkan elektron akibat reaksi oksidasi dari etanol, maka anoda akan bermuatan negatif sedangkan katoda akan bermuatan positif. Selongsong baut tersebut harus terbuat dari bahan isolator yang tidak bisa menghantarkan listrik. Oleh karena itu, isolator ini akan dibuat dari Teflon<sup>®</sup> yang dibubut mengikuti bentuk baut yang digunakan. Teflon<sup>®</sup> merupakan isolator yang sangat baik dan tahan panas hingga 300°C. Jumlah selongsong yang dibuat adalah sejumlah 8 buah.
2. Seal berguna untuk mencegah terjadinya kebocoran dalam DEFC. *Seal* diletakkan diantara pelat bipolar. Walaupun kedua pelat bipolar telah dibaut dengan kencang, untuk menghindari kebocoran pada DEFC, maka akan lebih baik jika diantara keduanya diberi *seal*. Penggunaan *seal* dalam DEFC menjadi lebih diperkuat lagi dengan adanya aliran udara bertekanan yang menjadi umpan pada pelat katoda dalam DEFC. Udara mempunyai ukuran molekul yang sangat kecil sehingga lubang sekecil apapun akan mampu dilewati oleh molekul udara tersebut. *Seal* terbuat dari karet, jenis karet yang digunakan adalah karet dengan daya tahan panas yang tinggi. Oleh karena itu, dipilih karet silicone sebagai bahan pembuat *seal*. Silicone mempunyai ketahanan terhadap panas yang baik. Silicone mampu tahan hingga suhu 200°C, sehingga tidak mungkin meleleh dengan kondisi operasi dalam DEFC. Berikut desain *seal* yang dibuat :



**Gambar 3. 6 Desain seal**

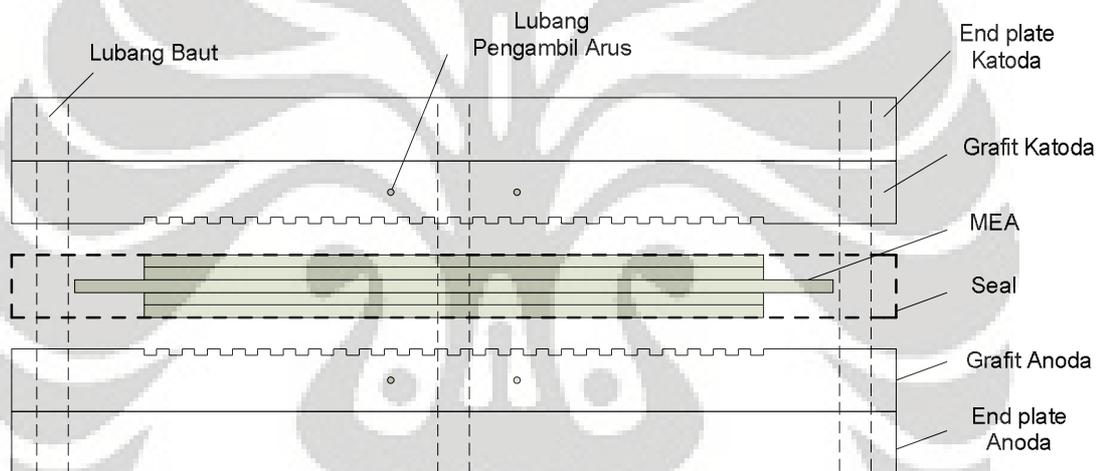
### *3.2.1.2. Desain MEA*

Tujuan dari kegiatan ini adalah merancang MEA dengan 5 lapisan, yang susunannya sebagai berikut: GDL-katalis anoda-membran-katalis katoda-GDL. MEA yang diperlukan berukuran 98 mm x 98 mm. MEA yang dibuat 4 buah untuk DEFC multi stack.



**Gambar 3. 7 Desain MEA**

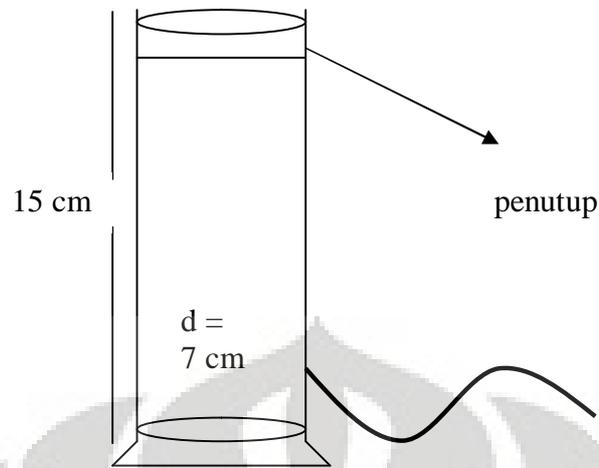
Berikut ini desain *cell stack* secara keseluruhan yang merupakan gabungan – gabungan dari seluruh komponen – komponennya.



**Gambar 3. 8 Desain *cell stack* keseluruhan (tampak atas)**

### 3.2.1.3. Desain Tempat Penyimpanan Etanol

Tempat penyimpanan etanol ini berfungsi sebagai tangki yang akan menyalurkan etanol ke DEFC. Reaktor ini memiliki kapasitas 150 ml dengan diameter 4 cm, tinggi 13 cm. Pada bagian atas diberi tutup agar etanol tidak menguap serta dilengkapi dengan saluran yang akan mengalirkan etanol ke *cell stack*.

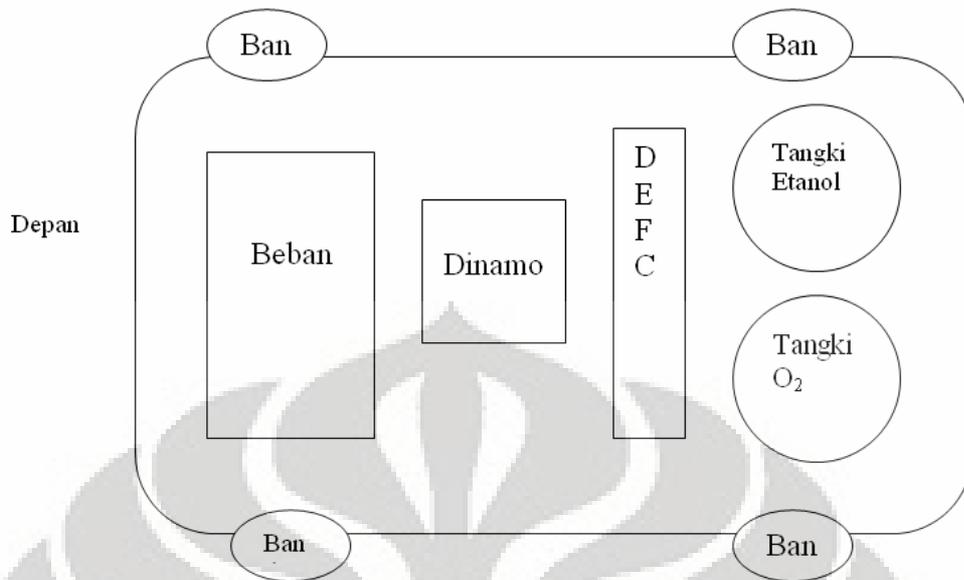


**Gambar 3. 9 Desain tempat penyimpanan etanol**

#### 3.2.1.4 Desain Badan Miniatur Mobil

- Rancangan mobil energi kimia ini memiliki ukuran panjang x lebar x tinggi adalah 30 cm x 20 cm x 18 cm.
- Roda-roda sebanyak 4 buah yang digunakan pada mobil energi kimia ini dibeli secara komersial yang merupakan komponen dari mobil mainan anak-anak. Sebuah penghubung akan menghubungkan masing-masing 2 roda untuk bagian belakang dan depan mobil.
- Untuk mengubah energi listrik menjadi energi gerak yang akan memutar roda digunakan dinamo penggerak . Dinamo ini dibeli secara komersial.

Berikut desain dua dimensi letak dari tiap komponen pada mobil :



Gambar 3. 10 Rancangan mobil energi kimia

### 3.2.2 Procurement (Pembelian dan Pengadaan Alat)

Procurement atau pembelian dan pengadaan alat dan bahan dilakukan bertujuan memenuhi segala kebutuhan untuk merakit dan membuat mobil kimia ini. Kegiatan ini mencakup pengadaan bahan dasar *cell stack*, bahan dasar untuk bahan bakar serta komponen mobil rakitan lainnya. Bahan – bahan yang diperlukan dapat selengkapnya dilihat pada bagian fabrikasi.

### 3.2.3. Fabrikasi Mobil Energi Kimia (*Chemical Energy Car*)

Pada tahap ini dilakukan fabrikasi komponen – komponen *chemical energy car* yang telah di rancang sebelumnya. Fabrikasi yang dilakukan meliputi: Fabrikasi *cell stack* untuk DEFC , fabrikasi MEA , fabrikasi tempat penyimpanan (tangki) etanol, serta fabrikasi kerangka mobil.

#### 3.2.3.1 Fabrikasi Cell stack

Fabrikasi yang dilakukan meliputi fabrikasi pelat bipolar, pelat penutup (*end plate*), dan *seal*.

#### A. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada tahap ini adalah:

1. Mesin bubut (*band saw dry and wet dengan diamond blade*).

2. Drill press (untuk melubangi)
3. Pisau cutter

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Grafit padat berukuran untuk pelat aliran konduktor.
2. Karet Silikon dengan tebal 0,5 mm. Sebagai isolator panas.
3. Beberapa skrup, mur/ selongsong baut.
4. *Fiberglass sheet* untuk pelat penutup dengan tebal 5 mm.

## **B. Langkah – langkah Fabrikasi**

### **B.1 Fabrikasi Pelat Bipolar**

Fabrikasi pelat bipolar dan pelat penutup dibuat dengan menggunakan mesin bubut CNC. Pelat bipolar ini memakai bahan grafit yang merupakan material inert dengan konduktivitas tinggi serta relatif mudah untuk dibentuk dengan mesin.

### **B.2 Fabrikasi Pelat Penutup**

Pelat penutup yang digunakan terbuat dari bahan *Fiberglass*). Untuk memotong dan membuat lubang dapat digunakan *dry/wet band* dan *drill press*. Pengerjaannya dilakukan sesuai dengan desain yang telah dibuat.

### **B.3. Fabrikasi Selongsong Baut**

Pembuatan selongsong baut akan dilakukan dengan memanaskan selongsong ke baut hingga selongsong menyatu dengan baut. Pengerjaannya akan dilakukan di Bengkel Bubut Teknik Mesin FTUI.

### **B.4. Fabrikasi Seal**

*Seal* dibuat secara manual dengan cara memotong dan melubangi karet silikon sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Untuk memotong karet silikon dapat digunakan cutter. Ketebalan karet silikon yang digunakan adalah 0.5 mm.

### 3.2.3.2. Fabrikasi MEA ( Membrane Electrode Assembly)

Tujuan dari kegiatan ini adalah membentuk MEA dengan 5 lapisan, yang susunannya sebagai berikut: GDL-katalis anoda-membran-katalis katoda-GDL. MEA ini dibuat dengan dua tahapan besar yaitu pembuatan tinta katalis anoda dan katoda serta pelapisan dengan katalis anoda dan katoda pada GDL yang ditempelkan ke membran dengan cara *coating*.

#### 3.2.3.2.1. Pembuatan tinta katalis (*Zelenay et al, 2000*)

##### A. Alat dan Bahan

Alat:

1. Timbangan digital
2. Cawan petri
3. Beaker glass
4. Pengaduk kaca

Bahan:

1. Katalis (E-TEK)
  - o Anoda: C20-60 60% HP Pt:Ru Alloy (1:1 a/o) *on optimized carbon*
  - o Katoda: C20-60 60% HP Pt *on Vulcan XC-72R*
2. Larutan Nafion 5%wt (DuPont Nafion PFSA Polymer Dispersions) dalam isopropanol
3. Deionzed water

##### B. Prosedur

1. Menghitung kebutuhan tinta katalis berdasarkan loading, kebutuhan air (perbandingan katalis: air = 1: 8 (persen berat)), dan kebutuhan larutan nafion 5% (perbandingan katalis : larutan Nafion = 1 : 3.5 (persen berat) untuk anoda dan 1: 2.2 (persen berat) untuk katoda).
2. Mencampurkan katalis dengan deionized water, aduk dalam pendingin 20-30 menit
3. Mencampurkan larutan nafion 5% ke dalam campuran, letakkan dalam pendingin, aduk 20-30 menit
4. Menyimpan dan menutup wadah penyimpanan

### 3.2.3.2.2. Coating katalis pada carbon cloth

#### A. Alat dan Bahan

Alat:

1. Atmosferic furnace
2. Timbangan digital
3. Kuas

Bahan:

1. Kain Karbon (*Carbon Cloth designation A, standard wet proofing* dari E-TEK)
2. Tinta Katalis

#### B. Prosedur

1. Memotong *carbon cloth* sesuai dengan luas inti aktif (9.8 cm x 9.8 cm). Kemudian menimbang berat awal ( $w_0$ ).
2. Melapiskan tinta katalis katoda pada *carbon cloth* sehingga terbentuk suatu lapisan.
3. Memanaskan *carbon cloth* dan katalis pada suhu 90°C menggunakan *atmosferic furnace* selama 5 menit untuk mengeringkan pelarut yang terdapat dalam tinta katalis.
4. Menimbang berat *carbon cloth* dan katalis setelah dikeringkan.
5. Mengulangi langkah 1,2,3 sampai tinta katalis habis atau tidak ada penambahan berat lagi
6. Melakukan pemanasan akhir pada suhu 90°C selama 20 menit.
7. Melakukan langkah 1 sampai 5 untuk lapisan katoda.
8. Kedua elektroda siap digunakan.

### 3.2.3.2.3. Preparasi membran nafion 117 (Mann, 2006)

#### A. Alat dan Bahan

Alat

1. Beaker glass
2. Cutter

## Bahan

1. Membran Nafion 117 dari Fuelcell Store
2. Hidrogen peroksida 3% wt (Merck)
3. Deionized water
4. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5 M (Merck)

## B. Prosedur

1. Memotong membran dengan ukuran 12 cm x 12 cm
2. Merendam membran dalam larutan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 3 wt% dengan pemanasan 80°C selama 1 jam
3. Merendam membran dalam larutan air demin dengan pemanasan 80°C selama 1 jam
4. Merendam membran dalam H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5 M dengan pemanasan 80°C selama 1 jam
5. Merendam membran dalam larutan air demin dengan pemanasan 80°C selama 1 jam kembali sebanyak 2 kali
6. Mengeringkan membran pada suhu ruang dan membran siap digunakan.

### 3.2.3.2.4. Hot pressing (Tang, 2007)

#### A. Alat dan Bahan

##### Alat

- Alat *Hot Press*

##### Bahan

1. Membran Nafion 117 dari Fuelcell Store
2. *Carbon cloth ter-coating*

## B. Prosedur

1. Menyusun membran serta elektroda anoda dan katoda dengan susunan anoda-membran-katoda
2. Menekan lapisan MEA pada 7 MPa dan pemanasan pada suhu 140°C selama 5 menit.
3. Mendinginkan MEA setelah di-*hot press* dan MEA siap digunakan.

#### 3.2.3.4 Fabrikasi Kerangka Mobil Energi Kimia

Pada tahapan ini akan dibuat kerangka mobil sederhana yang terdiri dari pelat sebagai alas komponen – komponen mobil energi kimia (*chemical energy car*) serta 4 buah roda.

##### **A. Alat dan Bahan**

Alat yang digunakan dalam tahapan ini adalah alat pemotong (cutter/ gergaji dll) sedangkan bahan yang digunakan adalah plastik dengan ketebalan 3-5 mm yang ringan namun tahan untuk menyangga beban. Dapat juga digunakan bahan lain (asalkan dapat menahan beban serta ringan). Kerangka mobil ini tidak memakai penutup.

##### **B. Langkah – Langkah Fabrikasi**

Mempersiapkan papan penyangga untuk meletakkan komponen-komponen mobil energi kimia. Ukuran papan tersebut ialah 20cm x 30cm. Menghubungkan papan penyangga tersebut dengan roda (dua roda depan dan dua roda belakang) yang nantinya akan dihubungkan dengan dinamo (yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik).

#### 3.2.4 Assembling (Perakitan)

Pada tahap awal dilakukan penyusunan komponen – komponen DEFC yang telah difabrikasi sebelumnya. DEFC disusun secara seri untuk menghasilkan daya yang cukup besar untuk menggerakkan mobil energi kimia ini. Perhitungan banyaknya *cell stack* yang diperlukan terdapat pada lampiran

Setelah itu dilakukan perakitan seluruh komponen – komponen *Chemical Energy Car*. Tahap ini juga meliputi pemasangan pipa saluran gas hidrogen menuju *cell stack*, pemasangan kabel arus eksternal menuju motor penggerak, pemasangan sistem bahan bakar, serta pemasangan aksesoris pelengkap pada prototipe mobil.

### 3.2.5 Uji Coba

#### 3.2.5.1 Uji Coba Laju Alir Etanol

Pada tahapan ini diukur laju alir etanol yang mengalir ke dalam DEFC. Dilakukan variasi konsentrasi etanol untuk menghasilkan kinerja yang optimal. Untuk mengukur laju alir hidrogen digunakan flowmeter.

#### 3.2.5.2 Aktivasi MEA

Humidifikasi MEA

1. Mengumpulkan air panas dengan suhu  $90^{\circ}\text{C}$  ke sisi anoda dan udara (jenuh pada suhu  $80^{\circ}\text{C}$  pada tekanan atmosfer) ke sisi katoda.
2. Menjaga agar suhu sel tetap  $80^{\circ}\text{C}$  selama satu jam
3. Mengamati nilai AC impedance ( $<280\text{ m}\Omega\text{-cm}^2$  pada suhu  $80^{\circ}\text{C}$ )

Aktivasi Katalis

1. Mengumpulkan etanol 1-2 M ke anoda dan udara ke katoda
2. Mengeset botol humidifikasi untuk udara pada  $85^{\circ}\text{C}$ , 720 mL/min pada 15-25 psig
3. Mengatur laju alir etanol 5 mL/min dan menjaga suhu sel pada  $80^{\circ}\text{C}$ .
4. Menjalankan sel 2-4 jam pada 0.2-0.3 volt

#### 3.2.5.3 Uji Coba Kinerja Mobil Energi Kimia

Pada tahapan ini dilakukan uji coba gerak mobil, dengan mengambil data waktu *start up*, kecepatan, jarak dan waktu yang ditempuh sampai mobil berhenti pada saat reaktan telah habis. Setelah dilakukan pengujian kemudian dilakukan analisis hasil dari data – data yang diperoleh pada pengujian tersebut.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

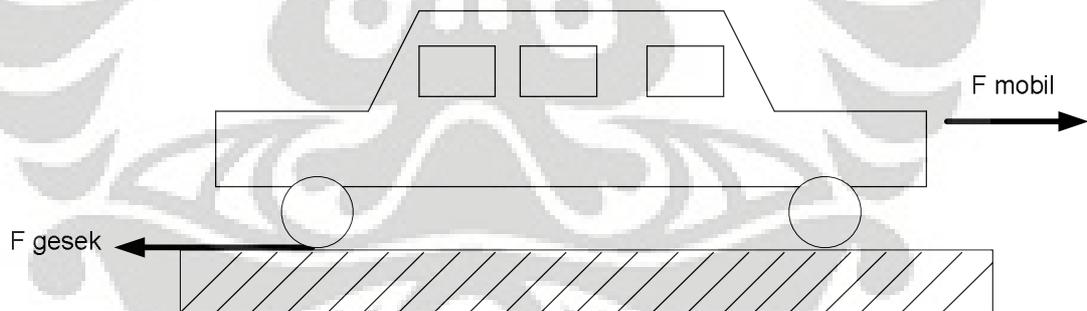
#### 4.1. PERHITUNGAN KOMPONEN MOBIL ENERGI KIMIA

##### 4.1.1. Perhitungan Kebutuhan Daya

Daya minimum yang diperlukan oleh mobil energi kimia yang difabrikasi dapat dihitung dengan besarnya gaya minimum yang diperlukan untuk menggerakkan mobil tersebut. Dalam perhitungan ini digunakan asumsi-asumsi sebagai berikut :

- Massa mobil ( $m$ ) : 2 kg
- Kecepatan mobil ( $v$ ) : 10 cm/s
- Koefisien gesek antara ban mobil dengan lantai ( $\mu_g$ ): 0,8
- Percepatan gravitasi ( $g$ ) : 9,8 m/s<sup>2</sup>

Mobil dapat bergerak jika gaya yang diberikan harus lebih besar/ sama dengan gaya gesek mobil dengan lantai. Hal ini dapat digambarkan pada Gambar 4. 1



Gambar 4. 1 Ilustrasi gaya pada mobil energi kimia

Gaya minimum ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.10 :

$$F_{\min} = f_g = \mu_g .m.g \quad \text{.....2.10}$$

Dengan menggunakan persamaan diatas, maka didapat gaya minimum untuk menggerakkan mobil yaitu sebesar

$$F_{\min} = 0,8 \times 2 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 15,68 \text{ N}$$

Dan daya minimum yang dibutuhkan untuk menggerakkan mobil yaitu sebesar

$$P_{\min} = F_{\min} \times v \quad \dots 2.9$$

$$P_{\min} = 15,68 \text{ N} \times 0,1 \text{ m/s} = 1,568 \text{ Watt}$$

Dengan:

F = gaya (N)

$\mu_g$  = koefisien gesek

g = percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

v = kecepatan mobil (m/s)

m = massa (kg)

P = daya (Watt)

Jadi, dapat disimpulkan bahwa daya minimum yang diperlukan untuk menggerakkan mobil yaitu sebesar 1,568 Watt.

#### 4.1.2. Perhitungan Luas MEA

Untuk menghitung dimensi flow field, maka dipergunakan asumsi-asumsi sebagai berikut :

- Tegangan yang dihasilkan 0,8 V
- Densitas Arus DEFC = 20 mA/cm<sup>2</sup>
- DEFC berbentuk persegi
- Loading katalis untuk anoda (Pt-Ru/C) : 3 mg/cm<sup>2</sup>
- Loading katalis untuk katoda (Pt/C) : 4 mg/cm<sup>2</sup>

Dari persamaan 2.6, maka untuk mendapatkan nilai arus yang dihasilkan oleh DEFC adalah:

$$I_{DEFC} = \frac{P}{V} \quad \dots 2.6$$

$$I_{DEFC} = \frac{1,568 \text{ W}}{0,8 \text{ V}} = 1,96 \text{ A} = 1960 \text{ mA}$$

Maka, luas DEFC yang dibutuhkan yaitu sebesar

$$A = \frac{I_{DEFC}}{\text{Current Density}} \quad \dots 4.1$$

$$= \frac{1960 \text{ mA}}{20 \text{ mA/cm}^2} = 98 \text{ cm}^2$$

Dengan:

I = arus (A)

P = daya (Watt)

V = tegangan (V)

A = luas ( $\text{m}^2$ )

Karena DEFC berbentuk persegi maka panjang sisi yang dibutuhkan yaitu 9,9 cm.

#### 4.1.3. Penentuan Jumlah Etanol dan Oksigen yang Diperlukan

Untuk menjalankan mobil energi kimia ini diperlukan bahan bahan bakar berupa etanol dan oksigen. Adapun jumlah etanol dan oksigen yang diperlukan masing-masing adalah 2,4 ml dan 274 ml (perhitungan terdapat pada lampiran 1). Kebutuhan ini diharapkan dapat memberikan tenaga menggerakkan mobil selama 10 menit. Namun untuk jumlah etanol yang digunakan lebih dari yang dibutuhkan, yakni 50 ml. Hal ini dikarenakan disesuaikan dengan volume flowfield yang dibutuhkan adalah 5 ml dengan waktu tinggal 5 menit (laju alir 1 ml/menit). Volume yang digunakan jauh lebih banyak dikarenakan untuk memberikan tekanan gravitasi yang cukup agar etanol dapat mengalir ke dalam cell stack. Sedangkan oksigen yang digunakan berasal dari tabung oksigen yang berisi oksigen murni dengan volume mencapai 8000 ml.

#### 4.2. HASIL DESAIN CELL STACK DEFC

*Cell stack* DEFC adalah gabungan dari pelat bipolar, pelat penutup, MEA, *seal* serta aksesoris stack lainnya yang dijadikan satu dan berbentuk seperti *sandwich* (Gambar 4. 3). Stack DEFC terdiri dari dari bagian anoda dan katoda. Input dari anoda berupa etanol, sedangkan input dari katoda berupa oksigen. Massa total dari *cell stack* ini adalah 972 gram sudah termasuk di dalamnya massa pelat bipolar, pelat penutup, baut, *seal*, serta MEA.



Gambar 4. 2 Stack DEFC

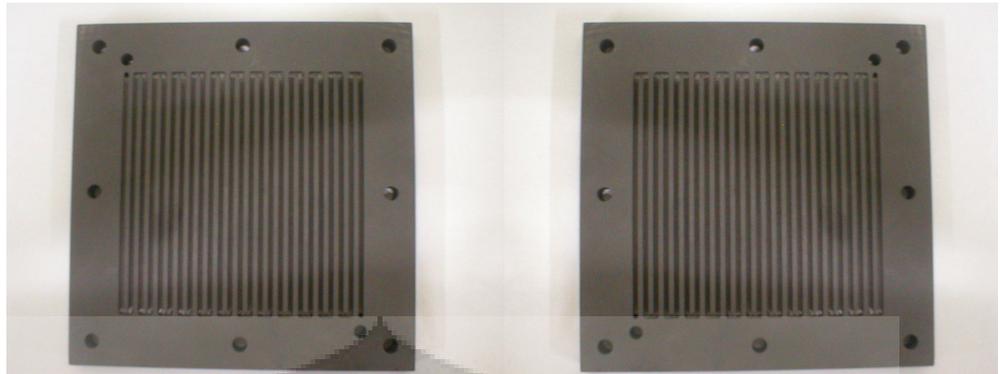


Gambar 4. 3 Stack DEFC (tampak atas)

#### 4.2.1. Pelat Bipolar

Pelat bipolar yang digunakan adalah berbahan dasar grafit. Pemilihan bahan grafit dikarenakan bahan grafit lebih ringan daripada bahan lain seperti aluminium dan stainless steel. Hal ini dapat dilihat dari densitas grafit yang menurut US Patent 6808834 adalah  $2 \text{ g/cm}^3$  yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan logam lainnya seperti stainless steel ( $7,480 \text{ g/cm}^3$ ) ataupun aluminium ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ). Luas pelat bipolar sebesar  $196 \text{ cm}^2$  ( $14 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$ ). Tebal pelat bipolar adalah  $1 \text{ cm}$ . Sedangkan luas *active area* seluas  $96,04 \text{ cm}^2$  ( $9,8 \text{ cm} \times 9,8 \text{ cm}$ ). Luas ini lebih kecil dari yang dibutuhkan, karena menyesuaikan bentuk dari aliran yang serpentine dan memberikan hasil dengan luas tersebut. Untuk tempat masuk dan keluarnya reaktan, maka terdapat dua buah lubang pada pelat bipolar ini. Pada pelat bipolar ini juga terdapat lubang untuk memasang baut.

Desain antara pelat untuk katoda dan anoda sedikit berbeda, sehingga jika dijadikan satu maka aliran parit pada kedua pelat akan pada pola yang sama. *Active area* berbentuk serpentine dengan kelebaran parit  $2 \text{ mm}$  dan kedalaman  $1 \text{ mm}$ .



**Gambar 4. 4 Pelat bipolar untuk katoda dan anoda**

#### **4.2.2. Pelat Penutup**

Pelat penutup berfungsi menutup atyau menjepit bagian luar dari pelat bipolar bagian anoda dan katoda. Pelat penutup yang digunakan adalah berbahan acrylic dengan ketebalan 5 mm. Luas pelat penutup sebesar  $196 \text{ cm}^2$  ( $14 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$ ). Pemilihan bahan acrylic sebagai pelat penutup dikarenakan bahan ini memiliki kekuatan yang cukup baik serta memiliki densitas yang relatif kecil, yakni sekitar  $1,22 \text{ g/cm}^3$ .

Pada pelat penutup ini juga terdapat lubang-lubang tempat baut serta lubang masukan untuk etanol (pada anoda) dan oksigen (pada katoda) dan lubang keluaran pada setiap sisinya. Diameter lubang untuk baut serta masukan dan keluaran reaktan adalah 5 mm.



**Gambar 4. 5 Pelat penutup katoda dan anoda**

### 4.2.3. Aksesoris DEFC

#### 4.2.3.1. Seal

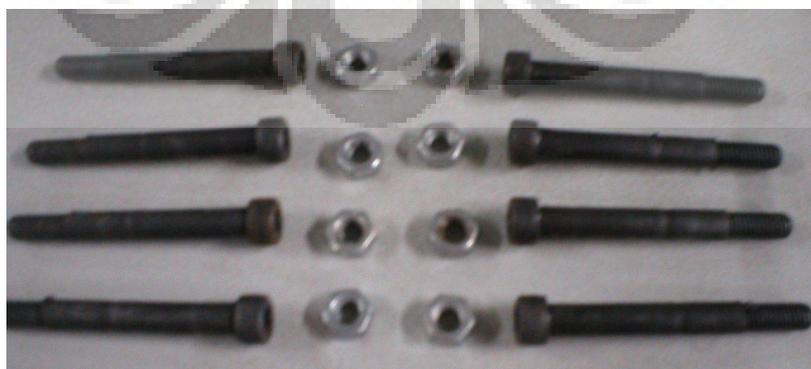
Ukuran dari *seal* seperti dengan ukuran pelat penutup, yakni sebesar 196 cm<sup>2</sup> (14 cm x 14 cm). Bahan *seal* adalah silikon, dengan ketebalan 0,5 mm. Bahan silikon dipilih karena silikon tidak dapat menghantarkan arus listrik, dan dapat tahan panas. *Seal* dipergunakan untuk mencegah kebocoran etanol serta oksigen yang digunakan. *Seal* ini dipergunakan di dua tempat, yakni antara pelat penutup dengan pelat bipolar dan antara pelat bipolar dengan MEA.



Gambar 4. 6 Seal

#### 4.2.3.2. Baut

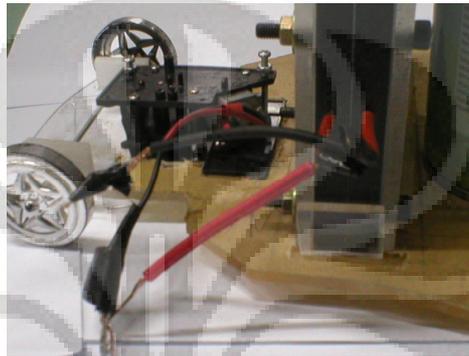
Baut yang dipergunakan berukuran diameter 5 mm dan panjang 5 cm. Baut ini dipergunakan untuk menyatukan pelat penutup dengan pelat bipolar yang berisi MEA. Baut yang digunakan harus dilapisi dengan isolator, dimana isolator yang dipergunakan berbahan TEFLON. Pelapisan baut ini bertujuan untuk mencegah adanya arus pendek dari listrik yang dihasilkan oleh etanol dan oksigen.



Gambar 4. 7 Baut

#### 4.2.3.3. Instalasi Listrik

Penghantaran listrik yang dihasilkan oleh DEFC ini adalah menggunakan kabel listrik tembaga. Kabel listrik tembaga yang digunakan berdiameter 2,5 mm. Kabel yang digunakan tidak terlalu panjang, karena akan memperbesar hambatan listrik yang ada dan dapat memperkecil arus yang dihasilkan oleh DEFC ini. Instalasi kabel listrik ini adalah dengan memasukkan kabel listrik tembaga in ke dalam lubang yang sudah tersedia di pelat bipolar.



**Gambar 4. 8 Instalasi listrik**

#### 4.2.4. Fabrikasi MEA



**Gambar 4. 9 MEA yang telah difabrikasi**

Membrane electrode assembly (MEA) yang telah difabrikasi seperti terlihat pada gambar di atas. MEA yang digunakan berukuran 9,8 cm x 9,8 cm. MEA yang terdiri dari GDL-katalis-membran-katalis-GDL. GDL yang digunakan

adalah *carbon cloth*. *Carbon cloth* dipilih karena *carbon cloth* tidak mudah patah jika dibandingkan dengan *carbon paper*, sehingga dapat menambah waktu penggunaan MEA. Sedangkan katalisnya adalah katalis komersial dimana untuk anoda adalah Pt-Ru/C dan untuk katoda adalah Pt/C. Dan untuk membran adalah Nafion 117. Fabrikasi MEA ini melalui beberapa tahapan, yakni pembuatan tinta katalis, pelapisan tinta katalis ke GDL, preparasi membran, dan hot press.

Tahapan awal adalah pembuatan tinta katalis. Tinta katalis adalah campuran antara katalis, air dan larutan nafion 5 wt% dengan perbandingan 1:8:4. Loading catalyst untuk anoda adalah 4 mg/cm<sup>2</sup> sedangkan katoda adalah 3 mg/cm<sup>2</sup>. Pembuatan tinta katalis adalah dengan cara menambahkan air ke katalis kemudian diikuti dengan penambahan larutan nafion 5 wt%. Air ditambahkan terlebih dahulu karena katalis jika terkena larutan nafion 5 wt% akan terbakar dan katalis akan habis.

Tahapan selanjutnya adalah pelapisan tinta katalis ke GDL. Metode *coating* yang digunakan adalah metode *brushing*, yaitu dengan melakukan penguasan dengan kuas ke permukaan *carbon cloth*. Metode ini adalah metode yang konvensional. Dimana penguasan dilakukan bertahap selapis demi selapis. Penguasan selesai jika massa *carbon cloth* sudah sesuai dengan jumlah loadingnya.

Tahapan ketiga adalah preparasi membran. Preparasi ini bertujuan menghilangkan komponen senyawa anorganik pada membran serta menghaluskan struktur permukaan membran. Preparasi ini dilakukan dengan merendam membran dalam larutan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 3%, air demineralisasi, larutan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5 M, dan air demineralisasi masing-masing selama 1 jam dan pada suhu 80°C. Tahapan yang terakhir adalah hot press. Hot press bertujuan untuk menyatukan elektroda-elektroda dengan membran. Yakni dengan cara di press pada suhu 140°C dan tekanan 7 MPa selama 5 menit.

Idealnya suatu MEA dapat digunakan berulang-ulang. Namun jika katalis kurang merekat pada membran, maka MEA akan mudah lepas. Hal ini bisa dikarenakan larutan nafion yang digunakan kurang banyak, sehingga mudah terlepas. Dan juga suhu, tekanan dan waktu hot press yang kurang.

Fungsi dari larutan nafion adalah sebagai perekat antara katalis dengan membran nafion 117. Larutan nafion dan membran terbuat dari jenis polimer yang sama, sehingga pada suhu *transition glass*, Nafion mampu membentuk jaringan ikat antara carbon cloth dengan membran sehingga mampu membuat katalis yang berada di antara kedua lapisan tersebut terikat. Proses terbentuknya jaringan ikat Nafion terjadi pada tahap hot pressing MEA. Kondisi yang menyebabkannya adalah suhu penekanan MEA sekitar 140°C yang merupakan suhu *transition glass* dari Nafion (Rifki, 2006).

### **4.3. HASIL DESAIN TANGKI**

#### **4.3.1. Tangki Etanol**

Tangki etanol yang dipergunakan berbahan plastik dan mempunyai diameter 4 cm serta tinggi 13 cm. Pada bagian bawah tangki diberi lubang sebagai jalan keluar dari etanol. Pergerakan etanol ke dalam cell stack menggunakan tekanan gravitasi. Oleh karena letak tabung etanol akan diletakkan pada bagian atas cell stack (Gambar 4. 19).



**Gambar 4. 10 Tabung etanol**

### 4.3.2. Tangki Oksigen

Tangki oksigen yang digunakan adalah tangki oksigen komersil, dengan diameter 6,5 cm dan tinggi 23 cm.. Tekanan dalam tabung adalah 10 atm. Oksigen akan mengalir karena adanya perbedaan tekanan dari dalam tabung dan luar tabung.



Gambar 4. 11 Tabung oksigen

## 4.4. PENGUJIAN DEFC

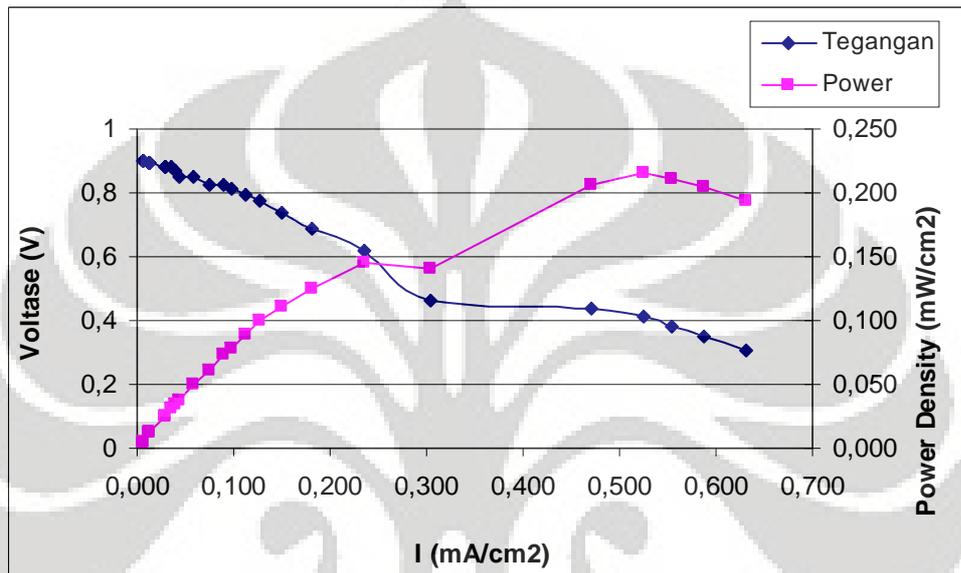
### 4.4.1. Aktivasi Katalis

Sebelum melakukan pengujian terhadap sel tunggal sebagai DEFC, ada baiknya dilakukan aktivasi untuk mencapai kinerja optimal. Tujuan aktivasi ini adalah untuk meningkatkan kinerja dari *fuel cell* tersebut yakni dengan hidrasi membran dan mengaktifkan anoda. Pada proses aktivasi ini terdapat dua tahapan, yakni humidifikasi dan aktivasi katalis. Pada proses humidifikasi, *fuel cell* dialirkan air pada sisi anoda dan udara pada sisi katoda. Suhu sel dijaga pada suhu 80°C. Hal ini dilakukan selama 1 jam. Tujuan dari proses ini adalah untuk mengurangi tegangan permukaan dari katalis, agar dapat bereaksi dengan alkohol nantinya.

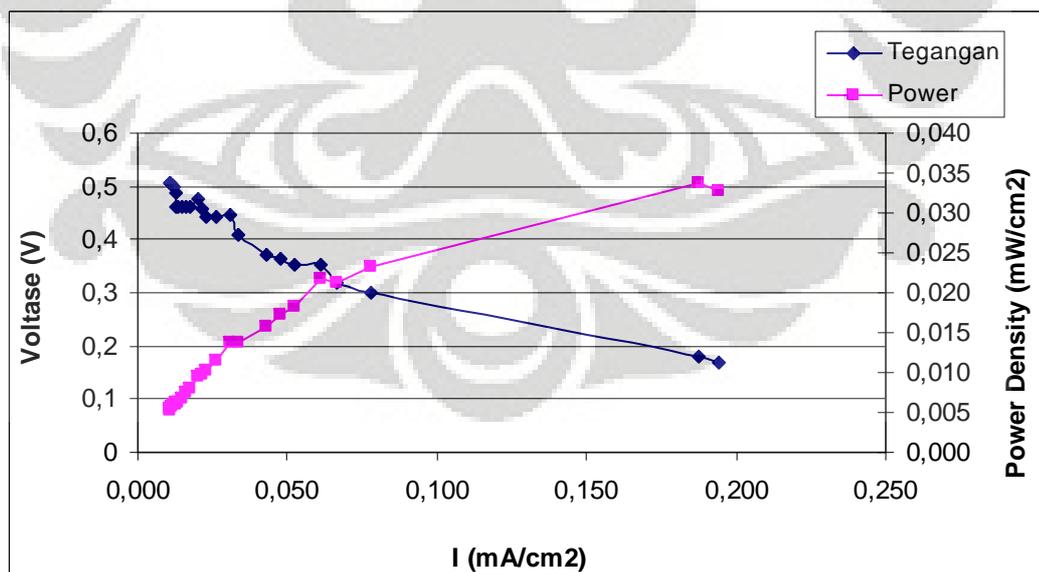
Selanjutnya adalah melakukan aktivasi katalis yang dengan mengalirkan hidrogen pada sisi anoda dan udara pada sisi katoda. Hal ini dilakukan selama 2 jam dan dijaga pada kondisi tegangan 0,6 volt. Tujuannya adalah untuk mengaktifkan katalis, sehingga saat digunakan dengan etanol, tidak perlu adanya aktivasi katalis kembali.

#### 4.4.2. Pengujian Sel Tunggal

Pengujian yang dilakukan pertama kali adalah pengujian cell yang berupa PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Tujuan ini untuk melihat keaktifan MEA terhadap hidrogen, sebelum dilakukan pengujian dengan menggunakan etanol. Pengujian ini dilakukan pada saat sel bersuhu 25<sup>0</sup>C.



Gambar 4. 12 Kurva polarisasi hasil uji sel dengan hidrogen



Gambar 4. 13 Kurva polarisasi hasil uji sel dengan etanol 2 M

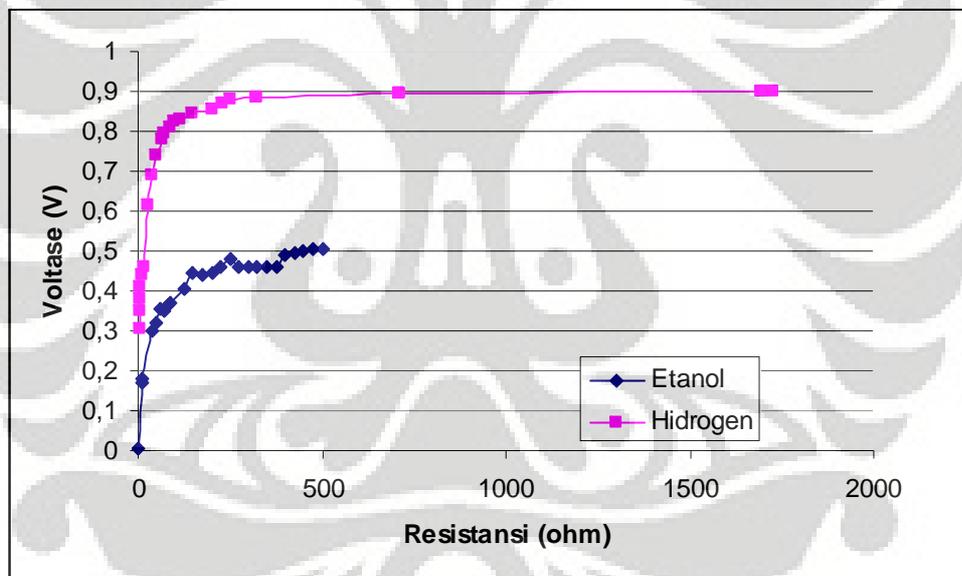
Dari data tersebut dapat terlihat bahwa tegangan maksimal yang dihasilkan oleh sel dengan bahan bakar hidrogen adalah 0,898 V. Dan akan semakin

berkurang seiring dengan adanya pembebanan yang diberikan kepada sel tersebut. Sedangkan tegangan maksimal yang dihasilkan dengan menggunakan etanol 2M adalah 0,504 V.

Data tersebut diambil dengan melakukan variasi pemberian resistansi, dengan tujuan untuk dapat melihat peningkatan densitas arus yang dihasilkan. Jika resistansi yang diberikan tetap, maka seiring berjalannya waktu, tegangan yang dihasilkan akan semakin menurun, namun tidak ada peningkatan densitas arus. Nilai resistansi yang diberikan dapat dibaca dari kurva tersebut, dimana:

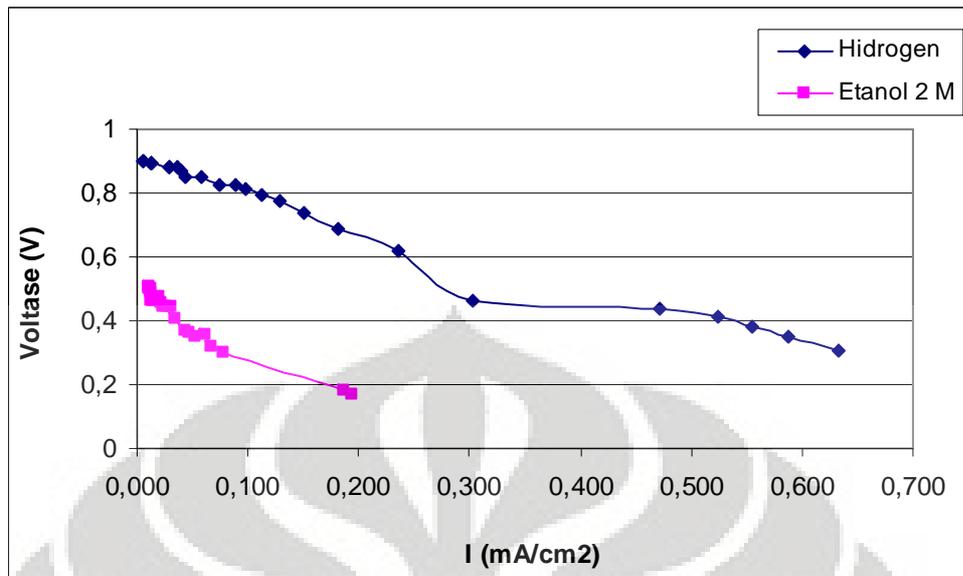
$$R = \frac{V}{\text{current density} * \text{luas area}}$$

Sehingga dari Gambar 4. 12 dan Gambar 4. 13 bisa didapatkan nilai resistansinya, yang ditunjukkan pada Gambar 4. 14



Gambar 4. 14 Kurva nilai resistansi pada uji coba sel tunggal

Jika dilihat dari kurva perbandingan antara menggunakan bahan bakar hidrogen dan etanol 2M, maka terlihat bahwa densitas arus yang dihasilkan oleh etanol jauh lebih kecil dari pada hidrogen. Selain itu jika dilihat dari desain awal DEFC, yakni tegangan yang diharapkan mencapai 0,8 V dan densitas arus yang diharapkan adalah 20 mA/cm<sup>2</sup>, maka hasil yang dicapai masih sangat jauh dari yang diharapkan.



Gambar 4.15 Kurva polarisasi perbandingan uji sel dengan menggunakan hidrogen dan etanol 2M

Densitas arus dan tegangan yang rendah ini dapat disebabkan oleh berbagai macam hal. Adapun kemungkinan penyebabnya adalah:

1. Cell stack yang kurang bagus.
  - a. Konduktivitas listrik pada grafit yang kurang baik, hal ini bisa dikarenakan kualitas grafit yang digunakan tidaklah bagus, atau grafit tersebut sudah porus. Keporosan grafit dapat dilihat dari densitas grafit yang digunakan, yakni hanya  $1,74 \text{ g/cm}^3$ , dimana seharusnya densitas grafit adalah  $2,2 \text{ g/cm}^3$ .
  - b. Pengumpul arus yang kurang baik, hal ini dikarenakan pengumpul arus yang digunakan hanyalah kawat tembaga, sehingga terjadi kemungkinan banyaknya arus yang tidak mengalir melalui kawat tembaga tersebut.
2. Kualitas MEA yang kurang baik.

Hal ini dapat terjadi karena teknik pelapisan tinta katalis yang menggunakan teknik pengkuasan. Sehingga tinta katalis tidak menyebar secara merata ke seluruh lapisan carbon cloth.

3. Jumlah kandungan Nafion yang kurang banyak dalam tinta katalis (Rifki, 2006).

Kurangnya kandungan Nafion menyebabkan ikatan jaringan yang terbentuk antara carbon cloth-katalis-membran menjadi semakin sedikit dan menyebabkan migrasi-migrasi proton terhambat. Migrasi proton dari anoda ke katoda akan terhambat karena Nafion tidak sempurna melekatkan katalis kepada membran, sehingga proses desorpsi proton pada katalis tidak sempurna. Akibatnya proton yang terbentuk tidak semuanya akan mencapai membran untuk bermigrasi ke sisi katoda yang kemudian membuat proton mengalami penumpukan atau mencapai kondisi jenuh di sisi katoda. Penumpukan proton inilah yang kemudian mengakibatkan terhambatnya proses adsorpsi reaktan pada katalis sehingga terjadi penurunan kinerja MEA.

4. Pengujian dilakukan pada suhu ruang.

Pada dasarnya DEFC tidak dapat aktif jika digunakan pada suhu ruang. Pada jurnalnya, Mann menjelaskan melalui grafik di bawah bahwa semakin rendah suhu yang digunakan, maka densitas arus yang dihasilkan juga akan semakin rendah. Sehingga jika ditarik suatu estimasi maka DEFC pada suhu ruang tidaklah aktif dan dapat bekerja secara optimal. Menurut Mann pada jurnalnya yang berjudul *Characterization and Analysis of New Catalyst for a Direct Ethanol Fuel Cell*, dijelaskan bahwa semakin tinggi temperature alcohol yang digunakan (dalam hal ini adalah etanol), maka proses oksidasi etanol tersebut membuat karbon pada etanol melepaskan elektron semakin cepat. Hal ini sesuai dengan teori kinetika dimana pada persamaan Arrhenius,

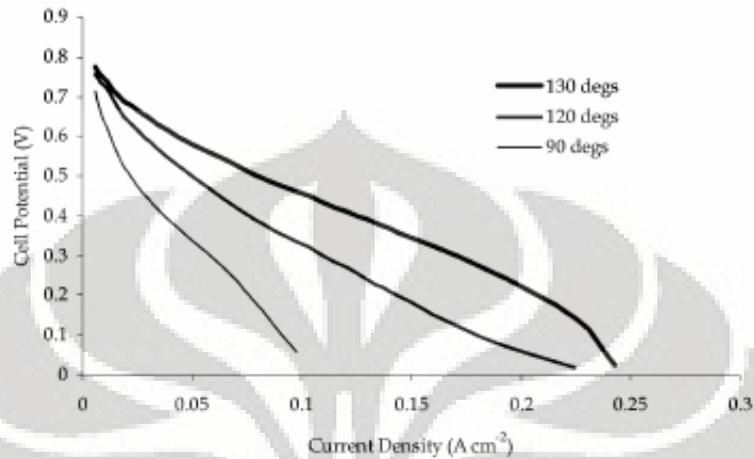
$$k_r = Ae^{-E/RT}$$

.....4. 2

semakin tinggi suhu suatu reaksi, maka kecepatan reaksi akan semakin meningkat.

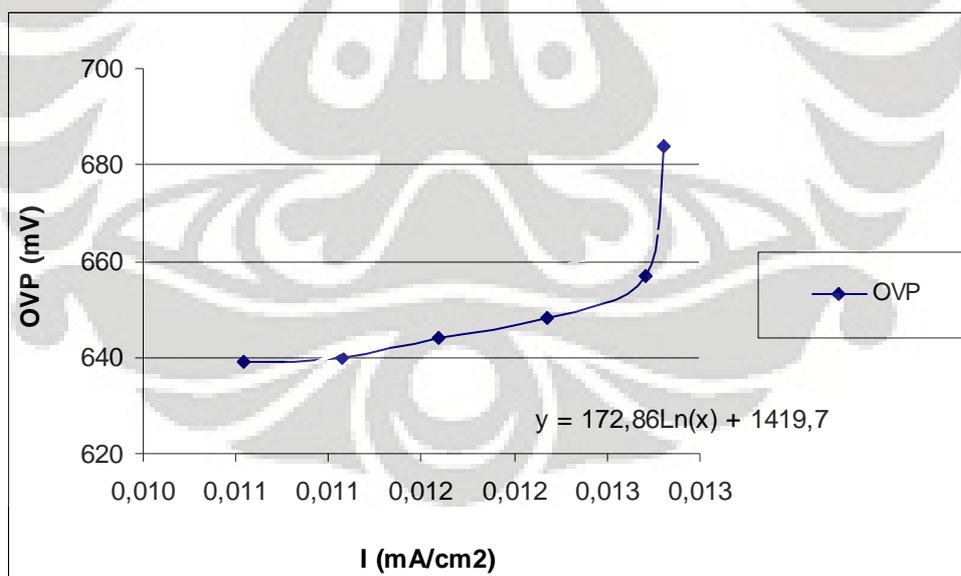
Reaksi oksidasi ini terjadi secara eksotermis. Seharusnya jika diberikan panas, maka kecepatan reaksi akan menurun dan performa sel akan menurun. Tetapi reaksi oksidasi yang terjadi belum mencapai kondisi kesetimbangannya, sehingga adanya peningkatan suhu akan mempercepat

reaksi yang terjadi. Sehingga pada temperatur ruang, oksidasi belum dapat berjalan sesuai dengan yang diharapkan. Semakin mudahnya etanol tersebut teroksidasi akan menghasilkan densitas arus dan tegangan yang lebih baik. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4. 16.



Gambar 4. 16 Kurva polarisasi DEFC dengan variasi suhu (Mann, 2006)

#### 4.4.3. Plot Tafel



Gambar 4. 17 Plot tafel etanol 2 M

Dari grafik tersebut didapatkan persamaan grafiknya, yakni  $y = 172,86 \ln x + 1419,7$

Dari persamaan Tafel, pada persamaan 2.12, yakni

$$V = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad \dots\dots 2.12$$

Maka dapat disederhanakan menjadi

$$V = a + b \ln x$$

Dimana  $a = (-RT/\alpha nF) \ln i_0$

$$b = RT/\alpha nF$$

sehingga didapatkan nilai *exchange current density* ( $i_0$ ) sebesar 0,000272 mA/cm<sup>2</sup>.

Dimana nilai ini masih sangat jauh dari nilai yang diharapkan, yakni 20 mA/cm<sup>2</sup>.

Hal ini menunjukkan bahwa kinerja DEFC belum berjalan dengan baik.

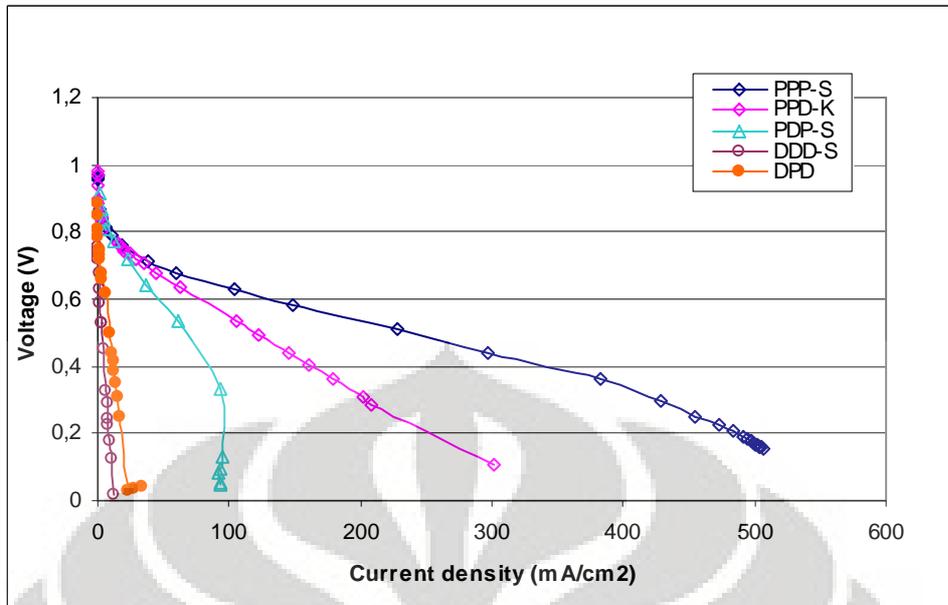
#### 4.4.4. Perbandingan Pengujian Sel Tunggal

Dari data sebelumnya didapatkan bahwa pengujian dengan menggunakan hidrogen maupun etanol memberikan hasil yang kurang bagus. Sehingga dilakukan pengujian perbandingan dengan menggunakan variasi sebagai berikut (Sistem; Cell Stack; E-Load):

1. P3TK; P3TK; P3TK (PPP)
2. P3TK; P3TK; DTK (PPD)
3. P3TK; DTK; P3TK (PDP)
4. DTK; DTK; DTK (DDD)
5. DTK; P3TK; DTK (DPD)

(P3TK = Lemigas, DTK = Departemen Teknik Kimia)

Cell stack serta sistem yang digunakan oleh P3TK adalah berasal dari Electrochem, sedangkan yang digunakan oleh DTK adalah hasil fabrikasi dan perakitan sendiri. Namun MEA yang digunakan adalah sama. Adapun data yang didapatkan:



**Gambar 4.18 Kurva polarisasi perbandingan antar sistem**

Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa cell stack dan sistem yang terdapat di DTK bermasalah. Pada saat menggunakan cell stack dan sistem P3TK memberikan densitas arus yang mencapai 500 mA/cm<sup>2</sup> sedangkan menggunakan cell stack dan sistem DTK memberikan densitas arus yang hanya mencapai 10 mA/cm<sup>2</sup>.

Adapun hasil yang bisa diambil dari perbandingan tersebut adalah:

1. Perbandingan antara sistem P3TK dan DTK

Perbandingan ini dapat dilihat pada kurva PPP dan DPD atau DDD. Terlihat sangat jelas, dengan perbedaan sistem yang digunakan, nilai densitas arus yang dihasilkan oleh sistem DTK mencapai 10 kali lebih rendah dari pada sistem P3TK. Hal ini karena sistem DTK merupakan fabrikasi sendiri, dan kemungkinan untuk adanya energy loss sangat besar, dan tidak keakuratan tekanan, temperatur dan laju lair sistem.

2. Perbandingan antara cell stack P3TK dan DTK

Perbandingan ini dapat dilihat melalui kurva PPP dan PDP. Pada kedua kurva tersebut terlihat bahwa cell stack yang terdapat pada DTK menghasilkan densitas arus 5 kali lebih rendah dari pada cell stack yang terdapat pada P3TK.

### 3. Perbandingan antara DC E-load P3TK dan DTK

Perbedaan penggunaan DC E-load juga mempengaruhi hasil pembacaan tegangan serta densitas arus yang dihasilkan. Penggunaan DC E-load di P3TK memberikan hasil hampir 2 kali lebih baik dari pada DC E-load yang ada di DTK.

## 4.5. FABRIKASI MOBIL ENERGI KIMIA

Untuk menjadikan sebuah mobil energi kimia, maka semua komponen harus dijadikan satu. Cell stack, tangki etanol, serta tangki oksigen diletakkan di atas chassis. Penyusunan komponen-komponen tersebut dapat dilihat pada Gambar 4. 19. Untuk dapat menggerakkan mobil, maka listrik yang dihasilkan dari DEFC dialirkan ke dinamo.



Gambar 4. 19 Mobil energi kimia

Laju alir yang digunakan untuk etanol adalah 1 ml/menit, dan oksigen 50 ml/menit. Secara teoritis, laju alir ini sudah dapat mencukupi kebutuhan bahan bakar pada DEFC. Namun pada kenyataannya, mobil ini tidak dapat bergerak, karena tegangan yang dihasilkan yakni 0,4 volt masih kurang untuk menggerakkan dinamo. Karena dinamo yang dipergunakan membutuhkan tegangan 0,5 volt untuk dapat bergerak. Jika mempergunakan bahan bakar hidrogen dengan tegangan yang dihasilkan 0,8 volt, maka dinamo dapat berputar, dan mobil dapat bergerak dengan kecepatan 3 cm/s dengan beban 1,5 kg.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. KESIMPULAN**

Dari hasil fabrikasi dan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan:

1. Secara teoritis, luas MEA yang dibutuhkan untuk dapat menggerakkan mobil adalah 9,9 cm x 9,9 cm. Selain itu dibutuhkan sebanyak 2,4 ml etanol 2 M dan 274 ml oksigen untuk dapat menggerakkan mobil seberat 2 kg selama 10 menit.
2. Pelat bipolar yang digunakan terbuat dari grafit dengan ukuran 14 cm x 14 cm dengan ketebalam 10 mm, dengan pola aliran serpentine yang memiliki luas area inti aktif 9,8 cm x 9,8 cm. Pelat penutup yang digunakan berbahan acrylyc dengan ukuran 14 cm x 14 cm dengan ketebalam 5 mm.
3. MEA yang difabrikasi terdiri dari carbon cloth sebagai GDL dan membran Nafion 117 serta katalis komersial Pt-RU/C untuk anoda dan Pt/C untuk katoda.
4. Hasil uji DEFC pada temperatur 25°C voltase maksimum yang dihasilkan adalah 0,506 V dengan densitas arus 0,011 mA/cm<sup>2</sup> dan densitas arus maksimum adalah 4,165 mA/cm<sup>2</sup> pada 0,004 V.
5. Berdasarkan daya dan tegangan yang dihasilkan oleh etanol dari DEFC belum dapat menggerakkan mobil. Namun dengan menggunakan hidrogen dapat menggerakkan mobil dengan kecepatan 3 cm/s dengan beban 1,5 kg.

#### **5.2. SARAN**

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya:

1. Fabrikasi cell stack dibuat seri, karena dapat meningkatkan voltase yang dihasilkan.
2. Teknik coating dengan spray atau sputtering dapat digunakan untuk menggantikan teknik coating dengan kuas, agar tinta katalis dapat lebih merata ke seluruh bagian GDL.

3. Melakukan hot press cukup sekali, namun dengan tekanan serta suhu yang optimal serta waktu yang disesuaikan dengan luas MEA yang dihotpress.
4. Instalasi listrik harus dipasang dengan baik agar tidak ada arus yang terbuang.
5. Untuk DEFC masih harus dilakukan pada suhu tinggi, yakni pada kisaran suhu 80-120<sup>0</sup>C.



## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (2005). 'International Chem E-Car Competition'. Chemical Engineering World Congress. Glasgow. Dibuka 16 Maret 2007  
<[www.eng.monash.edu.au/chemeng/undergraduate/chemecar2005.pdf](http://www.eng.monash.edu.au/chemeng/undergraduate/chemecar2005.pdf)>
- Anonim. (2000). 'Aluminium's Properties'. The International Aluminium Institute. Dibuka 9 Mei 2008.  
<<http://www.world-aluminum.org/production/processing/properties.html>>
- Cahyadi, D. (2004). "Perancangan dan Pembuatan *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC)". Skripsi. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Carrette, L., Friedrich, K.A. dan Stimming, U. (2001). 'Fuel Cells – Fundamentals and Applications'. *Fuel Cells* 1, 1 : 5-39.
- Dohle, H., Divisek, J. dan Jung, R. (2000). 'Process Engineering of the Direct Methanol Fuel Cell'. *Journal of Power Sources* 86, 469-477.
- EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation. (2002). 'Fuel Cell Handbook'. U.S. Department of Energy: Morgantown, West Virginia.
- FKKSA. (2007). 'Second Malaysian Chem E-Car Competition'. UTM, Malaysia. Dibuka 25 Mei 2007 <[www.fkkksa.utm.my](http://www.fkkksa.utm.my)>
- Lamy, C., Lima, A., LeRhun, V., Delime, F., Coetanceau, C. dan Leger, J.M. (2002). 'Recent Advances in the Development of Direct Alcohol Fuel Cells (DAFC)'. *Journal of Power Sources* 105, 2:283-296.
- Larminie, J. dan Dicks, A. (2000). *Fuel Cell System Explained*. John Wiley & Sons, Ltd. Baffins Lane, Chichester, England.
- Li, X. dan Sabir, I. (2005). 'Review of Bipolar Plates in PEM Fuel Cells: Flow-field Designs'. *Journal of Hydrogen Energy* 30, 359-371.
- Mann, J., Yao, N. dan Bocarsly, A.B. (2006). 'Characterization and Analysis of New Catalyst for a Direct Ethanol Fuel Cell'. *Langmuir* 22, 10432-10436.
- Mennola, T. (2000). 'Design and Experimental Characterization of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells'. Ph.D. Theses. Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology.

- Nomura, M., Namie, S., Okano, K., Kobayashi, T., Koseki, K., Komaki, H. (1995). 'Current Status of Development and Technical Subjects of Fuel Cells'. *Bulletin of M.E.S.J.*, Vol 23, No.1.
- Quadt, T. (2004). 'Fuel's Paradise: How Can Chemistry find a way out of the energy crisis?'. University of Bath.
- Reeve, R.W. (2002). 'Update on Status of Direct Methanol Fuel Cells'. DTI/Pub URN 02/592.
- Rifki, Martin. (2006). "Pengembangan Sistem *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) Melalui Fabrikasi Cell Stack Berbahan Grafit dan Membrane Electrode Assembly (MEA) Dengan Katalis Komersial E-Tek". Skripsi. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Ryan, P., Martin, A.J., Wray, J.C., Narasimhan, M. P. (2004). 'Fuel cell stack With Cooling Fins and Use of Expanded Graphite in Fuel Cells.' US Patent 6808834
- Tang, H., Wang, S., Pan, M., J, S.P. (2007). 'Performance of DMFCs Prepared by hot-pressed MEA and Catalyst-Coated Membrane'. *Fuel Cell Bulletin*.
- Utari, L. (2006). "Fabrikasi Chemical Energy Car dengan Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) dengan Bahan Bakar Hidrogen dari Reaksi Hidrolisis Sodium Borohidra". Seminar. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Wikipedia. 2007. Drag (physics). Wikimedia. Dibuka 17 Juni 2007. <[en.wikipedia.org/wiki/Drag\\_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_(physics))>
- Wikipedia. 2008. Karbon. Wikimedia. Dibuka 8 Mei 2008. <[id.wikipedia.org/wiki/Karbon](http://id.wikipedia.org/wiki/Karbon)>
- Zelenay, P., Davey, J., Ren, X., Gottesfeld, S., Thomas, S.C. (2000). 'Catalyst Inks and Method of Application for Direct Methanol Fuel Cells.' US Patent 6696382.

# LAMPIRAN 1

## Perhitungan Kebutuhan Etanol dan Oksigen

### Etanol

Diketahui :  $V = 0.7 \text{ V}$

$$I = 20 \text{ mA/cm}^2$$

$$\text{Fuel Utilization (Uf)} = 25 \%$$

$$\text{Mr Ethanol} = 46 \text{ gr/grmol}$$

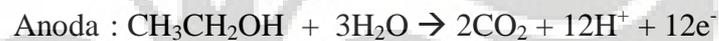
$$\rho_{\text{Ethanol}} = 0.79 \text{ gr/ml}$$

Spesifikasi DEFC Rancangan

$$P = 1,57 \text{ Watt}$$

$$V = 0,7 \text{ V}$$

Reaksi yang terjadi :



Dari spesifikasi rancangan, maka kita dapat mengetahui arus yang harus dihasilkan dengan persamaan :

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1,57}{0,7} = 2,24 \text{ Ampere}$$

Etanol yang dibutuhkan untuk menghasilkan arus sebesar 2,24 A dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned} m_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} &= 2,24 \text{ A} \times \frac{46 \text{ gr}}{1 \text{ grmol H}_2} \times \frac{1 \text{ equivalence of e}^-}{96,487 \text{ coulombs}} \times \frac{1 \text{ gmol C}_2\text{H}_5\text{OH}}{12 \text{ equiv. of e}^-} \times \frac{3600 \text{ sec}}{1 \text{ hr}} \\ &= 0,32 \frac{\text{gr C}_2\text{H}_5\text{OH}}{\text{hr}} \\ &= 0,005 \text{ gr/menit} = 0,007 \text{ ml/menit} \end{aligned}$$

Sedangkan laju Etanol yang masuk dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{in} = \frac{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{cons}}{U_f} = \frac{0,007}{0,25} = 0,028 \text{ ml/menit}$$

Berdasarkan perhitungan didapatkan bahwa kebutuhan etanol yaitu 0,028 ml/menit. Untuk waktu operasi selama 10 menit maka dibutuhkan etanol absolut sebanyak 0,28 ml atau sebanyak 0,22 gram.

Etanol yang digunakan dalam percobaan ini yaitu Etanol 2 M, maka volume larutan etanol 2 M yang dibutuhkan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$V = \frac{gr.1000}{M.Mr}$$

Dari perhitungan didapat bahwa jumlah volume larutan etanol 2 M untuk 10 menit yaitu sebesar 2,4 ml.

### **Oksigen**

Berdasarkan stoikiometri, maka laju oksigen yang dikonsumsi yaitu

$$O_{2,cons} = 3 \times C_2H_5OH_{cons} = 3 \times \frac{0.005}{46} = 0.0003 \text{ gmol/menit}$$

Sedangkan Oksigen yang harus disuplai sebanyak (STP)

$$O_{2,in} = \frac{0.0003}{0.25} = 0.0012 \text{ gmol/menit} \times 22.4 \frac{\text{L}}{\text{gmol}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1\text{L}} = 27.4 \text{ ml/menit}$$

Untuk waktu operasi selama 10 menit, maka dibutuhkan volume oksigen sebanyak 274 ml.

## LAMPIRAN 2

### Data Hasil Uji Sel Tunggal dengan Hidrogen

I (mA)	I (mA/cm <sup>2</sup> )	Tegangan (V)	P (mW/cm <sup>2</sup> )
0,52	0,005	0,898	0,005
0,53	0,006	0,9	0,005
0,53	0,006	0,899	0,005
1,26	0,013	0,895	0,012
1,26	0,013	0,895	0,012
1,26	0,013	0,895	0,012
1,26	0,013	0,895	0,012
1,26	0,013	0,895	0,012
1,26	0,013	0,895	0,012
2,72	0,028	0,884	0,025
2,72	0,028	0,884	0,025
2,72	0,028	0,884	0,025
3,46	0,036	0,879	0,032
3,8	0,040	0,869	0,034
4,2	0,044	0,853	0,037
5,66	0,059	0,847	0,050
7,14	0,074	0,828	0,062
8,62	0,090	0,825	0,074
9,34	0,097	0,811	0,079
10,81	0,113	0,796	0,090
12,3	0,128	0,778	0,100
14,49	0,151	0,739	0,111
17,42	0,181	0,69	0,125
22,56	0,235	0,617	0,145
29,16	0,304	0,461	0,140
45,3	0,472	0,438	0,207
50,4	0,525	0,411	0,216
53,3	0,555	0,379	0,210
56,4	0,587	0,349	0,205
60,7	0,632	0,307	0,194

### LAMPIRAN 3

#### Data Hasil Uji Sel Tunggal dengan Etanol 2 M

I (mA)	I (mA/cm <sup>2</sup> )	Tegangan (V)	P (mW/cm <sup>2</sup> )
1,01	0,011	0,506	0,005
1,06	0,011	0,505	0,006
1,11	0,012	0,501	0,006
1,17	0,012	0,497	0,006
1,22	0,013	0,488	0,006
1,23	0,013	0,461	0,006
1,32	0,014	0,461	0,006
1,42	0,015	0,461	0,007
1,54	0,016	0,461	0,007
1,68	0,017	0,461	0,008
1,91	0,020	0,478	0,010
2,04	0,021	0,458	0,010
2,22	0,023	0,443	0,010
2,53	0,026	0,442	0,012
2,97	0,031	0,446	0,014
3,26	0,034	0,407	0,014
4,11	0,043	0,37	0,016
4,56	0,048	0,365	0,017
5,01	0,052	0,351	0,018
5,90	0,061	0,354	0,022
6,40	0,067	0,32	0,021
7,48	0,078	0,299	0,023
18,00	0,187	0,18	0,034
18,67	0,194	0,168	0,033
400,00	4,165	0,004	0,017