

**EVALUASI SISTEM DAN APLIKASI TEKNIK
SPUTTERING UNTUK DEPOSISI KATALIS PADA
POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL
DAN *DIRECT METHANOL FUEL CELL***

SKRIPSI

Oleh:

M. NADRUL JAMAL
04 04 06 040 3



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

**EVALUASI SISTEM DAN APLIKASI TEKNIK
SPUTTERING UNTUK DEPOSISI KATALIS PADA
POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL
DAN *DIRECT METHANOL FUEL CELL***

SKRIPSI

Oleh:

M. NADRUL JAMAL
04 04 06 040 3



**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:

**EVALUASI SISTEM DAN APLIKASI TEKNIK *SPUTTERING* UNTUK
DEPOSISI KATALIS PADA *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE*
FUEL CELL DAN *DIRECT METHANOL FUEL CELL***

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia 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, 10 Juli 2008

M. Nadrul Jamal

NPM 04 04 06 040 3

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul:

**EVALUASI SISTEM DAN APLIKASI TEKNIK *SPUTTERING* UNTUK
DEPOSISI KATALIS PADA *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE*
FUEL CELL DAN *DIRECT METHANOL FUEL CELL***

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia 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, 10 Juli 2008

Dosen Pembimbing

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

NIP 131 627 864

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Prof. Dr. Ir. Widodo W. 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.



M. Nadrul Jamal
NPM 04 04 06 040 3
Departemen Teknik Kimia

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

**EVALUASI SISTEM DAN APLIKASI TEKNIK *SPUTTERING* UNTUK
DEPOSISI KATALIS PADA *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL
CELL* DAN *DIRECT METHANOL FUEL CELL***

ABSTRAK

Saat ini krisis energi dan permasalahan lingkungan makin meningkat. Bahan bakar fosil terbatas jumlahnya karena sifatnya yang tidak dapat diperbaharui serta dapat menimbulkan polusi udara. Penelitian mengenai pengganti bahan bakar fosil telah lama dimulai. Jenis energi alternatif yang cukup berkembang saat ini adalah sel bahan bakar atau *fuel cell* yang dapat mengkonversi energi kimia secara langsung menjadi energi listrik. Pengembangan teknologi ini diharapkan mampu mengatasi kebutuhan energi yang semakin meningkat dewasa ini.

Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia (DTK FTUI) telah memulai riset mengenai *fuel cell* yang berjenis *Polymer Electrolyte Membrane* (PEM) sejak awal tahun 2004. Namun, dalam perkembangannya sampai saat ini masih dihasilkan kinerja yang rendah. Salah satu penyebabnya adalah kualitas *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang kurang baik. Sistem *fuel cell* di DTK juga dapat menurunkan kinerja *fuel cell*.

Skripsi ini membahas mengenai penggunaan teknik *sputtering* untuk fabrikasi MEA. Teknik *sputtering* memberikan hasil yang baik pada *fuel cell* berbahan bakar hidrogen (PEMFC). MEA dengan teknik *sputtering* menghasilkan *power density* maksimum 138,6 dengan *loading* katalis 0,08 mg/cm², sedangkan MEA konvensional dengan *loading* 0,2 mg/cm² hanya menghasilkan 93,7 mW/cm². Tetapi *sputtering* memberikan hasil yang rendah pada *fuel cell* berbahan bakar metanol (DMFC). MEA DMFC dengan teknik *sputtering* hanya memberikan *power density* maksimum 0,51 mW/cm², sementara MEA konvensional mencapai 2,23 mW/cm². Hal ini karena deposisi katalis Ru dilakukan secara terpisah dengan Pt sehingga keduanya tidak dapat membentuk logam paduan (*alloy*), yang pada akhirnya menurunkan kinerja MEA.

Sistem *fuel cell* sebagai salah satu penyebab rendahnya kinerja pada DMFC telah dievaluasi. Penyebab utama rendahnya kinerja *fuel cell* di DTK adalah sistem aliran bahan bakar yang menyebabkan rendahnya tekanan gas reaktan. Yang kedua adalah kualitas *cell stack* sehingga yang menyebabkan tingginya resistensi sel. Dan yang terakhir adalah pembacaan DC E-Load di DTK memberikan nilai yang lebih rendah dari nilai yang sebenarnya.

Kata Kunci: *Fuel Cell*, PEMFC, DMFC, MEA, *Sputtering*

M. Nadrul Jamal
NPM 04 04 06 040 3
Chemical Engineering Departement

Counsellor
Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA.

**SYSTEM EVALUATION AND APPLICATION OF SPUTTERING FOR
CATALYST DEPOSITION ON POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE
FUEL CELL AND DIRECT METHANOL FUEL CELL**

ABSTRACT

World concern about energy and environmental issues is now increasing. Fossil fuels as a main source of energy is begin to deplete. Fossil fuels also cause severe damage to air quality due to its contaminant and incomplete combustion. Development for another energy source has begun since long ago. Fuel cells are one of the most developing alternatives. A fuel cell is able to produce electricity from a fuel directly, thus increasing its efficiency. Fuel cells can run with many renewable energy source such hydrogen and alcohol. Development of fuel cell is expected to respond the energy demand nowadays.

Chemical Engineering University of Indonesia has begun a research on Polymer Electrolyte Membrane (PEM) based fuel cells since 2004s. But its development still features a low performance. This low outcome is caused by the quality of Membrane Electrode Assembly (MEA) and the system itself.

This research paper has been investigated the sputter deposition method as a tool for manufacturing fuel cell electrodes. This method gave a good result for hydrogen fuel cell PEMFC compared to conventional method. MEA with sputtering has 138.6 mW/cm² maximum power densities with 0.08 mg/cm² catalyst loading, since conventional method only gave 93.7 mW/cm² maximum power densities with 0.2 mg/cm² catalyst loading. But sputtering has an unexpected result for methanol fuel cell DMFC. Performance of DMFC MEA used sputtering only has 0.51 mW/cm² maximum power densities, since conventional gave 2.23 mW/cm² maximum power densities. This low performance was due to the sputtering method that deposit ruthenium catalyst separately with platinum. It made both of them wasn't able to form alloy metal, thus lowering performance.

The fuel cell system as cause of low performance was also evaluated in this research. The main problem in fuel cell system is in the fueling system and oxidant. It contributed in lowering reactant pressure. The second problem is in fuel cell stack that contributed in high resistance of cell. The last problem is placed on the measurement instrument, the DC Electronic Load. Its reading was lower than the actual values.

Key Words: Fuel Cell, PEMFC, DMFC, MEA, Sputtering

DAFTAR ISI

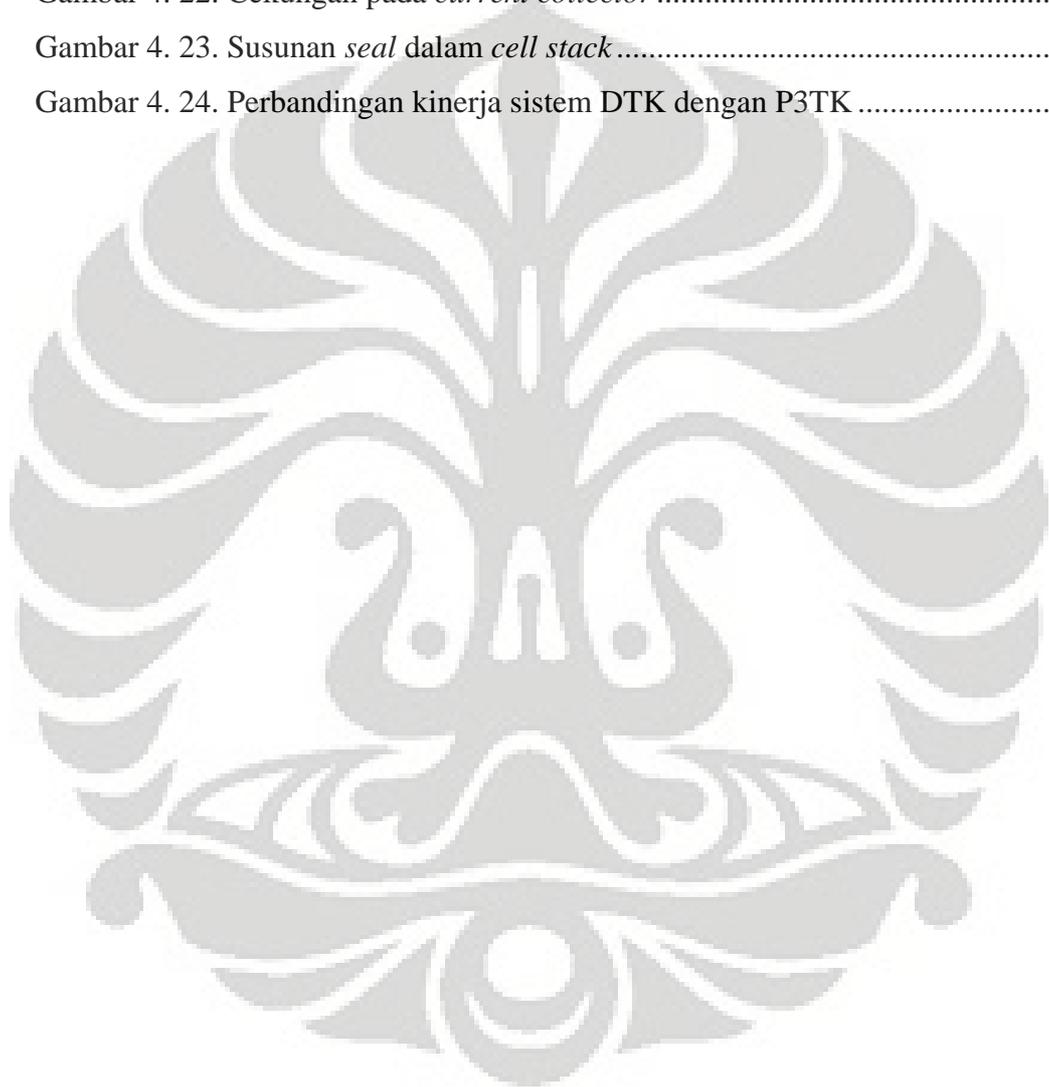
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
DAFTAR SINGKATAN	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH.....	1
1.2 RUMUSAN MASALAH.....	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	2
1.4 RUANG LINGKUP MASALAH.....	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN.....	3
BAB II LANDASAN TEORI.....	4
2.1 TENTANG FUEL CELL ^[10]	4
2.1.1 Polymer Electrolyte Membran Fuel Cell (PEMFC).....	5
2.1.2 Direct Methanol Fuel Cell (DMFC).....	10
2.2 KINERJA FUEL CELL ^[12]	13
2.2.1 Activation Losses.....	13
2.2.2 Crossover Losses.....	15
2.2.3 Ohmic Losses.....	15
2.2.4 Mass Transport Losses.....	16
2.2.5 Overall Losses.....	16
2.3 SPUTTERING	17
2.3.1 Sputtering dalam Fuel Cell	17

2.3.2 Prinsip Kerja Sputtering ^[17]	18
2.4 Unit Pengujian Fuel Cell.....	20
BAB III METODE PENELITIAN	22
3.1 RANCANGAN PENELITIAN.....	22
3.2 RINCIAN KEGIATAN PENELITIAN	24
3.2.1 Preparasi Membran	24
3.2.2 Pembuatan Tinta Katalis atau Nafion Karbon	25
3.2.3 Brush Coating Tinta ke GDL	25
3.2.4 Sputtering Katalis ke GDL atau Membran	26
3.2.5 Hot Pressing	27
3.2.6 Set up Sistem dan Uji Kinerja Fuel Cell.....	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 APLIKASI TEKNIK SPUTTERING	29
4.1.1 Pengaruh Ketebalan Deposisi	29
4.1.2 Pengaruh Substrat Sputtering.....	32
4.1.3 Perbandingan dengan Metode Konvensional.....	39
4.1.4 Perbandingan dengan Penelitian Internasional	44
4.2 EVALUASI SISTEM FUEL CELL DI DTK	45
4.2.1 Evaluasi Instrumen Pengukur	46
4.2.2 Evaluasi Cell Stack	48
4.2.3 Evaluasi Sistem Aliran Bahan Bakar	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	55
5.1 KESIMPULAN	55
5.2 SARAN	56
DAFTAR ACUAN	58
LAMPIRAN.....	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Skema <i>single cell</i> PEMFC[11].....	5
Gambar 2. 2. Struktur PEM[10].....	6
Gambar 2. 3. Struktur MEA[10].....	7
Gambar 2. 4. PEMFC dengan 3 <i>stack</i> [10].....	8
Gambar 2. 5. Model ORR pada Pt[10].....	9
Gambar 2. 6. Grafik operasi <i>fuel cell</i> (kurva polarisasi)[12].....	17
Gambar 2. 7. Sistem <i>sputtering</i> bertipe <i>glow discharge</i> dengan sumber arus DC atau RF[17].....	19
Gambar 2. 8. Unit pengujian PEMFC[18].....	20
Gambar 2. 9. Unit pengujian DMFC[6].....	21
Gambar 3. 1. Rancangan Keseluruhan Kegiatan Penelitian.....	23
Gambar 3. 2. Prosedur Fabrikasi dan Pengujian MEA.....	23
Gambar 4. 1. Pengaruh ketebalan katalis terhadap kinerja DMFC.....	29
Gambar 4. 2. Pengaruh ketebalan katalis terhadap kinerja PEMFC.....	30
Gambar 4. 3. Pengaruh ketebalan katalis terhadap kinerja maksimum PEMFC..	31
Gambar 4. 4. Ilustrasi pengaruh ketebalan katalis terhadap area aktif[20].....	32
Gambar 4. 5. Pengaruh sustrat <i>sputtering</i> terhadap kinerja DMFC.....	33
Gambar 4. 6. Pengaruh sustrat <i>sputtering</i> terhadap kinerja PEMFC.....	35
Gambar 4. 7. Polarisasi aktivasi untuk berbagai GDL PEMFC.....	36
Gambar 4. 8. Polarisasi ohmik untuk kedua jenis GDL PEMFC.....	38
Gambar 4. 9. Pengaruh teknik <i>sputtering</i> pada kinerja DMFC.....	39
Gambar 4. 10. Pengaruh teknik <i>sputtering</i> pada kinerja PEMFC.....	42
Gambar 4. 11. Polarisasi ohmik untuk MEA konvensional dan <i>sputtering</i>	42
Gambar 4. 12. Perbandingan kinerja DMFC DTK dengan jurnal internasional...	44
Gambar 4. 13. Skema <i>sputtering</i> Caillard[23].....	44
Gambar 4. 14. Perbandingan kinerja PEMFC P3TK dengan jurnal internasional	45
Gambar 4. 15. Perbandingan kinerja MEA Caillard dengan MEA komersial.....	46
Gambar 4. 16. Perbandingan pembacaan instrumen di DTK dan di P3TK.....	47

Gambar 4. 17. Rangkaian DC E-Load beserta <i>short circuit</i> yang dapat terjadi....	47
Gambar 4. 18. Polarisasi ohmik pembacaan instrumen DTK dan P3TK.....	48
Gambar 4. 19. Perbandingan kinerja <i>stack</i> DTK dan <i>stack</i> komersial.....	49
Gambar 4. 20. Struktur <i>cell stack</i> [25]	49
Gambar 4. 21. Geometri <i>flowfield</i> jenis <i>single serpentine</i> (kiri) dan <i>paralel serpentine</i> (kanan).....	50
Gambar 4. 22. Cekungan pada <i>current collector</i>	52
Gambar 4. 23. Susunan <i>seal</i> dalam <i>cell stack</i>	52
Gambar 4. 24. Perbandingan kinerja sistem DTK dengan P3TK	53



DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1. Tabel. Nilai α dan i_0 MEA PEMFC dengan berbagai variasi GDL.... 36



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Fabrikasi MEA	61
Lampiran 2. Perhitungan Kurva Polarisasi	62
Lampiran 3. Data Pengujian <i>Fuel Cell</i>	64
Lampiran 4. Gambar Peralatan Utama.....	72



DAFTAR SINGKATAN



CC	= <i>Carbon Cloth</i>
CFP	= <i>Carbon Fiber Paper</i>
CVD	= <i>Chemical Vapor Deposition</i>
DMFC	= <i>Direct Methanol Fuel Cell</i>
DTK	= Departemen Teknik Kimia
EW	= <i>Equivalent Weight</i>
GDL	= <i>Gas Diffusion Layer</i>
MEA	= <i>Membrane Electrode Assembly</i>
NCI	= <i>Nafion Carbon Ink</i>
OCV	= <i>Open Circuit Voltage</i>
ORR	= <i>Oxygen Reduction Reaction</i>
P3TK	= Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan
PEM	= <i>Polymer Electrolyte Membrane</i>
PEMFC	= <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i>
PTFE	= <i>Polytetrafluoro Ethane</i> atau Teflon [®]
PVD	= <i>Physical Vapor Deposition</i>
SD	= <i>Sputter Deposition</i>
TOF	= <i>Turn Over Frequency</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
\hat{r}	= Specific resistance, m Ω /cm ²
R	= Konstanta gas ideal, 8,314 m ³ .Pa/mol.K
T	= Suhu mutlak, K
V	= Voltage, V

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Saat ini salah satu permasalahan yang dihadapi oleh dunia adalah energi. Energi utama selama ini adalah energi yang berasal dari bahan bakar fosil. Bahan bakar fosil adalah bahan bakar yang tidak tebarukan, dan penggunaannya dapat mencemari lingkungan. Sel bahan bakar (*fuel cell*) diharapkan dapat mengatasi permasalahan ini. *Fuel cell* adalah alat yang dapat mengkonversi energi dari bahan bakar menjadi energi listrik secara langsung, sehingga penggunaannya lebih bersih dan sedikit emisi[1].

Fuel cell menggunakan bahan bakar yang dapat diperbarui, seperti alkohol atau hidrogen. Dibandingkan dengan mesin konvensional saat ini, secara teoritis *fuel cell* mempunyai efisiensi yang jauh lebih baik karena tidak adanya komponen bergerak di dalamnya. *Fuel cell* juga mempunyai tingkat emisi yang lebih rendah daripada mesin konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil[2].

Saat ini, *fuel cell* yang mengalami kemajuan cukup signifikan adalah sel yang dapat beroperasi pada suhu rendah dan dapat digunakan pada peralatan sehari-hari, yaitu *fuel cell* yang bertipe PEM (*Polymer Electrolyte Membrane*). Tipe ini dapat menggunakan hidrogen (PEMFC, *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*) atau alkohol (DAFC, *Direct Alcohol Fuel Cell*) sebagai bahan bakarnya[3].

Agar *fuel cell* ini dapat dikomersialkan, maka biaya fabrikasinya harus serendah mungkin. Salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk menekan biaya adalah dengan mengurangi kandungan atau *loading* katalis pada *Membrane Electrode Assembly* (MEA) *fuel cell* tanpa mengurangi kinerjanya. *Sputtering* adalah teknik *coating* katalis yang diharapkan dapat menurunkan *loading* hingga ke tingkat yang sangat rendah. Sebagai perbandingan, *loading* katalis sebesar 0,014 mg/cm² menggunakan teknik *sputtering* setara dengan kinerja MEA konvensional dengan *loading* 0,4 mg/cm²[4].

Di Departemen Teknik Kimia (DTK), penelitian mengenai *fuel cell* telah dimulai sejak tahun 2004 oleh Cahyadi[5]. Hingga saat ini telah dikembangkan *fuel cell* berbahan bakar hidrogen (PEMFC) serta *fuel cell* berbahan bakar metanol (DMFC). Dari penelitian terakhir diperoleh kinerja *fuel cell* masih rendah. Untuk PEMFC dan DMFC dihasilkan *power density* maksimum masing-masing 3,58 mA/cm² dan 24.75 mW/cm²[6][7]. Nilai ini masih jauh jika dibandingkan dengan penelitian internasional yang hasilnya di atas 100mW/cm²[8][9]. Rendahnya kinerja *fuel cell* di DTK dapat disebabkan oleh kualitas MEA atau sistem *fuel cell*. Karena itu diperlukan adanya evaluasi terhadap sistem *fuel cell* di DTK yang meliputi MEA serta sistem *fuel cell* sendiri.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Tingginya jumlah katalis yang digunakan untuk fabrikasi MEA memperbesar biaya pembuatan *fuel cell* untuk aplikasi komersial. Hal ini dapat disebabkan oleh rendahnya dispersi katalis pada MEA sehingga katalis tidak bekerja optimal.

Permasalahan lain yang timbul dari penelitian sebelumnya adalah rendahnya kinerja *fuel cell* yang dihasilkan di DTK. Rendahnya kinerja ini dapat disebabkan oleh kualitas fabrikasi MEA serta kualitas sistem *fuel cell* di DTK.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah untuk menurunkan loading katalis tanpa menurunkan kinerja *fuel* dengan cara mengubah metode *coating* katalis pada MEA dari metode *coating* katalis konvensional *brush coating* menjadi *sputtering*. Penelitian ini juga bertujuan mengevaluasi sistem *fuel cell* yang ada di DTK sehingga diketahui penyebab turunnya kinerja *fuel cell*.

1.4 RUANG LINGKUP MASALAH

Terdapat beberapa batasan untuk permasalahan yang dibahas dalam makalah ini. *Fuel cell* yang digunakan dalam penelitian ini berjenis *Polymer Electrolyte Membrane* (PEM) dengan bahan bakar hidrogen (PEMFC) dan metanol (DMFC). Kondisi operasi *fuel cell* tidak divariasikan. Pembahasan

mengenai *sputtering* hanya sebatas penggunaannya untuk *coating* katalis. Evaluasi sistem fuel cell di DTK hanya sebatas mengetahui penyebab turunnya kinerja.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Makalah ini menggunakan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Menjelaskan latar belakang permasalahan, rumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup permasalahan, serta sistematika penulisan.

Bab II : LANDASAN TEORI

Menjelaskan prinsip dasar mengenai *fuel cell*, *polymer electrolyte fuel cell*, *direct methanol fuel cell*, kinerja *fuel cell*, serta teknik *sputtering* dan aplikasinya dalam *fuel cell*.

BAB III : METODE PENELITIAN

Menjelaskan rancangan keseluruhan dan detil prosedur penelitian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan hasil yang didapat selama penelitian serta analisa terhadap hasil tersebut

BAB III : KESIMPULAN DAN SARAN

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

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 TENTANG FUEL CELL^[10]

Saat ini terdapat kebutuhan besar akan energi. Isu lingkungan menekankan bahwa sumber energi baru harus mempunyai efisiensi tinggi serta rendah atau bahkan tanpa emisi. *Fuel cell* adalah teknologi yang dapat memenuhi kriteria ini.

Fuel cell adalah alat elektrokimia yang dapat mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik secara langsung dan kontinyu. *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. Biasanya bahan bakar *fuel cell* adalah hidrogen yang diumpankan ke anoda dan oksigen ke katoda. Reaksi yang terjadi untuk *fuel cell* jenis ini adalah:



Keuntungan utama *fuel cell* dibanding mesin panas atau *heat engine* adalah tingginya efisiensi teoritis serta emisinya yang rendah. Operasi *fuel cell* tidak bising. Karena itu *fuel cell* banyak dikembangkan secara komersial dan aplikasi militer, seperti kendaraan, peralatan listrik *portable*, dan *distributed power plant*.

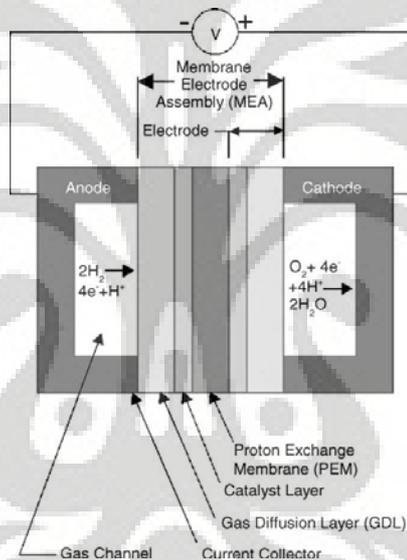
Sir William Grove mendemonstrasikan sel H₂-udara pada 1839. Hampir seabad kemudian, pada 1932, Francis Bacon memproduksi alat yang menjadi dasar *fuel cell*. Selanjutnya *fuel cell* digunakan dalam program luar angkasa Gemini dan Apollo pada 1960.

Banyak tantangan yang harus dihadapi sebelum *fuel cell* dapat diproduksi secara komersial dan berskala besar. Yang utama adalah biaya. Membran, katalis, dan *cell stack* sangat mahal saat ini. Sistem penyimpanan hidrogen juga sangat besar walaupun saat ini sedang dikembangkan sistem penyimpanan hidrogen seperti *carbon nano tube* atau metal hidrida. Infrastruktur sistem distribusi hidrogen juga belum tersedia.

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

2.1.1 Polymer Electrolyte Membran Fuel Cell (PEMFC)

PEMFC adalah jenis *fuel cell* dengan membran elektrolit dari polimer dengan bahan bakar hidrogen. 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[11]. Skema ini ditunjukkan pada Gambar 2. 1.

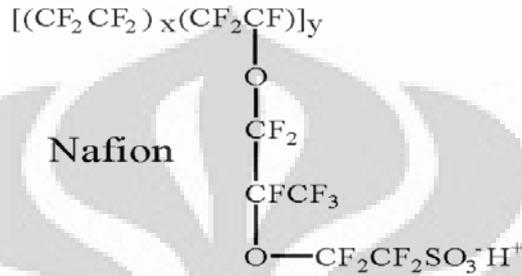


Gambar 2. 1. Skema *single cell* PEMFC[11]

Jantung utama PEMFC adalah *Membrane Electrode Assembly (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 *Gas Diffusion Layer (GDL)*[11]. MEA umumnya disusun diantara dua buah pelat *flowfield* yang identik sehingga membentuk pelat bipolar. Dari Gambar 2. 1 dapat dilihat bahwa MEA terdiri dari membran, lapisan katalis, dan GDL.

2.1.1.1 Membran

Sesuai namanya, 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. 2.



Gambar 2. 2. Struktur PEM[10]

Nilai x dan y bervariasi dengan variasi *Equivalent Weight* (EW). EW berkisar 900-1400, umumnya 1100. Karena struktur nafion mirip dengan PTFE atau 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. Karena itu jumlah air harus seimbang.

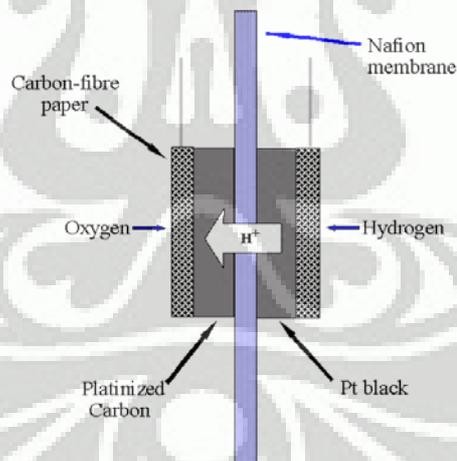
2.1.1.2 Elektroda PEMFC

Elektroda PEMFC adalah struktur tiga dimensi yang kompleks yang mengandung sejumlah bahan yang berbeda dalam campuran homogen. Banyak perkembangan pada elektroda ini. Umumnya lapisan setebal 50 μm yang mengandung Pt tersupport karbon diikat dengan menambahkan nafion atau PTFE yang kemudian dilapiskan ke GDL. GDL umumnya *Carbon Fiber Paper* (CFP) atau *Carbon Cloth* (CC) yang dapat mengumpulkan arus sekaligus melewatkan

gas. GDL umumnya di-*treatment* agar menghasilkan keseimbangan air yang baik. Penambahan nafion ke lapisan katalis dapat dilakukan dengan mencampurkannya dengan katalis atau melapisikannya setelah terbentuk lapisan katalis pada elektroda. Tujuan utamanya adalah sebagai medium untuk menghantarkan proton dalam lapisan katalis, karena hanya katalis Pt yang mempunyai kontak secara ionik dengan membran yang dapat aktif untuk reaksi reduksi-oksidasi. PTFE hanya berfungsi sebagai pengikat dan penambah sifat hidrofobik.

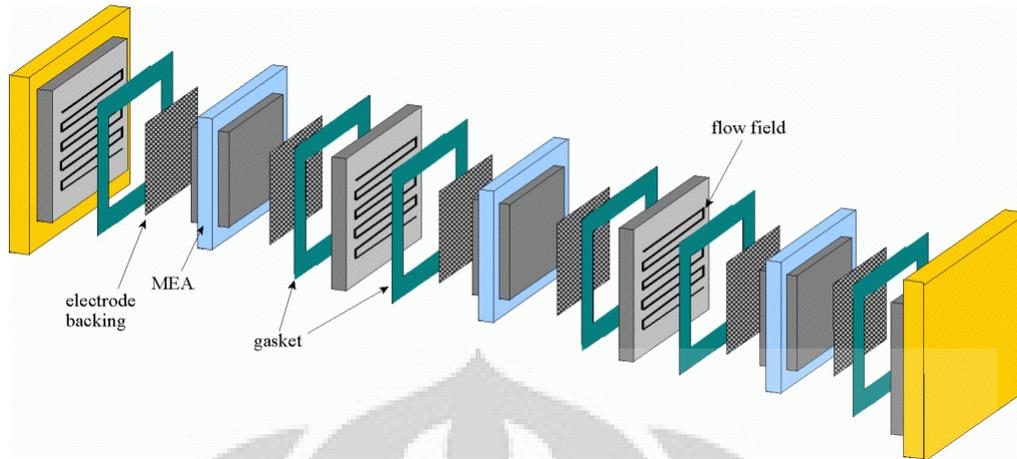
Katalis, nafion, dan PTFE umumnya dicampur bersamaan dengan air dan alkohol membentuk semacam tinta. Tinta inilah yang kemudian dilapiskan ke GDL menggunakan berbagai macam metode, seperti *spray coating*, *brush coating*, atau *screen printing*. Saat ini ada yang dilapiskan langsung ke membran[6].

Umumnya elektroda dipress ke membran dengan panas dan tekanan membentuk *Membrane Electrode Assembly* (MEA). Penampang MEA ditunjukkan pada Gambar 2. 3.



Gambar 2. 3. Struktur MEA[10]

Tipis (75-300 μm) serta ringannya MEA merupakan keuntungan PEMFC. Ini memungkinkan pembuatan *stack* yang ringan dan kompak. Suatu *cell stack* mempunyai beberapa MEA yang dihubungkan secara seri dengan *bipolar plate*. *Bipolar plate* berperan sebagai penghubung listrik antar MEA serta untuk memisahkan gas reaktan. Struktur *cell stack* ditunjukkan pada Gambar 2. 4.



Gambar 2. 4. PEMFC dengan 3 *stack*[10]

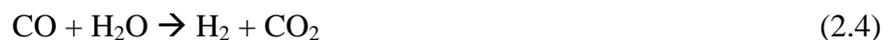
Bipolar plate mempunyai jalur aliran untuk mendistribusikan gas ke elektroda. Geometri yang umum adalah *serpentine* dan *interdigitated*. Banyak pengembangan dilakukan untuk mengoptimasi geometri *flowfield*.

2.1.1.3 Anoda PEMFC

Anoda PEMFC umumnya menggunakan katalis Pt. Anoda ini bekerja dengan baik saat digunakan hidrogen murni, tetapi penyimpanan dan infrastrukturnya menyulitkan penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar. Untuk mengatasi hal tersebut dikembangkan produksi hidrogen secara *in situ* 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:



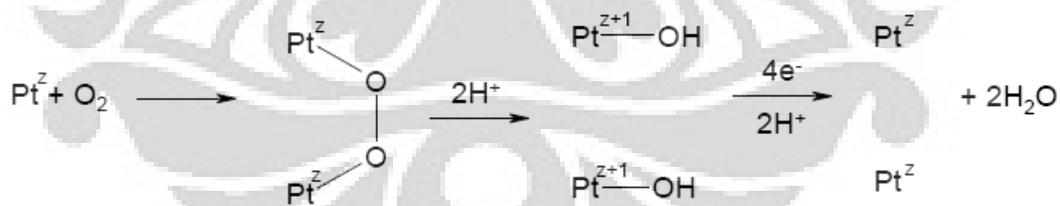
Walaupun *steam reforming* metanol tidak menghasilkan CO secara langsung, tetapi CO masih tetap ada dalam jumlah kecil karena reaksi *water gas shift* bersifat *reversible*.

Agar dapat menggunakan gas hasil *reforming* maka katalis harus toleran terhadap kandungan CO di atas 100 ppm. Salah satu metode yang efektif adalah dengan mencampurkan udara pada bahan bakar. Ketika udara dicampurkan ke gas hasil *reforming*, maka oksigen akan bereaksi dengan CO yang teradsorb katalis sehingga membersihkan permukaan katalis. Tetapi oksigen yang tidak bereaksi dengan CO akan bereaksi dengan H₂ yang artinya membuang bahan bakar dengan percuma.

Karena hal di atas, maka diperlukan katalis yang toleran terhadap CO. Pt sangat mudah teracuni, tetapi katalis bimetal Pt-X (X= Ru, Mo, Sn) lebih toleran terhadap CO. Logam kedua berperan sebagai promotor oksidasi CO menjadi CO₂. Saat ini logam yang paling efektif adalah Ru. Tetapi penambahan Ru meningkatkan harga katalis. Operasi pada suhu tinggi juga dapat mengurangi dampak CO.

2.1.1.4 Katoda PEMFC

Reaksi reduksi oksigen atau *Oxygen Reduction Reaction* (ORR) adalah reaksi yang terdiri dari banyak reaksi elementer. Banyak model dikembangkan untuk reaksi ini. Salah satunya adalah *Bridge Model*:



Gambar 2. 5. Model ORR pada Pt[10]

Dari model pada Gambar 2. 5 diketahui bahwa yang paling krusial adalah ukuran dan jarak antar partikel Pt. Kompleksnya jalur reaksi membuat ORR berjalan lambat. Salah satu parameternya adalah nilai *exchange current density*, j_0 . j_0 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 menggunakan karbon sebagai *support* katalis Pt. Jenis karbon yang paling cocok sebagai *support* katalis adalah *carbon black*. Banyak jenis *carbon black* komersial yang telah dipelajari untuk *fuel cell* dan yang paling umum digunakan adalah *Vulcan XC72*.

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.

2.1.2 Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)

2.1.2.1 Tentang DMFC

Secara keseluruhan skema DMFC sama dengan PEMFC. Pada DMFC, metanol dioksidasi di anoda dan oksigen direduksi di katoda. Oksidasi elektrokimia metanol terjadi sebagai berikut:



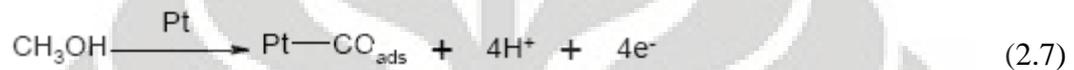
Banyak keuntungan penggunaan metanol sebagai bahan bakar dibandingkan hidrogen. Metanol adalah cairan, karena itu distribusi dan transportasinya lebih sederhana. Metanol juga dapat disuplay menggunakan infrastruktur untuk bensin yang ada saat ini. Walaupun hidrogen dapat diproduksi secara *in-situ* dari metanol menggunakan proses *reforming*, tetapi unit *reformer* ini membuat sistem *fuel cell* makin kompleks. *Reformer* juga selalu menghasilkan CO dengan kandungan yang tinggi yang dapat meracuni katalis.

DMFC dipelajari pertama kali sekitar 50 tahun yang lalu. Waktu itu digunakan elektrolit alkali. Tetapi karbonasi elektrolit oleh terbentuknya CO₂ menurunkan efisiensi dengan mengurangi konduktivitas elektrolit dan depolarisasi katoda. Di akhir tahun 70an banyak peneliti yang mencoba H₂SO₄ sebagai elektrolit. Saat ini penelitian lebih fokus pada penggunaan PEM, terutama karena

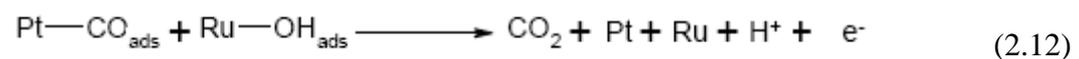
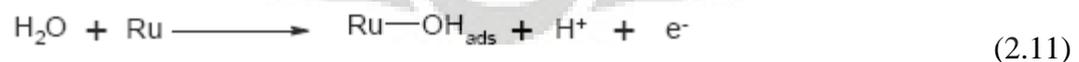
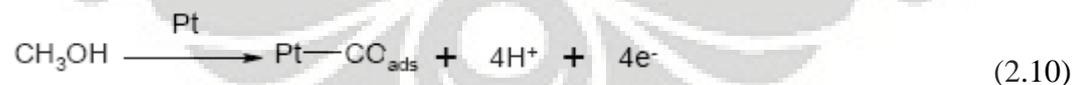
perkembangan membran ini pada PEMFC. Keuntungan PEM sebagai elektrolit pada DMFC sama seperti pada PEMFC.

2.1.2.2 Anoda DMFC

Oksidasi metanol adalah proses yang kompleks, dengan banyak tahap dan produk antara atau intermediet. Katalis terbaik untuk oksidasi ini adalah Pt, tetapi CO yang merupakan intermediet dapat meracuni katalis ini. Intermediet CO ini hanya dapat dioksidasi dengan kehadiran spesi yang mengandung oksigen atau oksigenat pada permukaan Pt. Mekanisme terbentuknya CO sebagai intermediet ditunjukkan pada persamaan (2.7) sampai (2.9).



Ketika ada air, oksigenat hanya terbentuk di permukaan Pt ketika potensial lebih besar dari 0,5-0,6V. Besarnya potensial ini menyebabkan besarnya penurunan kinerja *fuel cell*. Tingginya temperatur mengurangi laju oksidasi metanol dan menghilangkan intermediet CO, karena itu digunakan temperatur operasi 60-100°C pada DMFC. Untuk mengurangi pengaruh *poisoning* maka digunakan katalis bimetal. Sejak dulu hanya sedikit logam yang dapat digunakan sebagai paduan Pt. Hingga saat ini paduan yang paling efektif adalah Ru. Mekanisme sederhana oksidasi metanol menggunakan Pt-Ru ditunjukkan pada persamaan (2.10) sampai (2.12).



Kelebihan Pt-Ru yang utama adalah rendahnya potensial oksidasi metanol dibandingkan logam tunggal Pt. Hal ini karena spesi oksigenat dapat terbentuk pada permukaan Ru dengan potensial yang lebih rendah. Ru juga mengurangi

jumlah intermediet CO yang terbentuk di permukaan Pt. Ru adalah logam yang sedikit mulia sehingga lebih stabil dari logam lain pada kondisi operasi DMFC.

2.1.2.3 Katoda DMFC

Aktivitas katoda sangat penting, tetapi dalam DMFC sering diabaikan. Penggunaan larutan metanol sebagai umpan di anoda serta bahan bakar yang menembus membran atau *crossover* ke katoda dapat menyebabkan penurunan drastis terhadap aktivitas katoda. Metanol teroksidasi di katoda. Ini menyebabkan *mix potential loss* yang menurunkan potensial standar reduksi oksigen. Contohnya, jika metanol terdapat dalam jumlah 0,01 M di katoda, maka akan menurunkan potensial elektroda sebesar 300 mV. *Poisoning* katalis Pt oleh intermediet CO juga mungkin terjadi, yang akhirnya mengurangi aktivitas katoda.

Sebagai tambahan, *crossover* air dari anoda ke katoda dapat menyebabkan *flooding*, yaitu air terkumpul yang menghalangi katalis. Fenomena ini dapat diatasi dengan meningkatkan laju alir udara. Tetapi untuk desain sistem, tingginya laju alir udara akan menamnah kebutuhan energi untuk kompresor sehingga menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Untuk mengatasi masalah-masalah di atas dapat dilakukan dengan mengoptimasi komposisi elektroda. Tingginya loading Pt dibutuhkan untuk mengurangi *mix potential loss*. Secara umum, diperlukan juga sifat hidrofobik yang besar pada lapisan elektroda dan katalis agar air dapat segera terbuang.

2.1.2.4 Membran DMFC

Walaupun penggunaan PEM pada PEMFC menghasilkan kinerja yang tinggi, banyak masalah yang harus dihadapi pada DMFC sebelum diaplikasikan secara komersial. PEM terbaik untuk DMFC saat ini adalah nafion. Tetapi nafion sedikit bersifat *permeable* atau tembus air dan metanol. *Permeability* ini memungkinkan terjadinya *crossover* dari anoda ke katoda sehingga menurunkan kinerja *fuel cell* secara drastis. Karena itu, banyak dikembangkan membran pengganti nafion.

Pendekatan yang banyak dilakukan adalah untuk menciptakan membran yang sedikit *crossover*. Membran berbasis sulfonat telah mulai dikembangkan.

Walaupun *crossover*-nya lebih rendah dari nafion, tetapi konduktivitasnya tidak terlalu tinggi.

Pendekatan lain adalah dengan membuat membran yang dapat beroperasi pada suhu tinggi. Meningkatnya suhu sel dapat meningkatkan laju oksidasi metanol serta menurunkan *poisoning* CO. Nafion mempunyai batasan suhu sampai 100°C. Pada suhu yang lebih tinggi konduktivitas proton turun drastis, dan membran mulai terdegradasi. Membran *polybenzimidazole* yang ditambahkan dengan asam fosfat menunjukkan konduktivitas proton yang tinggi pada suhu hingga 200°C.

2.2 KINERJA FUEL CELL^[12]

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.

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. Penurunan tegangan ini umumnya disebut dengan *overpotential* (ΔV), yang merupakan beda tegangan antara dua terminal. Melalui eksperimen, Tafel dapat mendeskripsikan penurunan ini secara matematis. Tafel menunjukkan korelasi langsung antara densitas arus dan voltase yang dihasilkan

pada daerah arus rendah. Plot yang dihasilkan berbentuk logaritma natural untuk memudahkan analisa. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\Delta V = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.13)$$

Untuk plot ke kurva, persamaan (2.13) dapat diubah menjadi:

$$\Delta V = A \ln i - A \ln i_0 \quad (2.14)$$

Konstanta A makin besar untuk reaksi yang makin lambat, sedangkan konstanta i_0 makin besar untuk reaksi yang makin cepat. Nilai i_0 disebut dengan *exchange current*. i_0 adalah nilai pada plot tafel saat arus mulai bergerak menjauhi nol.

Telah ada percobaan yang dilakukan untuk menentukan nilai A secara teoritis. Berikut persamaan yang disederhanakan untuk *fuel cell* hidrogen.

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (2.15)$$

Dalam persamaan (2.15) R adalah konstanta gas ideal, T adalah suhu mutlak dalam Kelvin atau Rankine, serta F adalah konstanta Faraday. Nilai α dikenal dengan *charge transfer coefficient* dan tidak mempunyai satuan. Nilai ini menjelaskan proporsi energi listrik yang berkaitan dengan perubahan laju reaksi elektrokimia. Nilainya berbeda untuk material yang satu dengan yang lain. Karena itu secara keseluruhan nilai A merupakan fungsi dari sifat-sifat bahan. Untuk bahan yang biasa digunakan, nilai α berada dalam rentang yang kecil; biasanya $\alpha=0,5$ untuk anoda, dan berkisar $\alpha=0,1$ sampai $\alpha=0,5$ untuk katoda. Berdasarkan volt yang diprediksi oleh persamaan tafel, maka eksperimen dengan material yang berbeda tidak akan memberikan efek yang besar.

Perdasarkan persamaan (2.13), maka variabel yang dapat diubah untuk meningkatkan kinerja adalah nilai i_0 . Nilai *exchange current density constant* sangat bervariasi rentang rentang yang besar, sampai orde 4. Karena itu akan memberikan pengaruh yang signifikan pada kinerja *fuel cell* di arus rendah. Nilai i_0 rendah sekitar $0,01 \text{ mA/cm}^2$ sedangkan nilainya yang tinggi sekitar 100 mA/cm^2 .

2.2.2 Crossover Losses

Crossover terdiri dari *crossover* bahan bakar dan *crossover* elektron. *Open Circuit Voltage* (OCV) adalah voltase sel sebelum dibebani. Nilai ini biasanya lebih rendah 0,3 V dari nilai teoritis. 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. Untuk memodelkan fenomena ini, persamaan (2.13) dimodifikasi mejadi:

$$\Delta V = A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) \quad (2.16)$$

Dengan i_n adalah arus karena *crossover* bahan bakar atau elektron yang setara dengan *short circuit*.

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*.

$$V = ir \quad (2.17)$$

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 atau konsentrasi berhubungan langsung dengan masalah tekanan. Jika hidrogen dikonsumsi dalam laju yang sangat besar di anoda maka tekanan parsial hidrogen akan jatuh sehingga menurunkan laju reaksi. Hal yang sama terjadi pada oksigen di katoda. Penurunan tegangan karena perubahan tekanan dapat disederhanakan dalam persamaan matematika sebagai berikut:

$$\Delta V = \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (2.18)$$

Untuk menghubungkan persamaan ini dengan *current density*, maka harus didefinisikan *limiting current density*, i_l , sebagai kondisi dimana tidak ada lagi bahan bakar yang dapat digunakan untuk meningkatkan *current density*, sehinggakelebihan atau *excess* tekanan hidrogen menjadi nol. Jika kita mendefinisikan tekanan ini sebagai P_1 , jika *current density* diturunkan maka tekanan akan turun secara linear, sehingga diperoleh hubungan:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{i_l - i}{i_l} \right) \quad (2.19)$$

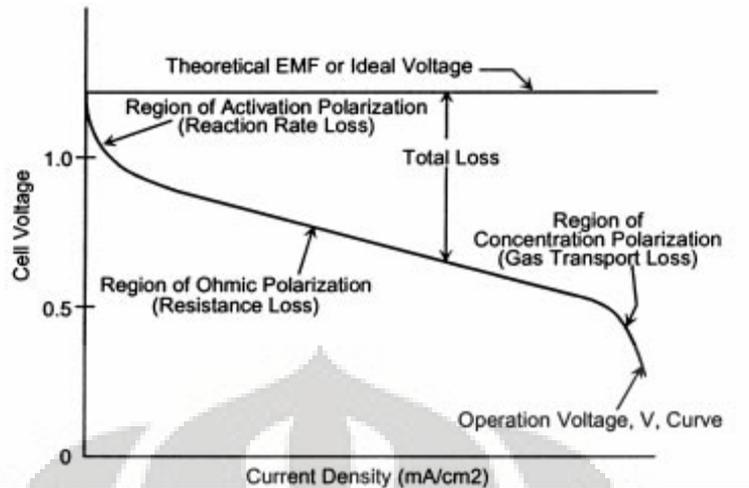
Jika disubstitusikan ke persamaan sebelumnya maka akan diperoleh hubungan:

$$\Delta V = \frac{RT}{2F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right) \quad (2.20)$$

Persamaan (2.20) menunjukkan bahwa penurunan tegangan ditentukan oleh *limiting current density*.

2.2.5 Overall Losses

Jika semua penyebab penurunan tegangan yaitu *activation*, *crossover*, *ohmic*, dan *mass transfer losses* digabungkan maka diperoleh grafik operasional *fuel cell*. Grafik yang ditunjukkan pada gambar Gambar 2. 6 menunjukkan kinerja *fuel cell* pada kondisi yang standar.



Gambar 2. 6. Grafik operasi *fuel cell* (kurva polarisasi)[12]

Plotnya secara keseluruhan ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\Delta V = E - (i - i_n) - A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) + B \ln \left(1 - \frac{i + i_n}{i_l} \right) \quad (2.21)$$

2.3 SPUTTERING

Metode deposisi vakum yang umum meliputi *Chemical Vapor Deposition* (CVD), *Physical Vapor Deposition* (PVD), dan *Sputter Deposition* (SD). *Sputtering* diketahui menghasilkan lapisan yang lebih kompak diantara ketiga jenis di atas[11].

2.3.1 Sputtering dalam Fuel Cell

Selama ini, metode yang biasa digunakan dalam pembuatan MEA untuk *fuel cell* diantaranya adalah *brush coating* (*painting*), *spray coating*, dan *print coating* terhadap tinta katalis yang mengandung campuran elektrolit, karbon, dan katalis. Campuran tersebut adalah perpaduan tiga fasa dari katalis, karbon, dan elektrolit (biasanya nafion) yang memungkinkan difusi gas, difusi air, transport proton, serta transport elektron dari dan ke bagian katalis terjadi secara efektif[13].

Perbaikan terhadap proses ini meliputi optimasi rasio Pt, C dan nafion yang ada dalam tiga fasa tersebut. Tetapi ada batasan terhadap aktifitas katalis yang disebabkan oleh ukuran partikel Pt pada karbon aktif. Selain itu, ada beberapa aspek dari struktur lapisan membran-katalis yang diproduksi dengan

metode di atas yang menyebabkan kinerja katalis menjadi rendah. Yang pertama, ionomer dalam lapisan katalis memperburuk konduktivitas listrik antara elektroda dengan partikel katalis. Yang kedua, porositas bertambah dengan bertambahnya ketebelan lapisan katalis. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan resistensi ohmik dari sel. Dampak lain adalah terbentuknya suatu gradien konsentrasi bahan bakar dalam tebalnya lapisan katalis. Hal-hal tersebut menyebabkan kinerja katalis menjadi tidak optimal[14].

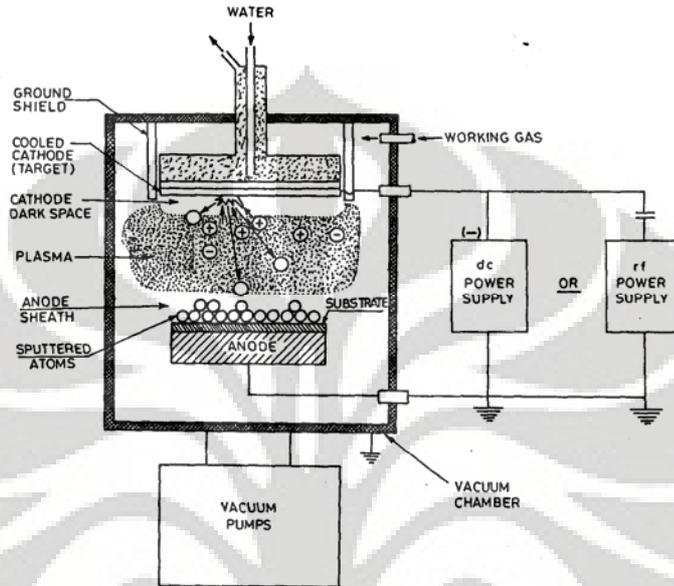
Sebagai alternatif, digunakan *Sputter Deposition* atau *sputtering* untuk melapiskan katalis pada permukaan membran untuk membuat MEA dengan *loading* katalis rendah[15]. *Sputter deposition* telah diteliti selama lebih dari satu dekade untuk pelapisan elektroda pada sel bahan bakar agar lebih efektif. Witham *et.al.*[14] mendapatkan kinerja katalis pada DMFC sampai dua kali lipat lebih tinggi dari penggunaan metode konvensional katalis berbasis tinta katalis. Selain meningkatkan kinerja, *sputter deposition* juga digunakan untuk mengurangi jumlah katalis anoda yang diperlukan untuk *fuel cell*. Srinivasan *et al.* melapiskan suatu film tipis Pt 50 nm ke permukaan GDL untuk mengurangi *loading* sampai sepersepuluhnya tanpa pengurangan kinerja *fuel cell*[16].

2.3.2 Prinsip Kerja Sputtering^[17]

Sputter deposition adalah suatu proses dimana material untuk *coating* atau *target* dikeluarkan/dilepaskan dari permukaan padatnya melalui perubahan momentum. Perubahan momentum dilakukan dengan membombardir permukaan *target* dengan partikel berenergi tinggi. Partikel berenergi tinggi ini biasanya berupa ion positif dari gas berat (*working gas*) yang inert atau yang reaktif terhadap material *coating* (untuk inert, gas yang biasa digunakan adalah argon). Ion positif dari *working gas* adalah plasma, fasa ke empat dari materi. Material yang di-*sputtering* dikeluarkan dari permukaannya dalam bentuk atom individual. Permukaan yang akan diberi *coating* diletakkan didepan *target* sehingga memotong fluks atom yang lepas dari permukaan *target*. Material ini disebut dengan *substrat*.

Sifat yang paling unggul dalam proses *sputtering* adalah keseragamannya. Komposisi *coating* juga dapat dikontrol dengan tingkat akurasi yang tinggi.

Karena material *coating* diubah ke fasa uap secara mekanik (perubahan momentum), dan bukan secara fisika atau kimia, maka secara teoritis material apapun dapat dipakai untuk *coating*. Material *target* untuk *coating* dapat dibuat dari semua jenis metode pembuatan material, dari jenis logam tuang sampai yang dalam bentuk bubuk. Prinsip dasar *sputtering* terlihat dalam Gambar 2. 7.



Gambar 2. 7. Sistem *sputtering* bertipe *glow discharge* dengan sumber arus DC atau RF[17]

Target disambungkan ke voltase negatif dari sumber energi, dan dihadapkan ke substrat yang akan di-*coating*, yang berada pada posisi anoda. Sebelum proses dimulai, ruangan divakum menggunakan *vacuum pump*. *Working gas* dimasukkan sebagai medium (partikel berenergi tinggi) untuk memulai tumbukan dengan *target*.

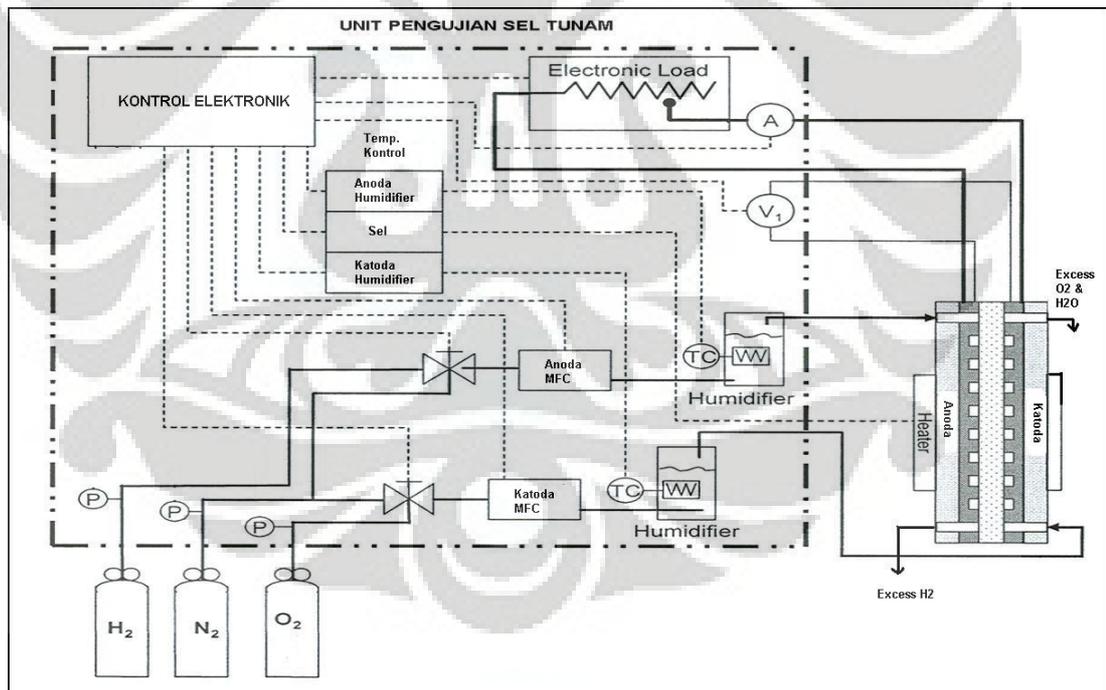
Saat proses dimulai, karena medan magnet yang besar, *working gas* melepaskan elektronnya membentuk plasma yang bermuatan positif dan menyerang *target* dengan sejumlah energi tertentu untuk melepaskan atomnya dari permukaan padatnya melalui transfer momentum. *Substrat* diletakkan memotong fluks laju atom yang keluar dari *target*. Atom yang keluar dari *target* nantinya akan terkondensasi di *substrat* dan melapisi permukaannya. Karena tumbukan plasma dengan *target* menghasilkan panas, maka di bagian katoda diberi air pendingin untuk menjaga suhunya.

Mekanisme deposisi pada substrat[17]

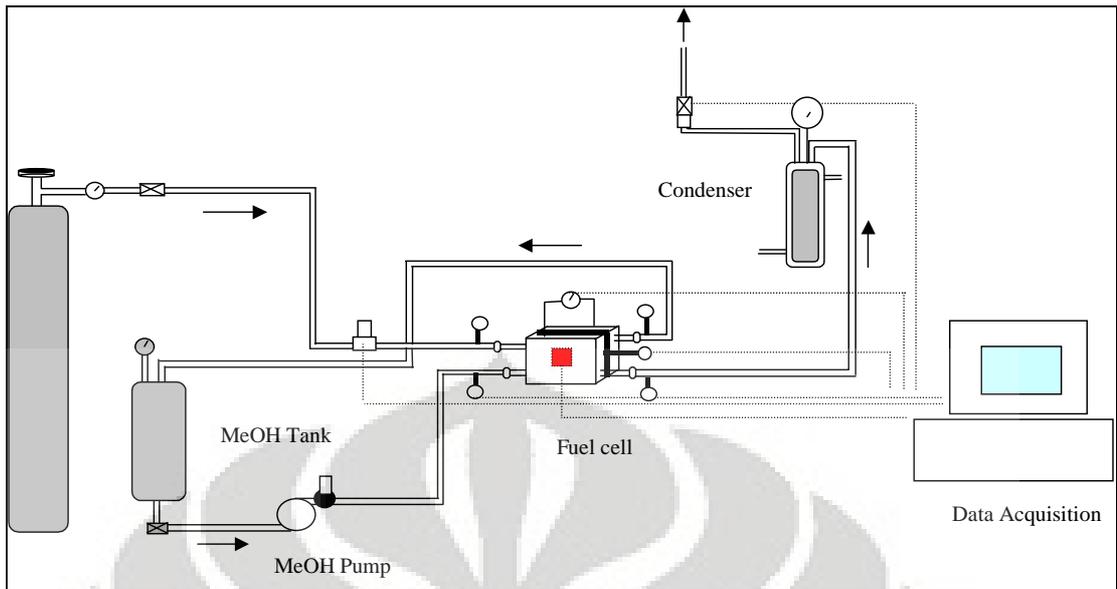
Pada proses *sputtering*, suatu atom mengalami tiga tahapan proses selama deposisi. Pertama partikel atom hasil *sputtering* mentransfer energi kinetik ke lapisan di bawah permukaan (*lattice*) pada *substrat* dan membentuk ikatan yang cukup lemah. Kedua, atom ini berdifusi di atas permukaan dan bertukar energi dengan atom di bawah permukaan *substrat* serta atom lain pada permukaan. Peristiwa ini berlangsung sampai semuanya mengalami desorpsi (oleh penguapan atau *sputtering* balik) atau terperangkap pada daerah (*site*) berenergi rendah. Akhirnya, atom yang telah terikat ini mengatur posisinya dalam *lattice* melalui proses difusi ruah (*bulk diffusion*). Secara keseluruhan, atom yang ter-*coating* seperti tertanam pada *substrat* sehingga membentuk ikatan yang cukup kuat antara permukaan dengan material *coating*.

2.4 Unit Pengujian Fuel Cell

Skema pengujian fuel cell ditunjukkan pada Gambar 2. 8 dan Gambar 2. 9.



Gambar 2. 8. Unit pengujian PEMFC[18]



Gambar 2. 9. Unit pengujian DMFC[6]

BAB III

METODE PENELITIAN

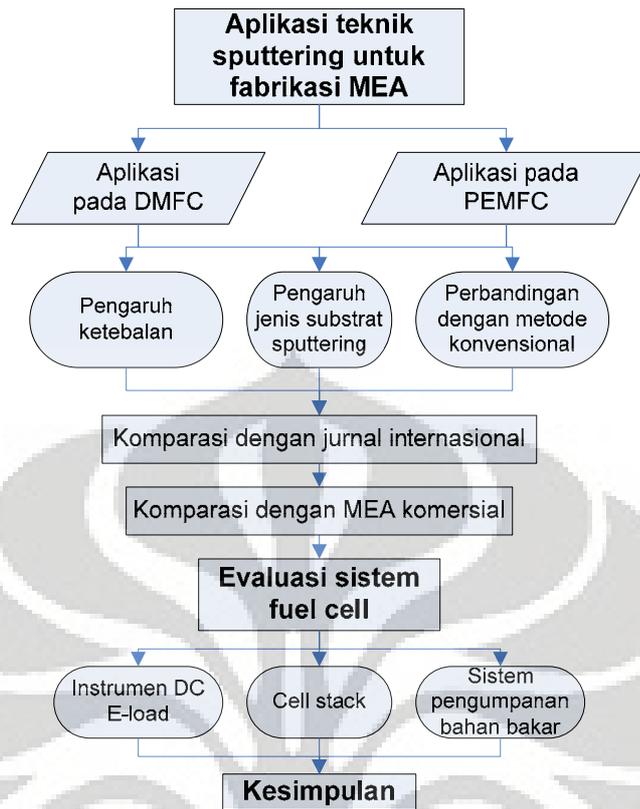
3.1 RANCANGAN PENELITIAN

Penelitian terbagi menjadi dua bagian besar, yaitu aplikasi teknik *sputtering* untuk meningkatkan kinerja *fuel cell* dan evaluasi sistem *fuel cell* di DTK FTUI. Aplikasi *sputtering* meliputi aplikasi pada PEMFC dan DMFC. Evaluasi terhadap sistem *fuel cell* di DTK sendiri menggunakan sistem PEMFC karena ada sistem lain yang dapat digunakan sebagai pembanding. Evaluasi ini meliputi evaluasi instrumen, *cell stack*, dan sistem.

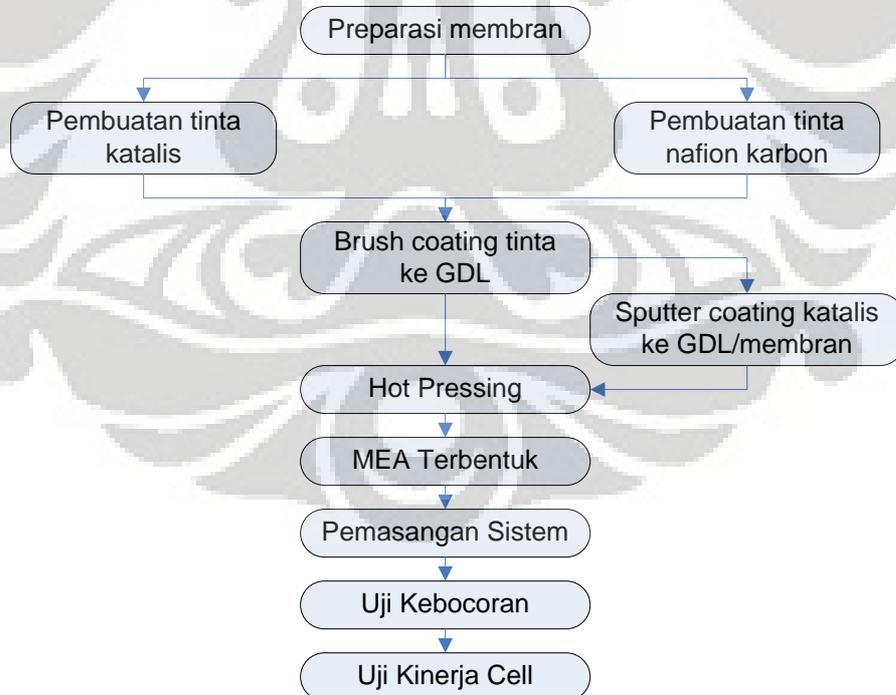
Untuk tiap langkah pada tahap di atas, dilakukan fabrikasi dan pengujian MEA untuk *fuel cell*. Fabrikasi MEA sendiri terdiri dari beberapa tahap, yaitu pencucian membran, pembuatan tinta katalis, pembuatan tinta nafion karbon (NCI), *coating* tinta katalis atau tinta nafion karbon, *sputtering* katalis, serta *hot pressing*. Sedangkan pengujian MEA terdiri dari uji kebocoran serta pengambilan data kinerja *fuel cell*.

Fabrikasi MEA dilakukan di Laboratorium Pusat Penelitian dan Pengemangan Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan (P3TKEBT), sedangkan pengujian *fuel cell* dilakukan di Lab P3TK serta di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) DTK FTUI.

Ringkasan dari semua kegiatan yang akan dilakukan terangkum dalam Gambar 3. 1, sedangkan tahapan fabrikasi dan pengujian MEA ditunjukkan pada Gambar 3. 2.



Gambar 3. 1. Rancangan Keseluruhan Kegiatan Penelitian



Gambar 3. 2. Prosedur Fabrikasi dan Pengujian MEA

3.2 RINCIAN KEGIATAN PENELITIAN

Berikut rincian prosedur tiap tahap penelitian.

3.2.1 Preparasi Membran

Alat dan bahan

1. *Beaker glass*
2. *Cutter*
3. Penjepit dan statif
4. *Hot Plate*
5. Membran nafion (DuPont Nafion PFSA *Membranes*) 112 untuk PEMFC dan 117 untuk DMFC
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 4×500 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%. Jangan sentuh bagian tengah membran.
3. Merendam membran dalam *deionized water* pertama selama satu jam. Untuk semua perendaman, pastikan membran tidak menempel ke bagian dinding *beaker glass*.
4. Memindahkan membran secara hati-hati menggunakan penjepit ke dalam *beaker glass* berisi hidrogen peroksida. Rendam 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. Simpan di tempat yang terlindung dari debu tetapi memungkinkan membran untuk kering.
7. Membiarkan membran kering selama satu malam.

3.2.2 Pembuatan Tinta Katalis atau Nafion Karbon

Alat dan bahan

1. Timbangan digital
2. *Magnetic stirrer*
3. Cawan petri
4. *Beaker glass*
5. Spatula
6. Katalis (E-TEK). Untuk PEMFC, Anoda dan Katoda: C20-60 10% HP Pt on Vulcan XC-72R. Untuk DMFC, Anoda: C20-60 60% HP Pt:Ru Alloy (1:1 a/o) on optimized carbon; Katoda: C20-60 60% HP Pt on Vulcan XC-72R
7. *Carbon powder (Carbon Vulcan XC-72R)*
8. Larutan Nafion 5% wt
9. *Deionzed water*

Prosedur

1. Menghitung kebutuhan katalis untuk tinta katalis atau *carbon powder* untuk tinta nafion karbon, larutan nafion 5%, dan *deionized water* berdasarkan *loading*.
2. Mencampurkan semua bahan dalam beker glass 50 ml dengan urutan katalis-air-larutan nafion, dan menutupi beaker glass dengan plastik laminating agar nafion tidak habis menguap.
3. Mengaduk campuran di atas menggunakan *magnetic stirrer* selama 10 menit.
4. Menyimpan tinta yang telah siap digunakan

3.2.3 Brush Coating Tinta ke GDL

Alat dan bahan

1. *Cutter*
2. Kuas kecil
3. *Doctor blade*
4. Oven atau *furnace*

5. *Gas Diffusion Layer (GDL): Carbon paper* atau *carbon cloth* (B-1/C/60WP *Carbon Paper/Cloth designation C*, 60 wt% *wet proofing* dari E-TEK)
6. Teflon[®] (PTFE *emulsion*)
7. Tinta katalis atau nafion karbon yang telah dibuat

Prosedur

1. Memotong *carbon paper* atau *carbon cloth* sesuai ukuran yang dibutuhkan dengan melebihi 0.5 cm di setiap sisinya.
2. Untuk PEMFC, menguaskan emulsi nafion atau PTFE pada GDL menggunakan kuas kecil kemudian mengeringkannya dalam oven selama 5 menit. Langsung ke nomor 3 untuk DMFC.
3. Menguaskan tinta pada GDL yang telah kering.
4. Meratakan kuasan tinta menggunakan *doctor blade* yang telah diset ketinggiannya.
5. Mengeringkan elektroda di dalam oven dengan suhu 70°C selama satu jam.
6. Menyimpan elektroda di tempat yang bebas debu.

3.2.4 Sputtering Katalis ke GDL atau Membran

Alat dan bahan

1. *Sputtering apparatus* Anatech[®] Hummer[®]
2. GDL atau membran yang telah dipreparasi
3. Gas argon

Prosedur

1. Meletakkan elektroda atau membran di dasar *sputtering chamber* dan menutup chamber dengan rapat.
2. Menyalakan *vacuum pump*.
3. Membuka aliran gas argon setelah tekanan mencapai 10 mTorr.
4. Melakukan prosedur *precleaning*, yaitu dengan menyalakan plasma RF selama 2 menit.
5. Mengatur semua parameter *sputtering*, meliputi daya dan ketebalan katalis yang diinginkan.

6. Menyalakan *plasma gun*, dan membiarkan proses berlangsung sampai ketebalan tercapai.
7. Setelah proses selesai, berturut-turut matikan saklar *plasma gun*, *switch DC/RF*, pompa vakum, dan aliran gas.
8. Menunggu sampai tekanan *chamber* mencapai kondisi atmosferik.
9. Membuka *chamber* dan mengambil *substrat* yang telah ter-*coating*.

3.2.5 Hot Pressing

Alat dan bahan

1. Alat *hot press*
2. Elektroda
3. 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 70 kg/cm^2 dan pemanasan pada suhu 140°C selama 5 menit.
3. Mendinginkan MEA setelah di-*hot press* dan MEA siap digunakan.

3.2.6 Set up Sistem dan Uji Kinerja Fuel Cell

Alat dan bahan

1. *Cell stack Fuel Cell*
2. MEA yang telah difabrikasi
3. Kunci pas dan kunci L
4. DC *Electronic load*
5. Air sabun
6. 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. Meneteskan 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. Jalankan *fuel cell* selama 2-3 jam.
7. Mengambil data volt dan arus menggunakan DC *electronic load*.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 APLIKASI TEKNIK SPUTTERING

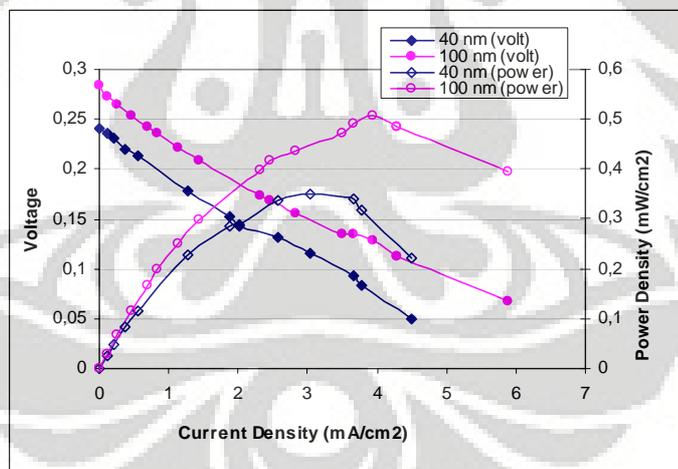
Teknik *sputtering* untuk *coating* katalis pada *fuel cell* diaplikasikan pada PEMFC serta DMFC. Untuk DMFC, katalis yang di-*coating* dengan teknik *sputtering* adalah Ru pada anoda. Sedangkan pada PEMFC, katalis yang di-*coating* adalah Pt pada anoda dan katoda.

4.1.1 Pengaruh Ketebalan Deposisi

Ketebalan deposisi katalis berbanding lurus dengan *loading*. Sehingga akan dibahas pengaruh penambahan *loading* katalis terhadap kinerja *fuel cell*.

4.1.1.1 Pengaruh pada DMFC

Perbandingan kinerja untuk *sputtering* Ru dengan ketebalan deposisi yang berbeda ditunjukkan oleh Gambar 4. 1.



Gambar 4. 1. Pengaruh ketebalan katalis terhadap kinerja DMFC

Gambar 4. 1 menunjukkan bahwa *sputtering* Ru dengan ketebalan yang lebih besar menghasilkan kinerja yang lebih baik. Untuk MEA dengan ketebalan *sputtering* Ru 100 nanometer atau setara dengan 0,1241 mg Ru/cm² dihasilkan *power density* maksimum 0,51 mWatt/cm², sedangkan *sputtering* dengan ketebalan 40 nm atau 0,0497 mg/cm² hanya menghasilkan 0,35 mWatt/cm². Hal

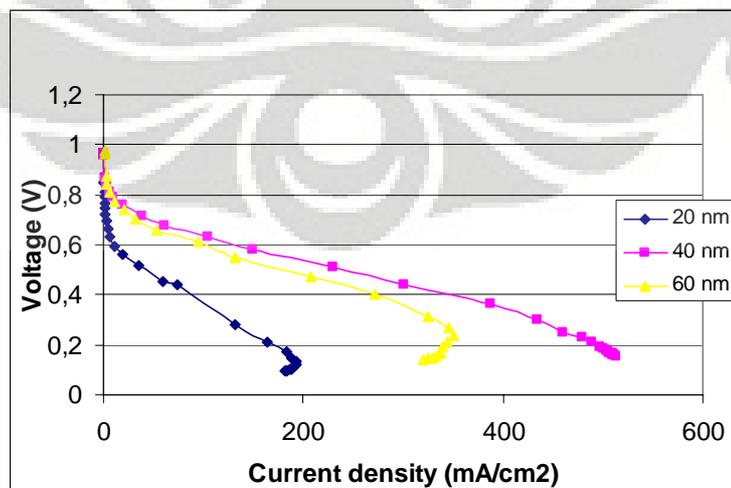
ini dapat dipahami karena Ru sebagai katalis yang membantu oksidasi CO berjumlah lebih banyak, sehingga oksidasi metanol secara keseluruhan lebih baik.

Tetapi kenaikan kinerja karena naiknya *loading* tidaklah proporsional. Pada MEA dengan *loading* Ru 0,0497 mg/cm² dihasilkan *power density* maksimum 0,35 mWatt/cm². Sedangkan MEA dengan *loading* 0,1241 mg/cm², atau 2,5 kali MEA 40 nm, *power density* yang dihasilkan hanya 0,51 mWatt/cm², atau sekitar 1,5 kali MEA 40 nm. Dari sini dapat disimpulkan bahwa penambahan *loading* tidak diiringi oleh kenaikan kinerja secara linear. Akan ada titik dimana penambahan *loading* tidak lagi berpengaruh pada kinerja, yaitu pada *loading* optimal Ru.

Rifki[6] dalam skripsinya menyebutkan bahwa kenaikan *loading* katalis pada anoda dari 3 mg/cm² menjadi 4 mg/cm² tidak memberikan pengaruh yang signifikan. Li Liu[19] dalam jurnalnya juga telah melakukan riset untuk mengetahui pengaruh penambahan *loading* katalis pada anoda. Dalam risetnya dihasilkan bahwa penambahan *loading* dari 2 mg/cm² menjadi 4 mg/cm² tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan, bahkan dalam bentuk kurva, keduanya hampir berimpit walau ada sedikit kenaikan pada *loading* yang lebih tinggi.

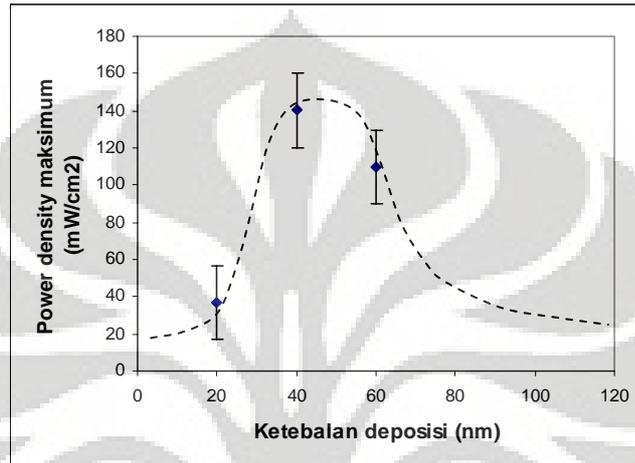
4.1.1.2 Pengaruh pada PEMFC

Perbandingan kinerja MEA dengan ketebalan yang berbeda ditunjukkan oleh kurva pada Gambar 4. 2.



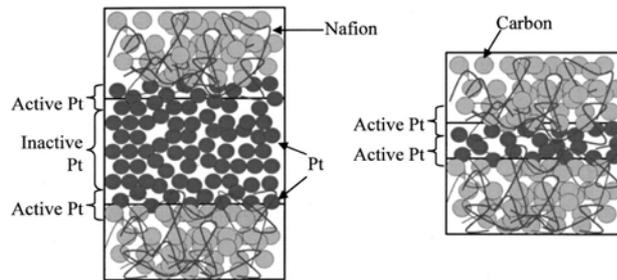
Gambar 4. 2. Pengaruh ketebalan katalis terhadap kinerja PEMFC

Sebagaimana pada DMFC, kinerja *fuel cell* sangat bergantung pada ketebalan atau *loading* katalis. Pada Gambar 4. 2 lebih jelas ditunjukkan bahwa peningkatan *loading* tidak selalu memberikan kinerja yang baik. Peningkatan deposisi dari 20 nm menjadi 40 nm membuat kinerja *fuel cell* meningkat, tetapi peningkatan menjadi 60 nm justru membuat kinerja turun. Plot *power density* maksimum sebagai fungsi ketebalan katalis ditunjukkan pada Gambar 4. 3.



Gambar 4. 3. Pengaruh ketebalan katalis terhadap kinerja maksimum PEMFC

Dari plot pada Gambar 4. 3 dapat diketahui bahwa *loading* optimal diperoleh pada ketebalan katalis 40-50 nm. Fenomena ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada *loading* rendah, jumlah katalis yang diperlukan untuk mengoksidasi hidrogen masih belum cukup. Dengan menaikkan *loading* atau ketebalan maka kinerja akan meningkat karena makin banyak katalis yang mengoksidasi hidrogen. Tetapi dengan bertambahnya ketebalan, maka makin banyak jumlah katalis yang tidak aktif karena tertutupi oleh lapisan katalis di atasnya sehingga kinerja tidak akan naik lagi. Deposisi lebih lanjut menyebabkan struktur katalis menjadi semakin tidak aktif. Ini berhubungan dengan struktur pada level nano[20]. Ilustrasi untuk penjelasan ini diberikan oleh penelitian Haug[20] yang ditunjukkan pada Gambar 4. 4.



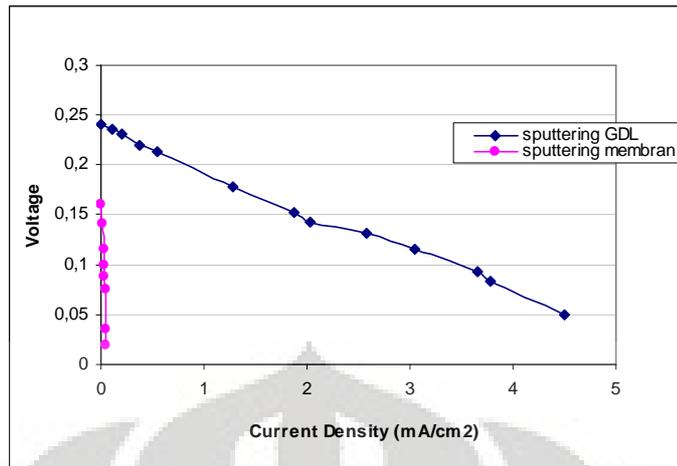
Gambar 4. 4. Ilustrasi pengaruh ketebalan katalis terhadap area aktif[20]

Pada Gambar 4. 4 ditunjukkan bahwa katalis pada lapisan katalis yang tebal bagian bawah tidak aktif sehingga utilisasi katalis makin rendah. Sementara lapisan katalis yang tipis bekerja lebih baik karena lebih banyak akses menuju permukaan katalisnya. O'Hayre[21] dalam jurnalnya juga menemukan fenomena yang sama. Penelitian O'Hayre mengenai pengaruh ketebalan katalis terhadap kinerja sel menghasilkan kesimpulan bahwa ada ketebalan optimal untuk deposisi katalis. Jika deposisi dilanjutkan hingga melebihi nilai tersebut, maka kinerja katalis akan makin turun. Hal ini karena makin tebal deposisi, maka permukaan aktif katalis menjadi makin tertutupi.

4.1.2 Pengaruh Substrat Sputtering

4.1.2.1 Pengaruh pada DMFC

Sputtering adalah pelapisan katalis pada suatu permukaan atau *substrat* dengan cara deposisi. Secara teoritis semua permukaan dapat di-*coating* menggunakan *sputtering*. Pada *fuel cell*, *coating* katalis menggunakan *sputtering* dapat dilakukan pada GDL yang telah dilapisi oleh tinta katalis Pt atau langsung pada membran. Perbandingan kinerja untuk dua jenis substrat *sputtering*, yaitu GDL dan membran, dapat dilihat pada Gambar 4. 5.



Gambar 4. 5. Pengaruh sustrat *sputtering* terhadap kinerja DMFC

Dari Gambar 4. 5 terlihat bahwa kinerja untuk MEA dengan *sputtering* pada membran berada jauh di bawah *sputtering* GDL. Permukaan membran jauh lebih halus dari permukaan GDL, sehingga deposisi Ru pada membran menghasilkan struktur yang kompak dengan sedikit celah. Hal ini menyebabkan penyebaran katalis menjadi kurang. Sebaliknya pada *sputtering* Ru ke GDL *ter-coating* menghasilkan deposisi yang berbutir banyak karena kekasaran permukaan lapisan difusi gas.

Selain itu, dalam fabrikasi MEA yang berperan penting adalah nafion dan ionomernya yang nantinya membentuk jaringan ikat (*crosslink*) sehingga membran dengan GDL dapat menempel dengan baik. Kualitas MEA yang baik ditandai dengan terekatnya katalis dengan baik antara lapisan membran dan GDL. Pada *sputtering* ke membran, polimer nafion membran yang diharapkan dapat bertemu dengan ionomer nafion untuk membentuk jaringan ikat tertutupi oleh lapisan katalis. Hal ini menyebabkan pembentukan ikatan antara membran dengan GDL menjadi terhalangi dan hasilnya kurang baik yang ditandai dengan kurang terekatnya GDL pada membran.

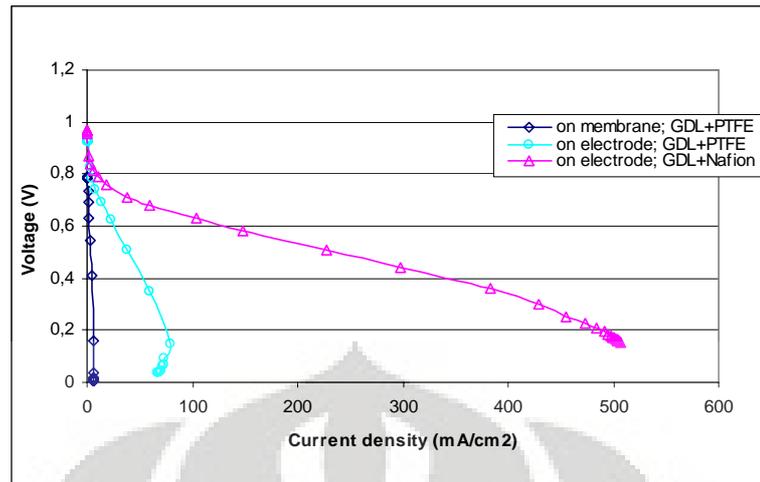
Dampak dari peristiwa ini adalah besarnya resistensi elektron dan ionik antara membran dengan GDL. Resistensi elektron yang tinggi menghambat transfer elektron dari lapisan katalis ke luar, sedangkan resistensi ionik menghambat transfer H^+ yang terbentuk pada lapisan katalis ke membran. Resistensi ionik juga diperparah dengan adanya lapisan katalis pada membran.

Sputtering Ru ke membran juga membuat kinerja Ru sebagai oksidator CO kurang optimal, bahkan hampir tidak bekerja. Katalis Pt sebagai oksidator metanol terdapat pada lapisan GDL. Dengan *sputtering* Ru ke membran, pertemuan Ru dengan Pt makin kecil, sehingga CO yang terikat pada katalis Pt lebih sukar dioksidasi lebih lanjut. Sebaliknya pada *sputtering* Ru ke GDL, karena Pt sendiri berada pada GDL, maka kerja Pt lebih baik. *Sputtering* Ru pada GDL terlapis Pt berarti mempertemukan kedua katalis secara langsung, sehingga CO yang meracuni Pt dapat segera dioksidasi.

Haug dalam jurnalnya menyebutkan bahwa untuk jumlah deposisi katalis yang sama, kinerja MEA menjadi lebih baik jika *sputtering* dilakukan pada GDL daripada ke membran. Deposisi Pt ke membran menunjukkan penurunan kinerja, dari 138 mA/cm² menjadi 44 mA/cm² pada 0,6 Volt. Kekasaran GDL menyebabkan luas aktif katalis menjadi makin besar. Selain itu, tingginya porositas GDL memungkinkan terjadinya difusi gas dari dan ke lapisan elektroda walaupun telah dilapisi dengan katalis. Haug juga menyebutkan bahwa *sputtering* pada membran menyebabkan resistensi lapisan katalis meningkat[20].

4.1.2.2 Pengaruh pada PEMFC

Fabrikasi MEA PEMFC sedikit berbeda dari DMFC. Sebelum katalis di-*coating*, terlebih dahulu dilakukan impregnasi terhadap GDL untuk meningkatkan sifat hidrofobik atau konduktivitasnya. Jenis impregnasi yang digunakan adalah Nafion atau PTFE. Oleh sebab itu, substrat pada MEA untuk PEMFC ada tiga jenis, yaitu membran, GDL dengan Nafion, serta GDL dengan PTFE. Hasil uji kinerja MEA *sputtering* untuk PEMFC dengan berbagai variasi substrat terlihat pada Gambar 4. 6.



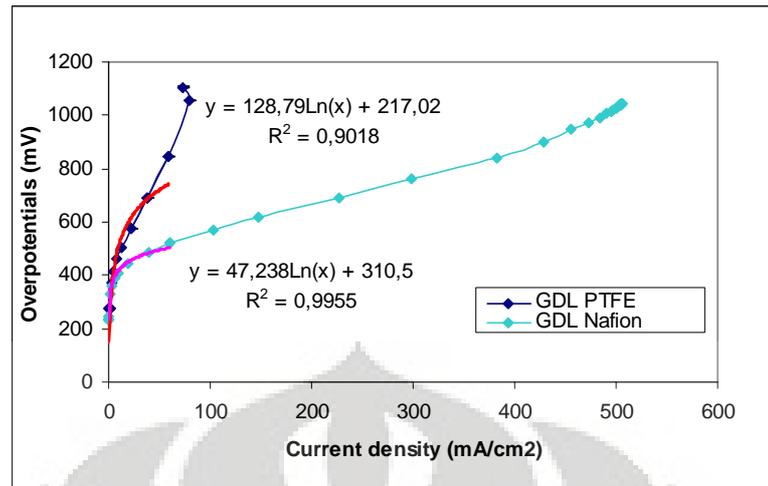
Gambar 4. 6. Pengaruh substrat *sputtering* terhadap kinerja PEMFC

Dari Gambar 4. 6 diketahui bahwa kinerja yang dihasilkan oleh MEA dengan GDL terimpregnasi PTFE lebih rendah daripada menggunakan nafion. Kinerja *sputtering* ke membran terlihat paling rendah.

Rendahnya kinerja MEA PEMFC yang menggunakan teknik *sputtering* ke membran sama dengan yang terjadi pada DMFC. Fenomena pada PEMFC mempunyai sebab yang sama dengan fenomena pada DMFC, yaitu morfologi permukaan membran yang halus serta *crosslink* yang buruk akibat keberadaan katalis pada membran. Karena itu pembahasan selanjutnya langsung mengenai perbandingan GDL terimpregnasi nafion dengan GDL terimpregnasi PTFE.

Analisa terhadap MEA PEMFC dengan GDL yang berbeda dapat dilakukan melalui empat penyebab penurunan tegangan (*losses*) yang didasarkan pada potensial Nernst[22], yaitu: polarisasi aktivasi (*activation losses*), *internal current* atau *fuel crossover*, polarisasi ohmik (*ohmic losses*), dan polarisasi konsentrasi (*mass transport losses*).

Analisa pertama dapat dilakukan terhadap daerah aktivasi. Untuk kedua jenis MEA di atas dapat dibuat plot tafel untuk daerah *activation losses* yang ditunjukkan pada Gambar 4. 7.



Gambar 4. 7. Polarisasi aktivasi untuk berbagai GDL PEMFC

Untuk daerah aktivasi dapat dihitung nilai *charge transfer coefficient* (α) serta *exchange current density constant* (i_0) berdasarkan persamaan (2.8): $\Delta V = A \ln i - A \ln i_0$.

Dari persamaan ini dapat dihitung nilai α dan i_0 yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4. 1.

Tabel 4. 1. Tabel. Nilai α dan i_0 MEA PEMFC dengan berbagai variasi GDL

Jenis GDL MEA	α	i_0
GDL+PTFE	0,099675	1,81
GDL+Nafion	0,271755	1,16

Exchange current density constant berhubungan dengan aktivitas katalitik material katalis yang digunakan, meliputi suhu, tekanan, dispersi atau luas permukaan katalis, serta jenis katalis sendiri[12]. Pada pembahasan ini suhu operasi, tekanan, serta jenis katalis yang digunakan sama sehingga secara keseluruhan yang berpengaruh terhadap i_0 adalah luas permukaan katalis.

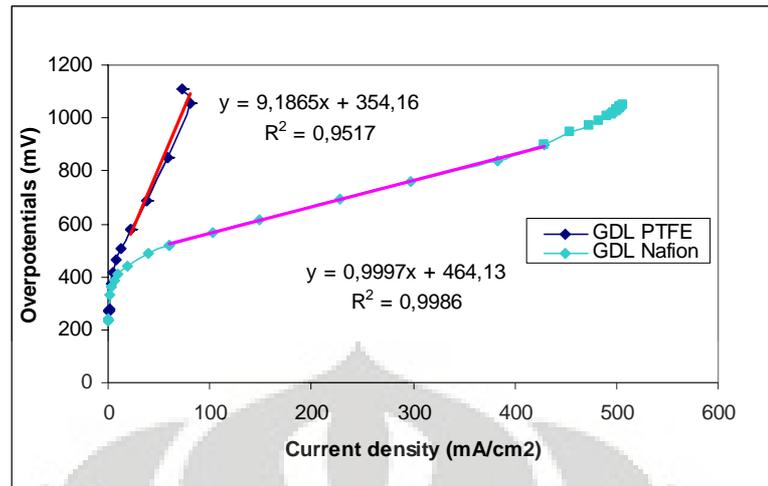
Nilai i_0 berkisar dari 0,001 mA/cm² untuk nilai yang rendah sampai 100 mA/cm² untuk nilai yang tinggi. Dari Tabel 4. 1 diketahui bahwa nilai *exchange current density constant* untuk GDL Nafion dan PTFE hampir sama sehingga dapat disimpulkan bahwa luas permukaan katalis keduanya setara.

Charge transfer coefficient dipengaruhi oleh sifat bahan. Nilai α menunjukkan besarnya proporsi energi listrik yang timbul saat perubahan laju reaksi. α berkisar 0,1 sampai 0,5. Makin besar nilainya, maka makin besar energi listrik yang dihasilkan dengan berubahnya laju reaksi. Dengan kisaran ini, maka perbedaan α untuk GDL nafion dengan PTFE tergolong besar. Nilai α lebih besar dimiliki oleh GDL terlapis nafion. Hal ini karena nafion memang mempunyai karakteristik transfer proton yang baik sehingga katalis yang menempel di permukaannya menjadi aktif sehingga energi listrik yang diperlukan untuk memulai reaksi elektrokimia lebih cepat tersalurkan dan reaksi dapat dimulai lebih cepat. Nafion juga membantu pembentukan ikatan silang (*cross link*) antara GDL dengan membran sehingga pertemuan atau *interface* yang terbentuk antara membran dengan GDL menjadi makin baik.

Analisa kedua berdasarkan *ohmic losses*. *Ohmic losses* terjadi karena adanya hambatan terhadap aliran elektron ke bipolar plate [rayment]. Plotnya berupa garis lurus sederhana dengan persamaan $V = ir$. Dimana V adalah *overpotentials*, i adalah *current density*, serta r adalah *area specific resistance*.

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 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 variasi GDL, *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 GDL serta *interface*-nya dengan lapisan katalis.

Plot polarisasi ohmik dari kedua jenis GDL ditunjukkan pada Gambar 4. 8.



Gambar 4. 8. Polarisasi ohmik untuk kedua jenis GDL PEMFC

Dari Gambar 4. 8 diperoleh *area specific resistance* untuk GDL berlapis PTFE serta GDL dengan nafion masing-masing adalah $9,2 \Omega\text{cm}^2$ dan $1,0 \Omega\text{cm}^2$. Jika diubah ke dalam resistensi spesifik per satuan luas \hat{r} , masing-masing menjadi $367,5 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ dan $40,0 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$.

Resistensi GDL dengan PTFE hampir sepuluh kali lebih besar daripada GDL dengan nafion. Hal ini berhubungan dengan struktur katalis yang terdeposisi pada dua permukaan yang berbeda. Impregnasi nafion masih memberikan ruang bagi katalis untuk bertemu dengan GDL sebagai pembawa elektron. Sedangkan PTFE menutupi permukaan sehingga transfer elektron sangat buruk dan resistensi makin besar.

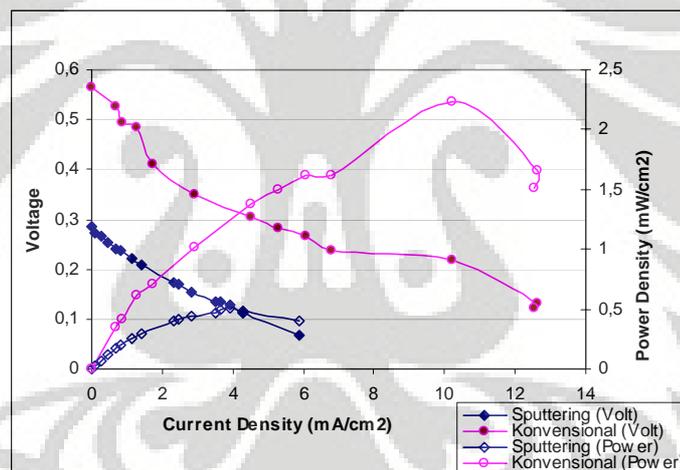
Polarisasi konsentrasi atau *mass transport losses* tidak dibahas disini karena berhubungan dengan kondisi operasi sel yaitu tekanan dan konsentrasi reaktan. Dalam penelitian ini tidak ada variasi kondisi operasi sehingga *mass transport losses* untuk semua jenis MEA diasumsikan sama. Selain itu dalam analisa polarisasi konsentrasi kita harus mengabaikan polarisasi aktivasi dan ohmik, yaitu dengan cara menyeragamkan semua perangkat *fuel cell* termasuk MEA[22]. Hal ini justru berlawanan dengan penelitian yang dilakukan dimana MEA justru divariasikan. *Internal current* atau *crossover* hidrogen juga tidak dibahas karena kedua hal tersebut dipengaruhi oleh jenis membran. Dalam penelitian ini membran yang digunakan sama untuk *fuel cell* yang sama.

Secara keseluruhan diperoleh bahwa penggunaan nafion untuk impregnasi GDL menghasilkan kinerja yang lebih tinggi daripada impregnasi PTFE. Treatment dasar terhadap GDL adalah impregnasi menggunakan PTFE atau teflon agar bersifat hidrofobik sehingga air yang terbentuk dapat segera keluar dan tidak membanjiri elektroda. Tetapi pada kenyataannya PTFE sendiri mempunyai resistensi terhadap aliran elektron maupun proton, sehingga dapat mengganggu transfer ionik yang pada akhirnya menurunkan kinerja sel. Walaupun PTFE juga dapat memberikan ikatan serta menguntungkan dalam hal sifat hidrofobiknya untuk GDL, tetapi PTFE tidak menguntungkan bagi lapisan katalis[12].

4.1.3 Perbandingan dengan Metode Konvensional

4.1.3.1 Perbandingan pada DMFC

Kinerja MEA konvensional dan *sputtering* dapat dilihat pada Gambar 4. 9.



Gambar 4. 9. Pengaruh teknik *sputtering* pada kinerja DMFC

Gambar 4. 9 menunjukkan bahwa MEA konvensional memiliki kinerja yang lebih baik daripada MEA *sputtering* Ru. MEA konvensional menghasilkan densitas energi atau *power density* maksimum mencapai 2,23 mWatt/cm², sedangkan MEA *sputtering* hanya 0,51 mWatt/cm². Hal ini menunjukkan bahwa *coating* katalis Ru untuk kondisi operasi pada penelitian ini belum menghasilkan kinerja yang lebih baik daripada *coating* Ru secara konvensional.

Hal ini dapat disebabkan oleh dua hal. Yang pertama adalah sifat *alloy sputtering* yang kurang, dan yang kedua adalah *loading* Ru sendiri yang lebih kecil pada MEA *sputtering*.

Untuk sifat *alloy*, katalis PtRu diperlukan bekerja sekaligus. Katalis Pt mengoksidasi metanol yang dapat menghasilkan CO. CO terikat sangat kuat pada permukaan Pt karena sifatnya yang mempunyai afinitas tinggi. Kehadiran logam Ru berfungsi mengoksidasi CO lebih lanjut membentuk CO₂ yang dapat terlepas dari Pt dan terbuang.

Pada MEA konvensional, katalis anoda yang digunakan adalah katalis PtRu yang berupa *alloy* dengan *support* karbon, sehingga Pt dengan Ru berdampingan secara langsung. Hal ini membuat proses oksidasi CO menjadi sangat baik. Sebaliknya pada MEA *sputtering* Ru pada anoda, Ru tidak dapat membentuk *alloy* dengan Pt serta hanya lapisan atas yang menerima deposisi Ru. Akibatnya kinerja Ru kurang optimal (seperti pada perbandingan *sputtering* Ru pada membran dengan GDL). Deposisi yang hanya ada di bagian permukaan menyebabkan katalis Pt yang berada pada lapisan bawah tidak mempunyai Ru untuk membantu oksidasi CO, akibatnya pada bagian tersebut Pt mengalami *poisoning* dan hanya Pt di bagian permukaan yang mendapat deposisi Ru yang dapat terus bekerja.

Pada MEA *sputtering*, *loading* Ru pada anoda untuk ketebalan 100 nm adalah 0,1241 mg/cm², sedangkan pada MEA konvensional *loading* Ru mencapai 1,5 mg/cm². Tetapi jika diperhatikan lebih lanjut, seperti halnya dalam pembahasan pengaruh ketebalan *sputtering*, kenaikan kinerja karena naiknya *loading* tidak proporsional. Hal ini dapat dilihat melalui nilai TOF (*turn over frequency*) katalis, yaitu besarnya kinerja yang dihasilkan per satuan unit katalis. Untuk sistem ini, TOF dicari berdasarkan *power density* maksimum yang dihasilkan per satuan massa katalis. Untuk MEA *sputtering* dan konvensional masing-masing diperoleh sebesar 4,11 mWatt/mg dan 1,49 mWatt/mg.

Dari hasil tersebut diketahui bahwa kinerja yang dihasilkan untuk tiap satuan berat katalis lebih tinggi pada MEA *sputtering*. Hal ini membawa dua potensi positif dari penggunaan *sputtering*. Yang pertama kemungkinan adanya kenaikan kinerja katalis jika dilakukan deposisi dengan hingga mencapai *loading* yang setara dengan *coating* Ru konvensional. Yang kedua adalah penggunaan katalis yang lebih sedikit untuk menghasilkan kinerja yang sama. Hal ini berpotensi mengurangi biaya pembuatan MEA karena kebutuhan katalis untuk

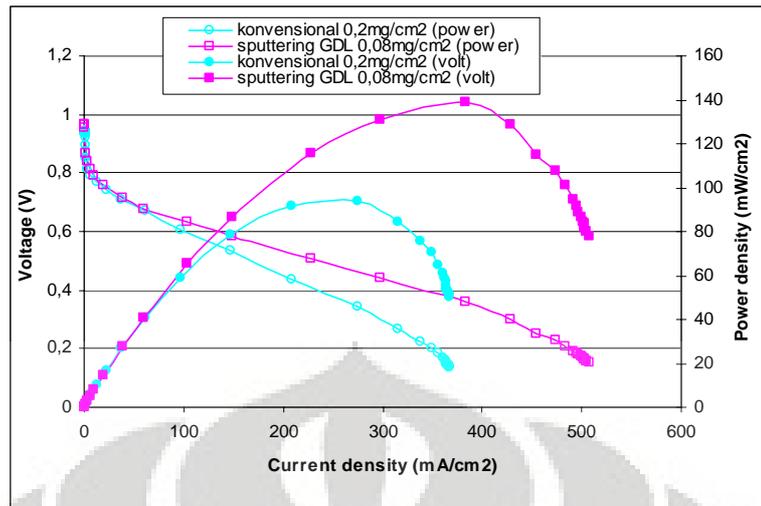
menghasilkan suatu kinerja tertentu pada MEA *sputtering* lebih rendah dari pada MEA konvensional.

Caillard[23] menyebutkan bahwa walaupun kinerja sel yang dihasilkan dari penggunaan *sputtering* tidak melebihi kinerja MEA standar, tetapi *specific power density* atau kinerja yang dihasilkan tiap satuan massa katalis menjadi lebih tinggi pada MEA *sputtering*. Walaupun *loading* katalis pada *sputtering* sepuluh kali lebih rendah dari metode konvensional, tetapi kinerja sel hanya berkurang sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat utilitas atau efisiensi penggunaan katalis pada MEA *sputtering* lebih tinggi daripada MEA standar.

Sebenarnya potensi pengurangan biaya fabrikasi ini dapat lebih dirasakan jika *sputtering* yang dilakukan adalah deposisi Pt dan Ru secara bersamaan menggunakan alat *sputtering* yang mempunyai dua *target* dalam satu *chamber*. Alternatif lainnya adalah dengan mengganti *target*-nya berupa logam paduan Pt dengan Ru, sehingga deposisi logam benar-benar murni menggunakan *sputtering* dan penekanan biaya menjadi makin optimal. Penelitian ini hanya sebatas pada *sputtering* Ru. *Sputtering* Pt dan Ru secara bersamaan terhambat oleh peralatan *sputtering* sendiri, serta tidak adanya *target* logam paduan Pt dengan Ru. Untuk itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai deposisi katalis Pt atau Pt dan Ru secara bersamaan untuk menggantikan *coating* Pt secara konvensional.

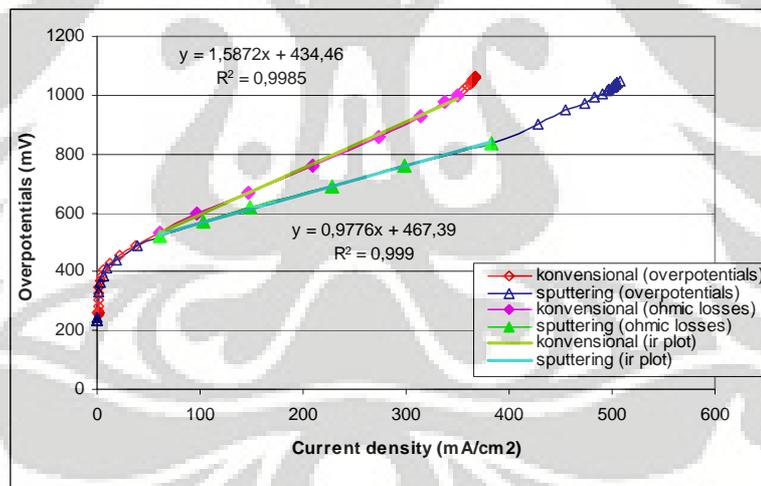
4.1.3.2 Perbandingan pada PEMFC

Pada PEMFC, perbandingan kinerja MEA konvensional dengan MEA *sputtering* ke GDL ditunjukkan pada Gambar 4. 10. Dari kurva ini diperoleh bahwa teknik *sputtering* pada PEMFC memberikan kinerja yang lebih baik daripada teknik konvensional. MEA *sputtering* dengan *loading* 0,08 mg/cm² dapat menghasilkan *power density* maksimum hingga 138,6 mW/cm². Sedangkan MEA konvensional dengan *loading* hampir tiga kali MEA *sputtering* hanya menghasilkan *power density* maksimum 93,7 mW/cm² atau 2/3 kinerja maksimum MEA *sputtering*.



Gambar 4. 10. Pengaruh teknik *sputtering* pada kinerja PEMFC

Aktivasi kedua MEA *sputtering* ke GDL dan MEA konvensional menghasilkan kurva yang berimpit. Perbedaan besar terlihat pada daerah *ohmic losses*. *Slope ir* MEA konvensional lebih besar daripada MEA *sputtering*, seperti terlihat pada kurva *ir* dalam Gambar 4. 11.



Gambar 4. 11. Polarisasi ohmik untuk MEA konvensional dan *sputtering*

Dari perhitungan diperoleh resistensi spesifik \hat{r} MEA konvensional sebesar $63,5 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$, hampir dua kali MEA *sputtering* yang hanya $39,1 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$.

Rendahnya resistensi MEA *sputtering* disebabkan oleh tipisnya lapisan katalis yang terbentuk pada GDL. Pada fabrikasi MEA konvensional, tinta katalis yang digunakan cukup kental sehingga saat dikuaskan ke GDL membentuk suatu lapisan yang cukup tebal. Lapisan ini diset ketinggiannya sebesar 10 mil ($254\mu\text{m}$)

menggunakan *doctor blade*. Dengan ketebalan *carbon paper* yang digunakan 170 μm , maka tebal lapisan katalis yang diperoleh adalah sekitar 84 μm . Sebaliknya pada MEA *sputtering*, lapisan *nafion carbon ink* (NCI) yang dikuaskan sangat encer dan tidak membentuk lapisan yang tebal. Hal ini dapat diamati secara visual saat penguasan NCI. Deposisi katalis sendiri dapat diabaikan ketebalannya karena hanya sebesar 0,4 μm (0,04 μm) untuk *loading* 0,08 mg/cm^2 . Dengan ketebalan lapisan katalis yang rendah, maka jarak dari katalis ke membran makin kecil sehingga dapat meningkatkan transfer proton. Jarak dari katalis ke GDL juga berkurang sehingga meningkatkan transfer elektron yang pada akhirnya mengurangi resistensi MEA.

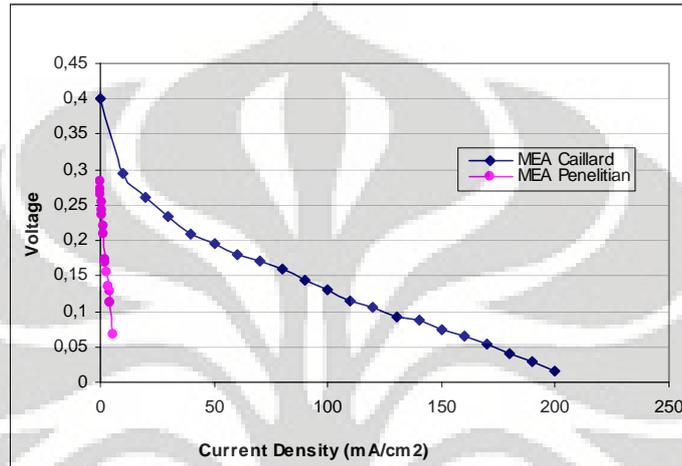
O'Hayre[21] dalam jurnalnya menyebutkan bahwa kinerja MEA *sputtering* sangat dipengaruhi oleh ketebalan lapisan katalis. Dalam kondisi tertentu MEA *sputtering* menunjukkan kinerja yang jauh lebih baik daripada MEA konvensional. Sebenarnya kurang tepat jika menyimpulkan bahwa kinerja MEA *sputtering* tetap tinggi untuk kondisi operasi yang berbeda. Harus dilakukan studi lebih lanjut pada kondisi yang berbeda terhadap kinerja MEA dengan lapisan katalis yang tipis. Kekurangan lapisan tipis adalah buruknya manajemen air yang sangat penting dalam PEMFC, karena jumlah air menentukan tingkat konduktivitas membran terhadap proton. Kelebihan lapisan katalis yang tipis adalah dari segi *mass transfer loss*.

Lister[11] dalam reviewnya menyebutkan bahwa deposisi lapisan katalis menggunakan *sputtering* telah terbukti dapat mengurangi *loading* katalis hingga yang terendah hingga 0,014 mg/cm^2 . Pendeknya jalur konduktansi dari lapisan tipis katalis *sputtering* merupakan sifat yang menguntungkan bagi media penghantar proton.

Hao Wan[24] dalam jurnalnya juga menyebutkan bahwa penggunaan *sputtering* dapat menghasilkan MEA dengan kinerja yang tinggi serta penggunaan katalis yang rendah. Wan juga menunjukkan bahwa *sputtering* dengan multi lapis dapat menghasilkan kinerja yang lebih tinggi daripada *sputtering* satu lapis dengan *loading* yang sama.

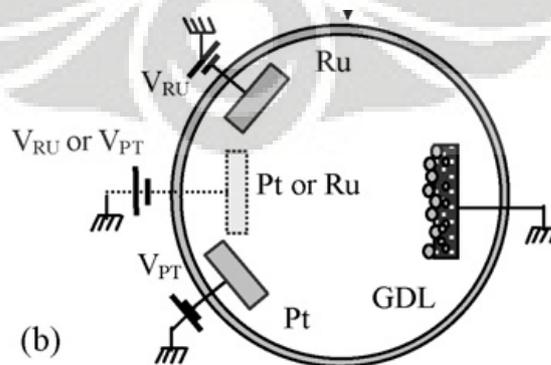
4.1.4 Perbandingan dengan Penelitian Internasional

Gambar 4. 12 menunjukkan perbandingan kinerja MEA yang dihasilkan oleh penelitian di DTK dengan penelitian yang dipublikasikan di jurnal internasional mengenai aplikasi *sputtering* untuk DMFC. Jurnal yang digunakan sebagai pembandingan adalah jurnal yang ditulis oleh Caillard[23] karena kondisinya paling mendekati kondisi penelitian di DTK.



Gambar 4. 12. Perbandingan kinerja DMFC DTK dengan jurnal internasional

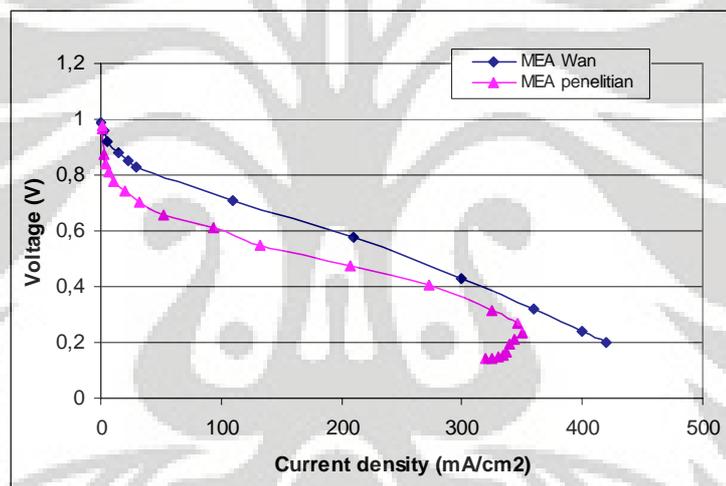
Dari hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4. 12 terlihat bahwa MEA yang dihasilkan oleh penelitian di DTK mempunyai kinerja yang jauh lebih rendah daripada MEA Caillard. Banyak faktor yang dapat menjadi penyebab rendahnya kinerja MEA DTK. Salah satu yang terpenting adalah bahwa pada penelitian di DTK, *target sputtering* hanyalah katalis Ru, sedangkan Caillard menggunakan alat *sputtering* yang mempunyai dua *target* dalam satu *chamber*, seperti diilustrasikan pada Gambar 4. 13.



Gambar 4. 13. Skema *sputtering* Caillard[23]

Dari skema pada Gambar 4. 13 terlihat bahwa deposisi pada MEA Caillard dilakukan secara bersamaan untuk katalis Pt dan Ru, sehingga dihasilkan perpaduan Pt dan Ru yang lebih baik. Sedangkan pada penelitian di DTK, pelapisan Pt dan Ru dilakukan secara terpisah, dengan Pt secara konvensional dan Ru menggunakan *sputtering*. Ini memungkinkan terdapat jarak antara katalis Pt dengan Ru sehingga kinerja keduanya menjadi berkurang, seperti dijelaskan pada pembahasan mengenai perbandingan MEA konvensional dengan MEA *sputtering*.

Perbandingan kinerja yang MEA dihasilkan oleh penelitian di P3TK dengan penelitian yang dipublikasikan di jurnal internasional mengenai aplikasi *sputtering* untuk PEMFC ditunjukkan pada Gambar 4. 14. Perbandingan yang digunakan adalah jurnal Wan[24] dengan *loading* katalis yang sama, sekitar 0,1 mg/cm².



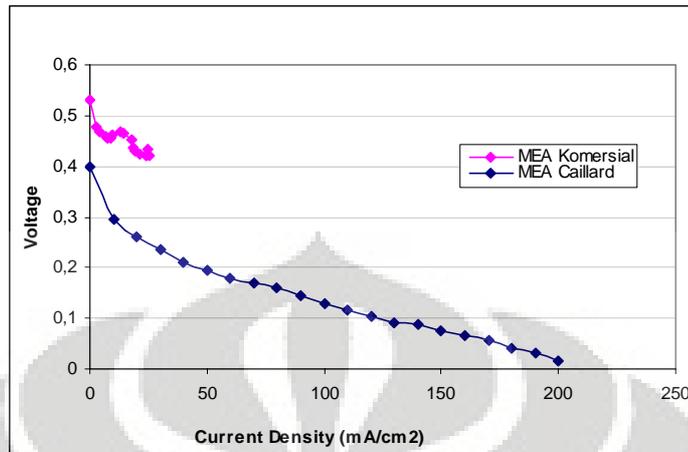
Gambar 4. 14. Perbandingan kinerja PEMFC P3TK dengan jurnal internasional

Dari kurva pada Gambar 4. 14 diketahui bahwa kinerja yang dihasilkan oleh MEA penelitian P3TK cukup baik jika dibandingkan dengan MEA Wan. Hal ini karena prosedur *sputtering* yang digunakan sama, yaitu *sputtering* Pt.

4.2 EVALUASI SISTEM FUEL CELL DI DTK

Dari hasil pembahasan sebelumnya diperoleh bahwa kinerja yang dihasilkan oleh sistem *fuel cell* di DTK dengan MEA yang difabrikasi sendiri masih rendah. Karena itu dilakukan pengujian menggunakan MEA komersial untuk mengetahui lebih jelas penyebab rendahnya kinerja *fuel cell* di DTK. Perbandingan hasil yang diperoleh untuk pengujian MEA komersial

menggunakan sistem *fuel cell* di DTK dengan hasil penelitian internasional (Caillard[23]) ditunjukkan oleh Gambar 4. 15.



Gambar 4. 15. Perbandingan kinerja MEA Caillard dengan MEA komersial

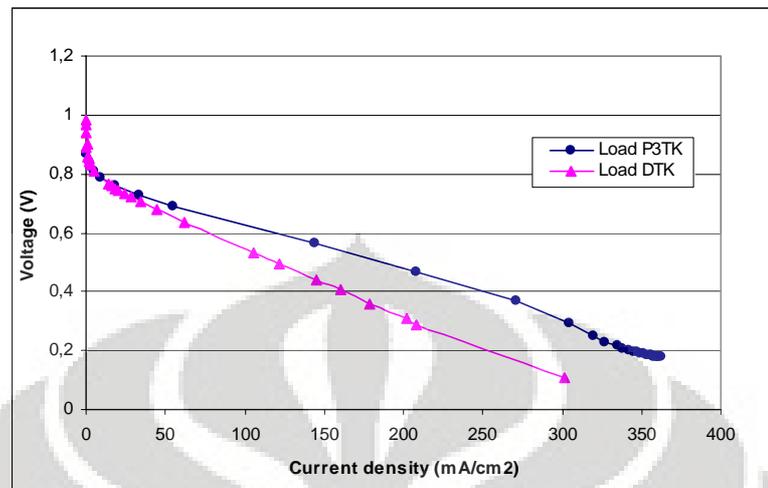
Pada Gambar 4. 15 terlihat bahwa aktivasi MEA komersial lebih baik daripada MEA Caillard, tetapi arusnya tidak dapat bertambah di daerah polarisasi ohmik. Ini menunjukkan bahwa kualitas fabrikasi MEA bukan merupakan satu-satunya penyebab turunnya kinerja *fuel cell* di DTK. Karena itu perlu dilakukan evaluasi terhadap sistem *fuel cell* yang ada di DTK.

Evaluasi terhadap sistem *fuel cell* yang ada di DTK dilakukan melalui tiga tahap, yaitu evaluasi instrumen pengukur atau *DC Electronic Load*, kemudian evaluasi *cell stack*, dan yang terakhir adalah evaluasi sistem pengumpanan bahan bakar. Standar yang digunakan sebagai pembanding adalah sistem yang ada di P3TK karena telah menghasilkan kinerja yang cukup baik. Karena sistem P3TK adalah *fuel cell* berbahan bakar hidrogen, maka sistem *fuel cell* di DTK akan diubah menjadi sistem PEMFC untuk evaluasi.

4.2.1 Evaluasi Instrumen Pengukur

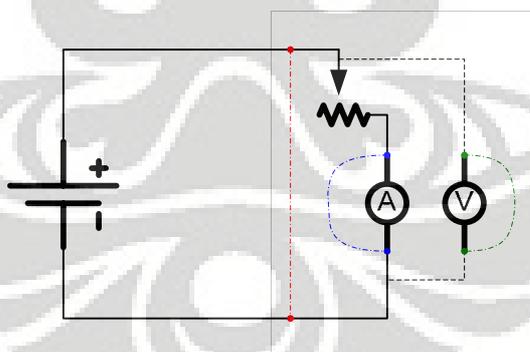
Instrumen pengukur yang dievaluasi adalah *DC Electronic Load* (DC E-Load), yaitu instrumen yang digunakan untuk membebani *fuel cell* agar diperoleh variasi arus dan tegangan. Evaluasi instrumen dilakukan dengan menggunakan sistem dan *cell stack* di P3TK. MEA yang digunakan adalah MEA konvensional terbaik. Perbandingan hasil pengukuran oleh DC E-Load milik P3TK dengan DC

E-Load milik DTK untuk *stack*, sistem, dan MEA yang sama ditunjukkan oleh kurva polarisasi pada Gambar 4. 16.



Gambar 4. 16. Perbandingan pembacaan instrumen di DTK dan di P3TK

Dari Gambar 4. 16 diperoleh bahwa pembacaan kurva oleh instrumen DTK memberikan hasil yang lebih kecil daripada pembacaan oleh instrumen P3TK. Penurunan tersebut terjadi pada daerah polarisasi ohmik. Ini menunjukkan bahwa instrumen di DTK memberikan *short circuit* yang tidak terbaca oleh pengukur ampere maupun volt. Skema rangkaian DC E-Load ditunjukkan oleh Gambar 4. 17.



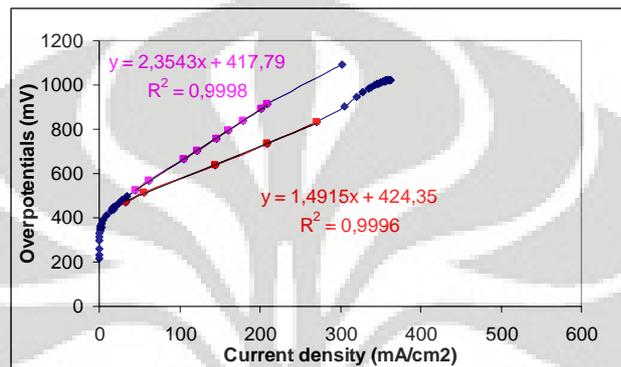
Gambar 4. 17. Rangkaian DC E-Load beserta *short circuit* yang dapat terjadi

Daerah yang diarsir menunjukkan batas dalam kotak DC E-Load. Garis hitam solid menunjukkan aliran listrik utama dari dan ke *fuel cell* sekaligus sinyal pembacaan arus. Garis hitam putus-putus menunjukkan sinyal pembacaan volt.

Short circuit yang mungkin terjadi ditunjukkan oleh garis berwarna putus-putus. Garis hijau menunjukkan *short circuit* yang menyebabkan turunnya

pembacaan di voltmeter. Garis biru menunjukkan *short circuit* yang menyebabkan turunnya pembacaan di amperemeter. Sedangkan garis merah menurunkan pembacaan keduanya.

Efek dari masing-masing *short circuit* tidak dapat diketahui. Yang dapat dianalisa adalah penurunan kinerja secara keseluruhan. Karena dampak ini terlihat pada daerah *ohmic losses* maka kita dapat membuat perbandingan menggunakan persamaan *ir* seperti ditunjukkan oleh plot pada Gambar 4. 18.

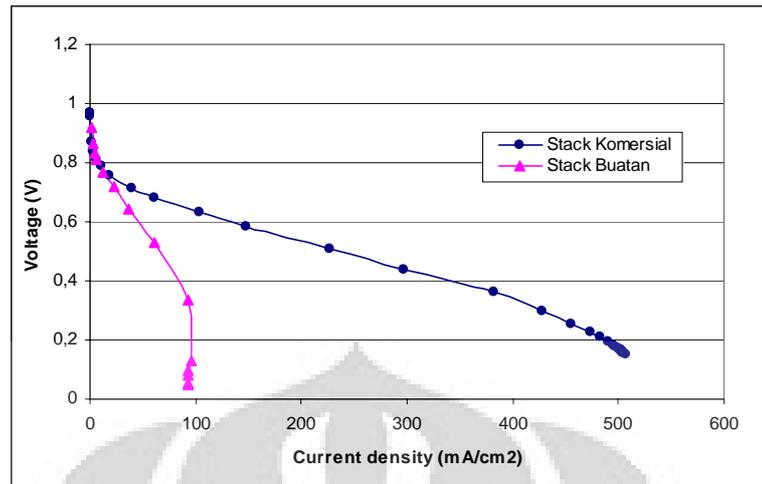


Gambar 4. 18. Polarisasi ohmik pembacaan instrumen DTK dan P3TK

Dari Gambar 4. 18 diketahui bahwa dampak *short circuit* berlaku seperti penambahan resistensi elektronik. Dari *slope* pada Gambar 4. 18 dapat dihitung hambatan untuk pembacaan DC E-Load DTK dan P3TK masing masing 470,9 mΩ dan 298,3 mΩ. Dari sini diperoleh bahwa *short circuit* menambah resistensi sebesar 172,6 mΩ. Sehingga jika kita mendapatkan pembacaan menggunakan DC E-Load DTK maka hasil sebenarnya dapat dikalibrasi dengan cara mengurangi resistensinya sebesar 172,6 mΩ.

4.2.2 Evaluasi Cell Stack

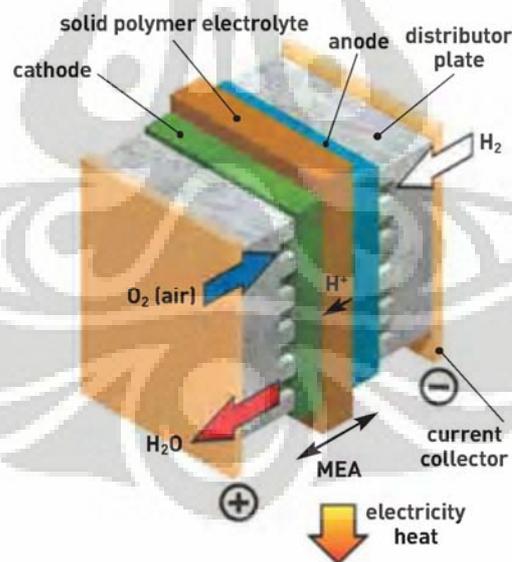
Cell stack dievaluasi dengan membandingkan kinerja *cell stack* DTK dengan *stack* komersial milik P3TK. Instrumen pengukur dan sistem yang digunakan sama yaitu di P3TK. Sedangkan MEA yang digunakan adalah MEA *sputtering* ke GDL. Perbandingan kinerja *cell stack* DTK dengan *stack* komersial ditunjukkan pada Gambar 4. 19.



Gambar 4. 19. Perbandingan kinerja *stack* DTK dan *stack* komersial

Gambar 4. 19 menunjukkan bahwa penurunan kinerja karena *cell stack* sangat besar. Penurunan kinerja mulai terlihat di daerah polarisasi aktivasi. Tetapi di daerah polarisasi ohmik penurunan kinerja justru paling besar. Ini menunjukkan bahwa resistensi sel merupakan penyebab utama turunnya kinerja.

Analisa terhadap *cell stack* harus dilakukan berdasarkan masing-masing komponennya. Struktur *cell stack* ditunjukkan pada Gambar 4. 20.



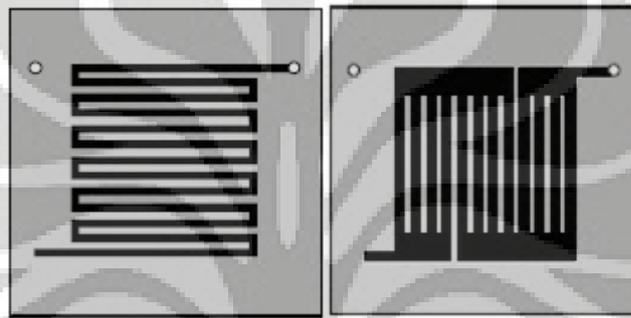
Gambar 4. 20. Struktur *cell stack*[25]

Bagian utama *cell stack* terdiri dari MEA, pelat bipolar, *current collector*, dan *seal*. MEA yang digunakan untuk perbandingan sama sehingga hanya akan di evaluasi tiga parameter terakhir.

4.2.2.1 Pelat Bipolar

Bahan yang umum digunakan sebagai pelat bipolar adalah grafit atau *stainless steel*. Pada *stack* komersial maupun *stack* DTK digunakan bahan grafit. Perbedaan pelat bipolar *stack* komersial dan DTK terletak pada geometri *flowfield* dan karakteristik grafit. Geometri *flowfield* berpengaruh terhadap aktivasi, sedangkan karakteristik grafit memberikan pengaruh terhadap resistensi sel.

Stack DTK menggunakan jenis aliran *single serpentine channel*, sedangkan *stack* komersial menggunakan jenis *parallel serpentine*. Ilustrasi kedua *flowfield* tersebut ditunjukkan pada Gambar 4. 21.



Gambar 4. 21. Geometri *flowfield* jenis *single serpentine* (kiri) dan *parallel serpentine* (kanan)

Kelebihan *single serpentine* adalah kemampuan membuang air yang lebih besar, sedangkan *parallel serpentine* mempunyai *pressure drop* yang lebih kecil sehingga supplay bahan bakar lebih baik. Distribusi bahan bakar yang lebih baik membuat aktivasi pada *stack* komersial lebih baik.

Karakteristik yang diperlukan dari grafit sebagai pelat bipolar terdiri dari konduktivitas, porositas (*gas-tightness*), kuat secara mekanis. Karakteristik ini ditentukan oleh fabrikasi blok grafitnya. Penambahan resin yang cocok sangat mempengaruhi karakteristik grafit terutama porositasnya [mennola].

Dari pengukuran didapat bahwa grafit lokal yang digunakan sebagai bahan pelat bipolar *stack* DTK mempunyai konduktivitas listrik sebesar $0,625 \times 10^5$ S/m, atau setengah grafit komersial yang berkisar 1×10^5 S/m. Rendahnya konduktivitas ini meningkatkan resistensi terhadap elektron yang mengalir sehingga menurunkan densitas energi yang dihasilkan.

Dari literatur[26] diperoleh bahwa densitas grafit standar yang digunakan untuk *stack* komersial adalah $2,0 \text{ g/cm}^3$. Sedangkan berdasarkan pengukuran langsung diperoleh densitas grafit lokal untuk *stack* DTK hanya $1,7 \text{ g/cm}^3$.

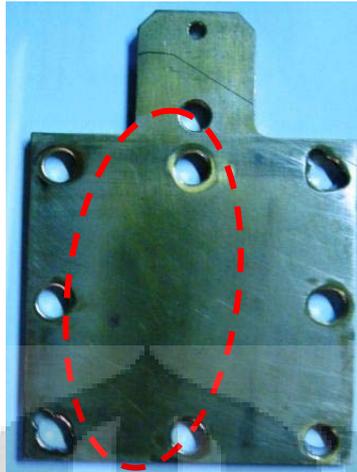
Rendahnya densitas membuat porositas grafit lokal sangat besar, yang memungkinkan terjadinya kebocoran gas yang berakibat terjadinya *short circuit* yang setara dengan *fuel crossover*. Sifat porous grafit lokal dapat ditunjukkan dengan terjadinya kebocoran gas melalui grafit. Tingginya porositas juga berkontribusi terhadap tingginya resistensi grafit.

Kekuatan mekanis grafit dapat dievaluasi dengan membandingkan tingkat kerapuhan di permukaannya. Permukaan grafit *stack* komersial cenderung licin dan tidak rontok. Sedangkan grafit lokal lebih rapuh. Ini ditunjukkan dengan adanya bekas karbon yang tercecer dari grafit lokal. Kekuatan mekanis yang rendah membuat sifat permukaan menjadi kurang baik. Ini sangat berpengaruh pada permukaan kontak antara pelat bipolar dengan *current collector*.

Dari tiga sifat di atas diperoleh bahwa grafit lokal mempunyai karakteristik yang kurang baik jika digunakan sebagai pelat bipolar *cell stack*. Untuk fabrikasi berikutnya sebaiknya digunakan grafit komersial atau *stainless steel*.

4.2.2.2 *Current Collector*

Current collector berperan mengumpulkan arus dari pelat bipolar. *Current collector* berupa pelat yang menempel pada pelat bipolar. Bahan yang umum digunakan adalah tembaga yang dengan campuran timah (kuningan). Perbedaan yang teramati pada *current collector* untuk *stack* DTK dengan *stack* komersial adalah kondisi permukaannya. *Current collector stack* komersial permukaannya sangat halus dan datar. *Current collector stack* DTK terlihat kasar. Saat diampals menggunakan kertas amplas (*silica carbida*) terlihat ada cekungan di beberapa tempat seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 22.

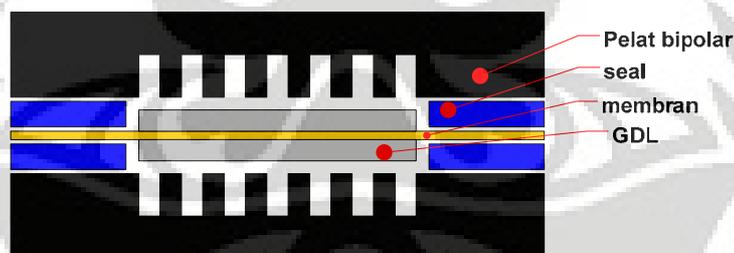


Gambar 4. 22. Cekungan pada *current collector*

Adanya kekasaran serta tidak rata permukaan mengurangi daerah kontak antara *current collector* dengan pelat bipolar sehingga memperbesar resistensi.

4.2.2.3 Seal

Seal berfungsi mencegah kebocoran gas. *Seal* biasanya terbuat dari karet silikon atau teflon agar tahan panas[6]. Pada penelitian ini *seal* yang digunakan pada *stack* komersial maupun *stack* DTK sama-sama menggunakan lembaran karet silikon. Penampang *seal* dalam *cell stack* ditunjukkan pada Gambar 4. 23.



Gambar 4. 23. Susunan *seal* dalam *cell stack*

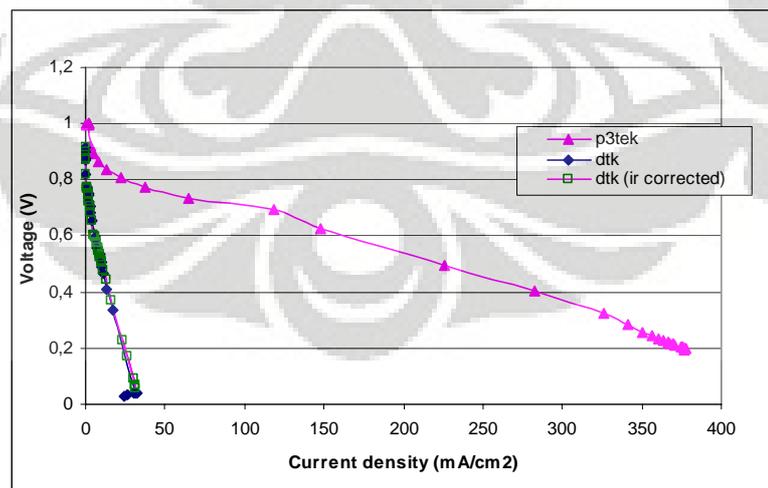
Umumnya *seal* ada dua buah, masing-masing untuk anoda dan katoda. Tebal *seal* tidak boleh lebih kecil dari tebal GDL karena *flowfield* dapat merusak MEA serta menyebabkan kebocoran gas. Tetapi *seal* tidak boleh terlalu tebal karena dapat menghambat pertemuan pelat bipolar dengan GDL. *Seal* yang terlalu tebal juga membuat MEA menjadi “tergantung” atau “mengambang” dalam *cell stack* yang akhirnya juga dapat merusak MEA. Idealnya *seal* mempunyai ketebalan sedikit lebih besar dari GDL sehingga dapat mencegah kebocoran gas.

Dan jika ditekan maka ketebalannya dapat berkurang hingga pelat bipolar dapat menyentuh GDL.

Ketebalan GDL yang digunakan pada penelitian ini adalah 170 mikron atau 0,17 mm. *Cell stack* komersial menggunakan *seal* dengan tebal 0,3 mm sehingga cukup ideal. Sedangkan *seal* untuk *stack* DTK mempunyai ketebalan 0,5 mm. Ketebalan ini sangat besar jika dibandingkan dengan tebal GDL. Dengan *seal* setebal ini maka pertemuan antara pelat bipolar dengan GDL menjadi tidak sempurna. Hal ini dapat memberikan dampak yang sangat besar karena elektron yang telah dihasilkan di GDL tidak bisa di bawa keluar.

4.2.3 Evaluasi Sistem Aliran Bahan Bakar

Sistem *feed* yang dievaluasi meliputi pengumpanan bahan bakar dan oksidan dari tabung hingga keluar. Karena DC E-Load P3TK tidak dapat digunakan untuk mengukur sistem di DTK, maka untuk membandingkan pengaruh sistem hanya *cell stack*-nya yang sama, yaitu *stack* komersial. Sedangkan DC E-Load yang digunakan berbeda. Akan ada penurunan pembacaan hasil di DTK karena perbedaan DC E-Load, tetapi dengan koreksi *ir* DC E-Load DTK maka diharapkan dapat menyamai DC E-Load P3TK. MEA yang digunakan adalah MEA komersial. Perbandingan kinerja sistem DTK dengan P3TK ditunjukkan oleh kurva polarisasi pada Gambar 4. 24.



Gambar 4. 24. Perbandingan kinerja sistem DTK dengan P3TK

Dari Gambar 4. 24 diperoleh bahwa kurva kinerja sistem DTK yang diukur menggunakan DC E-Load DTK hampir berimpit dengan kurva koreksi *ir*.

Hal ini karena penurunan kenerja sistem DTK sangat besar. Perbedaan *slope* karena DC E-Load sendiri hanya $0,8682 \Omega\text{cm}^2$, sedangkan dari perhitungan diperoleh bahwa *slope* ir pada sistem DTK mencapai $21,8 \Omega\text{cm}^2$. Karena itu koreksi *ir* tidak hampir tidak memberikan pengaruh.

Dari Gambar 4. 24 juga diperoleh bahwa kinerja sistem DTK telah mengalami penurunan sejak daerah aktivasi dan tidak mencapai daerah ohmik. Ini menunjukkan bahwa aktivasi sistem DTK sangat rendah.

Perbedaan utama sistem DTK dengan sistem P3TK adalah keberadaan *back pressure regulator*. Pada sistem DTK, gas yang keluar dari sel tidak ditahan sehingga langsung mengalir begitu saja sehingga secara keseluruhan tekanan dalam sel mendekati tekanan atmosfer atau 0 psig. Sedangkan di sistem di P3TK terdapat *back pressure regulator* yang berfungsi menahan dan mengatur tekanan gas keluaran. Tekanan sel diatur sebesar 10 psig. Adanya tekanan membuat gas dapat berdifusi ke dalam GDL serta memastikan ketersediaan bahan bakar dan oksidan. Untuk sistem dengan tekanan 0 psig, karena bahan bakar dan oksidan langsung mengalir maka dimungkinkan tidak adanya gas yang masuk ke GDL. Akibatnya reaktan yang dapat bereaksi sangat sedikit dan menurunkan kinerja. Rayment[12] menjelaskan bahwa tekanan bahan bakar dan konsentrasi gas sangat berpengaruh terhadap efisiensi *fuel cell*.

Perbedaan lain terletak pada oksidator yang digunakan. Sistem P3TK menggunakan oksigen murni sedangkan di DTK digunakan udara tekan. Penggunaan udara tekan berarti menurunkan tekanan parsial oksigen. Cooper[18] menunjukkan bahwa perbedaan kinerja yang dihasilkan dari penggunaan udara atau oksigen murni cukup besar karena berkaitan dengan tekanan parsial oksigen sendiri. Penggunaan udara sebagai oksidator dapat menurunkan kinerja *fuel cell* hingga setengah jika dibandingkan dengan penggunaan oksigen murni.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Pada *fuel cell* berbahan bakar hidrogen PEMFC, penggunaan *sputtering* untuk *coating* katalis Pt menghasilkan kinerja yang lebih tinggi daripada teknik *coating* konvensional. MEA dengan teknik *sputtering* menghasilkan *power density* maksimum 138,6 dengan *loading* katalis 0,08 mg/cm², sedangkan MEA konvensional dengan *loading* 0,2 mg/cm² hanya menghasilkan *power density* maksimum 93,7 mW/cm². Sedangkan pada *fuel cell* metanol DMFC, penggunaan *sputtering* untuk *coating* katalis Ru menghasilkan kinerja yang lebih rendah daripada teknik *coating* konvensional. MEA DMFC dengan teknik *sputtering* hanya memberikan *power density* maksimum 0,51 mW/cm², sementara MEA konvensional mencapai 2,23 mW/cm². Hal ini karena pelapisan katalis Ru pada MEA dilakukan secara terpisah dari katalis Pt sehingga keduanya tidak dapat membentuk *alloy*. Akibatnya kinerja katalis menjadi sangat rendah.

Pada teknik *sputtering*, ketebalan deposisi sangat mempengaruhi kinerja *fuel cell* karena berhubungan langsung dengan *loading* katalis. Pada ketebalan deposisi rendah, kenaikan *loading* katalis dapat meningkatkan kinerja *fuel cell*. Tetapi kenaikan kinerja *fuel cell* karena naiknya *loading* katalis tidak proporsional. Ada titik dimana penambahan *loading* katalis tidak lagi berpengaruh pada kinerja *fuel cell*, yaitu pada *loading* optimal. Penambahan *loading* di atas nilai optimal dapat menurunkan kinerja *fuel cell* karena pada lapisan katalis yang tebal katalis justru banyak yang tidak aktif. Pada PEMFC, deposisi katalis Pt dengan ketebalan 40-50 nm atau setara dengan *loading* 0,08-0,1 mg/cm² memberikan kinerja yang paling tinggi.

Kinerja MEA dengan teknik *sputtering* dipengaruhi juga oleh *substrat* deposisi. Teknik *sputtering* untuk *coating* katalis lebih efektif dilakukan ke GDL daripada ke membran. Hal ini berhubungan dengan sifat permukaan membran yang sangat halus jika dibandingkan dengan GDL. *Sputtering* ke membran menyebabkan tingginya resistensi ionik dan elektronik pada MEA. Pada PEMFC,

sputtering katalis ke GDL dengan nafion menghasilkan kinerja yang lebih tinggi daripada ke GDL dengan PTFE karena nafion mempunyai sifat yang lebih baik dalam menghantarkan proton.

Penyebab rendahnya kinerja *fuel cell* di DTK berdasarkan urutan dari yang paling besar berturut-turut adalah: sistem aliran bahan bakar, *cell stack*, dan Instrumen DC E-Load. Permasalahan pada sistem meliputi kontrol tekanan (menurunkan tekanan gas reaktan dalam *fuel cell*), kontrol aliran bahan bakar, serta penggunaan udara (menurunkan tekanan parsial oksigen). Permasalahan pada *cell stack* meliputi tingginya resistensi dan porositas *bipolar plate*, *seal* yang terlalu tebal, dan permukaan *current collector* yang kurang rata. Sedangkan permasalahan pada DC E-Load adalah pembacaannya yang lebih rendah dari nilai sebenarnya.

5.2 SARAN

Untuk penelitian selanjutnya, aplikasi *sputtering* pada DMFC sebaiknya menggunakan deposisi katalis Pt dan Ru secara bersamaan menggunakan alat *sputtering* yang mempunyai dua *target* dalam satu *chamber*, masing-masing untuk Pt dan Ru. Alternatifnya adalah menggunakan logam paduan Pt-Ru sebagai *target* tunggal.

Untuk memperbaiki kinerja *fuel cell* di DTK, yang harus di perhatikan adalah sistem aliran gas reaktan serta kualitas *cell stack*. Untuk fabrikasi selanjutnya, evaluasi sistem *fuel cell* di DTK memberikan hasil sebagai berikut:

- Perlu penambahan *back pressure regulator* untuk memberikan tekanan pada *fuel cell* serta *mass flow controller* untuk mengontrol laju aliran bahan bakar dan oksidan.
- Sebaiknya digunakan oksigen murni sebagai oksidan agar dihasilkan kinerja yang tinggi.
- *Bipolar plate* pada *cell stack* sebaiknya menggunakan bahan *sainless steel* atau grafit komersial.
- Sebaiknya digunakan *seal* dengan ketebalan yang sama dengan ketebalan GDL

- Permukaan *current collector* harus dipastikan rata. Untuk menghindari kontaminasi, permukaan *current collector* dapat di-*coating* dengan logam inert (emas)

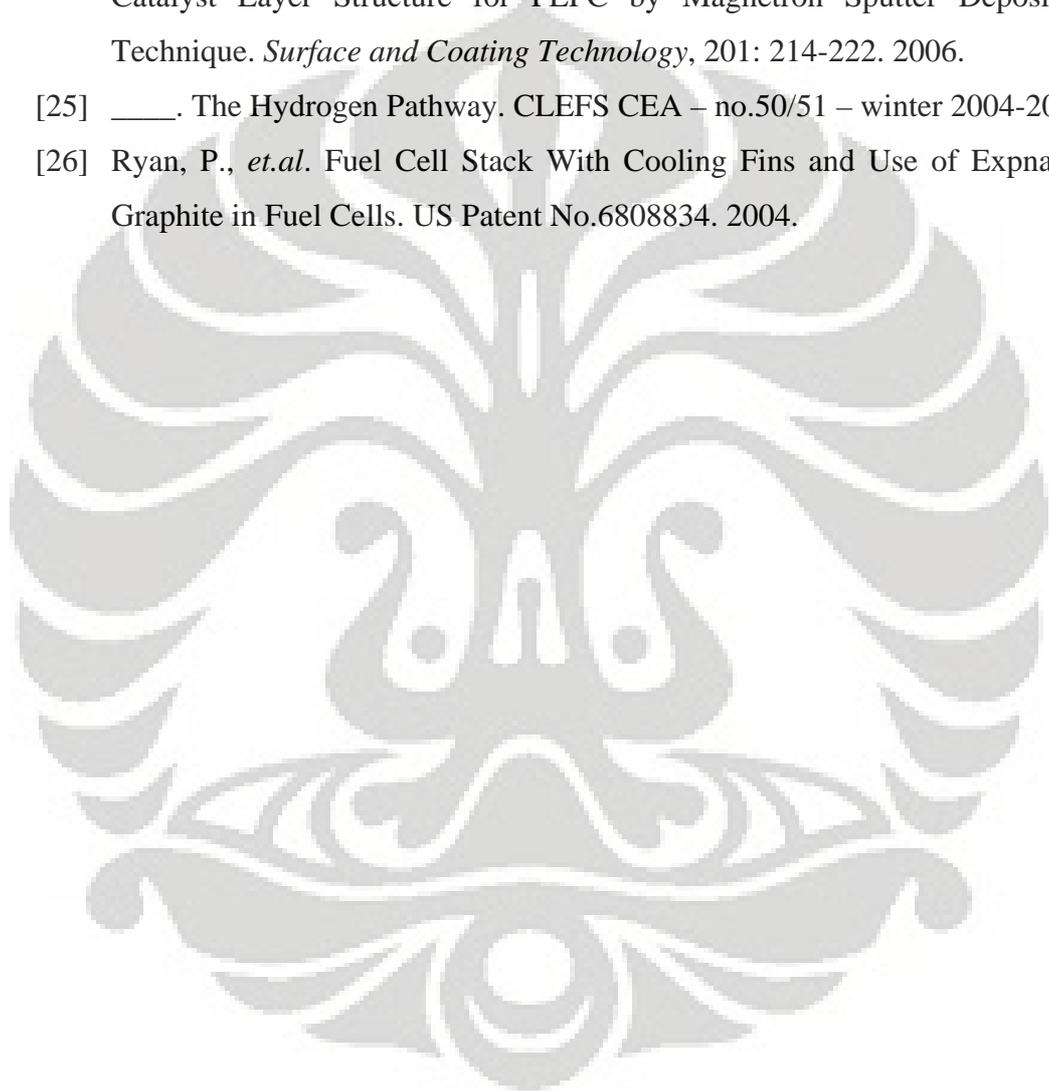


DAFTAR ACUAN

- [1] Lath, Amitabh. *Energy Consumption and Sources of Renewable Energy. Department of Physics and Astronomy Rutgers. The State University of New Jersey. 2003.*
- [2] Thomas, Sharon Et al. *Fuel Cell-Green Power. Los Alamos National Laboratory. 1999.*
- [3] Carrette, L., K. A. Friedrich, and U. Stimming. Fuel Cells – Fundamentals and Applications. *Fuel Cells*, 1: 5-39. 2001.
- [4] O'Hayre, Ryan, *et.al.* A Sharp Peak in The Performance of Sputtered Platinum Fuel Cells at Ultra Low Platinum Loading. *Journal of Power Sources*, 109: 483-493. 2002.
- [5] Cahyadi, D. *Perancangan dan Pembuatan Direct Methanol Fuel Cell (DMFC).* Skripsi. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2004.
- [6] Rifki, M. *Perancangan dan Pembuatan Direct Methanol Fuel Cell (DMFC).* Skripsi. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2004.
- [7] Utari, L. *Fabrikasi Chemical Energy Car: Analisa Aspek Dinamik Reaksi Hidrolisis Sodium Borohidrida Sebagai Penghasil Hidrogen untuk Bahan Bakar Proton Exchange Membrane Fuel Cell.* Skripsi. Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2007.
- [8] Jiabin, G. and Hongtan, L. Experimental studies of a Direct Methanol Fuel Cell. *Journal of Power Sources*, 142: 56-69. 2005.
- [9] Hyun Yang, T., *et.al.* Performance Improvement of Electrode for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 19(3): 417-420. 2002.
- [10] Easton, E.B. *Chemical Modification of Fuel Cell Catalyst and Electrochemistry of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Electrodes.* Doctoral Thesis. Department of Chemistry, Memorial University of Newfoundland. 2003.

- [11] Lister, S. and McLean, G. Review: PEM Fuel Cell Electrodes. *Journal of Power Sources*, 130: 61-76. 2004.
- [12] Rayment, C. and Sherwin, S. *Introduction to Fuel Cell Technology*. Departement of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame. USA. 2003.
- [13] Ticianelli, E.A., Derouin, C.R., and Srinivasan S. Localization of platinum in low catalyst loading electrodes to to attain high power densities in SPE fuel cells. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 251(2): 275-295. 1988.
- [14] Witham, C.K. *et. al.* Performance of Direct Methanol Fuel Cells with Sputter Deposited Anode Catalyst Layers. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 11(3): 497-500. 2000.
- [15] Choi, K.H., Kim, H.S., and Lee, T.H. Electrode fabrication for proton exchange membrane fuel cells by pulse electrodeposition. *Journal of Power Sources*, 75(2): 230-235. 1998.
- [16] Hirano S., Kim, J., and Srinivasan, S. High performance proton exchange membrane fuel cells with sputter-deposited Pt layer electrodes. *Electrochimica Acta*, 42(10): 1587-1593. 1997.
- [17] Bhushan, B., and Gupta, B.K. Coating Deposition From Vapor Phase. *Hand Book Of Tribology: Materials, Coatings, and Surface Treatments*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida. 1997.
- [18] Cooper, KR., *et.al.* *Experimental Method and Data Analyses for PEFC*. Scribner Associates, Inc. North Carolina USA. 2005.
- [19] Li Liu, *et.al.* Carbon Supported and Unsupported Pt-Ru Anodes for Liquid Feed Direct Methanol Fuel Cells. *Electrochimica Acta*, 43(24): 3657-3663. 1998.
- [20] Haug, At.T., *et.al.* Increasing Proton Exchange Membrane Fuel Cell Catalyst Effectiveness Through Sputter Deposition. *Journal of The Electrochemical Society*, 149(3): A280-A287. 2002.
- [21] O'Hayre, R., *et.al.* A Sharp Peak in The Performance of Sputtered Platinum Fuel Cells at Ultra-low Platinum Loading. *Journal of Power Sources*, 109: 483-493. 2002.

- [22] _____. *Fuel Cell Handbook* (Fifth Edition). EG&G Services, Parsons, Inc. 2000.
- [23] Caillard, A, *et.al.* Structure of Pt/C and PtRu/C Catalytic Layers Prepared by Plasma Sputtering and Electric Performance in Direct Methanol Fuel Cells (DMFC). *Journal of Power Sources* 162: 66-73. 2006.
- [24] Hao Wan, C., *et.al.* Preparation and Performance of Novel MEA with Multi Catalyst Layer Structure for PEFC by Magnetron Sputter Deposition Technique. *Surface and Coating Technology*, 201: 214-222. 2006.
- [25] _____. The Hydrogen Pathway. CLEFS CEA – no.50/51 – winter 2004-2005.
- [26] Ryan, P., *et.al.* Fuel Cell Stack With Cooling Fins and Use of Expanded Graphite in Fuel Cells. US Patent No.6808834. 2004.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Fabrikasi MEA

Kebutuhan bahan MEA konvensional

Untuk loading = 1 mg/cm^2 dan luas coating = $A \text{ cm}^2$, maka massa logam katalis Pt atau Pt-Ru:

$$m_{\text{unsupported}} = l \times A$$

Rasio *carbon*:katalis = 40:60, maka massa serbuk katalis Pt/C atau Pt-Ru/C:

$$m_{\text{supported}} = m_{\text{unsupported}} \times \left(1 + \frac{40}{60}\right)$$

Formula tinta katalis:

$$\text{katalis:nafion 5\%:air} = 1:3,5:8$$

Dengan efisiensi penguasan = η , maka kebutuhan masing-masing bahan:

$$\text{Katalis} = \frac{1 \times m_{\text{supported}}}{\eta}$$

$$\text{Nafion 5\%} = \frac{3,5 \times m_{\text{supported}}}{\eta}$$

$$\text{Air} = \frac{8 \times m_{\text{supported}}}{\eta}$$

Loading katalis berdasarkan ketebalan deposisi sputtering

Definisi *loading*: massa katalis per satuan luas: $\text{Loading} = \frac{m}{A}$

$$\text{Dimana: } m = \rho \times V = \rho \times A \times t$$

Maka diperoleh hubungan antara *loading* dan ketebalan katalis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Loading} &= \frac{\rho \times A \times t}{A} \\ &= \rho \times t \end{aligned}$$

Dengan ρ densitas katalis dan t ketebalan deposisi

Lampiran 2. Perhitungan Kurva Polarisasi

Polarisasi aktivasi

Plot polarisasi aktivasi:

$$\Delta V = A \ln i - A \ln i_0 \dots (a)$$

Dimana:

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \rightarrow \alpha = \frac{RT}{2AF} \dots (b)$$

Dengan $R = 8,314 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} / \text{mol} \cdot \text{K}$; $T = 298 \text{ K}$; $F = 96.500 \text{ C/mol}$

Persamaan umum kurva logaritma natural:

$$y = a \ln x + b \dots (c)$$

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

Dari (a), (b), dan (c) diperoleh *charge transfer coefficient* α :

$$a = A = \frac{RT}{2\alpha F}$$

$$\alpha = \frac{RT}{2aF}$$

Dari (a) dan (c) diperoleh *exchange current density constant* i_0 dalam mA/cm²:

$$b = -A \ln i_0 = -a \ln i_0$$

$$i_0 = \exp\left[-\frac{b}{a}\right] = \exp\left[\frac{b}{a}\right]$$

Pada Gambar 4. 7:

Persamaan logaritmik GDL PTFE: $y = 128,79 \ln(x) + 217,02$

Persamaan logaritmik GDL Nafion: $y = 47,238 \ln(x) + 310,5$

Hasil perhitungan:

Jenis GDL MEA	a	α	b	i_0
GDL+PTFE	128,79	0,099675	217,02	1,81
GDL+Nafion	47,238	0,271755	310,5	1,16

Polarisasi ohmik

Plot polarisasi ohmik:

$$\Delta V = ir \dots(d)$$

Persamaan umum garis lurus:

$$y = ax + b \dots(e)$$

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. 8:

Persamaan linear GDL PTFE: $y = 9,1865(x) + 354,16$

Persamaan linear GDL Nafion: $y = 0,9997(x) + 464,13$

Hasil perhitungan:

Jenis GDL MEA	r ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	A	\hat{r} ($\text{m}\Omega/\text{cm}^2$)
GDL PTFE	9,1865	5 cm^2	367,46
GDL Nafion	0,9997	5 cm^2	39,988

Pada Gambar 4. 11:

Persamaan linear GDL PTFE: $y = 1,5872(x) + 434,46$

Persamaan linear GDL Nafion: $y = 0,9776(x) + 467,39$

Hasil perhitungan:

Metode coating	r ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	A	\hat{r} ($\text{m}\Omega/\text{cm}^2$)
Konvensional	1,5872	5 cm^2	63,488
Sputtering	0,9776	5 cm^2	39,104

Lampiran 3. Data Pengujian *Fuel Cell*

Running DMFC 1

Kondisi operasi

MEA : Sputtering 40 nm
Ru on GDL
System : DTK
Stack : DTK
DC E-load : DTK
Fuel : Methanol; 3 ml/min
Oxidant : Air; 900 ml/min

Running DMFC 2

Kondisi operasi

MEA : Sputtering 100 nm
Ru on GDL
System : DTK
Stack : DTK
DC E-load : DTK
Fuel : Methanol; 3 ml/min
Oxidant : Air; 900 ml/min

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0,00	0,24	0,000
0,11	0,236	0,025
0,20	0,231	0,047
0,38	0,22	0,084
0,55	0,213	0,117
1,28	0,178	0,227
1,87	0,152	0,284
2,02	0,143	0,289
2,58	0,131	0,338
3,04	0,115	0,350
3,66	0,093	0,340
3,78	0,084	0,317
4,50	0,049	0,221

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0,00	0,284	0,000
0,11	0,273	0,029
0,25	0,265	0,067
0,46	0,254	0,117
0,69	0,242	0,168
0,84	0,236	0,198
1,13	0,221	0,251
1,43	0,209	0,298
2,31	0,173	0,399
2,46	0,169	0,416
2,82	0,155	0,437
3,49	0,135	0,471
3,66	0,134	0,490
3,93	0,129	0,507
4,29	0,113	0,484
4,29	0,113	0,485
5,89	0,067	0,395

Running DMFC 3

Kondisi operasi

MEA : Sputtering 40 nm
Ru on membrane
System : DTK
Stack : DTK
DC E-load : DTK
Fuel : Methanol; 3 ml/min
Oxidant : Air; 900 ml/min

Running DMFC 4

Kondisi operasi

MEA : Conventional
System : DTK
Stack : DTK
DC E-load : DTK
Fuel : Methanol; 3 ml/min
Oxidant : Air; 900 ml/min

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0	0,16	0
0,01	0,141	0,00141
0,026	0,115	0,00299
0,03	0,099	0,00297
0,038	0,089	0,003382
0,04	0,076	0,00304
0,05	0,036	0,0018
0,054	0,019	0,001026

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0,00	0,565	0,000
0,67	0,525	0,354
0,84	0,495	0,418
1,28	0,484	0,620
1,72	0,411	0,709
2,90	0,351	1,016
4,50	0,306	1,377
5,30	0,282	1,494
6,06	0,266	1,611
6,78	0,239	1,620
10,20	0,219	2,234
12,62	0,131	1,653
12,54	0,121	1,517

Running DMFC 5

Kondisi operasi

MEA : Commercial
System : DTK
Stack : DTK
DC E-load : DTK
Fuel : Methanol; 3 ml/min
Oxidant : Air; 900 ml/min

Running PEMFC 1

Kondisi operasi

MEA : Sputtering 20 nm
Pt on GDL Nafion
System : P3TK
Stack : P3TK
DC E-load : P3TK
Fuel : Hydrogen; 10 psig
Oxidant : Oxygen; 10 psig

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0,1	0,53	0,05
2,74	0,476	1,30
3,914	0,469	1,84
6,7	0,459	3,08
7,876	0,455	3,58
8,76	0,455	3,99
9,92	0,463	4,59
12,72	0,468	5,95
14,76	0,464	6,85
18,14	0,453	8,22
18,78	0,436	8,19
19,42	0,431	8,37
21,48	0,423	9,09
23,86	0,421	10,05
24,86	0,432	10,74
25,36	0,42	10,65

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0	0,852	0,0
2	0,813	1,6
2	0,769	1,5
2,4	0,719	1,7
4,2	0,664	2,8
6,6	0,633	4,2
10,8	0,596	6,4
18,6	0,562	10,5
35,2	0,518	18,2
59,6	0,45	26,8
73,8	0,442	32,6
131,4	0,281	36,9
164	0,208	34,1
182,8	0,17	31,1
189	0,149	28,2
192,8	0,133	25,6
190	0,11	20,9
186,6	0,101	18,8
181,6	0,093	16,9

Running PEMFC 2

Kondisi operasi

MEA : Sputtering 40 nm
Pt on GDL Nafion
System : P3TK
Stack : P3TK
DC E-load : P3TK
Fuel : Hydrogen; 10 psig
Oxidant : Oxygen; 10 psig

Running PEMFC 3

Kondisi operasi

MEA : Sputtering 60 nm
Pt on GDL Nafion
System : P3TK
Stack : P3TK
DC E-load : P3TK
Fuel : Hydrogen; 10 psig
Oxidant : Oxygen; 10 psig

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0,2	0,967	0,2
0,2	0,956	0,2
1,6	0,87	1,4
6,4	0,812	5,2
19	0,758	14,4
39,4	0,713	28,1
61	0,679	41,4
104,8	0,631	66,1
150	0,583	87,5
230,4	0,508	117,0
301,4	0,44	132,6
387,6	0,362	140,3
434	0,3	130,2
460,8	0,252	116,1
479,6	0,228	109,3
489,4	0,209	102,3
503,4	0,179	90,1
510,4	0,159	81,2

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
1,8	0,975	1,8
2,6	0,872	2,3
6,6	0,812	5,4
11	0,775	8,5
20,2	0,741	15,0
32,4	0,702	22,7
52,4	0,659	34,5
94,2	0,611	57,6
132,2	0,55	72,7
207,8	0,472	98,1
272,4	0,403	109,8
324,8	0,312	101,3
346,4	0,269	93,2
350,4	0,236	82,7
340,2	0,193	65,7
333,6	0,153	51,0
325	0,144	46,8

Running PEMFC 4

Kondisi operasi

MEA : Sputtering 40 nm
Pt on GDL PTFE
System : P3TK
Stack : P3TK
DC E-load : P3TK
Fuel : Hydrogen; 10 psig
Oxidant : Oxygen; 10 psig

Running PEMFC 5

Kondisi operasi

MEA : Sputtering 40 nm
Pt on membrane
System : P3TK
Stack : P3TK
DC E-load : P3TK
Fuel : Hydrogen; 10 psig
Oxidant : Oxygen; 10 psig

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0,59	0,926	0,55
3,36	0,828	2,78
4,74	0,785	3,72
8,10	0,738	5,98
13,04	0,693	9,03
22,32	0,624	13,93
37,73	0,51	19,24
59,06	0,352	20,79
80,00	0,146	11,68
73,48	0,093	6,83
71,31	0,06	4,28
69,93	0,04	2,80
66,96	0,035	2,34
65,38	0,034	2,22

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0,20	0,79	0,156
0,59	0,784	0,465
1,19	0,732	0,868
1,38	0,692	0,957
1,78	0,631	1,122
2,37	0,543	1,287
3,95	0,413	1,632
6,12	0,157	0,961
6,52	0,038	0,248
6,32	0,011	0,070

Running PEMFC 6

Kondisi operasi

MEA : Conventional
System : DTK
Stack : DTK
DC E-load : DTK
Fuel : Hydrogen; 10 psig
Oxidant : Oxygen; 10 psig

Running PEMFC 7

Kondisi operasi

MEA : Commercial
System : DTK
Stack : DTK
DC E-load : DTK
Fuel : Hydrogen; 10 psig
Oxidant : Oxygen; 10 psig

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0,59	0,939	0,56
1,38	0,938	1,30
1,58	0,872	1,38
2,57	0,833	2,14
6,91	0,792	5,48
13,23	0,77	10,19
22,32	0,742	16,56
37,93	0,71	26,93
61,04	0,669	40,83
97,19	0,604	58,70
147,16	0,532	78,29
209,38	0,439	91,92
274,17	0,342	93,77
314,67	0,269	84,65
338,17	0,224	75,75
349,63	0,202	70,63
360,10	0,17	61,22
367,60	0,137	50,36

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0,40	0,997	0,39
3,36	0,922	3,10
4,74	0,895	4,24
7,90	0,864	6,83
12,84	0,835	10,72
22,12	0,806	17,83
37,14	0,775	28,78
65,19	0,734	47,85
118,12	0,691	81,62
147,36	0,623	91,80
226,17	0,493	111,50
282,86	0,402	113,71
326,32	0,322	105,08
341,33	0,283	96,60
350,22	0,256	89,66
360,49	0,233	84,00
368,00	0,217	79,86
376,30	0,196	73,75

Running System 1

Kondisi operasi

MEA : Conventional
System : P3TK
Stack : P3TK
DC E-load : DTK
Fuel : Hydrogen; 10 psig
Oxidant : Oxygen; 10 psig

Running System 2

Kondisi operasi

MEA : Sputtering 40 nm
Pt on GDL Nafion
System : P3TK
Stack : DTK
DC E-load : P3TK
Fuel : Hydrogen; 10 psig
Oxidant : Oxygen; 10 psig

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0,10	0,982	0,10
0,40	0,938	0,37
0,40	0,888	0,35
1,78	0,851	1,51
4,94	0,809	4,00
14,62	0,766	11,20
20,54	0,744	15,28
28,44	0,721	20,51
34,77	0,704	24,47
44,44	0,677	30,09
62,22	0,634	39,45
105,88	0,534	56,54
122,07	0,495	60,43
145,38	0,442	64,26
160,40	0,406	65,12
179,16	0,361	64,68
202,07	0,307	62,04
208,40	0,288	60,02
301,63	0,107	32,27

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0,79	0,917	0,722
2,36	0,866	2,045
3,94	0,835	3,287
6,30	0,81	5,102
12,20	0,77	9,397
22,44	0,719	16,133
36,81	0,642	23,630
61,41	0,532	32,671
92,71	0,334	30,964
95,66	0,128	12,244
93,30	0,05	4,665

Running System 3

Kondisi operasi

MEA : Commercial
System : DTK
Stack : P3TK
DC E-load : DTK
Fuel : Hydrogen; 0 psig
Oxidant : Oxygen; 0 psig

Data kinerja fuel cell

Current density mA/cm ²	Voltage V	Power density mW/cm ²
0	0,916	0,000
0,4	0,82	0,328
1	0,776	0,776
1,8	0,752	1,354
2,8	0,705	1,974
3,8	0,655	2,489
6	0,587	3,522
7	0,559	3,913
7,8	0,546	4,259
9,4	0,52	4,888
10,4	0,489	5,086
11,6	0,469	5,440
13,2	0,412	5,438
16,8	0,338	5,678
31,4	0,042	1,319
32	0,042	1,344
30,4	0,04	1,216
26,6	0,035	0,931
23,8	0,031	0,738

Lampiran 4. Gambar Peralatan Utama

Peralatan Fabrikasi

Kiri atas: Sputtering Apparatus

Kanan atas: Hot Press



Peralatan Uji Kinerja Fuel Cell

Kiri atas: cell stack

Kanan atas: DC Electronic Load

Bawah: alat uji DMFC

