



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KOMPOSISI *POLYTETRAFLUOROETHYLENE*
PADA *MICROPOROUS LAYER* UNTUK MENINGKATKAN
KINERJA *PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL***

SKRIPSI

**KEVIN WIRANATA
0706269905**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA
DEPOK
JANUARI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KOMPOSISI *POLYTETRAFLUOROETHYLENE*
PADA *MICROPOROUS LAYER* UNTUK MENINGKATKAN
KINERJA *PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

**KEVIN WIRANATA
0706269905**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JANUARI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Kevin Wiranata

NPM : 0706269905

Tanda Tangan :

Tanggal : 6 Januari 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Kevin Wiranata
NPM : 0706269905
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pengaruh Komposisi *Polytetrafluoroethylene*
pada *Microporous layer* untuk Meningkatkan
Kinerja *Proton Exchange Membrane Fuel cell*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA ()

Penguji : Kamarza Mulia, PhD ()

Penguji : Ir. Dijan Supramono, MSc ()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Slamet, MT ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Januari 2011

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur bagi Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan rahmat-Nya sehingga seminar ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Dalam penyusunan makalah ini, penulis banyak mendapatkan bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA. selaku pembimbing skripsi di Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia (DTK FTUI) atas bimbingan, ilmu, waktu, dan saran dalam pembuatan skripsi ini.
2. Ibu Dr. Verina J. Wargadalam, Mas Bono Pranoto, S.T., Mas Harun Al Rasyid, S.T., dan Ka Danu selaku pembimbing selama di Laboratorium Pusat Penelitian dan Pengembangan Tenaga Kelistrikan dan Energi Baru Terbarukan (P3TKEBT) atas bimbingan, ilmu, diskusi dan nasehatnya dalam pembuatan makalah skripsi ini.
3. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng selaku koordinator skripsi, Ibu Ir. Dewi Tristantini, PhD. selaku pembimbing akademis dan para dosen DTK FTUI yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang sangat berguna.
4. Keluarga (Papa, Mama, dan Adik tercinta) di rumah yang telah memberikan kasih sayang, dukungan, dan doa.
5. Kak Danu dan Kang Jajat yang telah membantu teknis penggunaan peralatan selama di laboratorium *Fuel cell* P3TKEBT.
6. Mbak Lisa dari Laboratorium Kimia P3TKEBT atas bimbingan dan perijinan menggunakan laboratorium kimia P3TKEBT.
7. Kang Jajat dan Mang Ijal, Mas Opik, Mas Sri, Mas Eko, Mas Mughni, Mas Her, Mas Rinan, Mbak Yanti, Mbak Ita, serta seluruh karyawan DTK UI atas bantuannya dalam administrasi dan perlengkapan skripsi.
8. Angela Jessica Stephanie, Cynthia Herdiana, David Karunia, Erica Sanjaya, Hendro, Humala, Rudy Wijaya, dan Valentina atas persahabatan dan dukungannya.

9. Alien Olifitria Ningrum dan Rahma Muthia, selaku tim satu bimbingan, serta Mas Bono Pranoto, S.T., dan Dewi Anggraini selaku satu team bimbingan *Fuel cell*, terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.
10. Riezqa Andika, Maria Linawati, dan Zayyanatun Zulfa selaku teman satu kelompok Perancangan Produk Kimia yang selalu memberi suasana hangat selama proses penyusunan skripsi ini.
11. Teman-teman Teknik Kimia 2007 dan Unit Kegiatan Mahasiswa Keluarga Mahasiswa Buddhis Universitas Indonesia (KMBUI) yang telah memberi dukungan dari awal hingga akhir penyusunan skripsi ini
12. Serta semua pihak yang telah mebantu penyusunan skripsi ini baik secara langsung ataupun tidak langsung.

Semoga Tuhan YME membalas kebaikan dan bantuan yang telah diberikan. Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam skripsi ini, oleh sebab itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan untuk pengembangan penelitian dalam skripsi ini

Depok, 6 Januari 2011

Kevin Wiranata

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Kevin Wiranata

NPM : 0706269905

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pengaruh Komposisi *Polytetrafluoroethylene* pada *Microporous Layer* untuk Meningkatkan Kinerja *Proton Exchange Membrane Fuel cell*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 6 Januari 2011

Yang menyatakan

(Kevin Wiranata)

ABSTRAK

Nama : Kevin Wiranata

Program Studi : Teknik Kimia

Judul : Pengaruh Komposisi *Polytetrafluoroethylene* pada *Microporous layer* untuk Meningkatkan Kinerja *Proton Exchange Membrane Fuel cell*

Air memegang peranan penting dalam *Membrane Elektrode Assembly*. Semakin banyak kandungan air dalam MEA, semakin baik konduktivitas ioniknya. Namun kadungan air yang berlebihan dapat menyebabkan *flooding* yang dapat menurunkan kinerja *fuel cell*. Tujuan penelitian ini adalah mencegah *flooding* dan meningkatkan kinerja MEA dengan penambahan *microporous layer*. Kinerja MEA tanpa MPL dan MEA dengan berbagai komposisi PTFE dalam MPL diuji pada penelitian ini. MEA dengan MPL terbukti menaikkan *power density fuel cell* sebesar 258,8% dibandingkan dengan MEA tanpa MPL. Selain itu, MEA dengan MPL yang mengandung PTFE 20% wt menunjukkan *power density* yang lebih tinggi dibandingkan dengan MEA dengan MPL 10% wt PTFE dan 30% wt PTFE. Hal ini menunjukkan adanya komposisi optimum PTFE dalam MPL, dimana pada penelitian ini sebesar 20% wt.

Kata Kunci: *Polytetrafluoroetilene (PTFE); Microporous layer (MPL), Membrane Elektrode Assembly (MEA), Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*

ABSTRACT

Nama : Kevin Wiranata

Program Studi : Teknik Kimia

Judul : The Effect of Polytetrafluoroethylene Composition in *Microporous layer* to Increase Proton Exchange Membrane *Fuel cell* Performance

Water plays an important role in the Membrane Electrode Assembly. The more water content in the MEA, the better its ionic conductivity. However, excessive water content can result in flooding which degrades the performance of fuel cells. The objectives of this experiment are to reduce flooding and improve cell performance by adding a microporous layer. MEA without MPL and MEA with various compositions of PTFE in MPL have been tested in this experiment. MEA with MPL proved to raise the fuel cell power density by 258.8% compared to the MEA without MPL. Furthermore, MEA with MPL containing 20% wt PTFE showed a higher power density compared to the MEA with MPL 10% wt PTFE and 30% wt PTFE. This shows there is an optimum composition of PTFE in the MPL which is 20% wt in this experiment.

Keywords : *Polytetrafluoroethylene (PTFE); Microporous layer (MPL), Membrane Elektrode Assembly (MEA), Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR SINGKATAN	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Ruang Lingkup Permasalahan	3
1.5. Sistematika Penulisan	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Fuel cell</i>	5
2.2 <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel cell</i>	6
2.3 Struktur PEMFC	8
2.3.1 Pelat Bipolar	9
2.3.2 <i>Membrane Electrode Assembly</i>	10
2.3.3 Pelat Penutup	14
2.4 Kinerja <i>Fuel Cell</i>	14
2.2.1 <i>Activation Losses</i>	15
2.2.2 <i>Crossover Losses</i>	15
2.2.3 <i>Ohmic Losses</i>	15
2.2.4 <i>Mass Transport Losses</i>	16
2.5 <i>Microporous Layer</i>	16
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	22
3.1 Rancangan Penelitian.....	22
3.2 Variabel Penelitian.....	24
3.3. Rincian Kegiatan Penelitian.....	25
3.3.1. Pencucian Membran.....	25
3.3.2. Sintesis MPL pada katoda.....	26
3.3.3 Sintesis Lapisan Katalis Katoda.....	27
3.3.4 Sintesis Lapisan Katalis Anoda	29
3.3.5 <i>Hot Pressing</i>	30

3.3.6 Uji Kebocoran dan Uji <i>DC Elektroda Load</i>	30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	32
4.1 Fabrikasi <i>Membrane Electrode Assembly</i>	32
4.2 Uji <i>Single Cell</i>	35
BAB 5 KESIMPULAN.....	43
DAFTAR REFERENSI	44
LAMPIRAN.....	47
Lampiran 1. Perhitungan Bahan MPL pada GDL Katoda	47
Lampiran 2. Perhitungan Bahan Lapisan Katalis.....	48
Lampiran 3. Data pengujian kinerja PEMFC.....	50
Lampiran 4. Perhitungan Kurva Polarisasi Ohmic.....	54



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 MEA yang Terkelupas (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping. (Wahyudi, 2009)	2
Gambar 2. 1 Skema single cell PEMFC (Barbir, 2005).....	7
Gambar 2. 2 Skema produksi hidrogen dengan sistem energi berkelanjutan	8
Gambar 2. 3 Stuktur PEMFC	9
Gambar 2. 4 Jenis-jenis lajur aliran (Anggraini, 2010).....	10
Gambar 2. 5 Diagram skematik struktur MEA (Shen, 2008)	11
Gambar 2. 6 Struktur Nafion (Hoogers, 2003)	13
Gambar 2. 7 Kurva polarisasi <i>fuel cell</i> (Barbir, 2005).....	14
Gambar 2. 8 Struktur MPL dalam MEA dan gambar SEM tiap lapisannya (Malevich dkk, 2009).....	17
Gambar 2. 9 Pengaruh kandungan PTFE terhadap (a) pori MPL dan (b) tekanan operasi (Park dkk,2008)	18
Gambar 2. 10 (a) Ilustrasi pergerakan air pada katoda dan (b) tampilan mikrokopis pada daerah antarmuka (Kaviany dkk, 2009)	19
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian untuk Fabrikasi MEA	23
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian untuk Uji Kinerja PEMFC	24
Gambar 3. 3 Proses Preparasi Membran nafion.....	26
Gambar 3. 4 Carbon Paper yang mengandung MPL setelah dipanaskan hingga suhu 330 °C selama 30 menit.....	27
Gambar 3. 5 Proses deposisi lapisan katalis menggunakan air brushing.....	29
Gambar 3. 6 Mesin Hot Press (kiri) dan MEA siap pakai (kanan)	30
Gambar 3. 7 Gas yang digunakan (kiri) dan Peralatan Uji satu sel (kanan)	31
Gambar 4. 1 Ink yang terbentuk (a) MPL 10% (b) MPL 20% (c) MPL 30%	32
Gambar 4. 2 MPL setelah dipanaskan hingga suhu 330°C	33
Gambar 4. 3 (a) Penyemprotan dengan air brush (b) Keempat MPL katoda, Non MPL, 10%, 20%, dan 30% (c) hasil deposisi lapisan katalis.....	34
Gambar 4. 4 MEA yang telah difabrikasi	34
Gambar 4. 5 Kurva Polarisasi (kiri) dan kurva power density (kanan)	35
Gambar 4. 6 Daerah Ohmic Losses	37
Gambar 4. 7 (a) Katoda MEA non MPL (b) MEA MPL 10% (c) MEA MPL 20%, dan (d) MEA MPL 30%	39
Gambar 4. 8 Pelat bipolar katoda yang dibanjiri air (a) MEA non MPL (b) MEA MPL 10% (c) MEA MPL 20% (d) MEA MPL 30%	40

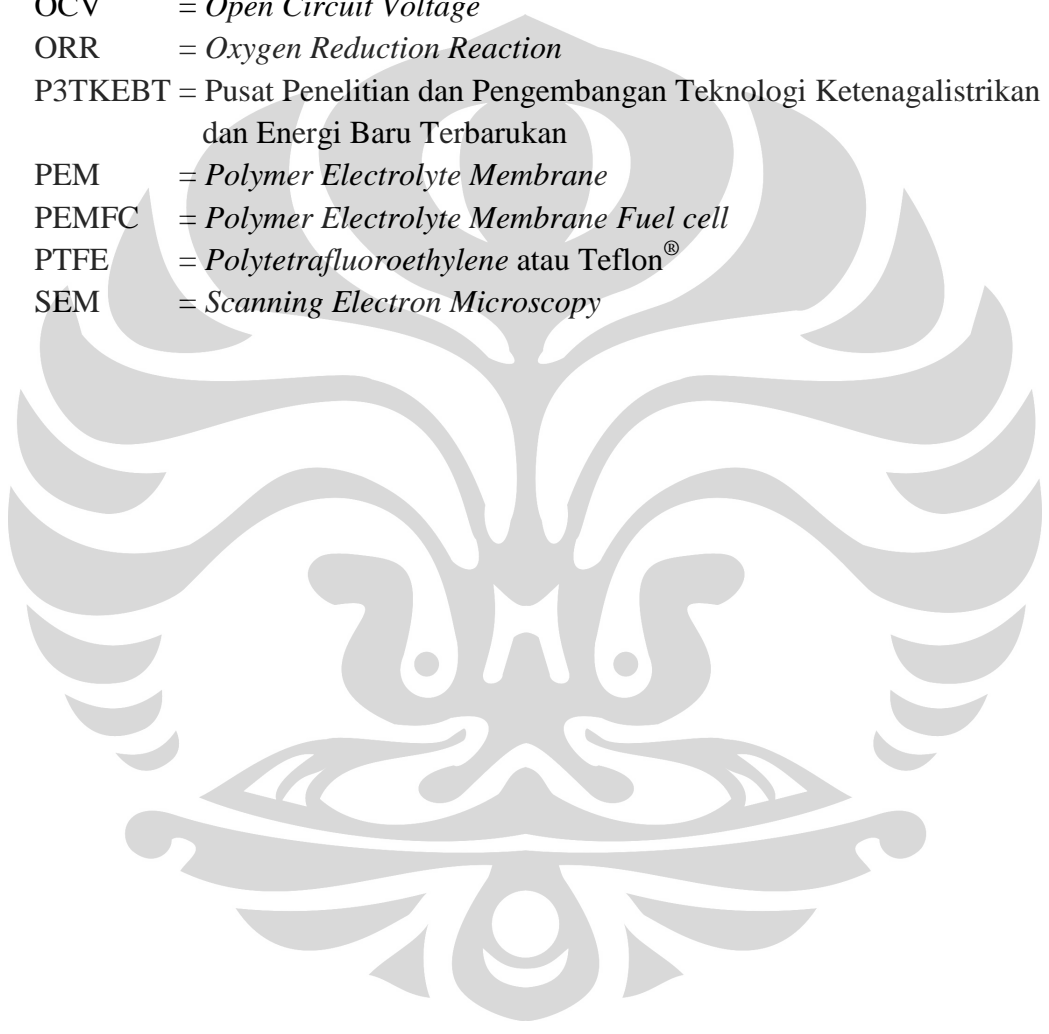
DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Metode dan hasil percobaan variasi komposisi PTFE dari beberapa jurnal internasional	20
Tabel 4. 1 Nilai <i>resistance</i> MEA	37



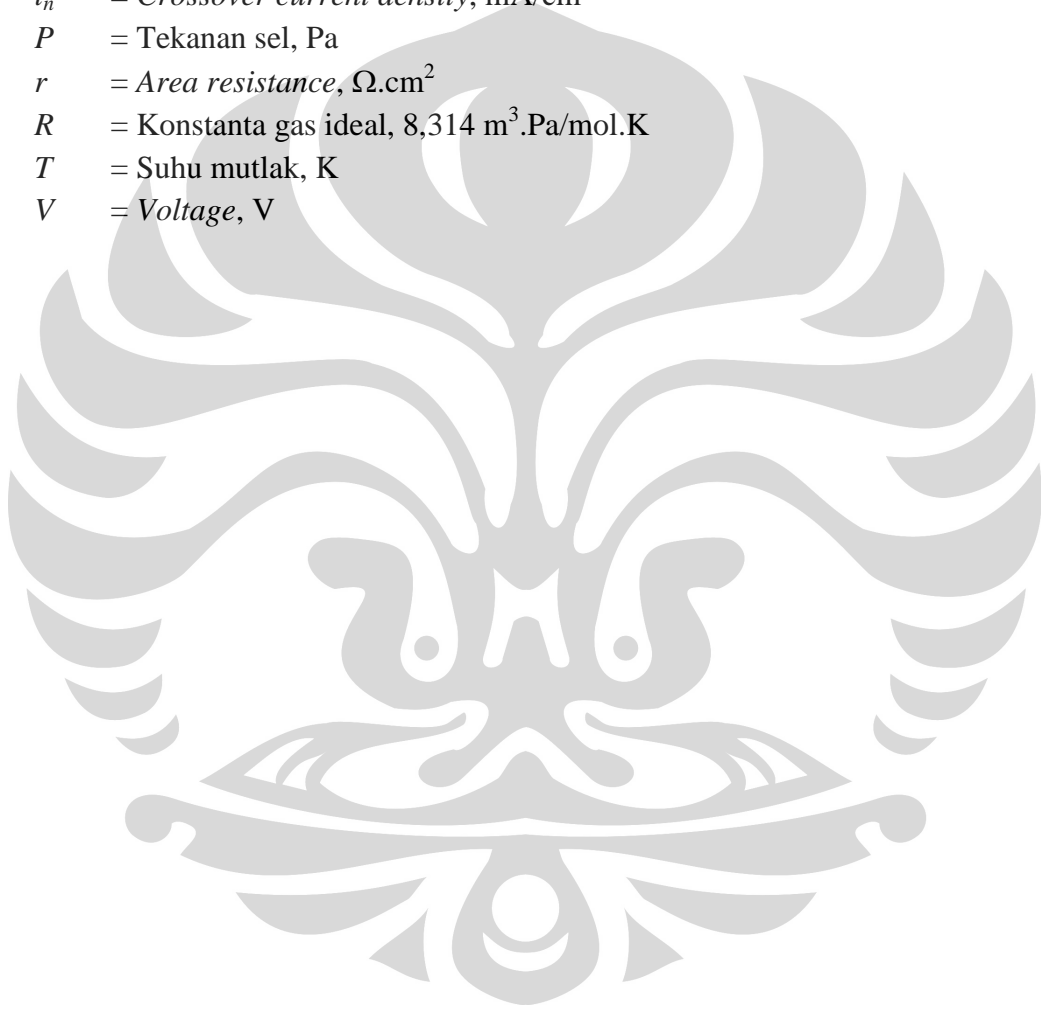
DAFTAR SINGKATAN

CC	= <i>Carbon Cloth</i>
CFP	= <i>Carbon Fiber Paper</i>
EW	= <i>Equivalent Weight</i>
GDL	= <i>Gas Diffusion Layer</i>
MEA	= <i>Membrane Electrode Assembly</i>
MPL	= <i>Microporous layer</i>
OCV	= <i>Open Circuit Voltage</i>
ORR	= <i>Oxygen Reduction Reaction</i>
P3TKEBT	= Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan
PEM	= <i>Polymer Electrolyte Membrane</i>
PEMFC	= <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel cell</i>
PTFE	= <i>Polytetrafluoroethylene</i> atau Teflon [®]
SEM	= <i>Scanning Electron Microscopy</i>



DAFTAR SIMBOL

α	= Charge transfer coefficient, unitless
ΔV	= Penurunan tegangan sel (<i>Overpotentials</i>), mV
F	= Konstanta Faraday, 96.500 Coulomb/mol
i	= Current density, mA/cm ²
i_0	= Exchange current density constant, mA/cm ²
i_l	= Limiting current density, mA/cm ²
i_n	= Crossover current density, mA/cm ²
P	= Tekanan sel, Pa
r	= Area resistance, Ω .cm ²
R	= Konstanta gas ideal, 8,314 m ³ .Pa/mol.K
T	= Suhu mutlak, K
V	= Voltage, V



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan konversi energi kimia menjadi energi listrik secara langsung melalui teknologi elektrokimia *fuel cell* merupakan alternative yang menjanjikan dan menarik dibanding sistem konversi energi berdasarkan siklus termodinamika yang melibatkan pembakaran dan saat ini mendapatkan perhatian yang intensif pada beberapa tahun terakhir. *Fuel cell* mempunyai efisiensi energi yang tinggi dan tingkat emisi lebih rendah sehingga lebih ramah lingkungan.

Akhir-akhir ini, teknologi *fuel cell* terutama tipe *Polymer Electrolyte Membrane Fuel cell* (PEMFC) yang dapat beroperasi pada suhu rendah 60 °C - 100 °C mengalami kemajuan yang cukup signifikan terutama untuk aplikasi peralatan bergerak seperti kendaraan bermotor dan peralatan portabel (Lamy dkk, 2002). Tipe PEMFC ini menggunakan bahan bakar berupa gas Hidrogen.

Beberapa kendala yang menjadi hambatan pengembangan saat ini adalah ketahanan katoda *fuel cell* terhadap air yang terbentuk. Apabila tidak teratasi dengan baik, hal tersebut dapat menyebabkan *flooding*, menurunkan daya rekat Membrane Exchange Assembly (MEA) *fuel cell*, meningkatkan hambatan perpindahan massa dalam MEA dan menurunkan potensial *fuel cell*. Salah satu cara mengatasi hal ini adalah dengan menambahkan lapisan diantara lapisan Gas Diffusion Layer (GDL) dan lapisan katalis yang dinamakan Miroporous Layer (MPL)

Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia telah memulai riset mengenai *fuel cell* sejak 2004. Namun dalam perkembangannya sampai saat ini masih belum dihasilkan kinerja MEA yang optimal dari system PEMFC yang dibuat. Pada penelitian terdahulu (Wahyudi, 2009) diketahui bahwa *fuel cell* yang dihasilkan masih memiliki kelemahan berupa daya perekatan yang kurang baik. Permasalahan yang terjadi pada MEA penelitian yaitu pada daya rekat antara GDL dan membrane Nafion yang kurang baik, hal ini dibuktikan setelah 6 jam

beroperasi, kondisi MEA penelitian tidak lagi merekat sempurna, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1. 1 MEA yang Terkelupas (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping. (Wahyudi, 2009)

Daya rekat ini merupakan salah satu faktor rendahnya kinerja MEA yang dihasilkan. Jika lapisan MEA dan GDL terkelupas, maka ada daerah di antara membran Nafion dan GDL yang kosong (tidak rapat) sehingga proses penghantaran elektron di lokasi ini tidak berjalan dengan baik. Rendahnya daya rekat ini disebabkan oleh adanya manajemen air yang kurang baik sehingga terjadi *flooding* dalam *stack fuel cell* dan menyebabkan daya rekat menurun dan akhirnya menurunkan kinerja PEMFC.

Penggunaan PTFE dalam MPL dapat meningkatkan sifat hidrofobik dan mencegah *flooding* pada MEA *fuel cell*. PTFE sendiri juga berfungsi sebagai pengikat partikel karbon sehingga menjaga integritas dari MEA. Akan tetapi komposisi optimal PTFE dalam MPL *fuel cell* berbeda-beda tergantung pada keadaan operasi dan struktur MEA (Park dkk, 2008). Porositas GDL, tekanan aliran air, temperature operasi, dan ketebalan lapisan PTFE-Carbon adalah parameter-parameter yang dipengaruhi dan mempengaruhi komposisi optimum PTFE. Dari beberapa literature dan percobaan didapatkan komposisi optimum MEA adalah 10% - 30% persen berat (Antolini dkk, 2002). Oleh karena itu, pada penelitian kali ini akan memvariasikan beberapa komposisi PTFE dalam MPL yang *dicoating* ke GDL kemudian menggabungkan GDL dengan membrane Nafion untuk membentuk MEA. Hasil kinerja dari berbagai variasi komposisi PTFE tersebut kemudian dibandingkan sehingga diperoleh komposisi optimal PTFE pada PEMFC yang dibuat.

Penelitian ini memfokuskan penggunaan PTFE yang bersifat hidrofobik pada MPL sehingga diharapkan akan menghasilkan PEMFC yang berkinerja baik dan durabilitas yang tinggi.

1.2. Rumusan Masalah

Perumusan masalah pada penelitian ini adalah: Menentukan komposisi PTFE optimal dalam katoda MPL dengan keadaan operasi yang telah ditentukan sehingga diharapkan dapat meningkatkan kinerja PEMFC

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan secara khusus adalah untuk mencegah terjadinya *flooding* dan meningkatkan kinerja MEA dengan penambahan lapisan *microporous* pada katoda *fuel cell*. Kinerja yang dimaksud adalah peningkatan *power density* (mW/cm^2) yang dihasilkan oleh MEA

1.4. Ruang Lingkup Permasalahan

Ruang lingkup permasalahan yang akan dibahas pada tulisan ini adalah sebagai berikut.

1. Jenis *fuel cell* yang dibuat dalam penelitian ini berupa PEMFC.
2. Fabrikasi MEA mengacu pada penelitian sebelumnya (Wahyudi, 2009) dengan penambahan penggunaan PTFE dengan berbagai komposisi pada MPL katoda.
3. Kinerja *fuel cell* dievaluasi dengan uji sel tunggal yang dipresentasikan dalam bentuk kurva V-I dan P-I

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam makalah ini adalah sebagai berikut:

Bab 1 : PENDAHULUAN

Menjelaskan latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup permasalahan, dan sistematika penulisan.

Bab 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Menjelaskan pengertian *fuel cell*, prinsip kerja *fuel cell*, PEMFC dan komponen-komponennya, faktor yang mempengaruhi kinerja *fuel cell* dan MPL.

Bab 3 : METODE PENELITIAN

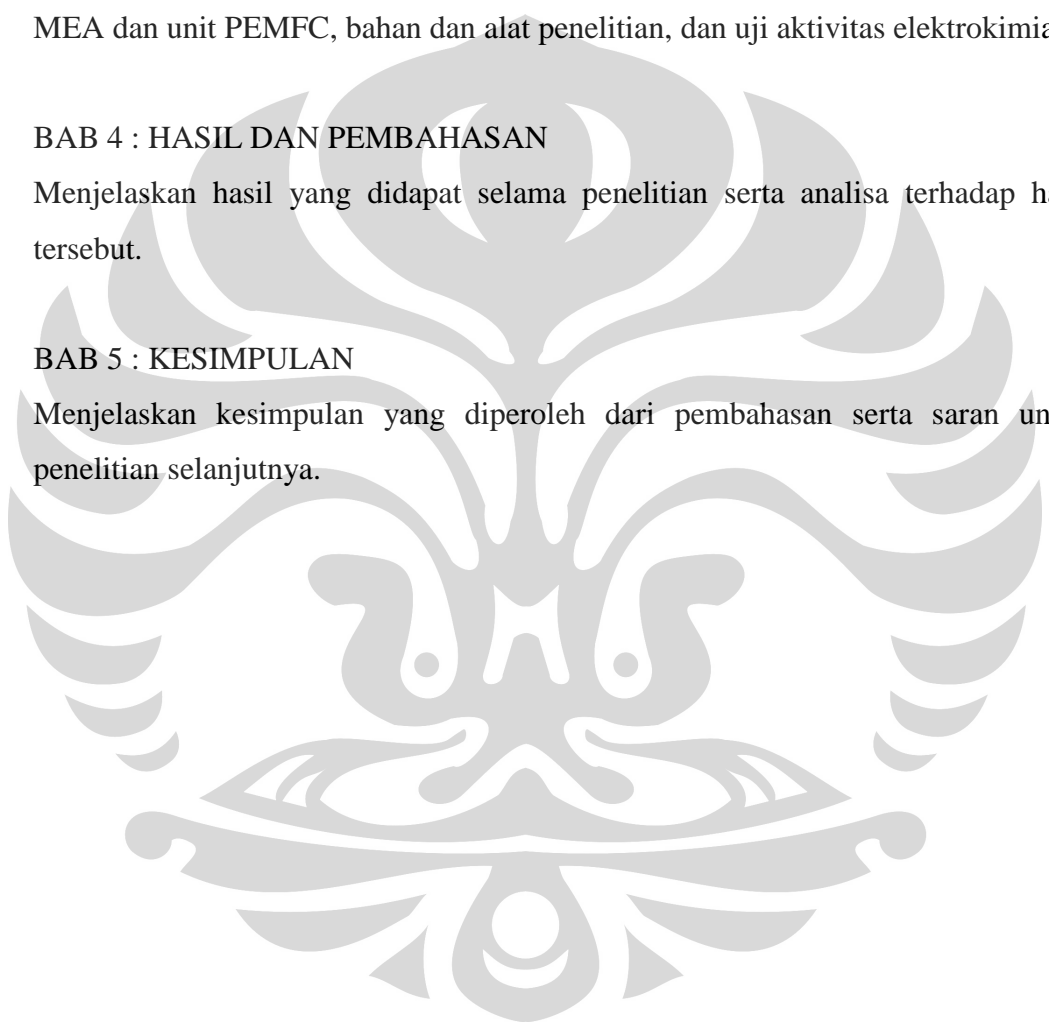
Menjelaskan rancangan penelitian, variabel-variabel yang akan digunakan dalam penelitian dan metode yang digunakan selama penelitian, mulai dari preparasi MEA dan unit PEMFC, bahan dan alat penelitian, dan uji aktivitas elektrokimia.

BAB 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan hasil yang didapat selama penelitian serta analisa terhadap hasil tersebut.

BAB 5 : KESIMPULAN

Menjelaskan kesimpulan yang diperoleh dari pembahasan serta saran untuk penelitian selanjutnya.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Fuel cell*

Fuel cell adalah suatu alat elektrokimia yang secara kontinu mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik secara langsung sepanjang bahan bakar dan oksidan dialirkan (Hoogers, 2003). *Fuel cell* mirip dengan baterai, perbedaannya baterai adalah alat untuk menyimpan energi, sedangkan *fuel cell* adalah alat untuk mengkonversi energi. Selama ada suplay bahan bakar maka *fuel cell* dapat terus memproduksi listrik.

Secara umum, proses untuk membangkitkan listrik dari bahan bakar melibatkan beberapa tahap konversi energy (Barbir, 2005), yaitu:

1. pembakaran bahan bakar mengkonversi energy reaksi bahan bakar menjadi panas
2. panas ini digunakan untuk memanaskan air dan memproduksi uap
3. uap digunakan untuk menjalankan turbin dilaam sebuah proses yang mengkonversi energy panas menjadi energy gerak, dan akhirnya
4. energy gerak digunakan untuk menggerakkan sebuah generator yang membangkitkan listrik

Sebuah *fuel cell* tidak mengindahkan semua proses tersebut dan menghasilkan listrik dengan sebuah tahap. Oleh karena itu, *fuel cell* memiliki efisiensi teoritis yang lebih tinggi dibandingkan mesin yang menggunakan sistem konversi energi berdasarkan siklus termodinamika yang melibatkan pembakaran. Saat gas hidrogen digunakan sebagai bahan bakar, *fuel cell* menghasilkan listrik dan air murni sehingga *fuel cell* disebut juga *zero emission engine*.

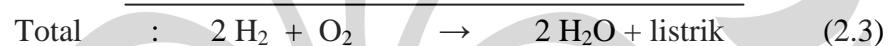
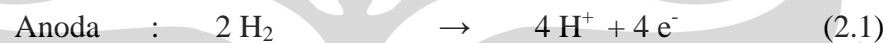
Teknologi *fuel cell* yang memiliki efisiensi tinggi dan *zero emission* ini dapat menjadi jawaban atas isu ketahanan energi yang saat ini banyak dikhawatirkan. Oleh karena itu *fuel cell* banyak dikembangkan secara komersial dan aplikasi militer, seperti kendaraan, peralatan listrik *portabel*, dan *power plant* (Hoogers, 2003).

Banyak tantangan yang harus dihadapi sebelum *fuel cell* dapat diproduksi secara komersial dan berskala besar. Yang utama adalah biaya. Untuk mendapatkan performa yang optimal umumnya dibutuhkan bahan dan alat yang terbaik. Membran, katalis, dan *cell stack* sangat mahal saat ini. Sistem produksi dan penyimpanan hydrogen dalam jumlah besar masih sulit ditemui.

Ada banyak jenis *fuel cell*. Perbedaan utama terletak pada elektrolitnya. Yang akan dibahas disini adalah elektrolit bertipe membran polimer atau *Polymer Electrolyte Membrane* (PEM).

2.2 *Polymer Electrolyte Membrane Fuel cell*

PEMFC adalah jenis *fuel cell* dengan membran elektrolit dari polimer dengan bahan bakar hidrogen diumpankan ke anoda dan oksigen ke katoda. Reaksi yang terjadi untuk *fuel cell* jenis ini adalah:

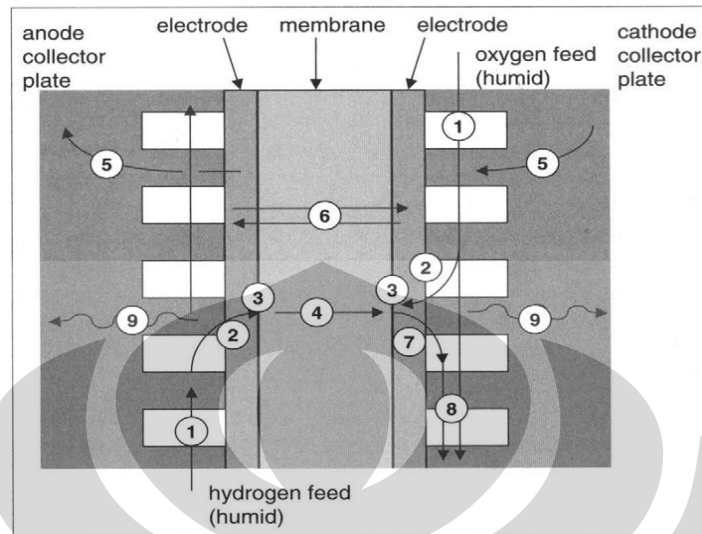


Total reaksi redoks tersebut menghasilkan potensial maksimum sebesar 1,23 Volt dan memiliki nilai energi bebas gibbs yang negative. Hal ini berarti reaksi tersebut dapat berlangsung secara spontan.

Hidrogen dioksidasi di anoda dan oksigen direduksi di katoda. Proton dilepaskan selama oksidasi hidrogen dan mengalir melalui PEM ke katoda. Karena membran tidak konduktif terhadap listrik, maka elektron yang dilepaskan selama oksidasi hidrogen mengalir ke rangkaian luar sehingga tercipta arus listrik (Lister dan McLean, 2004). Berikut adalah cara kerja *fuel cell* secara umum:

1. Gas mengalir melalui saluran
2. Gas berdifusi melewati media yang berpori
3. Terjadi reaksi kimia, termasuk semua reaksi intermeditnya
4. Proton bergerak melewati membrane PEM
5. Elektron berkonduksi melalui sel komponen yang konduktif listrik
6. Air bergerak melewati membrane PEM
7. Air bergerak (cair atau uap) melewati media katalis berpori dan GDL

8. Cairan dua fase gas yang membawa air yang terbentuk
9. Perpindahan panas



Gambar 2. 1 Skema single cell PEMFC (Barbir, 2005)

Jantung utama PEMFC adalah MEA. MEA sendiri terdiri dari dua komponen utama yaitu membran dan elektroda. Elektroda terdiri dari dua bagian, yaitu anoda dan katoda. Di elektroda terdapat lapisan katalis serta lapisan difusi gas atau GDL. MEA umumnya disusun diantara dua buah pelat *flowfield* yang identik sehingga membentuk pelat bipolar.

Produksi hidrogen sebagai bahan bakar PEMFC dapat dikembangkan melalui *reforming* metanol, propana, gas alam, atau bahan bakar lain. Contohnya, metana dapat di-*steam reforming* untuk menghasilkan hidrogen:



Gas hasil *reforming* mempunyai kelemahan besar yaitu karbon monoksida (CO). CO meracuni Pt (*poisoning*) karena teradsorb sangat kuat pada permukaan katalis ini. Akibatnya oksidasi hidrogen terganggu. Kandungan CO 100 ppm dapat menurunkan kinerja *fuel cell* ke tingkat yang parah. Untuk mengurangi kandungan CO dapat digunakan reaksi *water gas shift*:

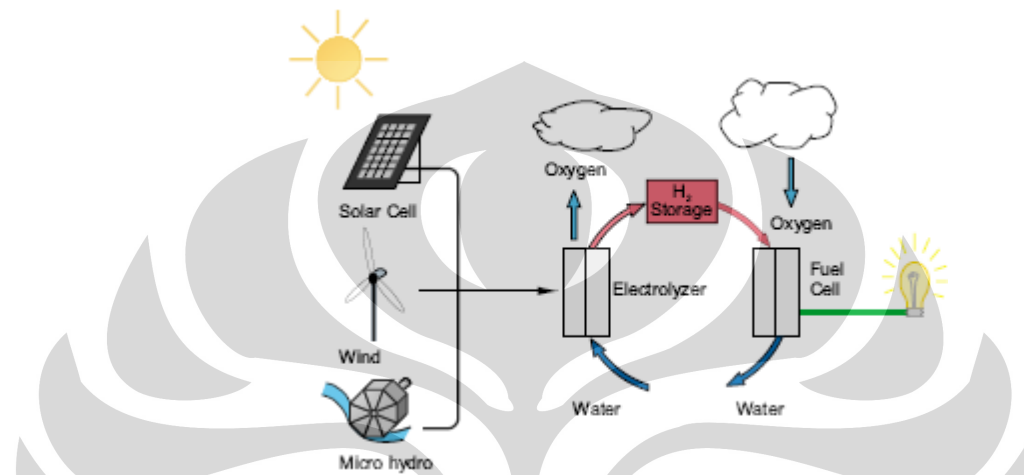


Walaupun digunakan reaktor *water gas shift* terbaru, kandungan CO masih lebih besar dari 2500 ppm. Pemrosesan lanjutan untuk menurunkan kadar CO sangat mahal. Metanol juga dapat direforming secara langsung:



Walaupun *steam reforming* metanol tidak menghasilkan CO secara langsung, tetapi CO masih tetap ada dalam jumlah kecil karena reaksi *water gas shift* bersifat *reversible*.

Hidrogen dapat diproduksi secara berkelanjutan tanpa emisi CO₂ dengan sistem energi terbarukan (Cook, 2001).



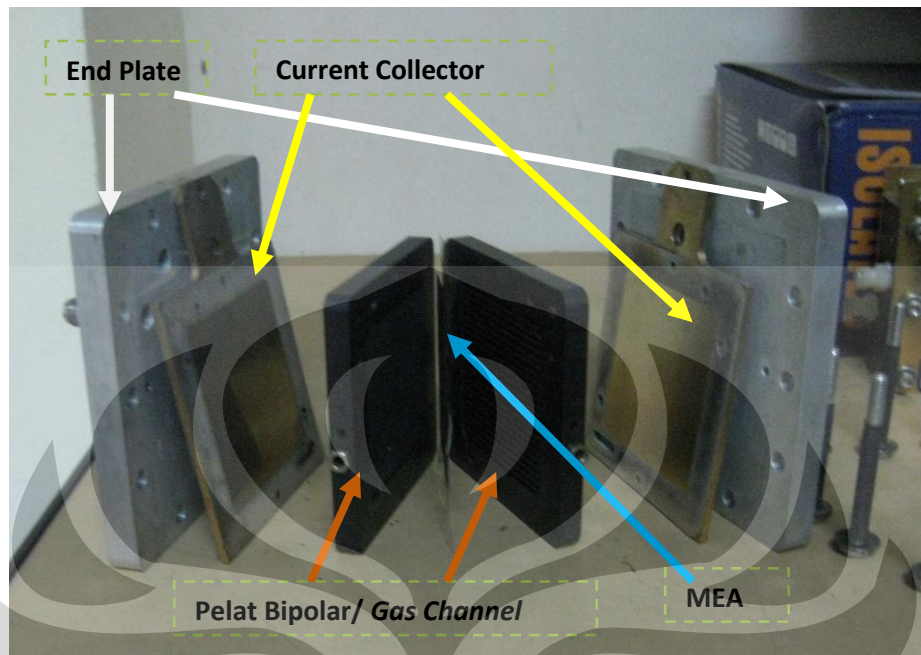
Gambar 2. 2 Skema produksi hidrogen dengan sistem energi berkelanjutan (Cook, 2001)

Sistem tersebut menggunakan *solar cell*, turbin angin, atau generator *micro-hydro* untuk mengkonversi energy matahari, angin, atau air menjadi energi listrik yang diarahkan ke *electrolyzer*. *Electrolyzer* akan memecah air menjadi gas hidrogen dan gas oksigen. Hidrogen akan disimpan hingga akan digunakan untuk *fuel cell* sedangkan gas oksigen akan dilepaskan ke atmosfer. Pada sistem ini, selama matahari bersinar, angin bergerak, atau air mengalir, gas hidrogen dapat terus diproduksi.

2.3 Struktur PEMFC

Struktur dalam satu sel PEMFC tidak jauh berbeda dengan struktur *fuel cell* pada umumnya. Struktur PEMFC 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; MEA yang terdiri dari GDL atau sering juga disebut *porous gas-backing layer*, lapisan katalis (*active layer*), dan membran, dan yang terakhir adalah pelat penutup (*endplate*) (EG&G dkk, 2000). Struktur

PEMFC lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2. 3 Struktur PEMFC

Bagian penting pada PEMFC yang mengkonversikan reaktan menjadi listrik terdapat di MEA. MEA pada umumnya terdiri dari lima lapisan yaitu elektoda-anoda-membran-katoda-elektroda. Di elektroda terdapat lapisan katalis serta lapisan difusi gas (GDL).

2.3.1 Pelat Bipolar

Kebanyakan dari *fuel cell*, 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*).

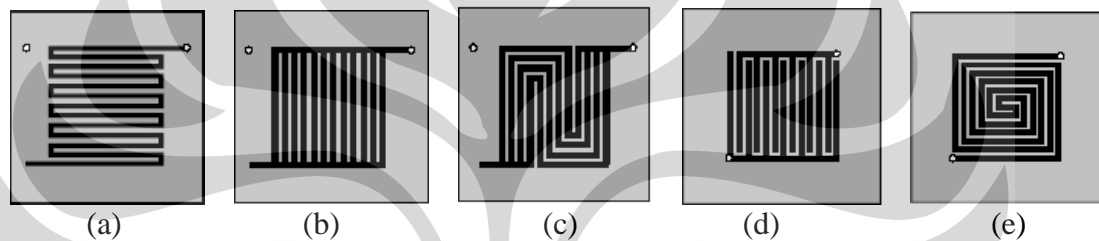
Pelat bipolar memiliki beberapa fungsi diantaranya (Moreira dkk, 2002; Hermanna, 2005):

1. Untuk mendistribusikan bahan bakar dan oksigen dalam sel (*flowfield*)
2. Sebagai fasilitas manajemen air
3. Untuk membawa arus menjauhi sel (*current collector*)
4. Sebagai fasilitas manajemen panas.

Kriteria sifat fisik dari pelat bipolar yaitu: baik secara konduktivitas listrik dan panas, *gas-tightness*, kuat secara mekanis dan baik secara stabilitas kimia terhadap

kondisi oksidasi dan reduksi serta faktor keekonomisannya (Moreira dkk, 2002).

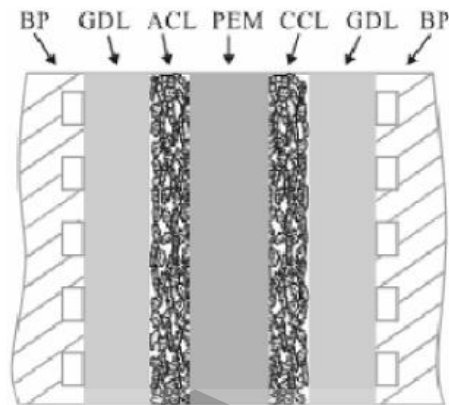
Fungsi pertama dari pelat ini adalah sebagai kolektor arus listrik (*current collector*) di mana sisi yang satu dari pelat bipolar berhadapan dengan anoda dan sisi yang lain dengan katoda. Voltase total dari suatu *fuel cell* ditentukan dari jumlah satuan sel dan densitas arus. Fungsi kedua dari pelat ini adalah menyediakan suatu area aktif (*active area*) atau lajur aliran (*flowfield*) reaktan yang berada pada sisi yang bersentuhan dengan lapisan difusi gas (GDL). Geometri lajur aliran bisa saja berbeda antara anoda dan katoda. Arah aliran pun bisa sama bisa juga berbeda: *co-flow*, *counter-flow* atau *crossflow*. Setiap lajur dan arah aliran memberikan pengaruh terhadap kinerja *fuel cell*, terutama dalam hal manajemen air dan distribusi gas ke elektroda.



Gambar 2. 4 Jenis-jenis lajur aliran: (a) serpentine channel, (b) parallel channel, (c) parallel serpentine channel, (d) discontinuous channels, (e) spiral channel geometry (Anggraini, 2010)

2.3.2 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 (sering juga disebut dengan elektrokatalis) sangat penting dalam *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 GDL dengan katalis. Susunan MEA ini disebut dengan MEA dengan lima lapisan (GDL-katalis anoda-membran-katalis katoda-GDL) (Moreira dkk, 2002).



Gambar 2. 5 Diagram skematik struktur MEA. BP – bipolar plate; GDL – gas diffusion layer; ACL – lapisan katalis anoda; CCL – lapisan katalis katoda; PEM – membran penukar proton (Shen, 2008)

2.3.2.1 Gas Diffusion Layer

Komponen-komponen utama PEMFC adalah GDL, membran, dan katalis. Pada PEMFC, GDL memiliki beberapa fungsi, antara lain:

- melewati gas-gas reaktan dan produk untuk mengalir di antara anoda dan katoda
- penyangga struktural bagi lapisan katalis
- konduktor listrik antara katalis dan *current collector plate*
- terkadang, GDL juga digunakan sebagai substrat untuk deposisi katalis.

GDL umumnya *Carbon Fiber Paper* (CFP) atau *Carbon Cloth* (CC) yang dapat mengumpulkan arus sekaligus melewati gas. MEA yang dibentuk dari kain karbon dapat mencerminkan kinerja daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan kertas karbon (Wilson dkk, 1995). Namun golongan akademisi dan industri umumnya menggunakan kertas karbon karena biaya yang lebih murah dan lebih mudah untuk membuat micro-porous layer (MPL) atau katalis lapisan langsung ke atasnya.

Untuk menjalankan fungsinya dengan baik, GDL harus memiliki ketebalan serendah mungkin dengan hambatan listrik yang rendah. Dengan ketebalan yang rendah, gas-gas reaktan dan produk akan dapat berdifusi dengan lebih mudah (permeabilitas gas tinggi). Untuk menghasilkan transport massa yang optimum, GDL dibuat bersifat porous tanpa terlalu menurunkan konduktivitas listriknya. Berdasarkan praktek, GDL yang terlalu tipis tidak dapat memberikan

kontak elektrik yang baik antara *current collector plate* dengan lapisan katalis, sementara GDL yang terlalu tebal menghasilkan hambatan listrik yang terlalu besar. Oleh karena itu, setiap jenis material yang digunakan sebagai GDL memiliki ketebalan optimum tertentu yang berbeda-beda (Mathur dkk, 2005).

Air yang terbentuk pada PEMFC tidak boleh menyumbat pori-pori kertas/kain yang digunakan pada GDL. Oleh karena itu, pada umumnya kertas/kain pada GDL mengandung material hidrofobik seperti PTFE atau material khusus lainnya untuk mencegah terjadinya kebasahan. Material hidrofobik tersebut mencegah terjadinya kadar air yang berlebih sehingga lapisan katalis tidak dibanjiri oleh air dan dapat bekerja secara maksimal. Material tersebut juga membantu mempertahankan keseimbangan air pada membran dengan melewatkan air dalam jumlah yang sesuai dan mencegah air yang berlebih mengalir menuju membran.

2.3.2.2 Lapisan Katalis Katoda

Reaksi reduksi oksigen atau *Oxygen Reduction Reaction* (ORR) adalah reaksi yang terdiri dari banyak reaksi elementer. Kompleksnya jalur reaksi membuat ORR berjalan lambat. Salah satu parameternya adalah nilai *exchange current density*. *Exchange current density* ORR 10^5 kali lebih rendah dari oksidasi hidrogen. Perbedaan inilah yang membuat kinerja *fuel cell* sangat bergantung pada aktivitas katoda. Oleh sebab itu pengembangan elektroda PEMFC umumnya dilakukan pada katoda.

Untuk meningkatkan aktivitas katoda maka utilisasi atau penggunaan katalis harus ditingkatkan. Hal ini tidak saja meningkatkan kinerja tetapi juga mengurangi *loading* Pt. Salah satu metode untuk meningkatkan utilisasi katalis adalah menambahkan lapisan MPL diantara lapisan katalis dan GDL. Diameter pori yang lebih kecil pada MPL akan mencegah *ink* katalis jatuh ke lapisan GDL (Zi dan Kaufan, 2002). Selain itu, lapisan MPL juga mengurangi terjadinya flooding sehingga laju transport gas oksigen ke lapisan katalis katoda akan lebih lancar.

Cara lain untuk meningkatkan utilisasi katalis adalah dengan menambahkan polimer konduktor proton seperti nafion karena katalis Pt yang

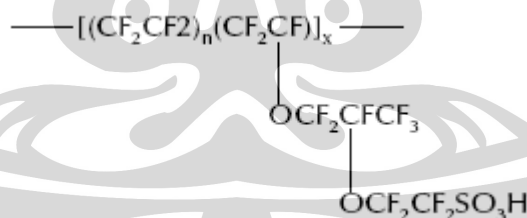
kontak dengan membran dapat bekerja lebih efektif. Larutan nafion dapat ditambahkan ke elektroda atau saat preparasi tinta katalis. Nafion dapat meningkatkan konduktivitas ionik lapisan katalis.

2.3.2.3 Lapisan Katalis Anoda

Reaksi yang terjadi pada anoda adalah hidrogen berubah menjadi ion hidrogen positif (proton) dan menarik elektron. Katalis Pt yang digunakan untuk mempercepat kinetika reaksi. Pada *fuel cell* katalis yang digunakan biasanya adalah Pt, akan tetapi harga katalis ini sangat mahal dan mudah teracuni oleh CO yang menyebabkan luas permukaan Pt semakin kecil. Oleh karena itu diperlukan logam kedua atau ketiga untuk mengabsorb CO. Saat ini perkembangan teknologi katalis telah membuat campuran Pt dengan logam – logam lain seperti : Ru, Re, Rh, Os, Mo, Pb, Bi, Sn (Jamal, 2008).

2.3.2.4 Membran

PEMFC menggunakan elektrolit dari membran berbahan polimer (PEM). PEM berfungsi sebagai pembatas antara anoda dan katoda serta sebagai elektrolit. Yang umum digunakan saat ini adalah Nafion[®], membran *perfluorosulfonic acid* yang dikembangkan oleh DuPont. Strukturnya ditunjukkan oleh Gambar 2.6



Gambar 2. 6 Struktur Nafion (Hoogers, 2003)

Nilai n dan x bervariasi dengan variasi *Equivalent Weight* (EW). EW berkisar 900-1400, umumnya 1100. Karena struktur nafion mirip dengan Teflon[®] maka kekuatan mekanisnya bagus, tidak larut oleh air, dan stabil secara termal dan kimia.

Konduktivitas nafion bergantung pada tingkat hidrasinya. Dalam keadaan kering nafion merupakan konduktor ion yang buruk. Tetapi dengan bertambahnya kandungan air, konduktivitasnya meningkat tajam. Karena itu gas umumnya dihumudifikasi sebelum masuk ke PEMFC. Sifat ini membatasi suhu operasi *fuel*

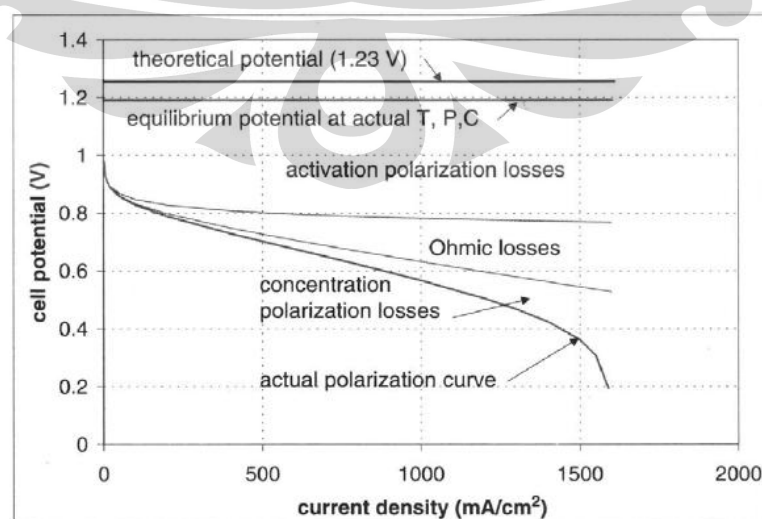
cell yang menggunakan nafion, yaitu hanya sampai 100°C karena di atas suhu ini air selalu menguap dan hilang dari membran. Tetapi jika terlalu banyak air juga kurang baik karena dapat menyumbat aliran. Oleh karena itu jumlah air harus dikontrol.

2.3.3 Pelat Penutup

Pelat penutup pada sel PEMFC berjumlah dua buah yang terdapat pada sisi anoda dan sisi katoda. Pelat ini berfungsi sebagai penjepit kedua elektroda atau mengencangkan sel PEMFC. Ukuran dari pelat ini sama dengan pelat bipolar, tetapi pelat ini tidak memiliki *active area* (EG&G dkk, 2000).

2.4 Kinerja *Fuel cell*

Kinerja *fuel cell* biasanya ditentukan melalui kurva polarisasi atau kurva V-I, dimana voltase sel merupakan fungsi dari densitas arus. Umumnya makin tinggi voltase sel untuk suatu densitas arus tertentu maka menunjukkan kinerja yang lebih baik. Informasi mengenai penyebab turunnya kinerja sel juga dapat diperoleh dari kurva polarisasi. Kurva polarisasi menunjukkan informasi mengenai penurunan tegangan yang disebabkan oleh aktivasi, resistensi, dan konsentrasi. *Kinetic losses* dan *fuel crossover* atau *internal current losses* umumnya ditandai dengan penurunan tajam voltase di daerah densitas arus rendah. *Ohmic losses* umumnya berupa garis lurus di daerah densitas arus menengah. *Mass transport losses* dapat diamati pada penurunan tiba-tiba yang terjadi di daerah densitas arus tinggi.



Gambar 2. 7 Kurva polarisasi *fuel cell* (Barbir, 2005)

2.2.1 Activation Losses

Activation losses atau polarisasi aktivasi pada dasarnya menunjukkan penurunan volt yang terjadi untuk memaksa agar reaksi dapat berlangsung, yang meliputi pemecahan hidrogen di anoda menjadi proton dan elektron, proton yang bergerak menembus elektrolit, hingga kemudian bergabung dengan oksigen serta elektron di katoda. *Activation losses* ini berdasarkan aktivitas katalis. Semakin baik katalisnya, semakin sedikit energy aktivasi yang diperlukan. Untuk saat ini, platinum merupakan katalis terbaik yang dapat digunakan untuk fuel cell.

2.2.2 Crossover Losses

Crossover terdiri dari *crossover* bahan bakar dan *crossover* elektron. *Open Circuit Voltage* (OCV) adalah voltase sel sebelum dibebani. Rendahnya voltase awal ini berhubungan dengan *fuel crossover*, yaitu fenomena bahan bakar yang menembus membran, serta *internal current*, fenomena elektron yang menembus membran. Dua jenis penyebab turunnya tegangan ini digolongkan dalam satu kelompok karena menghasilkan akibat yang sama. Keduanya disebabkan oleh ketidak sempurnaan elektrolit sebagai penghantar proton. Idealnya suatu elektrolit hanya menghantarkan proton dan tidak menghantarkan yang lain. Tetapi pada kenyataannya ada juga bahan bakar serta elektron yang bisa lewat.

2.2.3 Ohmic Losses

Ohmic losses atau penurunan tegangan karena adanya hambatan terjadi pada semua peralatan elektronik, tidak terkecuali untuk *fuel cell*. Penurunan tegangan ini terjadi karena adanya tahanan pada elektron yang mengalir dalam *bipolar plate*. Persamaan Ohm biasanya dibuat dalam bentuk *current density* dan *area resistance*. Ini memudahkan evaluasi kinerja *fuel cell* karena sebagian besar kinerjanya dihubungkan dengan *current density*.

$$V = ir \quad (2.7)$$

Dimana i adalah *current density* dan r adalah *area specific resistance*. Untuk mengurangi besarnya tahanan ohmik maka harus dibuat elektroda dengan konduktivitas listrik yang tinggi, atau mengurangi jarak yang harus ditempuh oleh elektron karena tahanan sebanding dengan jarak. Cara lain untuk mengurangi tahanan adalah dengan membuat *bipolar plate* dengan desain yang baik, yang

mempunyai konduktivitas tinggi serta tidak tebal. Yang terakhir untuk mengurangi hambatan adalah dengan membuat elektroda yang tipis, sehingga memberikan jarak yang lebih kecil bagi proton sebelum akhirnya bertemu dengan oksigen dan elektron.

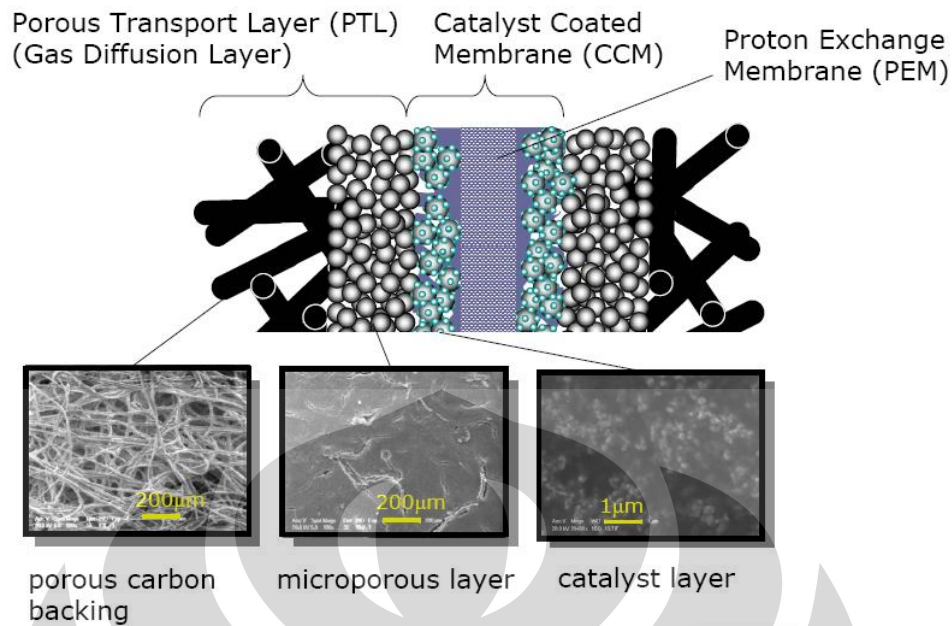
2.2.4 Mass Transport Losses

Penurunan tegangan yang disebabkan oleh masalah transfer massa berhubungan dengan penurunan konsentrasi gas hydrogen dan oksigen di elektroda. Pada arus tinggi, air akan terbentuk dengan jumlah yang cukup banyak pada katoda, hal ini dapat menyebabkan *flooding* pada lapisan katalis atau elektroda dan menghambat penetrasi gas oksigen. Oleh karena itu, penting untuk mencegah *flooding* terjadi pada katoda.

2.5 Microporous Layer

MPL merupakan suatu lapisan yang ditambahkan diantara lapisan GDL dan lapisan katalis (Gambar 2.8). MPL bertujuan melancarkan jalan air ke dalam GDL, dan mencegah tinta lapisan katalis bocor ke GDL. Hal tersebut akan meningkatkan pemanfaatan katalis dan mengurangi kecenderungan banjir elektroda (Lim dan Wang, 2004). Air memberikan peranan yang penting dalam PEMFC. Ketika ada kelebihan air yang terbentuk dalam katoda PEMFC, air tersebut dalam mengisi pori-pori dalam lapisan katalis, dan gas GDL atau dapat menghalangi jalannya aliran gas di dalam *Gas Channel* (GC). Fenomena ini dinamakan *flooding*, yang dapat diamati baik di anoda dan katoda PEMFC.

Flooding di katoda disebabkan oleh pembentukan air secara kontinu di lapisan katalis katoda dan secara signifikan akan membatasi difusi oksigen di GDL. *Flooding* di anoda juga sering terjadi karena kondensasi khususnya pada PEMFC yang menggunakan hydrogen murni sebagai bahan bakar. Akan tetapi *flooding* di anoda hanya berakibat kecil pada kinerja PEMFC karena sifat difusifitas tinggi dari hydrogen dan cepatnya energy kinetic dari oksidasi hydrogen. Namun, air di anoda lebih sulit untuk diatasi sehingga memerlukan tantangan khusus terutama pada saat start-up.



Gambar 2. 8 Struktur MPL dalam MEA dan gambar SEM tiap lapisannya (Malevich dkk, 2009)

MPL berisi *carbon black* dan PTFE. Penambahan lapisan MPL ini mengurangi terjadinya *flooding* karena sifat hidrofobik dan porositas yang lebih kecil dibandingkan GDL. *Carbon black* berperan dalam memberikan luas daerah pori yang lebih kecil dibandingkan GDL sedangkan PTFE meningkatkan sifat hidrofobik dari MPL. Berikut adalah penjelasan beberapa sifat fisika yang dimiliki MPL dan komponennya:

- **Konduktivitas**

Carbon black merupakan konduktivitas listrik yang baik (Kim, 2010). Oleh sebab itu karbon black digunakan sebagai bahan utama dalam MPL. Akan tetapi PTFE dalam lapisan MPL memiliki konduktivitas yang buruk karena molekulnya merupakan polimer yang mempunyai hambatan listrik besar (Cowie, 2010). Oleh karena itu semakin tinggi kandungan PTFE dalam MPL, konduktivitasnya akan semakin menurun.

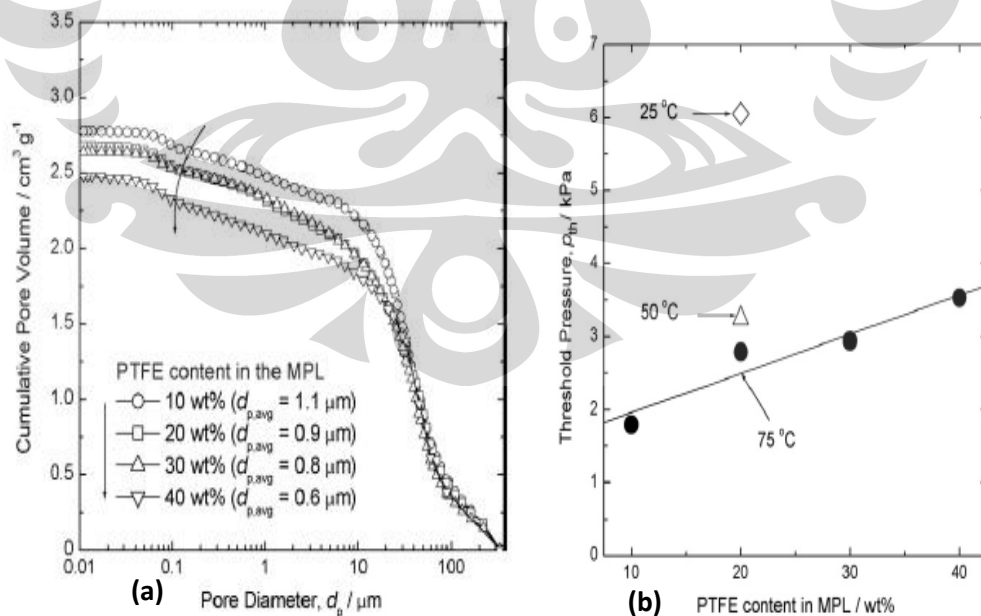
- **Sifat Hidrofobik**

Penambahan kandungan PTFE akan meningkatkan sifat hidrofobik pada MPL. Kadar PTFE dalam MEA merupakan hal yang sangat penting. Kadar optimum PTFE pada setiap *fuel cell* berbeda-beda tergantung pada keadaan operasi dan struktur MEA. Semakin banyak PTFE digunakan akan menyebabkan

meningkatnya fraksi hidrofobik pada MPL sehingga pori-pori MPL semakin kecil dan air yang terbentuk semakin sulit keluar dalam kondisi tekanan yang sama. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya *flooding* di lapisan katalis. Sebaliknya, kadar PTFE yang semakin rendah dapat pula menyebabkan *flooding* di lapisan GDL (Park dkk, 2008). Oleh karena itu diperlukan kadar optimum PTFE sehingga dapat menghasilkan *fuel cell* yang tahan lama dan mempunyai *power density* yang tinggi. Kadar Optimum PTFE umumnya mempunyai jangkauan 10% hingga 30% (Antolini dkk, 2002).

- Porositas

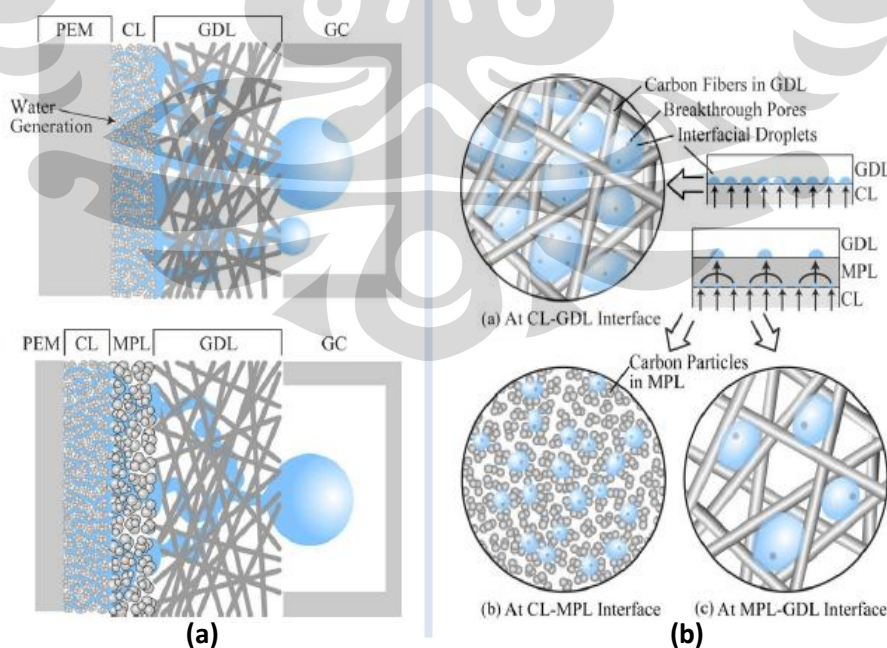
Pada hasil SEM GDL seperti Gambar 2.8, dapat dilihat bahwa permukaan GDL tidak teratur, kasar, dan memiliki pori yang besar sedangkan pada partikel karbon saling berdekatan satu dengan lainnya dan ukuran porinya lebih kecil. Ukuran diameter pori pada GDL adalah sekitar 18-26 μm sedangkan ukuran diameter pori dari MPL berkisar antara 0.32 - 12 μm tergantung dari komposisi PTFE di dalamnya (Chung dkk, 2005). Adanya perbedaan porositas inilah yang menjadi salah satu penyebab MPL dapat mencegah *flooding* dan mengatur perpindahan air dan gas lebih baik dibandingkan MEA tanpa MPL.



Gambar 2. 9 Pengaruh kandungan PTFE terhadap (a) pori MPL dan (b) tekanan operasi (Park dkk,2008)

Semakin besar komposisi PTFE dalam lapisan MPL, diameter pori dari MPL akan semakin kecil dan kumulatif pori dalam MPL juga berkurang (Gambar 2.9a). Berkurangnya diameter pori dari MPL ini menyebabkan tekanan yang diperlukan untuk mendorong air dari lapisan katalis ke MPL dan GDL menjadi lebih besar (Gambar 2.9b).

Berdasarkan Kaviany dkk, 2009, MPL berfungsi dalam mengurangi air yang terbentuk pada pertemuan antarmuka lapisan. Gambar 2.10(a) memperlihatkan bagaimana butiran air yang terbentuk menutupi interface antara lapisan katalis dan GDL. Hal ini akan menyebabkan mengurangi *surface area* untuk mass transport. Adanya butiran air tersebut akan menghalangi aliran gas menuju lapisan katalis. Oleh karena kecilnya difusivitas efektif di lapisan katalis katoda, maka akibat negative dari butiran air ini akan berdampak signifikan pada kinerja *fuel cell*. Pada system MEA dengan MPL (Gambar 2.10b) akan terdapat dua jenis *interface* yaitu *interface* antara lapisan katalis dengan MPL dan *interface* antara MPL dengan GDL. Dapat dilihat bahwa tetesan air lebih jarang pada pertemuan antara MPL dan GDL, hal ini akan memudahkan gas untuk melalui celah-celah yang tidak dilalui air sehingga mass transport akan lebih lancar. Air yang melalui MPL akan berkumpul dan membentuk jalan sendiri hingga GDL.



Gambar 2. 10 (a) Ilustrasi pergerakan air pada katoda dan (b) tampilan mikroskopis pada daerah antarmuka (Kaviany dkk, 2009)

Komposisi optimal PTFE dalam suatu rangkaian *fuel cell* berbeda-beda tergantung pada keadaan operasi dan struktur MEA. (Park dkk, 2008). Berikut adalah beberapa mapping dari penentuan PTFE optimal yang pernah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya yang didasarkan atas kondisi operasi dan preparasi struktur PEMFC

Tabel 2. 1 Metode dan hasil percobaan variasi komposisi PTFE dari beberapa jurnal internasional

Jurnal	Metode	Hasil
<i>Effect of PTFE content in microporous layer on water management in PEM fuel cells</i> oleh Park dkk, 2008.	<ul style="list-style-type: none"> - Di MPL, carbon loading dipertahankan 2 mg/cm^2. - Carbon paper mengandung 10% PTFE - PTFE divariasikan 10-40% wt - Lapisan katalis katoda merupakan campuran Pt/C powder (45%Pt), dengan larutan Nafion, air, dan metil alcohol. Campuran katalis kemudian <i>dicoating</i> diatas lapisan MPL. - Elektroda anoda merupakan elektroda komersil, direkatkan ke membrane dengan ink Nafion $1,2 \text{ mg/cm}^2$. - Loading Pt pada katalis sebesar $0,4 \text{ mg/cm}^2$. 	<p>Komposisi PTFE 20% wt memberikan kinerja terbaik ditunjukkan dengan cell potential yang dihasilkan melebihi komposisi lainnya pada current density yang sama.</p> <p>Kinerja terbaik selanjutnya ditunjukkan oleh PTFE dengan komposisi 30%, 40%, dan 10% yang menunjukkan kinerja terburuk.</p>
<i>Improvement of Water Management by a microporous sublayer for PEMFC</i> oleh Z. Qi dan A. Kaufan , 2002	<ul style="list-style-type: none"> - Carbon paper mengandung 20% PTFE - Memvariasikan kandungan PTFE dalam MPL sebesar 0%, 24%, 35% dan 45% - Suhu Cell 35°C - Loading katalis $>1 \text{ mg/cm}^2$. 	<p>Komposisi optimal PTFE adalah 35% wt</p> <p>Kinerja terbaik hingga terburuk ditunjukkan oleh PTFE dengan komposisi 35%, 24%, 45% , dan non MPL</p>

<p><i>Optimal composition of polymer electrolyte fuel cell electrodes determined by the AC impedance method</i>, J.M. Song dkk, 2001.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Carbon paper dicoating dengan Teflon resin (Teflon 30J, DuPont) kemudian dipanaskan 180°C selama 30 menit. - Menggunakan campuran suspense 2-propanol, <i>carbon powder</i> (Vulcan XC-72) dan PTFE yang dicoating ke <i>carbon paper</i>. - Komposisi PTFE di variasikan 10, 20, 30, 40% wt - <i>Loading</i> Carbon+PTFE pada GDL sebesar 3,5 mg/cm - Menggunakan <i>humidifiers</i> pada suhu 70°C 	<p>Komposisi optimal PTFE adalah 30% wt.</p> <p>Kinerja terbaik hingga terburuk ditunjukkan oleh PTFE dengan komposisi 30%, 20%, dan 10%</p>
<p><i>Effects of hydrophobic polymer content in GDL on power performance of a PEM fuel cell</i> oleh C. Lim, C.Y. Wang, 2004.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Menggunakan FEP (Fluorinated Etylene Propylene) sebagai materi hidrofobik pengganti PTFE - Memvariasikan FEP 10-30 % wt - Dioperasikan pada suhu 90°C, Suhu anoda 95°C, dan suhu katoda 60°C. 	<p>Komposisi optimal PTFE adalah 10% wt.</p> <p>Peningkatan PTFE menurunkan kinerja <i>fuel cell</i></p>

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dapat dibagi menjadi dua tahapan besar yaitu:

1. Fabrikasi MEA

Tahap ini bertujuan untuk menghasilkan MEA yang kemudian akan dibentuk menjadi PEMFC. Tahap ini dibagi menjadi tiga langkah, yaitu preparasi membrane nafion, pembuatan elektroda katoda, dan elektroda anoda.

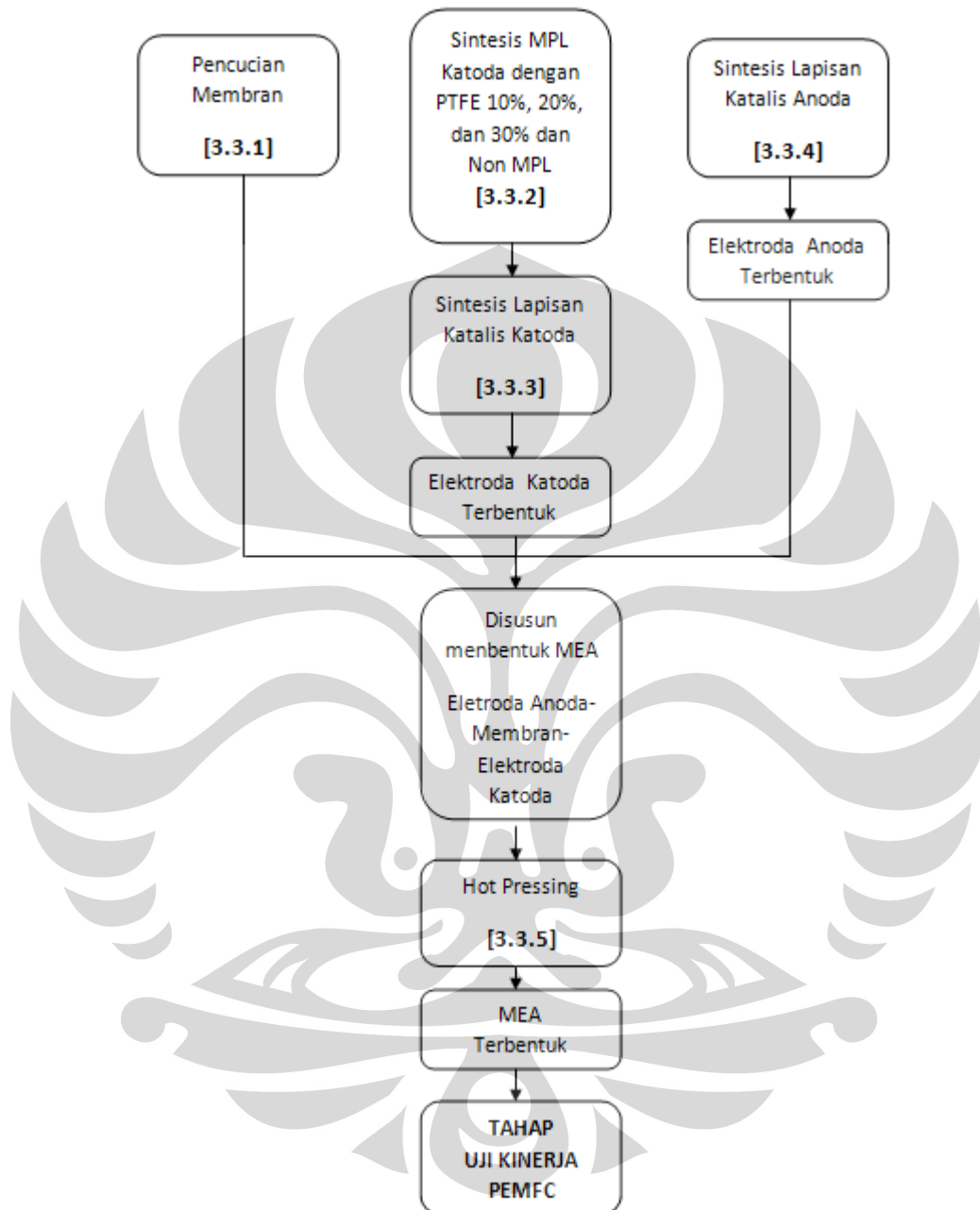
Pada sistesis GDL elektroda katoda akan digunakan PTFE dengan variasi komposisi 10%, 20%, dan 30% pada lapisan MPL. Sebagai pembandingnya akan dibuat satu Elektroda katoda tanpa MPL. Elektroda anoda tidak menggunakan lapisan MPL. Membran dan elektroda yang telah siap akan disusun sekedemikian rupa dan *dihot pressing* membentuk MEA.

2. Uji Kinerja PEMFC

Pada tahap ini dilakukan pengambilan data penelitian, pengolahan data serta analisis hasil untuk mengetahui kinerja dari sel tunggal PEMFC yang telah dibuat. Uji kinerja dilakukan dengan DC *electronic load* untuk menghasilkan kurva V-I. Sebelum uji kinerja PEMFC dilakukan, terlebih dahulu dilakukan *set up* seluruh peralatan utama dan pendukung termasuk MEA yang dihasilkan menjadi suatu sistem terpadu serta diuji kebocoran unit PEMFC.

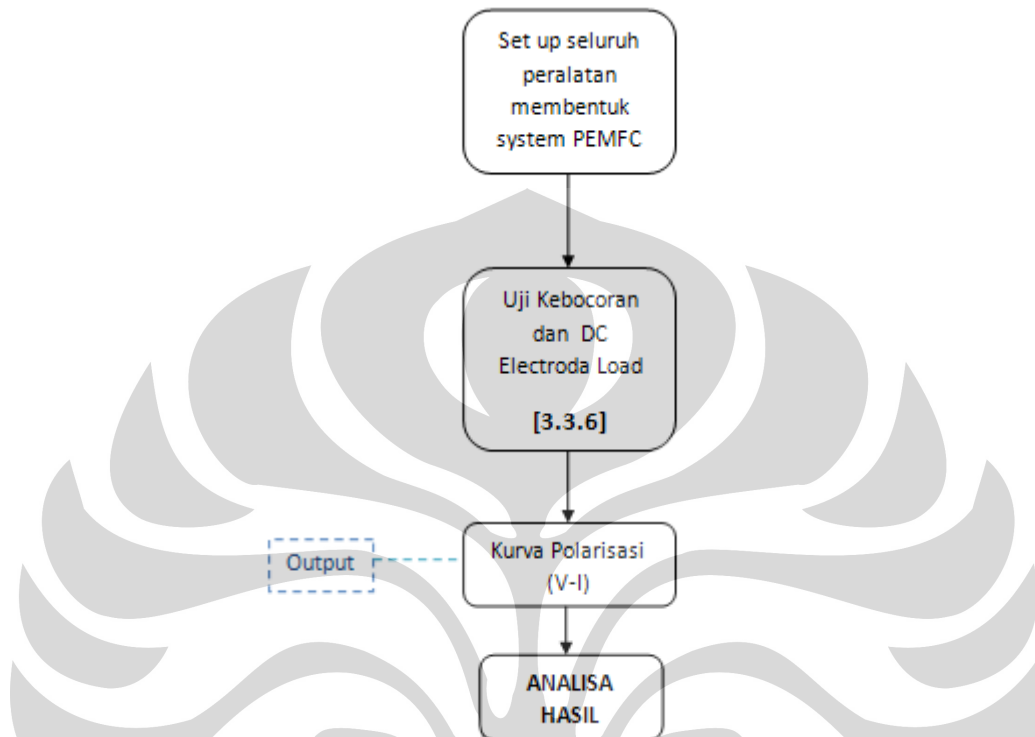
Di bawah ini adalah diagram alir penelitian dari fabrikasi MEA dan Uji kinerja PEMFC, rincian kegiatannya penelitian dapat dilihat pada subbab 3.3.

TAHAP FABRIKASI MEA



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian untuk Fabrikasi MEA

TAHAP UJI KINERJA PEMFC



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian untuk Uji Kinerja PEMFC

3.2 Variabel Penelitian

Berikut adalah variable-variabel dalam penelitian ini

1. Variabel bebas: Komposisi PTFE yang digunakan pada MPL yaitu: 10%, 20%, 30%, dan MEA tanpa MPL
2. Variabel terikat: *Voltage dan current density* pada kurva V-I dan P-I
3. Variabel control: tekanan dan suhu operasi, menggunakan bahan yang sama, ketebalan yang sama, loading katalis Pt yang sama.

Suhu operasi *fuel cell* akan diset pada 40°C karena suhu tersebut merupakan suhu terbaik untuk menguji *fuel cell* pada DC load di P3TKEBT. Suhu yang lebih tinggi akan meningkatkan tingkat bahaya karena pada pengujian DC load menggunakan gas O₂ dan H₂ yang murni sehingga mempunyai resiko terjadi

ledakan. Loading PTFE-Carbon yang ditentukan sebesar 2 mg/cm^2 sehingga yang menjadi pembeda adalah komposisi PTFE yang digunakan.

Setelah GDL terbentuk akan dilakukan uji SEM untuk melihat morfologi tiap GDL yang terbentuk. Dengan perbandingan menggunakan karakteristik SEM ini kita dapat menganalisa porositas dan homogenisasi dari tiap GDL. Uji Kinerja dari *fuel cell* akan dilakukan dengan DC *Electronic load* untuk uji satu sel. Hasil keluarannya akan berupa kurva polarisasi (V-I). Dengan membandingkan kurva polarisasi tiap system dengan komposisi PTFE yang berbeda, akan dapat disimpulkan komposisi PTFE yang menghasilkan potensial tertinggi.

3.3. Rincian Kegiatan Penelitian

Fabrikasi MEA mengacu pada penelitian sebelumnya (Wahyudi, 2009) dengan modifikasi penambahan penggunaan PTFE dengan berbagai komposisi pada pembuatan GDL. Berikut adalah rincian kegiatannya:

3.3.1. Pencucian Membran

Alat dan bahan

1. *Beaker glass*
2. *Cutter*
3. Penjepit dan statif
4. *Hot Plate*
5. Membran nafion (DuPont Nafion PFSA *Membranes*) 117
6. Hidrogen peroksida 3% (Merck)
7. Asam sulfat 3% (Merck)
8. *Deionized water* (DI)

Prosedur

1. Memanaskan 500 ml hidrogen peroksida, 500 ml asam sulfat, dan $4 \times 500 \text{ ml}$ *deionized water* masing-masing dalam *beaker glass* sampai bersuhu $80^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C}$. Jaga agar suhu tetap.
2. Memotong membran sesuai ukuran yang diinginkan dengan melebihi 15%. Tidak menyentuh bagian tengah membran.

3. Merendam membran dalam *deionized water* pertama selama satu jam. Untuk semua perendaman, memastikan membran tidak menempel ke bagian dinding *beaker glass*.
4. Memindahkan membran secara hati-hati menggunakan penjepit ke dalam *beaker glass* berisi hidrogen peroksida. Merendam selama satu jam.
5. Mengulangi prosedur 3 dan 4 dengan urutan selanjutnya: asam sulfat, *deionized water* ke dua, *deionized water* ke tiga, dan *deionized water* ke empat.
6. Mengangkat membran dari bilasan terakhir dan meletakkannya di alas kaca. Menyimpan membran di tempat yang terlindung dari debu tetapi memungkinkan membran untuk kering.
7. Membiarkan membran kering selama satu malam.



Gambar 3. 3 Proses preparasi membran nafion

3.3.2. Sintesis MPL pada katoda

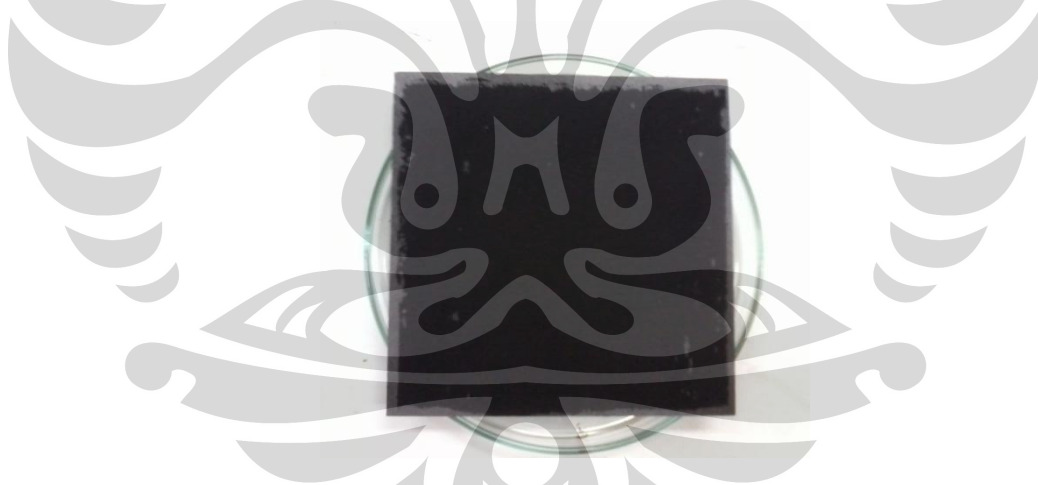
Alat dan Bahan :

1. Carbon paper mengandung 20% PTFE (TORAY 060 T)
2. Larutan 30% wt PTFE
3. *Carbon black* XC-72
4. Etilene glikol
5. Magnetic stirer
6. Timbangan digital
7. Gelas kimia 50ml

Prosedur :

1. Memotong 3 buah Carbon Paper dengan ukuran 8,5cm x 8,5cm.
2. Membuat tiga macam ink dengan perbandingan berat PTFE : (PTFE dan Carbon Blak) sebesar 10%, 20%, dan 30%. Loading *Carbon black* sebesar 2 mg/cm^2 .
3. Pelarut alcohol yang digunakan adalah etilene glikol dengan perbandingan carbon : etilene glikol = 1 : 10.
4. Campuran dihomogenkan menggunakan pemutar magnetic stirrer selama 1 jam
5. Setelah slurry ink terbentuk, ink dioleskan ke Carbon Paper kemudian diratakan dengan menggunakan doctor blade.
6. Carbon Paper atau GDL yang mengandung MPL kemudian dipanaskan hingga suhu $330 - 350 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 30 menit.

Gambar di bawah memperlihatkan GDL yang mengandung MPL setelah dipanaskan



Gambar 3. 4 Carbon paper yang mengandung MPL setelah dipanaskan hingga suhu $330 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 30 menit

3.3.3 Sintesis Lapisan Katalis Katoda

Alat dan Bahan

1. Pengaduk ultrasonik
2. Compresor udara

3. *Air brusher*
4. Gelas kimia 50ml
5. Timbangan digital
6. Etilen glikol
7. *Deionized water*
8. Metanol
9. Katalis Pt/C 20%Pt
10. Nafion Solution 5% wt
11. GDL yang telah mengandung MPL masing-masing 10%, 20%, dan 30% PTFE
12. GDL yang tidak mengandung MPL/polos sebagai pembanding

Prosedur

1. Menimbang bahan-bahan yang dibutuhkan dengan perbandingan berikut:
Carbon : Air : Nafion 5% : Etilen glikol: Metanol = 1 : 3 : 4 : 1 : 7 dengan loading carbon sebesar 2 mg/cm^2 dan loading katalis Pt sebesar $0,4 \text{ mg/cm}^2$.
2. Campuran dimasukan ke dalam gelas kimia 50ml kemudian dihomogenkan dengan pengaduk ultrasonic selama 30 menit dengan amplitude 15 Hz selama 3 menit dan waktu tunggu selama 1 menit.
3. Slurry yang terbentuk kemudian dideposisi ke 3 buah GDL yang mengandung MPL masing-masing 10%, 20%, 30% dan sebuah GDL tanpa MPL dengan cara disemprot atau air brush.
4. Elektroda yang telah mengandung katalis dipanaskan pada suhu 80°C selama 30 menit untuk menguapkan pelarut.



Gambar 3.5 Proses deposisi lapisan katalis menggunakan air brushing

3.3.4 Sintesis Lapisan Katalis Anoda

Alat dan Bahan

1. Pengaduk ultrasonik
2. Compresor udara
3. *Air brusher*
4. Gelas kimia 50ml
5. Timbangan digital
6. Etilen glikol
7. *Deionized water*
8. Metanol
9. Katalis Pt/C 10%Pt
10. Nafion Solution 5% wt
11. 4 buah GDL/ Carbon Paper 20% PTFE (TORAY 060 T)

Prosedur

1. Memotong 3 buah Carbon Paper dengan ukuran 8,5cm x 8,5cm.
2. Menimbang bahan-bahan yang dibutuhkan dengan perbandingan berikut:
Carbon : Air : Nafion 5% : Etilen glikol : Metanol = 1 : 3 : 4 : 1 : 7 dengan loading carbon sebesar 4 mg/cm^2 dan loading katalis Pt sebesar $0,4 \text{ mg/cm}^2$.
3. Campuran dimasukkan ke dalam gelas kimia 50ml kemudian dihomogenkan dengan pengaduk ultrasonic selama 30 menit dengan amplitude 15 Hz selama 3 menit dan waktu tunggu selama 1 menit.

4. Slurry yang terbentuk kemudian dideposisi ke 4 buah GDL tanpa MPL.
5. Elektroda yang telah mengandung katalis dipanaskan pada suhu 80°C selama 30 menit untuk menguapkan pelarut.

3.3.5 Hot Pressing

Alat dan bahan

1. Alat *hot press*
2. Pelat besi 2 buah yang permukaannya rata
3. Elektroda Katoda dan Anoda
4. Membran nafion yang telah dipreparasi

Prosedur

1. Menyusun membran serta elektroda anoda dan katoda dengan susunan elektroda anoda-membran-elektroda katoda.
2. Menekan lapisan MEA pada 7000 lb dan pemanasan pada suhu 284°F selama 4 menit.
3. Mendingamkan MEA setelah di-*hot press* dan MEA siap digunakan.



Gambar 3. 6 Mesin Hot Press (kiri) dan MEA siap pakai (kanan)

3.3.6 Uji Kebocoran dan Uji *DC Elektroda Load*

Alat dan bahan

1. *Cell stack Fuel cell*
2. MEA yang telah difabrikasi
3. Kunci pas
4. *DC Electronic load*

5. Air sabun
6. Kuas kecil
7. Udara tekan, gas H_2 , O_2 , dan N_2

Prosedur

1. Merangkai seluruh sistem *fuel cell*.
2. Melakukan tes kebocoran unit dan sistem *fuel cell* dengan cara mengalirkan N_2 .
3. Menguaskan air sabun di setiap celah pada sambungan antara pelat bipolar serta pada tiap sambungan antar peralatan pada sistem.
4. Jika terjadi gelembung sabun, maka menandakan adanya kebocoran pada sistem.
5. Setelah kebocoran tidak terjadi, alirkan bahan bakar pada anoda dan oksigen atau udara tekan pada katoda.
6. Menjalankan *fuel cell* selama 6 jam.
7. Mengambil data volt dan arus menggunakan DC *electronic load*.



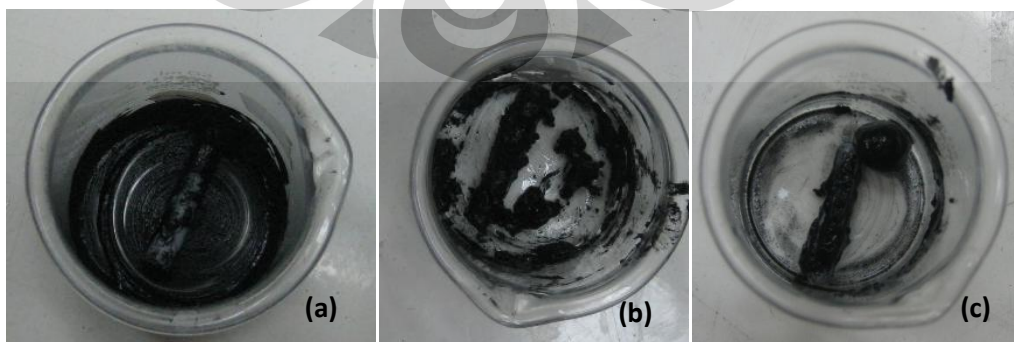
Gambar 3. 7 Gas yang digunakan (kiri) dan Peralatan Uji satu sel (kanan)

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Fabrikasi *Membrane Electrode Assembly*

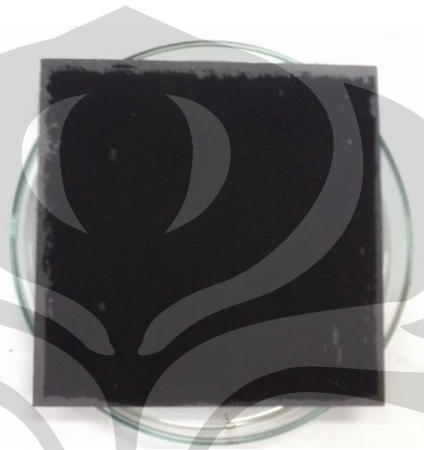
Pada penelitian ini, MPL ditambahkan diantara lapisan katalis dan lapisan GDL katoda. MPL dibuat dengan cara mencampurkan karbon black Vulcan X-72 dengan PTFE dengan komposisi PTFE 10%, 20%, dan 30% dari total berat PTFE dan *carbon black*. Pelarut etilen glikol digunakan untuk melarutkan campuran tersebut. Etilen glikol digunakan karena memiliki viskositas dan titik didih yang cukup tinggi dibandingkan pelarut lainnya seperti methanol dan 2-propanol. Titik didih etilen glikol sekitar 220°C sehingga tidak akan mudah menguap pada saat preparasi. Viskositas yang cukup tinggi akan menyebabkan ink yang terbentuk cukup kental untuk dideposisi ke GDL.

Ink yang terbentuk mempunyai karakteristik yang berbeda. Pada tinta MPL 10%, tinta masih berwujud cairan yang sangat kental. Pada tinta MPL 20%, tinta masih berwujud cairan kental, namun tidak homogen karena ada beberapa bagian yang sangat yang menggumpal sendiri. Pada MPL 30%, seluruh tinta menggumpal membentuk satu bola yang besar dan memisah dengan sebagian pelarutnya. Perbedaan karakteristik ini disebabkan komposisi dari PTFE yang semakin besar pada campuran. PTFE bersifat hidrofobik dan merupakan pengikat yang baik pada *carbon black* (Park dkk, 2008). Oleh karena itu, semakin besar PTFE maka kecenderungan ink untuk menggumpal dan memisah dengan air atau alkohol semakin besar.



Gambar 4. 1 Ink yang terbentuk (a) MPL 10% (b) MPL 20% (c) MPL 30%

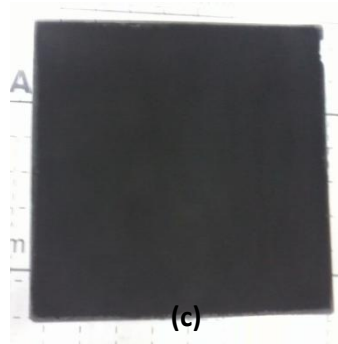
Ink dideposisi ke GDL dengan cara dikuas dan kemudian permukaannya diratakan dengan *doctor blade*. Permukaan yang rata ini berfungsi agar MPL dapat menempel dengan baik di lapisan katalis. GDL yang telah mengandung MPL kemudian dipanaskan dalam oven hingga suhu 330 °C – 350 °C agar PTFE dapat terdistribusi dengan baik pada lapisan tersebut (Park dkk, 2008). Pada suhu tersebut pelarut etilen glikol dan air yang terbawa diharapkan telah menguap seluruhnya.



Gambar 4. 2 MPL setelah dipanaskan hingga suhu 330°C

Lapisan katalis ditambahkan ke atas lapisan MPL. Lapisan katalis ini merupakan campuran dari air, katalis Pt yang tersupport pada Karbon dalam serbuk Pt/C, larutan nafion, dan air. Deposisi lapisan katalis ke atas MPL dilakukan dengan teknik *air brush coating*. Cara ini dilakukan karena teknik ini mampu mendistribusikan campuran dengan homogen dibandingkan dengan teknik deposisi menggunakan kuas.





Gambar 4. 3 (a) Penyemprotan dengan air brush (b) Keempat MPL katoda, Non MPL, 10%, 20%, dan 30% (c) hasil deposisi lapisan katalis

Teknik air brushing menghasilkan permukaan yang rata dan distribusi lapisan katalis lebih homogen. Elektroda kemudian dipanaskan pada suhu 80°C hingga pelarut menguap dan lapisan mengering.

Pada anoda, tidak ditambahkan lapisan MPL. Lapisan MPL hanya diaplikasikan pada katoda karena air terbentuk pada lapisan katoda sehingga pengamatan peran MPL dalam mengatur air hanya dapat dilihat pada katoda.

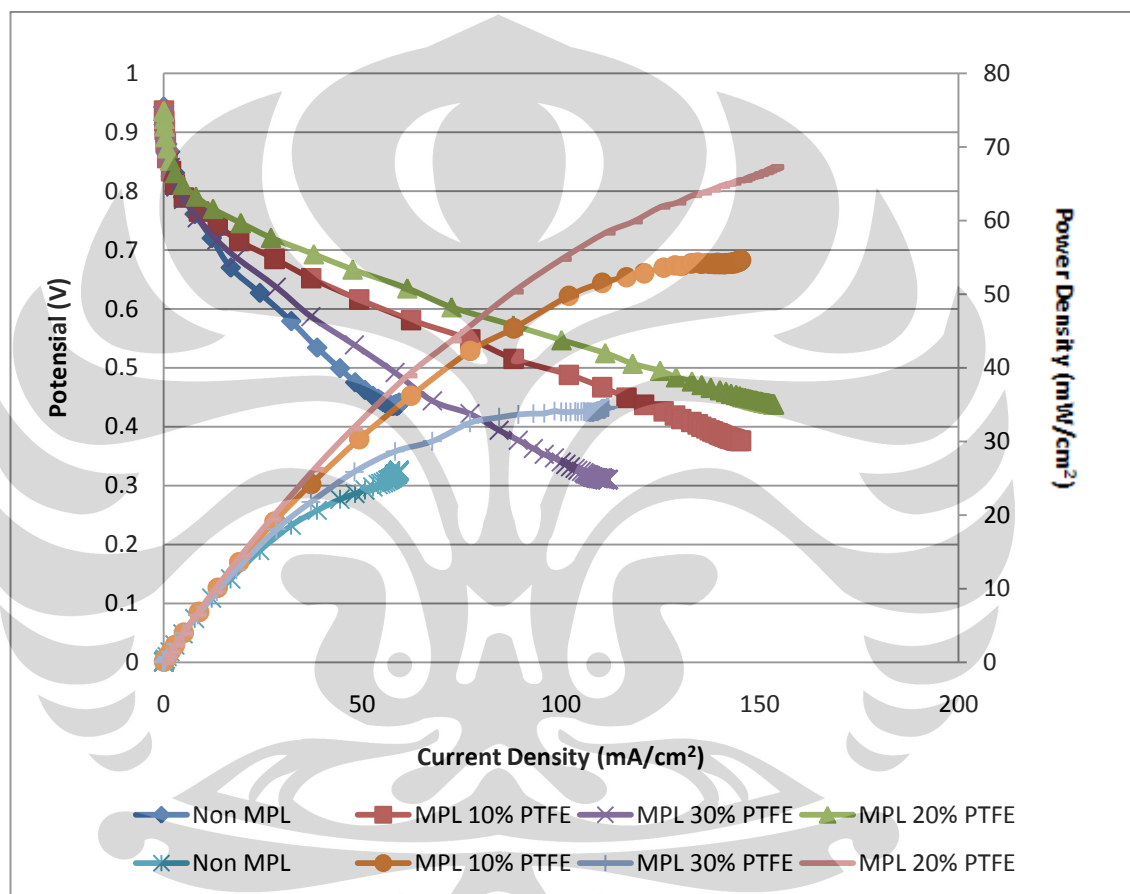


Gambar 4. 4 MEA yang telah difabrikasi

Setelah elektroda anoda dan katoda terbentuk, sebuah membran PEM ditempatkan diantara elektroda. Susunan tersebut kemudian ditempelkan dengan hot press hingga tekanan 7000 lb pada suhu 284°F . MEA hasil hot press seperti terlihat pada Gambar 4.4 telah siap diuji dan digunakan.

4.2 Uji Single Cell

Uji satu sel merupakan pengukuran kinerja PEMFC yang dilakukan dengan cara mengukur tegangan dan arus yang dihasilkan PEMFC dalam kondisi pembebanan tertentu. Pembebanan ini dilakukan setelah MEA dialirkan gas hidrogen pada anoda dan gas oksigen pada katoda selama 6 jam. Hasil dari uji *single sell* ini berupa kurva V-I dan P-I.



Gambar 4.5 Kurva V-I (kiri) dan kurva P-I (kanan)

Berdasarkan Gambar 4.5 secara berturut MEA yang memberikan kinerja terendah hingga tertinggi berdasarkan tegangan dan power density yang dihasilkan adalah MEA non MPL, MEA MPL 30%, MEA MPL 10%, dan MEA MPL 20%. Hal ini dapat dilihat dari kemiringan garis pada kurva V-I (sebelah kiri) dan *power density* tertinggi (sebelah kanan). MEA MPL 20% mempunyai kemiringan garis (slope) terendah diantara yang lainnya. Kemiringan garis ini sangat penting dalam menentukan kinerja *fuel cell*. Semakin besar kemiringan

garis ini, maka tegangan yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini juga berdampak pada power density *fuel cell* karena daya merupakan fungsi perkalian antara tegangan dan arus listrik.

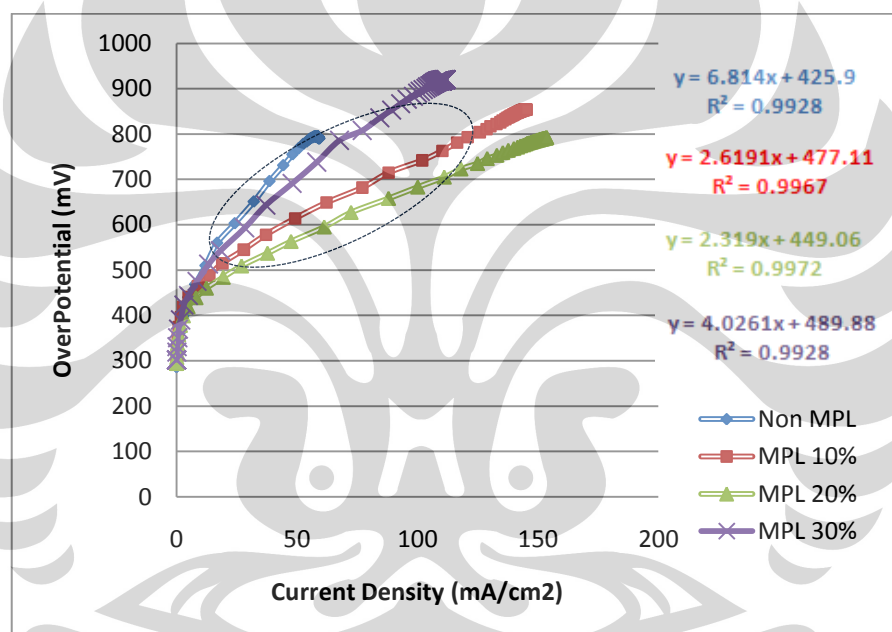
MEA MPL 20% mempunyai kemiringan garis terkecil (landai) dan MEA non MPL yang mempunyai kemiringan garis terbesar (curam) diantara MEA lainnya. Selain itu, MEA MPL 20% mampu mencapai *current density* tertinggi yaitu sekitar 153 mA/cm^2 dibandingkan MEA lainnya seperti non MPL sebesar 59 mA/cm^2 , MPL 10% sebesar 145 mA/cm^2 , dan MPL 30% sebesar 112 mA/cm^2 .

Pada kurva power density, MEA dengan lapisan MPL yang mengandung 20% PTFE menghasilkan power density tertinggi sebesar $67,3 \text{ mW/cm}^2$ sedangkan density tertinggi yang dihasilkan oleh MEA non MPL hanya sebesar $26,0 \text{ mW/cm}^2$. Hal ini mengindikasikan bahwa **penambahan lapisan MPL pada MEA dapat meningkatkan power density yang dihasilkan MEA secara signifikan, dalam penelitian ini mengalami peningkatan sebesar 258,8%.**

Pada MEA ber-MPL, didapatkan power density terbaik pada MEA MPL 20% yaitu sebesar $67,3 \text{ mW/cm}^2$, yang diikuti oleh MPL 10% sebesar $54,6 \text{ mW/cm}^2$, dan yang terkecil adalah MPL 30% dengan power density sebesar $34,7 \text{ mW/cm}^2$. Hal ini secara mengindikasikan bahwa penambahan komposisi PTFE tidak selalu menaikkan kinerja dari *fuel cell*. Ada komposisi optimum dimana apabila komposisi PTFE dalam MPL lebih besar atau lebih kecil dari komposisi optimum tersebut, kinerja PEMFC akan menurun.

Besaran power density dan potensial yang dihasilkan tidak terlepas dari variabel *ohmic losses*. *Ohmic losses* terjadi karena adanya hambatan terhadap aliran elektron ke bipolar plate. Plotnya berupa garis lurus sederhana dengan persamaan $V = ir$. Dimana V adalah *overpotentials*, i adalah *current density*, serta r adalah *area specific resistance*. Ohmic losses ini diukur pada daerah kurva *current density* menengah dimana kurva mulai bergerak secara linear seperti yang terlihat pada Gambar 4.6 ditandai dengan daerah lingkaran garis putus-putus. Penurunan persamaannya dapat dilihat pada lampiran 4.

Besarnya *area specific resistance* berhubungan dengan tahanan yang dialami oleh elektron sejak terbentuk di anoda hingga kemudian ikut dalam reaksi di katoda. Jalur yang dilalui elektron meliputi lapisan katalis, lapisan MPL, lapisan GDL, *bipolar plate*, *current collector*, serta rangkaian-rangkaian luar. Kualitas *interface* atau pertemuan antar lapisan di atas juga sangat berpengaruh terhadap besarnya resistensi yang diterima oleh elektron. Pada percobaan ini, *cell stack* serta keseluruhan sistem yang digunakan seragam. Preparasi katalis juga dilakukan secara bersamaan menggunakan formula yang sama sehingga perbedaan yang terjadi pada *ohmic losses* hanya disebabkan oleh perbedaan kondisi lapisan MPL serta *interface*-nya dengan lapisan katalis dan GDL.



Gambar 4. 6 Daerah Ohmic Losses

Dari persamaan garis di atas dapat dihitung *area specific resistance*, yang hasilnya ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Nilai *resistance* MEA

Kode MEA	r ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
MEA-Non MPL	6,814
MEA-MPL 10%	2,619
MEA-MPL 20%	2,319
MEA-MPL 30%	4,026

Berdasarkan tabel 4.1, MEA-non MPL memberikan nilai resistansi tertinggi sebesar $6,814 \Omega \cdot \text{cm}^2$ diikuti oleh MEA MPL 30% MEA MPL 10%, dan terakhir MEA MPL 20% yang memiliki nilai resistance terkecil dengan nilai $2,319 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa besaran hambatan berbanding terbalik dengan kinerja (*power density*) yang dihasilkan. Semakin besar hambatannya, *power density* yang dihasilkan semakin kecil, dan sebaliknya semakin kecil hambatannya, *power density* yang dihasilkan akan semakin besar.

Power density MEA non MPL lebih kecil disebabkan oleh hambatan MEA non MPL yang lebih besar daripada hambatan MEA lainnya seperti MEA MPL 20% seperti yang telah dihitung pada Tabel 4.1. MEA non MPL memberikan hambatan sebesar $6,814 \Omega \cdot \text{cm}^2$ sedangkan hambatan MEA MPL 20% hampir tiga kali lebih kecil dari hambatan MEA non MPL yaitu sebesar $2,319 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Seperti rumus umum $V=IR$ atau $P=VR$ maka hambatan yang lebih besar akan menurunkan daya yang dihasilkan.

MEA non MPL lebih rentan terjadi *flooding* pada elektroda dan pelat bipolar sehingga memperbesar *resistance* dan *mass transport losses*. Selain itu, ketiadaan PTFE mengurangi *mechanical strength* dari elektroda karena PTFE dalam MPL dapat berfungsi sebagai zat pengikat ke lapisan katalis, PEM, dan GDL (Park dkk, 2008).





Gambar 4. 7 (a) Katoda MEA non MPL yang tampak tidak merekat pada PEM (b) MEA MPL 10% ada sebagian daerah yang tidak merekat.(c) MEA MPL 20% masih merekat dengan baik, dan (d) MEA MPL 30% ada sebagian daerah yang tidak merekat.

Pada MEA non MPL, butiran air yang terbentuk pada lapisan katalis menutupi daerah antarmuka lapisan katalis dan GDL (Kaviany, 2009). Hal ini mengakibatkan perpindahan air dari lapisan katalis ke pelat bipolar (*gas channel*) menjadi terganggu sehingga air yang tertahan membanjiri elektroda. Kandungan air yang terlalu banyak pada lapisan katalis cenderung membuat PEM melengkung sehingga daya perekatan antara PEM dengan elektroda katoda menjadi lebih buruk menyebabkan sebagian elektroda tidak merekat sempurna.

Setelah pengujian selama 6 jam, elektroda katoda dikeluarkan secara hati-hati dari stack pengujian. Ada sebagian luas daerah aktif katoda MEA non MPL yang terlepas dari membran PEM. Total luas daerah katoda MEA non MPL yang tidak merekat sempurna dari PEM adalah 50% dari total luas daerah aktif (Gambar 4.7a). Hal inilah yang memperbesar resistance pada MEA non MPL karena luas daerah dimana elektron dapat terhantarkan dengan baik berkurang akibat ada sebagian daerah MEA non MPL yang tidak merekat.



Gambar 4. 8 Pelat bipolar katoda yang dibanjiri air (a) MEA non MPL (b) MEA MPL 10% (c) MEA MPL 20% (d) MEA MPL 30%.

Terjadinya *flooding* pada MEA non MPL meningkatkan ohmic losses. Gambar 4.8a memperlihatkan banyaknya air yang terdapat pada pelat bipolar setelah pengujian selama 6 jam. Tingkat kebasahan pada pelat bipolar katoda MEA non MPL jauh lebih besar dibandingkan dengan pelat bipolar MEA lainnya.

Pada MEA-MPL 10% komposisi PTFE dalam MPL kurang optimal. Sifat hidrofobik pada MPL kurang banyak sehingga kurang mampu untuk mendorong air. Hal ini menyebabkan masih kurangnya manajemen air karena masih terjadi indikasi *flooding*, namun sudah lebih baik dari MEA non MPL.

Terjadinya *flooding* pada MEA MPL 10% menyebabkan 37.5% elektroda tidak merekat dengan sempurna akibat daya rekat yang menurun seperti pada Gambar 4.7(b). Bentuk PEM yang berkerut juga menandakan bahwa ada bagian

dari PEM yang banjir. Hal inilah yang memperbesar resistance pada MEA MPL 10% karena luas daerah dimana elektron dapat terhantarkan dengan baik berkurang akibat terdapat sebagian elektroda MEA MPL 10% yang terlepas dari PEM.

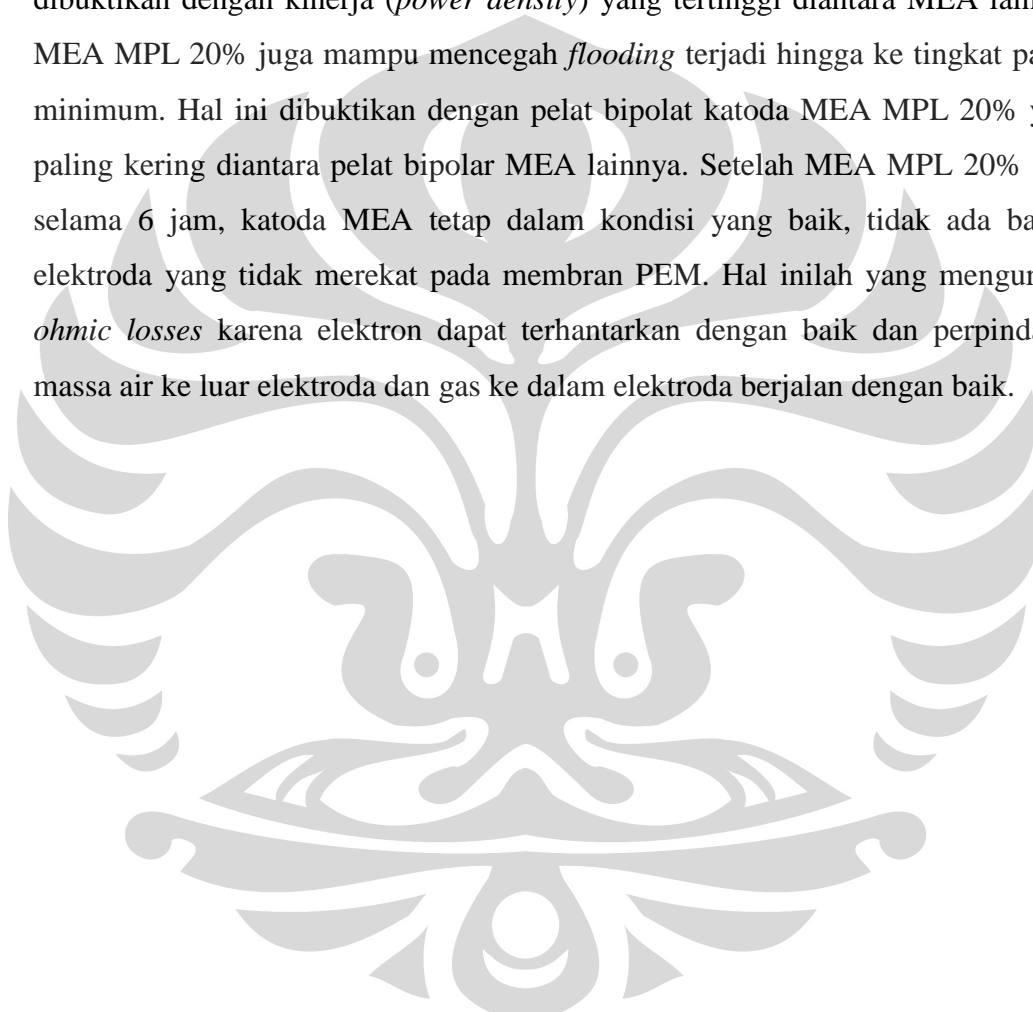
Indikasi terjadinya *flooding* juga dapat dilihat pada pelat bipolar MPL 10% pada Gambar 4.8(b). Terlalu banyak air yang membasahi pelat bipolar tersebut dibandingkan dengan pelat bipolar MPL 20% dan 30%. Namun tingkat kebanjiran pada MPL 10% masih lebih baik dibandingkan pada MEA non MPL. Tingkat kebanjiran ini terlihat dari lebih kecilnya daerah elektroda yang tidak merekat pada PEM dengan sempurna. Hal ini membuktikan peran MPL dalam mencegah *flooding* dan meningkatkan kinerja *fuel cell* meskipun hasilnya belum maksimal pada MPL dengan komposisi PTFE 10%.

Pada MPL 30%, terjadi hambatan yang cukup besar. Semakin besar komposisi PTFE dalam MPL, semakin besar pula tingkat hidrofobiknya. Akan tetapi, **PTFE yang bersifat polimer mempunyai hambatan listrik yang tinggi** (Cowie, 2010). Semakin besar kandungan PTFE dalam MPL, maka konduktivitas listrik dalam MPL semakin berkurang. MEA MPL 30% mempunyai resistansi yang cukup besar, lebih besar dibandingkan dengan MPL 20% dan MPL 10% sehingga kemampuan menghantarkan elektron dari MEA MPL 30% juga yang terendah diantara MEA lainnya. Hal ini adalah salah satu penyebab penurunan kinerja MEA MPL 30%.

Selain itu besarnya PTFE dalam MPL juga mengurangi tingkat diameter pori dari MPL yang dapat dilalui oleh air dan gas. **Pada diameter pori MPL yang lebih kecil diperlukan tekanan yang lebih besar untuk mendorong dan mengalirkan air dari lapisan katalis-MPL-GDL-pelat bipolar** (Park dkk, 2008). Pada penelitian kali ini digunakan variabel tekanan gas yang sama sekitar 10 psia. Pada diameter pori yang lebih kecil dan tekanan yang sama, air akan lebih banyak tertahan pada lapisan katalis katoda MEA MPL 30%. Hal ini menyebabkan *flooding* pada lapisan katalis katoda. *Flooding* yang terjadi menyebabkan daya rekat sebagian daerah aktif MEA PTFE 30% menjadi berkurang sehingga ada sebagian yang MEA yang tidak merekat lagi dengan

sempurna yaitu sekitar 28% dari total luas area aktif (Gambar 4.7d). Daerah MEA MPL 30% yang tidak merekat sempurna menyebabkan kemampuan MPL menghantarkan elektron berkurang sehingga memperbesar hambatan dan menurunkan kinerja *fuel cell*.

Pada MEA MPL 20%, terjadi hambatan yang paling kecil. Hal ini disebabkan karena komposisi PTFE dalam MPL telah optimal. Hal ini dibuktikan dengan kinerja (*power density*) yang tertinggi diantara MEA lainnya. MEA MPL 20% juga mampu mencegah *flooding* terjadi hingga ke tingkat paling minimum. Hal ini dibuktikan dengan pelat bipolar katoda MEA MPL 20% yang paling kering diantara pelat bipolar MEA lainnya. Setelah MEA MPL 20% diuji selama 6 jam, katoda MEA tetap dalam kondisi yang baik, tidak ada bagian elektroda yang tidak merekat pada membran PEM. Hal inilah yang mengurangi *ohmic losses* karena elektron dapat terhantarkan dengan baik dan perpindahan massa air ke luar elektroda dan gas ke dalam elektroda berjalan dengan baik.



BAB 5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Penerapan lapisan MPL pada katoda MEA terbukti menaikkan kinerja *fuel cell* secara signifikan sebesar 258,8% pada perolehan *power density* dibandingkan dengan MEA tanpa MPL.
2. MEA MPL 20% berhasil meminimalisasi terjadinya *flooding* dalam MEA. Hal ini dibuktikan dengan lebih sedikitnya air yang terdapat pada pelat bipolar, lebih tingginya *power density* yang dihasilkan dibandingkan dengan ketiga MEA lainnya, dan fisik MEA yang masih baik setelah diuji selama 6 jam.
3. MEA dengan kinerja tertinggi hingga terendah berdasarkan tegangan dan *power density* yang dihasilkan adalah MEA MPL 20%, MEA MPL 10%, MEA MPL 30%, dan MEA non MPL. Nilai hambatan untuk tiap MEA meningkat selaras dengan penurunan *power density*. Menurut perhitungan, ohmic losses tertinggi hingga terendah adalah MEA non MPL, MEA MPL 30%, MEA MPL 10%, MEA MPL 20%.
4. Komposisi PTFE optimal dalam MPL katoda MEA adalah 20%. Kinerja *fuel cell* akan menurun apabila komposisi PTFE dalam MPL lebih besar atau lebih kecil dari 20%.

DAFTAR REFERENSI

- Anggraini, Dewi. (2010). *Pengembangan Kinerja Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell melalui Fabrikasi Membrane Electrode Assembly dengan Carbon Nanotube sebagai Penyangga Katalis*. Skripsi, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Antolini, E., Passos, R.R. dan Ticianelli, E.A. (2002). Effects of the Cathode Gas Diffusion Layer Characteristics on the Performance of Polymer Electrolyte Fuel cell. *J. Appl. Electrochem*, 32. Pp. 383–388.
- Barbir, F. (2005). *PEM Fuel cells: Theory and Practice*. Istanbul: UNIDO-International Centre for Hydrogen Energi Technologies.
- Chung, J.T., Shih, K.L., Yi, Y.Y., Lung, Y.S. (2005). Gas Diffusion Layer and Microporous Layer for PEMFC. *Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2005*. Istanbul, Turkey.
- Cook, B. (2001). *An introduction of Fuel Cell and Hydrogen Technology*. Vancouver, Canada: Heliocentris.
- Cowie Technology. (2010). *Properties of PTFE*. November 23, 2010. <http://www.cowie.com/ptfeprop.htm>.
- EG&G services, Parsons Inc dan Science Application International Corporation. (2000). *Fuel cell Handbook*. Morgantown, West Virginia: U.S.Department of Energi.
- Hermann, Allen .(2005). Bipolar Plates for PEM *Fuel cells*: A Review. *International Journal of Hydrogen Energi*, 30. Pp. 1297 – 1302.
- Hoogers, G. (2003). *Fuel Cell Technology Handbook*. New York: CRC Press.
- International Energi Agency (IEA). (2008). *Key World Energi Statistics*. Paris : IEA.

- Jamal, N. (2008). *Evaluasi Sistem dan Aplikasi Teknik Sputtering untuk Deposisi Katalis pada Polymer Electrolyte Membrane Fuel cell dan Direct Methanol Fuel cell*. Skripsi. Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Kaviany, M dan Nam, J.H. (2009). Microporous layer for Water Morphology control in PEMFC. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52. Pp. 2779-2791.
- Kim Kinoshita. (2010). *Electrochemical Uses of Carbon*. November 23, 2010. <http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-c01-carbon.htm>
- Lamy, C., Lima, A., Lerhun, V., Delime, F. dan Coutanceau, C. (2002). Recent advances in the development of direct alcohol fuel cells. *Journal Power Sources*, 105(2). Pp. 283-296.
- Lim, Chan dan Wang, C.Y. (2004). Effects of Hydrophobic Polymer Content in GDL on Power Performance of a PEM Fuel cell. *Electrochimica Acta*, 49. Pp. 4149-4156.
- Lister, S. dan McLean, G (2004). Review: PEM Fuel cell Electrodes. *Journal of Power Sources*, 130. Pp. 61-76.
- Mathur, Virendra, K. dan Crawford, J. (2009). *Fundamentals of Gas Diffusion Layers in PEM Fuel cells*. New Delhi: Anamaya Publishers.
- Malevich, D., Halliop, E., dan Kunal, K. (2009). Characterization of Water Management in PEM Fuel Cell with Microporous layer using Elektrochemical Impedence Spectroscopy. *Fuel Cell Reasearch Center*.
- Moreira, J., Sebastian, P.J., Ocampo, A.L., Castellanos, R.H., Cano, U. dan Salazar, M.D. (2002). Dependence of PEM Fuel cell Performance on the Configuration of the Gas Diffusion Electrodes. *Journal New Materials for Electrochemical Systems*, 5. Pp. 173-175.

- Park, S., Lee, J.W. dan Popov, B.N. (2008). Effect of PTFE Content in Microporous layer on Water Management in PEM Fuel cells. *Journal of Power Sources*, 177. Pp. 457–463.
- Qi, Z. dan Kaufman, A. (2002). Improvement of Water Management by a Microporous Sublayer for PEM Fuel cell. *Journal Power Sources* 109. Pp. 36-46.
- Rifki, M. (2004). *Perancangan dan Pembuatan Direct Methanol Fuel cell (DMFC)*. Skripsi, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Shen, P.K. (2008). *PEM Fuel Cell Catalyst Layers and MEAs*. New York: Elsevier Academic Press.
- Song, J.M., Cha, S.Y. dan Lee, W.M. (2001). Optimal Composition of Polymer Electrolyte Fuel cell Electrodes Determined by the AC Impedance Method. *Jurnal of Power Sources*, 94. Pp. 78-84.
- Wahyudi. (2009). *Aplikasi Teknik Sputtering Pt Pada Pengembangan PEMFC Melalui Fabrikasi Membrane Electrode Assembly (MEA) dengan Pengaruh Kondisi Operasi Proses Sputtering Pt*. Skripsi, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Wilson, M.S., Springer, T.E., Davey, J.R. dan Gottesfeld, S. (1995). In: S. Gottesfeld, G. Halpert, A. Landgrebe (Eds.). *Proceedings of the First International Symposium on Proton Conducting Membrane Fuel cells I*, PV95-23. The Electrochemical Society, p. 115.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Bahan MPL pada GDL Katoda

Berikut adalah rumusan yang digunakan untuk menghitung jumlah bahan yang diperlukan:

Rumusan Jumlah Bahan	MPL 10%	MPL 20%	MPL 30%
Luas GDL	72,25 cm ²	72,25 cm ²	72,25 cm ²
Loading <i>Carbon black</i>	2 mg/cm ²	2 mg/cm ²	2 mg/cm ²
<i>Carbon black</i> : Etilen Glikol	1 : 9	1 : 9	1 : 9
Jumlah PTFE	10% x (PTFE + Carbon)	20% x (PTFE + Carbon)	30% x (PTFE + Carbon)
Jumlah PTFE 30% wt	(100/30) x Jumlah PTFE	(100/30) x Jumlah PTFE	(100/30) x Jumlah PTFE

Catatan: Luar GDL adalah 8,5 cm x 8,5 cm.

Larutan PTFE yang tersedia adalah larutan PTFE 30%wt

Dari rumusan tersebut dapat ditentukan jumlah bahan yang diperlukan seperti pada table di bawah

Jumlah Bahan yang digunakan	MPL 10%	MPL 20%	MPL 30%
<i>Carbon black</i>	0,1445 gr	0,1445 gr	0,1445 gr
PTFE 30%	0.0535 gr	0.1204 gr	0.2064 gr
Etilen Glikol	1,4450 gr	1,4450 gr	1,4450 gr

Lampiran 2. Perhitungan Bahan Lapisan Katalis

Lapisan Katalis Anoda

Berikut adalah rumusan yang digunakan untuk menghitung jumlah bahan yang diperlukan:

Rumusan Jumlah Bahan	Non MPL	MPL 10%	MPL 20%	MPL 30%
Luas GDL	72,25 cm ²	72,25 cm ²	72,25 cm ²	72,25 cm ²
Loading Katalis Pt	0,4 mg/cm ²	0,4 mg/cm ²	0,4 mg/cm ²	0,4 mg/cm ²
Loading Carbon black	3,6 mg/cm ²	3,6 mg/cm ²	3,6 mg/cm ²	3,6 mg/cm ²
Jumlah Pt/C (10% Pt)	(100/10) x Loading katalis Pt	(100/10) x Loading katalis Pt	(100/10) x Loading katalis Pt	(100/10) x Loading katalis Pt
Carbon : Air : Nafion 5% : Etilen Glikol	1 : 3 : 4 : 1	1 : 3 : 4 : 1	1 : 3 : 4 : 1	1 : 3 : 4 : 1

Dari rumusan tersebut dapat ditentukan jumlah bahan yang diperlukan seperti pada table di bawah

Jumlah Bahan yang digunakan	Non MPL	MPL 10%	MPL 20%	MPL 30%
Pt/C (10%Pt)	0.2890 gr	0.2890 gr	0.2890 gr	0.2890 gr
Air	0.7803 gr	0.7803 gr	0.7803 gr	0.7803 gr
Larutan Nafion 5%	1,0404 gr	1,0404 gr	1,0404 gr	1,0404 gr
Etilen Glikol	0.2601 gr	0.2601 gr	0.2601 gr	0.2601 gr
Metanol	secukupnya	secukupnya	secukupnya	secukupnya

Catatan: Metanol ditambahkan secukupnya hingga ink cukup encer untuk melakukan prosedur brush coating ke GDL

Lapisan Katalis Anoda

Berikut adalah rumusan yang digunakan untuk menghitung jumlah bahan yang diperlukan:

Rumusan Jumlah Bahan	Non MPL	MPL 10%	MPL 20%	MPL 30%
Luas GDL	72,25 cm ²	72,25 cm ²	72,25 cm ²	72,25 cm ²
Loading Katalis Pt	0,4 mg/cm ²	0,4 mg/cm ²	0,4 mg/cm ²	0,4 mg/cm ²
Loading Carbon black	1,6 mg/cm ²	1,6 mg/cm ²	1,6 mg/cm ²	1,6 mg/cm ²
Jumlah Pt/C (20% Pt)	(100/20) x Loading katalis Pt	(100/20) x Loading katalis Pt	(100/20) x Loading katalis Pt	(100/20) x Loading katalis Pt
Carbon : Air : Nafion 5% : Etilen Glikol	1 : 3 : 4 : 1	1 : 3 : 4 : 1	1 : 3 : 4 : 1	1 : 3 : 4 : 1

Dari rumusan tersebut dapat ditentukan jumlah bahan yang diperlukan seperti pada table di bawah

Jumlah Bahan yang digunakan	Non MPL	MPL 10%	MPL 20%	MPL 30%
Pt/C (10%Pt)	0.1445 gr	0.1445 gr	0.1445 gr	0.1445 gr
Air	0.3468 gr	0.3468 gr	0.3468 gr	0.3468 gr
Larutan Nafion 5%	0,4624 gr	0,4624 gr	0,4624 gr	0,4624 gr
Etilen Glikol	0.1156gr	0.1156gr	0.1156gr	0.1156gr
Metanol	secukupnya	secukupnya	secukupnya	secukupnya

Catatan: Metanol ditambahkan secukupnya hingga ink cukup encer untuk melakukan prosedur brush coating ke GDL

Lampiran 3. Data pengujian kinerja PEMFC

1. MEA non MPL

Kode	:	Non MPL		
Ukuran	:	50 cm ²		
Cell Stack	:	Electrochem		
Temperatur				
Cell	:	30 ⁰ C		
Tekanan H2	:	10 Psia		
Tekanan O2	:	10 Psia		
Load (beban)	Voltage (V)	Current Density d(mA/cm ²)	Power Density (mW/cm ²)	
off	0.943	0	0.00	
0	0.943	0	0.00	
1	0.943	0.04	0.04	
2	0.943	0.04	0.04	
3	0.943	0.04	0.04	
4	0.923	0.14	0.13	
4.5	0.831	2.82	2.34	
5	0.627	24.2	15.17	
5.5	0.462	50.66	23.40	
6	0.439	55.86	24.52	
6.5	0.435	57.46	25.00	
7	0.437	58.26	25.46	
7.5	0.436	58.52	25.51	
8	0.435	58.7	25.53	
8.5	0.437	58.92	25.75	
9	0.437	59	25.78	
9.5	0.439	59.12	25.95	
10	0.440	59.2	26.05	

2. MEA MPL 10%

Kode : MPL 10%			
Ukuran : 50 cm ²			
Cell Stack : Electrochem			
Temperatur			
Cell : 30 ⁰ C			
Tekanan H2 : 10 Psia			
Tekanan O2 : 10 Psia			
Load (beban)	Voltage (V)	Current Density d(mA/cm ²)	Power Density (mW/cm ²)
off	0.937	0.08	0.07
0	0.937	0.08	0.07
1	0.937	0.08	0.07
2	0.937	0.08	0.07
3	0.937	0.08	0.07
4	0.919	0.18	0.17
4.5	0.811	2.84	2.30
5	0.685	27.92	19.13
5.5	0.515	88.08	45.36
6	0.426	125.84	53.61
6.5	0.4	135.34	54.14
7	0.389	139.4	54.23
7.5	0.383	141.24	54.09
8	0.38	142.48	54.14
8.5	0.378	143.44	54.22
9	0.377	144.18	54.36
9.5	0.376	144.8	54.44
10	0.376	145.28	54.63

3. MEA MPL 20%

Kode	:	MPL 20%	
Ukuran	:	50 cm ²	
Cell Stack	:	Electrochem	
Temperatur Cell	:	30 ⁰ C	
Tekanan H2	:	10 Psia	
Tekanan O2	:	10 Psia	
Load (beban)	Voltage (V)	Current Density d(mA/cm ²)	Power Density (mW/cm ²)
off	0.936	0	0.00
0	0.936	0	0.00
1	0.936	0.04	0.04
2	0.936	0.04	0.04
3	0.936	0.04	0.04
4	0.923	0.14	0.13
4.5	0.831	2.86	2.38
5	0.721	27	19.47
5.5	0.572	88	50.34
6	0.484	128.94	62.41
6.5	0.459	141.52	64.96
7	0.449	146.36	65.72
7.5	0.445	148.96	66.29
8	0.442	150.54	66.54
8.5	0.441	151.58	66.85
9	0.44	152.42	67.06
9.5	0.439	153.1	67.21
10	0.438	153.6	67.28

4. MEA MPL 30%

Kode	:	MPL 30%	
Ukuran	:	50 cm ²	
Cell Stack	:	Electrochem	
Temperatur Cell	:	30 ⁰ C	
Tekanan H2	:	10 Psia	
Tekanan O2	:	10 Psia	
Load (beban)	Voltage (V)	Current Density d(mA/cm ²)	Power Density (mW/cm ²)
off	0.928	0	0.00
0	0.928	0	0.00
1	0.928	0.04	0.04
2	0.928	0.04	0.04
3	0.928	0.06	0.06
4	0.911	0.14	0.13
4.5	0.807	3.06	2.47
5	0.637	28.34	18.05
5.5	0.422	77.1	32.54
6	0.347	98.34	34.12
6.5	0.326	104.24	33.98
7	0.318	106.96	34.01
7.5	0.314	108	33.91
8	0.312	109.3	34.10
8.5	0.312	110.24	34.39
9	0.311	110.8	34.46
9.5	0.31	111.6	34.60
10	0.31	111.92	34.70

Lampiran 4. Perhitungan Kurva Polarisasi Ohmic

Plot polarisasi ohmik:

$$\Delta V = ir$$

Persamaan umum garis lurus:

$$y = ax + b$$

Dengan $y = \Delta V$ dalam mV; $x = i$ dalam mA/cm²

Dari (d) dan (e) diperoleh *area resistance* r dalam $\Omega \cdot \text{cm}^2$:

$$r = a$$

Dengan luas area aktif = A , dapat diperoleh *specific resistance* \hat{r} dalam $\text{m}\Omega/\text{cm}^2$:

$$\hat{r} = \frac{r}{A} \\ = \frac{a}{A}$$

Pada Gambar 4.6 dapat diketahui persamaan linear tiap kurva:

Persamaan linear MEA non MPL: $y = 6.814 x + 425.9$

Persamaan linear MEA MPL 10%: $y = 2.619 x + 477.11$

Persamaan linear MEA MPL 20%: $y = 2.319 x + 449.06$

Persamaan linear MEA MPL 30%: $y = 4.026 x + 489.88$

Hasil perhitungan:

Kode MEA	r ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
MEA-Non MPL	6.814
MEA-MPL 10%	2.6191
MEA-MPL 20%	2.319
MEA-MPL 30%	4.0261