



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENINGKATAN KUALITAS MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY
UNTUK PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL DENGAN
PEMANFAATAN TEFLON DAN CARBON NANOTUBES PADA LAPISAN
MICROPOROUS**

TESIS

BONO PRANOTO
NPM 0906578863

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENINGKATAN KUALITAS MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY
UNTUK PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL DENGAN
PEMANFAATAN TEFLON DAN CARBON NANOTUBES PADA LAPISAN
MICROPOROUS**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik**

**BONO PRANOTO
NPM 0906578863**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2011**

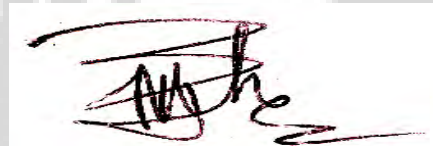
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Bono Pranoto

NPM : 0906578863

Tanda Tangan :

A rectangular box containing a handwritten signature in black ink, which appears to be 'Bono Pranoto'.

Tanggal : 11 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Bono Pranoto

NPM : 0906578863

Program Studi : Teknik Kimia

Judul Tesis : Peningkatan Kualitas Membrane Electrode Assembly Untuk Proton Exchange Membrane Fuel Cell Dengan Pemanfaatan Teflon Dan Carbon Nanotubes Pada Lapisan Microporous

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I	: Prof. Dr. Ir. Widodo W Purwanto DEA	(.....)
Pembimbing II	: Dr. Verina J Wargadalam	(.....)
Penguji	: Prof.Dr.Ir.Slamet,MT	(.....)
Penguji	: Ir.Mahmud Sudibandriyo,M.Sc.,PhD	(.....)
Penguji	: Dr.rer.nat.Ir.Yuswan Muharam, MT	(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juni 2011

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas limpahan rahmat dan petunjuk-Nya sehingga tesis ini dapat selesai dengan baik dan tepat waktu. Penulisan tesis dengan judul **“Peningkatan Kualitas Membrane Electrode Assembly Untuk Proton Exchange Membrane Fuel Cell Dengan Pemanfaatan Teflon Dan Carbon Nanotubes Pada Lapisan Microporous”** dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Program Studi Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI; juga selaku pembimbing I yang telah banyak membimbing, mengarahkan dan mensupport penulis dalam menyusun tesis ini;
2. Ibu Dr. Verina J Wargadalam selaku pembimbing II yang juga telah membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyusun tesis ini;
3. Bapak Mahmud Sudibandriyo, PhD selaku pembimbing akademis;
4. Sahabat seperjuangan penulis di S2 Teknik Kimia UI angkatan 2008 & 2009 (Mas Joddy, Mba Ani, Mas Ari, Mas Dharma, Mas Agus, Mas Agung, Mas Wasis, Mas Setyo, Mas Yuslan, Mas Bona, Mas Ibad, Mba Fais, Mba Rini, Mba Echa, Mas Bowo, Mas Irsham, Mas Denny, Mba Aida, dan teman-teman lainnya) serta Seluruh staf Departemen Teknik Kimia.
5. Seluruh Rekan Kerja Kelompok Penelitian EBT di P3TKEBTKE KESDM
6. Istriku Desy Anis Solehah dan Anakku tersayang Dias Nabila Zahir yang telah memberikan cinta dan semangat kepada penulis.
7. Seluruh pihak yang secara langsung maupun tidak langsung turut berkontribusi dalam penyusunan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam tesis ini. Oleh karena itu, diharapkan kritik dan saran dari semua pihak agar dapat menyempurnakan tesis ini. Akhir kata, penulis berharap agar tesis ini dapat bermanfaat dalam rangka pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 20 Nopember 2010

Penulis

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

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

Nama : Bono Pranoto
NPM : 0906578863
Program Studi : Magister Teknik Nimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

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

**Peningkatan Kualitas Membrane Electrode Assembly Untuk Proton Exchange
Membrane Fuel Cell Dengan Pemanfaatan Teflon Dan Carbon Nanotubes Pada
Lapisan Microporous**

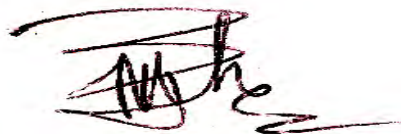
Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 11 Juni 2011

Yang menyatakan,



(Bono Pranoto)

ABSTRAK

Penelitian tentang *Fuel Cell* juga didorong oleh kemajuan dalam pembuatan nanomaterials dan aplikasinya sebagai bahan *fuel cell* dalam beberapa tahun terakhir. Pengembangan teknik fabrikasi terus ditingkatkan untuk mengatasi hambatan masalah daya tahan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada PEM Fuel Cell pada periode tertentu. Salah satu faktor yang menyebabkan menurunkan kualitas MEA adalah manajemen air yang buruk pada lapisan elektroda. Selain masalah manajemen air, kendala lain yang berhubungan dengan daya tahan *fuel cell* adalah degradasi katalis Pt berpenyangga karbon (*carbon supported Pt, Pt/C*) yang disebabkan oleh korosi karbon penyangga

Tujuan penelitian ini adalah untuk meningkatkan kinerja Membrane Electrode Assembly (MEA) dari fuel cell bertipe membran penukar proton (PEMFC) melalui dua pendekatan. Pendekatan pertama adalah perbaikan manajemen air dengan memanfaatkan teflon sebagai material hidrofobik pada MPL. Pendekatan kedua adalah penggunaan karbon nanotube sebagai lapisan *Microporous* (MPL) yang bertujuan untuk meningkatkan sifat konduktifitas dan masalah degradasi katalis Pt dari elektroda MEA.

Dari sebuah perbandingan antara pemanfaatan teflon berjenis Polytetrafluoroethylene (PTFE) dengan Fluorinated ethylene propylene (FEP) didapatkan bahwa FEP memberikan kontribusi lebih terhadap peningkatan kualitas dalam hal ketahanannya terhadap masalah air dalam elektroda sehingga mampu bertahan hingga lebih dari 40 jam operasional dibandingkan dengan PTFE.

Dalam pemanfaatan Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) dalam MPL didapatkan komposisi yang optimal yang mampu meningkatkan konduktivitas dari elektroda, pemakaian 50% MWCNT terhadap total karbon dalam MPL meningkatkan 43,7% konduktivitas dibanding jika hanya Vulcan saja. Dan pemakaian 50% Single-Walled Carbon Nanotubes (SWCNT) mampu meningkatkan 44,3% konduktifitasnya. Kualitas daya yang dihasilkan dari pemanfaatan 50%MWCNT adalah $110\text{mW}/\text{cm}^2$, sedangkan kualitas daya yang dihasilkan dari pemanfaatan 50% SWCNT adalah $134\text{mW}/\text{cm}^2$.

Kata kunci : *Microporous Layer, Carbon Nanotubes, Polytetrafluoroethylene, Fluorinated ethylene propylene*

ABSTRACT

Research on Fuel Cell is also encouraged by progress in the manufacture of nanomaterials and their application as fuel cell materials in recent years. Development of fabrication techniques continue to be improved to overcome barriers to durability problems Membrane Electrode Assembly (MEA) in PEM Fuel Cell at a certain period. One of the factors that lead to lower quality of MEA is poor water management on the electrode layer. In addition to water management problems, other constraints related to fuel cell durability is the degradation of Pt catalysts carbon supported (Pt/C) caused by corrosion.

The purpose of this research is to improve the performance of Membrane Electrode Assembly (MEA) of fuel cell proton exchange membrane type (PEMFC) through two approaches. The first approach is to improve water management by using Teflon as a hydrophobic material on the MPL. The second approach is to use carbon nanotubes as Microporous Layer (MPL) which aims to increase the conductivity properties of Pt catalyst and the problem of degradation of the MEA electrodes.

From a comparison between the utilization of Polytetrafluoroethylene (PTFE) with Fluorinated ethylene propylene (FEP) Teflon manifold was found that FEP contribute more to improving the quality in terms of durability to the problem of water in the electrodes, that can operated more than 40 hours compared with PTFE.

In the use of Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) in MPL obtained the optimal composition that is able to increase the conductivity of the electrode, the use of 50% of MWCNT from total carbon in the MPL can increase 43.7% than if only used Vulcan only. And use 50% of Single-Walled Carbon Nanotubes (SWCNT) can increase 44.3% conductivity. The quality of power generated from the utilization of 50% MWCNT is $110\text{mW}/\text{cm}^2$, while the quality of power generated from the utilization of 50% SWCNT is $134\text{mW}/\text{cm}^2$.

Keywords : *Microporous Layer, Carbon Nanotubes, Polytetrafluoroethylene, Fluorinated ethylene propylene*

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR SINGKATAN	ix
BAB 1. PENDAHULUAN	
1.1. LATAR BELAKANG	1
1.2. RUMUSAN MASALAH	3
1.3. TUJUAN PENELITIAN	3
1.4. BATASAN MASALAH	3
1.5. SISTEMATIKA PENULISAN	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. FUEL CELL	5
2.2. PROTON EXCHANGE MEMBRANE (PEMFC)	7
2.3 STRUKTUR AND REAKSI PADA PEMFC	8
2.3.1 Membran Electrolyte Assembly (MEA)	8
2.3.2.1 Proton Exchange Membrane (PEM).....	9
2.3.2.2 Lapisan Difusi Gas (GDL)	10
2.3.2.3 Lapisan Katalis.....	10
2.3.2.4 Microporous Layer (MPL).....	12
2.3.4. Plat Grafit Kolektor.....	13
2.3.5. Polarisasi PEM Fuel Cell	13
2.4. POLYTETRAFLUOROETILEN (PTFE)	16
2.5. FLUORINATED ETHYLENE PROPYLENE (FEP).....	17

2.6.	CARBON NANO TUBE (CNT)	19
2.6.1.	Deskripsi carbon nano tube	19
2.6.2.	Penggunaan CNT sebagai catalyst support pada PEMFC	22
2.7.	FABRIKASI MEA	25
2.8.	KARAKTERISASI	27
2.8.1.	Analisis kurva polarisasi	27
2.8.2.	<i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	28
2.8.3.	<i>Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive (SEM-EDX)</i>	28
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		
3.1.	RANCANGAN PENELITIAN	29
3.2.	VARIABEL PENELITIAN	30
3.3.	RINCIAN PENELITIAN	31
3.3.1.	Membuat lapisan difusi gas dan MPL	31
3.3.2.	Membuat lapisan katalis	34
3.3.3.	Pembuatan MEA	35
3.3.4.	Pengujian Polarisasi PEMFC	36
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1.	PENINGKATAN KUALITAS IKATAN ANTAR LAPISAN	38
4.1.1.	Pengujian SEM	38
4.1.2.	Uji Polarisasi	44
4.1.2.1	Uji Polarisasi MEA dengan kandungan PTFE	44
4.1.2.2	Uji Polarisasi MEA dengan kandungan FEP	48
4.2.	PENINGKATAN KUALITAS DENGAN MEMANFAATKAN CNT	55
4.2.1.	Optimalisasi kandungan MWCNT	55
4.2.2.	Pemanfaatan SWCNT	57
BAB 5 KESIMPULAN.....		
DAFTAR PUSTAKA		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. MEA yang Terkelupas (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping.	1
Gambar 2.1. Kualitas daya penelitian fuel cell tahun 2010	6
Gambar 2.2. Ilustrasi operasi PEM Fuel Cell menunjukkan pemisahan molekul hidrogen pada anoda dan proton menembus elektrolit untuk bergabung dengan oksigen di katoda membentuk air.	8
Gambar 2.3. Contoh struktur fluoroethylene sulfonat. Kelompok asam sulfonat berwarna merah..	9
Gambar 2.4. Struktur sel tunggal dari PEMFC	11
Gambar 2.5. Ilustrasi perjalanan air dari lapisan katalis katoda hingga Gas Channel.....	12
Gambar 2.6. Karakteristik kurva polarisasi pada PEM fuel cell	15
Gambar 2.7. Pengaruh Jenis Overpotensial terhadap kerugian tegangan	16
Gambar 2.8. Bentuk-bentuk alotrop karbon (intan, grafit, fullerene) dan CNT.....	20
Gambar 2.9. Armchair, zig-zag, dan chiral SWNT	21
Gambar 2.10 Pengaruh jumlah CNT dalam MPL pada Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC),(Li et al, 2011)	24
Gambar 2.11 Foto SEM pembentukan air dalam lapisan katalis.....	26
Gambar 2.12 Foto SEM bola air didalam lapisan MPL.....	26
Gambar 4.1. Foto SEM Kondisi GDL ketika terbentuk embun air	27
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3.2. Pembuatan Lapisan Difusi (P3TKEBT)	32
Gambar 3.3. Flow diagram GDL Treatment	33
Gambar 3.4. Alat Uji Polarisasi PEMFC (P3TKEBT)	37
Gambar 4.1. Perbandingan hasil treatment kertas karbon dengan penambahan teflon; (a) Kertas karbon tanpa teflon; (b) Kertas karbon dengan teflon jenis PTFE; (c) Kertas Karbon dengan teflon jenis FEP (sumber: (a) foto SEM perbesaran 60x sumber: www.toray.com , (b,c) foto SEM perbesaran 100x).....	39
Gambar 4.2. Kertas karbon dengan teflon (a) PTFE (b) FEP	40
Gambar 4.3. Kertas karbon dengan teflon (a) PTFE (b) FEP (foto SEM cross section perbesaran 300x).....	40
Gambar 4.4. Pelapisan MPL diatas kertas karbon berteflon; (a) PTFE; (b) FEP (foto SEM perbesaran 100x).....	41

Gambar 4.5. Pelapisan MPL diatas kertas karbon berteflon; (a) PTFE; (b) FEP (foto SEM cross section perbesaran 300x)	41
Gambar 4.6. Foto SEM EDX unsur Fluor (warna jingga) pada potongan melintang lapisan elektroda (teflon jenis FEP)	42
Gambar 4.7. Foto SEM lapisan tinta katalis perbesaran 200x	43
Gambar 4.8. Foto SEM EDX Sebaran katalis (warna biru) dan teflon (jingga) pada permukaan....	43
Gambar 4.9. Uji Polarisasi MEA dengan PTFE (PEMFC, Tekanan gas 10 psig, temp 25°C).....	44
Gambar 4.10. Over Potensial MEA dengan PTFE (PEMFC, Tekanan gas 10 psig, temp 25°C).....	45
Gambar 4.11. Kondisi Plat Grafit bagian dalam pengujian MEA dengan PTFE	46
Gambar 4.12. Kondisi MEA dengan PTFE setelah pengujian 16 jam	47
Gambar 4.13. Ilustrasi Lapisan Elektroda MEA dengan PTFE; (a) kondisi awal pengujian; (b) kondisi akhir pengujian	47
Gambar 4.14. Uji Polarisasi MEA dengan FEP (PEMFC, Tekanan gas 10 psig, temp 25°C)	48
Gambar 4.15. Overpotensial MEA dengan FEP (PEMFC, Tekanan gas 10 psig, temp 25°C)	49
Gambar 4.16. Kondisi Plat Grafit bagian dalam pengujian MEA dengan FEP	50
Gambar 4.17. Kondisi MEA dengan FEP setelah pengujian 40 jam	50
Gambar 4.18. Ilustrasi Elektroda MEA dengan FEP	51
Gambar 4.19. Hasil keluaran air hasil samping reaksi selama 8 jam; (a) MEA PTFE, (b) MEA FEP	52
Gambar 4.20. Perbandingan Polarisasi MEA terhadap penggunaan teflon dalam GDL dan MPL, 8 jam operasional (PEMFC , tekanan operasi 10 psig, suhu 25°C, Pt 0,4mg/cm ²).	53
Gambar 4.21 Perbandingan Daya MEA maksimum terhadap penggunaan Teflon dalam GDL dan MPL (PEMFC , tekanan operasi 10 psig, suhu 25°C).	54
Gambar 4.22. Polarisasi MEA dengan MWCNT pada MPL (PEMFC , tekanan operasi 10 psig, suhu 25°C).	55
Gambar 4.23. Grafik Over Potensial MEA dengan MWCNT pada MPL	56
Gambar 4.24. Perbandingan hasil pemanfaatan MWCNT pada MPL milik Li dkk (2011)	57
Gambar 4.25. Polarisasi Pemanfaatan Carbon Nanotubes pada MPL (PEMFC , tekanan operasi 10 psig, suhu 25°C).	58
Gambar 4.26. Polarisasi aktivasi pemanfaatan CNT pada MPL	59
Gambar 4.27. Overpotensial hambatan ohmic pemanfaatan CNT	60

Gambar 4.28. Densitas daya pemanfaatan CNT	61
Gambar 4.29. Pemanfaatan CNT pada MEA untuk PEMFC pada kerapatan arus 150 mA/cm^2	61



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbandingan Sifat Termal antara PTFE dan FEP.....	17
Tabel 2.2 Perbandingan Sifat Mekanik antara PTFE dan FEP.....	18
Tabel 2.3 Perbandingan Sifat Kimia antara PTFE dan FEP.....	18
Tabel 2.4 Perbandingan Sifat Elektrik antara PTFE dan FEP.....	19
Tabel 4.1. Nilai Resistance MEA dengan PTFE.....	46
Tabel 4.2. Nilai Resistance MEA dengan PTFE.....	49
Tabel 4.3. Volume keluaran air dari PEMFC.....	52
Tabel 4.4. Waktu Operasional MEA terhadap penggunaan Teflon.....	54
Tabel 4.5. Nilai <i>Resistance</i> MEA dengan MWCNT.....	56
Tabel 4.6. Nilai <i>Charge Transfer Coeficient</i> (α) pemanfaatan CNT pada MPL.....	58
Tabel 4.7. Nilai Resistance MEA dengan MWCNT.....	59

DAFTAR SINGKATAN



CNT	= <i>Carbon Nanotubes</i>
CL	= <i>Catalyst Layer</i>
ECSA	= <i>Electrochemical Active Surface Area</i>
EDL	= <i>Electrochemical Double Layer</i>
FEP	= <i>Fluorinated ethylene propylene</i>
DMFC	= <i>Direct Methanol Fuel Cell</i>
GDE	= <i>gas diffusion electrode</i>
GDL	= <i>Gas Diffusion Layer</i>
MEA	= <i>Membrane Electrode Assembly</i>
MWCNT	= <i>Multi walled carbon nanotube</i>
MPL	= <i>Microporous Layer</i>
P3TKEBT	= Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan
PEM	= <i>Polymer Electrolyte Membrane atau Proton Exchange Membrane</i>
PEMFC	= <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i>
PFSA	= <i>perfluorosulfonic acid</i>
PTFE	= <i>Polytetrafluoro Ethane atau Teflon[®]</i>
SEM	= <i>Scanning Electron Microscopy</i>
SWCNT	= <i>Single walled carbon nanotube</i>

BAB 1.

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

FUEL CELL atau dikenal sebagai Sel tunam adalah perangkat elektrokimia yang secara langsung mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Jenis reaktan yang digunakan dalam *fuel cell* adalah hidrogen atau gas kaya hidrogen pada anoda dan oksigen atau udara pada katoda. Secara umum proses *fuel cell* adalah kebalikan dari elektrolisis air sebuah proses ketika hidrogen dan oksigen digabungkan untuk membentuk air. Bahkan beberapa *fuel cell* dapat beroperasi secara terbalik sebagai elektrolisa air dan menghasilkan hidrogen untuk penyimpanan energi (EG&G, 2004)

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

Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia telah memulai riset mengenai *fuel cell* sejak 2004. Namun dalam perkembangannya sampai saat ini masih belum dihasilkan kinerja MEA yang optimal dari sistem PEMFC yang dibuat. Pada penelitian terdahulu (Wahyudi dkk, 2009) diketahui bahwa *fuel cell* yang dihasilkan masih memiliki kelemahan berupa daya perekatan yang kurang baik. Permasalahan yang terjadi pada MEA penelitian yaitu pada daya rekat antara GDL dan membrane Nafion yang kurang baik, hal ini dibuktikan setelah 8 jam beroperasi, kondisi MEA penelitian tidak lagi merekat sempurna, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar1.1. MEA yang Terkelupas (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping. (Wahyudi dkk, 2009)

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

Selain daya tahan terhadap air, kendala lain yang menghalangi komersialisasi *fuel cell* adalah degradasi katalis Pt berpenyangga karbon (carbon supported Pt, Pt/C) yang disebabkan oleh korosi karbon penyangga. Degradasi tersebut membatasi umur pemakaian *fuel cell* sehingga keekonomian *fuel cell* semakin rendah. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk membatasi degradasi karbon penyangga pada *fuel cell* adalah penggunaan *carbon nanotube* (CNT) sebagai penyangga katalis (Wang dkk, 2008). Sejak ditemukan karbon nanotube (Frackowiak dan Beguin, 2002), dengan sifat mekanik, sifat listrik dan struktur yang unik telah menarik banyak perhatian. Penelitian telah dilakukan untuk mengetahui aplikasi karbon nanotube dalam penampungan hidrogen (Fan.S, dkk, 1999), penyimpanan energi elektrokimia (Planeix, dkk, 1994), perangkat elektronik (Li.W, dkk, 2004) dan katalisis heterogen (Matsumoto.T, dkk, 2004). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa karbon nanotube dapat menjadi material pendukung yang lebih baik bagi katalis Pt pada membran penukaran proton (PEM) *Fuel cell* dibandingkan dengan karbon hitam tradisional (Li.W, dkk, 2004). Matsumoto dkk, 2004 melaporkan bahwa dengan menggunakan karbon nanotube multiwall (MWCNT) sebagai penyangga katalis dalam hidrogen / oksigen *Fuel cell*, 12 wt% Pt-terdeposisikan pada elektroda karbon nanotube memberikan 10% tegangan yang lebih tinggi dari 29 wt% Pt-yang didepositkan pada karbon hitam dan telah mengurangi penggunaan Pt hingga 60% (Kyotani, dkk, 2001). Li dkk, menunjukkan bahwa katalis Pt dilekatkan pada MWCNTs memiliki aktivitas lebih tinggi untuk *direct methanol fuel cell* (DMFC) di area kepadatan arus tinggi (yaitu sebesar 0,4 V) dibandingkan dengan karbon hitam XC72 komersial, dengan densitas arus 37% lebih tinggi di bawah kondisi pengujian yang sama (Mawhinney dkk, 2000). Selain mengatasi masalah degradasi, penggunaan CNT juga dapat menurunkan loading katalis Pt (Tang, dkk, 2007) dan meningkatkan ketahanan *fuel cell* terhadap peracunan katalis oleh CO (Tanaka, dkk, 2009). Oleh karena itu, untuk memperbesar peluang komersialisasi *fuel cell* sebagai sumber energi masa depan, suatu penelitian yang memadukan penggunaan teknik deposisi sputtering katalis Pt dan *carbon nanotube* sebagai penyangga katalis Pt perlu dilakukan.

1.2. RUMUSAN MASALAH

Salah satu penyebab rendahnya daya tahan MEA adalah ketidak-kuatan ikatan antara lapisan katalis dengan *gas diffusion layer* (GDL) ketika terbentuknya air hasil reaksi. Diperlukan perbaikan metoda fabrikasi yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas ikatan antara GDL dan lapisan katalis, perbaikan teknik pelapisan dan perubahan komposisi material.

Untuk meningkatkan kualitas MEA dalam hal sifat konduktifitas dan kekuatannya maka diperlukan perubahan komposisi material elektroda yang melibatkan penambahan karbon nanotube pada elektroda MEA.

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan kualitas MEA dari PEMFC lebih dari 50 mW/cm^2 dengan waktu operasional lebih dari 8 jam. Kualitas MEA dipengaruhi oleh metode fabrikasi, sifat fisik dan kimia dari material. Oleh karena itu dalam penelitian ini mempelajari dua pendekatan. Pendekatan pertama adalah meningkatkan kualitas dengan meningkatkan manajemen air didalam elektroda dengan memanfaatkan teflon dalam MPL. Yang kedua adalah peningkatan sifat konduktifitas MEA dengan merubah komposisi material elektroda dengan menambahkan karbon nanotube kedalamnya.

1.4. BATASAN MASALAH

Ruang lingkup dari permasalahan yang akan dibahas adalah sebagai berikut:

1. *Fuel cell* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *polymer electrolyte membrane* (PEMFC) berbahan bakar H_2 dan O_2 .
2. Pelapisan pada elektroda *membrane electrode assembly* (MEA) menggunakan metode spraying dengan kondisi variabel tetap
3. Karbon nanotube yang digunakan adalah *single wall carbon nanotube* (SWCNT)
4. Kondisi pengujian operasi *fuel cell* tidak divariasikan yaitu temperatur *fuel cell* 25°C , tekanan H_2 dan O_2 10 psia.

1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan terdiri dari:

BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi analisis pustaka tentang *fuel cell*, PEMFC, struktur PEMFC, membrane electrode assembly (MEA), karbon nanotube, dan beberapa teknik untuk pabrikan MEA.

BAB III: METODE PENELITIAN

Bab ini berisi tentang langkah kerja yang dilakukan untuk mencapai tujuan tersebut.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil dan pembahasan dari penelitian yang berupa uraian dan analisa terhadap karakterisasi katalis dalam penyelidikan terhadap variable-variabel yang mempengaruhi.

BAB V: KESIMPULAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan atas penelitian yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memaparkan teori-teori yang mendasari penelitian yang akan dilakukan. Beberapa teori yang akan diuraikan antara lain mengenai *fuel cell* secara umum, PEM *fuel cell*, struktur dan reaksi PEMFC, *membran electrode assembly* (MEA), karbon nanotube dan beberapa teknik untuk pabrikasi MEA.

2.1. *Fuel cell*

Fuel cell adalah alat yang digunakan untuk mengkonversikan energi kimia menjadi energi listrik, bahan bakar yang digunakan adalah hidrogen yang dapat berasal dari senyawa hidrokarbon seperti metanol (EG&G, 2004). Besarnya energi listrik tersebut dapat dideteksi dari besarnya potensial yang dihasilkan oleh sel. Perkiraan besar potensial sel yang mampu dihasilkan oleh *fuel cell* dapat ditinjau dari reaksi masing-masing elektrodanya.

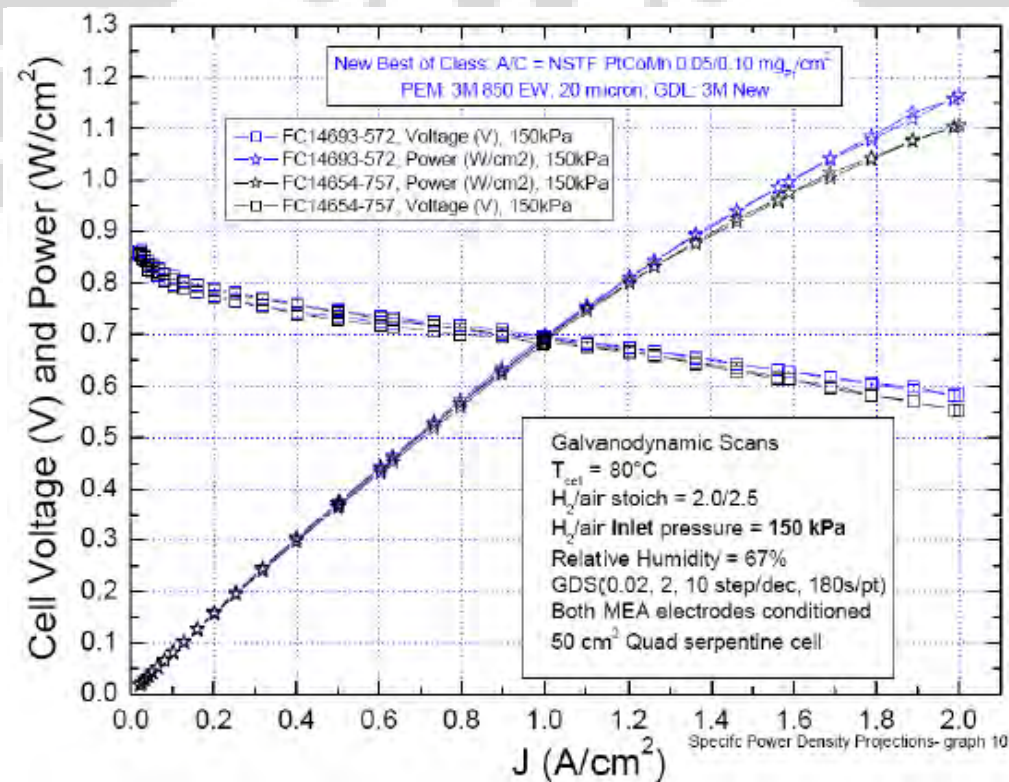
Reaksi oksidasi-reduksi terjadi secara simultan pada elektroda. Hal inilah yang menyebabkan adanya perbedaan potensial di antara kedua elektroda tersebut. Hubungan antara mekanisme reaksi setengah sel dengan potensial elektroda dapat dijelaskan dengan konsep *electrochemical double layer* (EDL) atau *charge double layer*. Jika sebuah logam dicelupkan ke dalam suatu elektrolit, maka pada selang waktu tertentu, akan terbentuk dua lapisan muatan pada antar-muka logam-elektrolit. Lapisan muatan negatif terbentuk di permukaan logam dan lapisan positif terletak dalam elektrolit sejajar dengan permukaan logam dan lapisan muatan positif terletak dalam elektrolit sejajar dengan permukaan logam. Peristiwa tersebut berlangsung terus menerus sampai terjadi kesetimbangan sehingga logam tidak mengalami ionisasi lebih lanjut. Keadaan kesetimbangan itu disebut EDL. Terdapat beberapa jenis *fuel cell*. Perbedaan utama terletak pada elektrolitnya. Jenis *fuel cell* akan dibahas pada penelitian ini adalah elektrolit bertipe membran polimer (EG&G, 2004).

Sebuah sistem *fuel cell* hanya akan menghasilkan emisi berupa uap air apabila bahan bakar yang digunakan berupa hidrogen murni. Namun, jika bahan bakar yang digunakan berupa hidrogen hasil reforming hidrokarbon, maka uji emisi harus dilakukan untuk menentukan apakah sistem tersebut masih dapat dikategorikan zero emission. Menurut standar yang dikeluarkan United Technologies Corporation (UTC) pada tahun 2002, maka sebuah sistem *fuel cell* dapat dikategorikan *zero emission* ketika mengeluarkan emisi pencemar udara yang sangat rendah, dengan kriteria sbb: $\text{NO}_x \leq 1 \text{ ppm}$, $\text{SO}_2 \leq 1 \text{ ppm}$, dan $\text{CO}_2 \leq 2 \text{ ppm}$ (UTC, 2002). Selain itu, sistem *fuel cell* juga tidak mengeluarkan suara (polusi

suara minimum), kecuali suara dari beberapa peralatan pendukung seperti pompa, kipas, kompresor, dll.

Fuel cell yang diaplikasikan pada industri otomotif memerlukan katalisator yang berupa platina untuk membantu reaksi pembangkitan listrik. Platina adalah logam yang jarang ditemui dan sangat mahal. Berdasarkan survei ahli geologi USA, total cadangan logam platina di dunia hanya sekitar 100 juta kg. Pada saat ini, diperkirakan teknologi *fuel cell* berkapasitas 50 kW memerlukan 100 gram platina sebagai katalisator. Jika penerapan teknologi *fuel cell* berjalan baik (pemakaian platina pada *fuel cell* dihemat, pertumbuhan pasar *fuel cell* rendah, dan permintaan platina rendah), maka diperkirakan logam platina akan habis sebelum tahun 2030. Oleh karena itu, penelitian untuk menemukan jenis katalis alternatif yang memiliki kemampuan mirip katalis platina sangat diperlukan.

Selama beroperasi, sistem *fuel cell* menghasilkan panas yang dapat berguna untuk mencegah pembekuan pada temperatur lingkungan normal. Tetapi, jika temperatur lingkungan terlampaui sangat dingin (-10°C hingga -20°C), maka air murni yang dihasilkan akan membeku di dalam *fuel cell* dan merusak membran *fuel cell* (Keenan, 2004). Departement of Energi (DOE) USA, pada tahun 2010 telah berhasil mengembangkan *fuel cell* dengan kualitas daya yang tinggi mencapai $1,15 \text{ W/cm}^2$ (Gambar 2.1.)



Gambar 2.1. Kualitas daya penelitian *fuel cell* tahun 2010. (Dimitrios, DOE, 2010)

2.2. Proton Exchange Membrane (PEMFC)

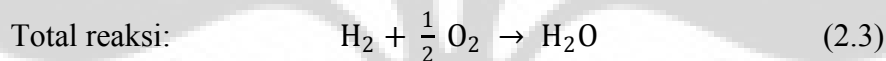
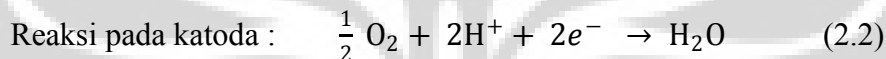
Polimer Elektrolit Membran *Fuel cell* juga dikenal sebagai Polimer Elektrolit *Fuel cell* (PEFC) atau Solid Polimer Elektrolit *Fuel cell* (SPEFC) atau Proton Exchange Membrane *Fuel cell*. Sebagaimana ditunjukkan oleh nama, Polimer Elektrolit Membran *Fuel cell* menggunakan membran polimer tipis penghantar ion sebagai elektrolit. Membran polimer padat memiliki manajemen masalah elektrolit lebih sedikit dibandingkan dengan elektrolit cair dan juga mengurangi korosi pada elektroda. Elektrolit polimer membutuhkan air untuk menjadi ion konduktif dan membatasi suhu operasi hingga 100°C. Suhu rendah memastikan operasi startup lebih cepat pada suhu lingkungan, kondisi tersebut sangat dibutuhkan untuk perangkat portabel tetapi juga memiliki beberapa kelemahan seperti masalah keracunan CO saat sisa bahan bakar digunakan dan pembuangan sisa panas. Pt katalis yang sangat mahal menjadi diperlukan adalah karena katalis non-logam mulia memiliki aktivitas rendah pada temperatur rendah. (Li.Q,dkk, 2004)

PEMFC digunakan sebagai sumber daya tambahan untuk penerbangan antariksa NASA di pesawat Gemini 1960-an (Bockris, 1969). Setelah itu perkembangan teknologi stagnan selama lebih dari sepuluh tahun. Peningkatan signifikan pertama dalam kinerja sel dicapai ketika polystyrene membran asam sulfonat yang digunakan dalam penerbangan antariksa NASA's Gemini digantikan oleh membran asam perfluorosulfonic Du Pont's Nafion® (1) dalam 1970-an (Grot.W, 1985). Memanfaatkan Nafion membran® kerapatan daya PEMFC naik sepuluh kali dan *lifetime* PEMFC meningkat dari dua ribu jam sampai seratus ribu jam (Costamagna dan Srivisian, 2001). Terobosan lain dalam teknologi itu adalah pengurangan kandungan platinum di elektroda 10 kali lipat dicapai pada akhir 1980-an dan awal tahun 1990-an. Hal ini dicapai dengan menggunakan platinum yang dilekatkan pada permukaan karbon tinggi sebagai *electrocatalyst* daripada penggunaan Pt hitam murni seperti pada *fuel cell* Gemini dan impregnasi sebuah konduktor proton (Nafion) ke dalam lapisan katalis pada elektroda difusi gas berpori (Srinivasan, 1988). Kandungan platinum pada elektroda PEMFC tersebut diturunkan di awal 1990-an dengan penemuan elektroda film lapis tipis (Wilson dan Gottesfeld, 1992).

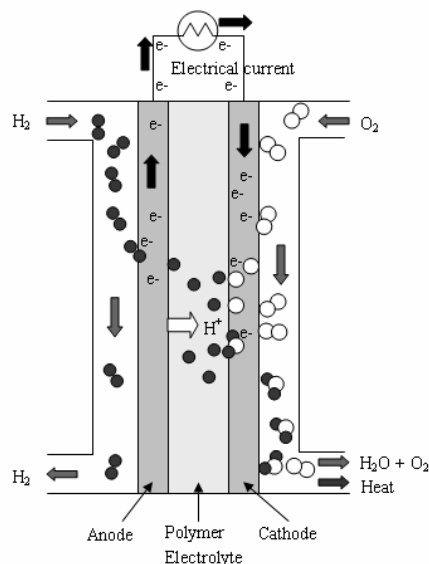
2.3 Struktur and reaksi pada PEMFC

2.3.1 Membran Electrolyte Assembly (MEA) dan Reaksi PEM Fuel cell

Struktur dasar dari MEA terdiri dari membran elektrolit padat (PEM) yang diapit dua elektroda. Anoda dan katoda dari *Fuel cell* ditentukan oleh bahan bakar atau oksidan yang diumpankan ke elektroda. Ketika hidrogen diumpankan ke anoda, molekul hidrogen akan terpisah menjadi proton dan elektron dengan bantuan katalis platinum. Proton berpindah dari anoda ke katoda melalui membran penghantar proton, sedangkan elektron mengalir melalui sirkuit eksternal menuju katoda. Pada katoda, oksigen berkurang karena bereaksi dengan proton dan elektron untuk membentuk air dan menghasilkan panas. Reaksi elektrokimia *Fuel cell* ini disajikan sebagai berikut:



Energi listrik yang diperoleh dalam operasional *Fuel cell* ditentukan oleh perubahan energi bebas Gibbs. Jika proses ini reversibel, semua perubahan energi bebas Gibbs akan dikonversi menjadi energi listrik, tetapi dalam prakteknya sebagian energi dilepaskan sebagai panas (Larminie, 2000). Ilustrasi dari proses ini ditunjukkan dalam Gambar. 2.2.

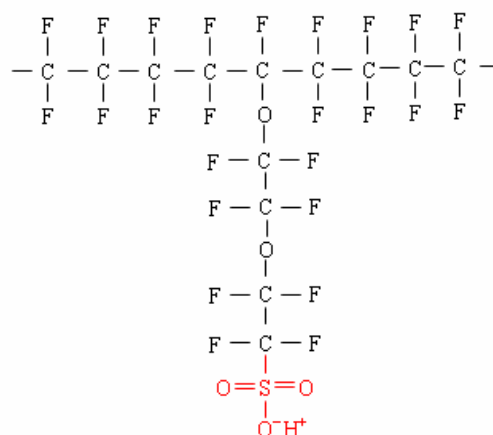


Gambar 2.2. Ilustrasi operasi PEM *Fuel cell* menunjukkan pemisahan molekul hidrogen pada anoda dan proton menembus elektrolit untuk bergabung dengan oksigen di katoda membentuk air. (EG&G, 2004)

2.3.2.1. Membran Elektrolit Polimer (PEM)

Membran elektrolit polimer memungkinkan proton mengalir dari anoda ke katoda tetapi juga memisahkan bahan bakar dan oksidan dari satu sama lain untuk menghindari pembakaran langsung. Membran ini juga merupakan insulator listrik yang memaksa elektron mengalir melalui sirkuit luar untuk menghasilkan daya listrik. Membran elektrolit biasanya mengandung polytetrafluoroethylene (PTFE) polimer *backbone* dan dengan demikian membuat membran tahan terhadap serangan kimia dan tahan lama.

Elektrolit biasanya dibuat dengan menambahkan rantai samping yang berakhir dengan asam sulfonat (HSO_3) ke polimer backbone PTFE. Kelompok sulfonat yang ditambahkan dalam bentuk ion SO_3^- dan H^+ ion yang ditahan oleh daya tarik ion yang kuat seperti ditunjukkan pada Gambar. 2.3. Asam sulfonat sangat hidrofilik (Larminie, 2000) sehingga polimer elektrolit dapat menyerap sejumlah besar air di sekitar gugus rantai samping sulfonasi. Ketika elektrolit terhidrasi dengan baik, ion H^+ relatif lemah dan tertarik pada kelompok SO_3^- dan dapat bergerak. Jadi karena elektronegativitas yang tinggi dari kelompok SO_3^- dan daya tarik melemah terhadap proton ketika elektrolit dicairkan, polimer elektrolit adalah insulator elektron yang baik dan juga sebuah konduktor proton yang baik. PTFE *backbone* dari polimer elektrolit juga menyediakan kekuatan mekanik untuknya yang akan dibuatnya menjadi selaput yang sangat tipis. Membran polimer elektrolit yang paling terkenal adalah Nafion[®] dari Dupont, yang dianggap sebagai “standar industri” sejak 1960 (Larminie, 2000).



Gambar 2.3. Contoh struktur fluoroethylene sulfonat.

Kelompok asam sulfonat berwarna merah.(Larminie, 2000)

Karena membran elektrolit polimer perlu air untuk mengalirkan proton, suhu operasi dari PEM *Fuel cell* terbatas pada suhu di bawah titik didih air. Namun, bahan penghantar proton yang berfungsi pada suhu yang lebih tinggi sedang dikembangkan. Sebagai contoh, sistem PEMFC yang menggunakan membran *phosphoric acid doped polybenzimidazole* (PBI) yang operasionalnya bisa mencapai hingga 200°C ditunjukkan oleh Li.Q, dkk, 2004.

2.3.2.2. Lapisan Difusi Gas

Lapisan difusi dibentuk oleh 2 struktur, pertama adalah struktur kertas karbon (*carbon paper*). Kertas karbon yang digunakan memiliki spesifikasi Material karbon 2050-A, dengan ketebalan 0,008 in (0,20mm), berat jenis 0,48 g/cc, *Mean Pore Diameter* 28, *Flexural Strength* 5.000 psi, *In-plane* 0,012 cm, *Through-plane* 0,07cm², *Gas Permeability* 45 cfm, *Compressive Strength* 300 psi. Struktur kedua dibentuk oleh *micro porous layer* (MPL). MPL berisikan kandungan karbon hitam dan partikel hidrofobik (PTFE).

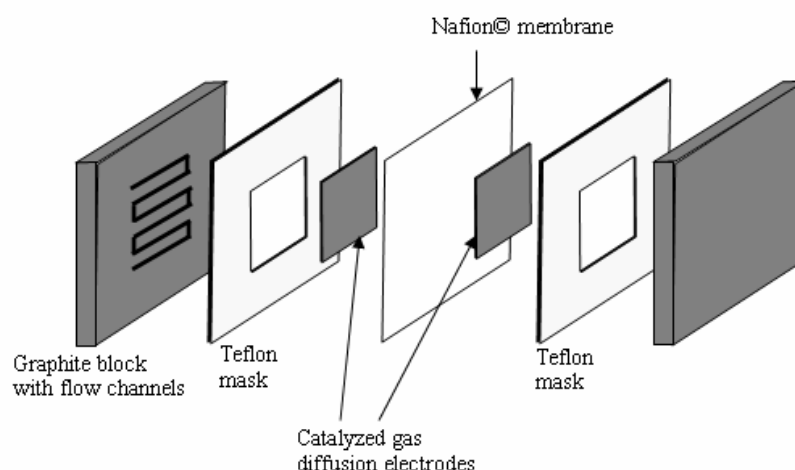
Lapisan difusi ini memiliki fungsi

- a. Membantu mendistribusikan gas reaktan atau cairan dari saluran flow-field plat bipolars menuju lapisan katalis.
- b. Membantu mengeluarkan air yang terbentuk dan terakumulasi di lapisan katalis menuju saluran flow-field.
- c. Sebagai kerangka struktur dari lapisan katalis, menghalangi kontak tekanan yang tinggi dari saluran flow-field terhadap lapisan katalis.
- d. Membantu mengantarkan aliran elektron dari plat bipolar menuju lapisan katalis dan sebaliknya.
- e. Membantu memindahkan panas yang terbentuk akibat reaksi pada lapisan katalis menuju plat bipolar untuk menjaga sel pada temperatur operasional.

2.3.2.3. Lapisan Katalis

Elektroda PEM *fuel cell* merupakan wilayah di mana terjadi semua reaksi elektrokimia. Katalis diperlukan untuk mempercepat reaksi elektrokimia. Katalis terbaik untuk reaksi oksidasi hidrogen (HOR) dan reaksi reduksi oksigen (ORR) adalah platinum. Tergantung pada jenis gasnya paduan Pt seperti katalis PtRu digunakan untuk meningkatkan resistensi terhadap efek keracunan CO. Pada penelitian awal PEM *fuel cell*, platinum hitam digunakan sebagai katalis dalam PEM *Fuel cell* mengarah ke loading Pt yang tinggi 4mg/cm². teknologi saat ini memisahkan elektroda menjadi dua lapisan yang berbeda.

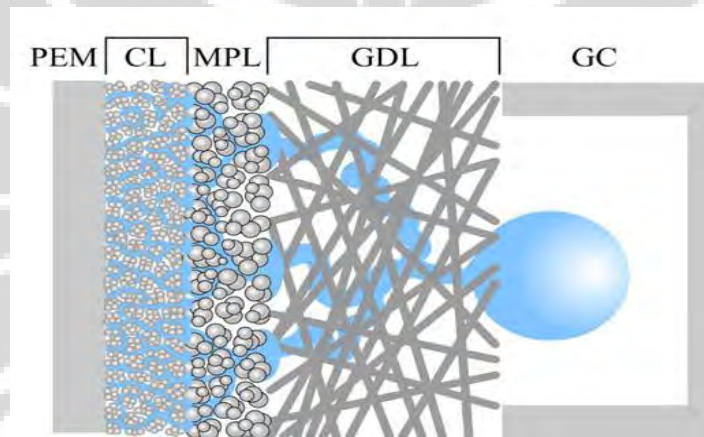
Lapisan yang lebih dekat dengan membran elektrolit disebut lapisan katalis, yang memanfaatkan nanopartikel Pt didukung pada bahan nano-karbon sehingga kandungan Pt PEM *Fuel cell* dikurangi hingga sepuluh kali atau lebih. Karbon kulit hitam seperti XC72R (Cabot Corp) secara luas digunakan sebagai penyangga katalis; karbon ini mendukung stabil Pt nanopartikel untuk mencegah aglomerasi dan menjadi konduktor elektron dengan memberikan jalur transpor elektron ke kolektor arus. Lapisan difusi biasanya terbuat dari kertas karbon atau kain karbon yang dilapisi dengan campuran karbon hitam dan PTFE. Kertas karbon atau kain karbon merupakan bahan berpori dan konduktif juga dapat memberikan kekuatan mekanik untuk elektroda untuk mencegah katalis masuk ke dalam medan aliran (saluran gas). PTFE adalah agen hidrofobik yang dapat mencegah banjir pada elektroda, terutama pada katoda dimana air dihasilkan karena reaksi. Ketebalan lapisan katalis hanya sekitar 10 μ m, ini karena pada kerapatan arus yang tinggi, sebagian besar arus cenderung dihasilkan dari daerah yang dekat dengan membran elektrolit (Bockris dan Srinivasan, 1969) sehingga semakin tebal lapisan katalis semakin rendah katalis yang dimanfaatkan. Namun lapisan tipis katalis tidak mampu mendistribusikan gas reaktan merata ke situs reaksi, sehingga dibutuhkan lapisan difusi gas takberkatalis sebagai spacer yang memungkinkan akses gas secara merata ke lapisan katalis dari saluran gas (Gregor, dkk, 2003). Gambar 2.4 menunjukkan struktur sel tunggal dari PEM *Fuel cell*. Bahan elektrolit (Ionomer Nafion) ditambahkan ke elektroda melalui impregnasi atau pencampuran dengan katalis untuk memperluas daerah kontak elektrolit dengan katalis untuk menghasilkan penggunaan yang lebih baik dari electrocatalyst (Lee, dkk, 1998).



Gambar 2.4. Struktur sel tunggal dari PEMFC (EG&G, 2004)

2.3.2.4. Microporous Layer (MPL)

Microporous layer merupakan suatu lapisan yang ditambahkan diantara lapisan *gas diffusion layer* (GDL) dan lapisan katalis (CL). *Microporous layer* ini bertujuan untuk memberikan pengaturan air yang lebih baik dalam sistem PEMFC. Air memberikan peranan yang penting dalam PEMFC. Ketika ada kelebihan air atau uap air yang terbentuk dalam katoda PEMFC, air atau uap air tersebut dalam terkondensasi menjadi air jenuh yang dapat mengisi pori-pori dalam lapisan katalis, dan gas GDL atau dapat menghalangi jalannya aliran gas di dalam *gas channel* (GC). Fenomena ini dinamakan *flooding*, yang dapat diamati baik di anoda dan katoda PEMFC.



Gambar 2.5. Ilustrasi perjalanan air dari lapisan katalis katoda hingga *gas channel*.

(Kaviany, dkk, 2009)

Berdasarkan Kaviany, dkk (2009), MPL berfungsi dalam mengurangi air yang terbentuk pada pertemuan antarmuka lapisan. Gambar 2.4 memperlihatkan bagaimana butiran air yang terbentuk menutupi interface antara lapisan katalis dan GDL. Hal ini akan menyebabkan mengurangi *surface area* untuk mass transport. Adanya butiran air tersebut akan menghalangi aliran gas menuju lapisan katalis. Oleh karena kecilnya difusivitas efektif di lapisan katalis katoda, maka akibat negatif dari butiran air ini akan berdampak signifikan pada kinerja fuel cell. Pada sistem MEA dengan MPL akan terdapat dua jenis *interface* yaitu interface antara lapisan katalis dengan MPL dan interface antara MPL dengan GDL. Dapat dilihat bahwa tetesan air lebih jarang pada pertemuan antara MPL dan GDL, hal ini kan memudahkan gas untuk melalui celah-celah yang tidak dilalui air sehingga transport massa akan lebih lancar. Air yang melalui MPL akan berkumpul dan membentuk jalan sendiri hingga GDL.

2.3.4. Plat Grafit Kolektor

Dalam sel tunggal, plat grafit kolektor menghantarkan elektron dan bertindak sebagai struktur pendukung. Plat grafit memiliki saluran aliran reaktan di satu sisi yang menyediakan jalan untuk gas reaktan untuk mencapai elektroda, menghantarkan elektron dan mengalirkan produk reaksi dari elektroda. Bahan plat kolektor harus memiliki konduktivitas yang tinggi dan kedap gas. Karena keberadaan hidrogen dan gas oksigen, bahan harus tahan korosi dan kimia *inert*. Ketika kolektor pelat dipasang pada *stack fuel cell*, saluran aliran reaktan dibuat pada kedua sisi pelat kolektor, dan disebut pelat bipolar. Kebanyakan pelat bipolar PEMFC terbuat dari grafit yang diresapi resin, tapi penggunaan stainless steel sebagai pelat bipolar juga dikembangkan (Davies,dkk, 2000)

2.3.5. Polarisasi PEM Fuel cell

Ketika arus diambil dari sel, potensi sel bahan bakar berbeda dari nilai ekuilibrium (yaitu potensi sirkuit terbuka, E_0). Hal ini disebut polarisasi sel. Tingkat polarisasi dapat didefinisikan dalam sebagai *overpotensial* (Koryta 1993), yang sama dengan perbedaan antara potensial sel E dan potensial E_r reversibel:

$$\eta = E - E_r \quad (2.4)$$

Overpotentials dari *fuel cell* berasal dari tiga sumber: overpotential aktivasi, overpotential ohmik, dan overpotential transportasi massa. Oleh karena itu, ekspresi dari tegangan dari sebuah sel tunggal adalah:

$$V = E_r + \eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{trans} \quad (2.5)$$

Dimana η_{act} adalah overpotential aktivasi, η_{ohm} adalah overpotential ohmik dan η_{trans} adalah overpotential transportasi massa.

Overpotential Aktivasi (η_{act}) muncul dari kinetika reaksi aktivasi transfer pada antarmuka elektrolit katalis. Potensial elektroda menghilang ketika mendorong terjadinya reaksi transfer elektron. Overpotential aktivasi secara langsung berkaitan dengan kinetika reaksi elektrokimia dan energi aktivasi reaksi. Persamaan Butler-Volmer secara luas digunakan untuk mengGambarkan kinetika elektroda *fuel cell* di lapisan katalis (Gregor 2003), yang mengGambarkan hubungan kerapatan arus dengan overpotensial sebagai berikut (Koryta, 1993):

$$i = i_0 \left[\exp\left(\frac{-z\alpha F\eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{z(1-\alpha)F\eta}{RT}\right) \right] \quad (2.6)$$

Dimana α adalah koefisien perpindahan, z adalah jumlah elektron yang ikut bereaksi dan i_0 adalah perubahan kerapatan arus.

Dalam *fuel cell* hidrogen-oksigen, kontribusi overpotential aktivasi anoda diabaikan, sedangkan overpotential aktivasi katoda adalah beberapa kali lipat lebih besar karena lambatnya kinetika reaksi oksidasi reduksi. Bila persamaan tersebut digunakan untuk menggambarkan overpotential besar di katoda dimana $|\eta| \gg RT/F$, Persamaan 2.4 menjadi persamaan Tafel:

$$\eta = a + b \log |i| \quad (2.7)$$

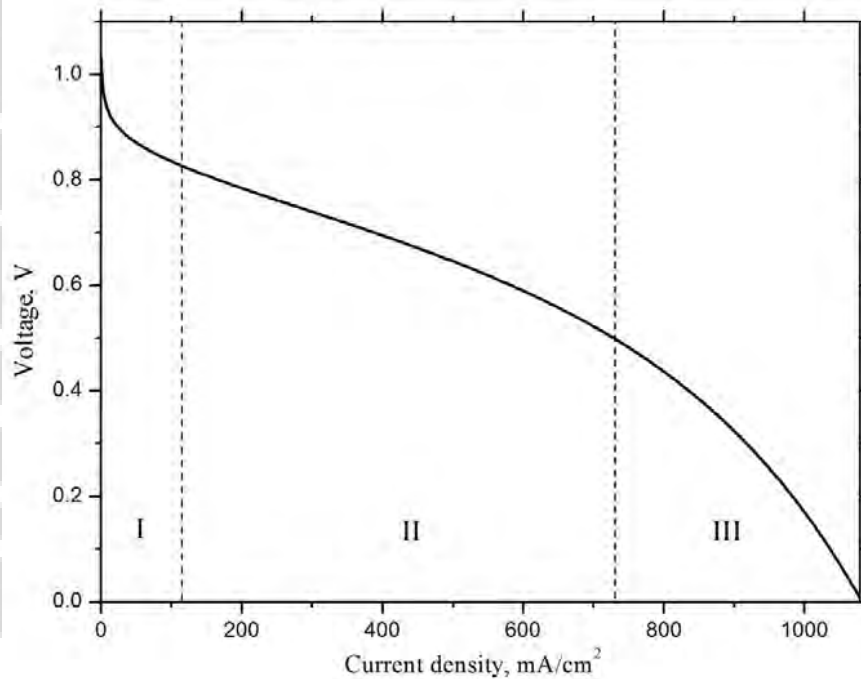
Dimana $a = \frac{2.303 RT}{\eta\alpha F} \log i_0$ dan $b = -\frac{2.303 RT}{\eta\alpha F}$

Overpotential ohmic η_{ohm} , juga dikenal sebagai IR-losses, adalah hasil dari kerugian tahanan listrik dalam sel. Resistensi ini ditemukan di hampir semua komponen *Fuel cell*: resistensi ion pada membran, resistensi ion dan elektronik di lapisan katalis, dan resistensi elektronik di lapisan difusi gas, plat kolektor arus dan terminal koneksi.

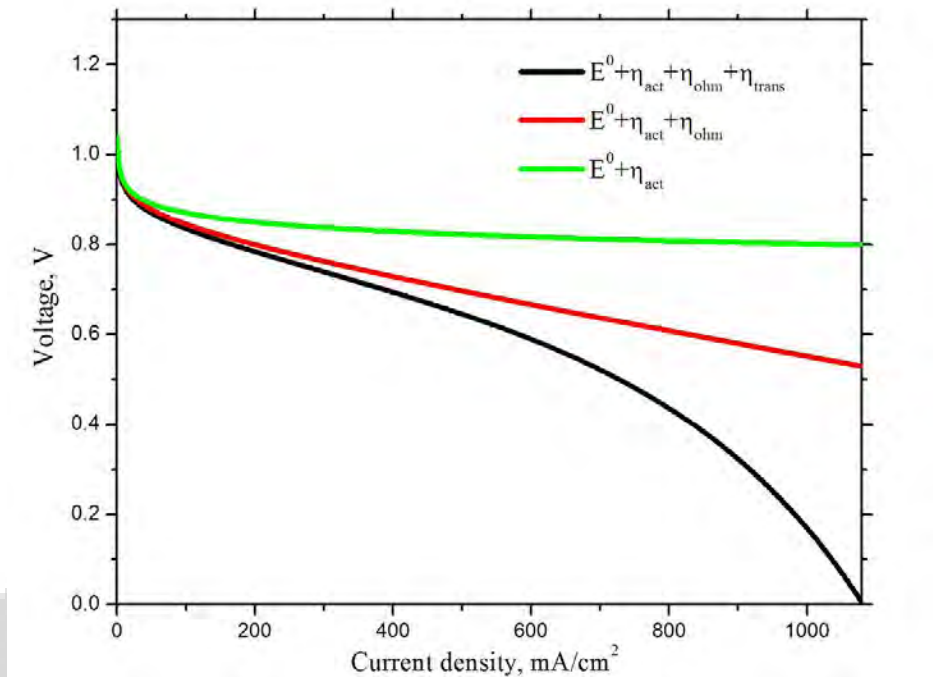
Overpotential transportasi massa η_{trans} disebabkan oleh keterbatasan perpindahan massa gas reaktan dalam elektroda. Untuk mempertahankan aliran arus konstan, reaksi elektroda membutuhkan pasokan konstan dari reaktan. Ketika reaktan habis pada elektroda, bagian dari energi reaksi yang diambil untuk mendorong perpindahan massa, sehingga membuat rugi pada tegangan keluaran (Al-Baghdadi, dkk, 2005). Perpindahan massa dapat dipengaruhi oleh terhalangnya jalur difusi dan dilusi reaktan. *overpotential* transportasi massa jauh lebih kecil pada anoda dari pada katoda, sejak difusi hidrogen jauh lebih cepat dibandingkan dengan oksigen, dan produk air yang dibuat di katoda juga menghalangi jalan difusi terutama pada kepadatan tinggi saat ini.

Overpotential merupakan fungsi dari kerapatan arus. Pada kerapatan arus yang berbeda, overpotentials memiliki nilai yang berbeda dan memberikan kontribusi yang berbeda terhadap kerugian tegangan. Bentuk kurva polarisasi dari PEM *Fuel cell* ditunjukkan pada Gambar. 2.5. Kurva ini dibagi menjadi tiga wilayah di mana tiap wilayah didominasi oleh *overpotential* berbeda. *Overpotential* aktivasi mendominasi pada kerapatan arus yang rendah di wilayah I. Sebagian besar kerugian tegangan di wilayah II yang disumbangkan oleh *overpotential* ohmik, sedangkan di wilayah III pada kerapatan arus yang tinggi, *overpotential*

transportasi massa mendominasi, yang ditunjukkan dengan lekukan pada kurva polarisasi. Kontribusi *overpotential* berbeda dengan kerugian tegangan diilustrasikan pada Gambar 2.6. Pengaruh *overpotential* aktivasi terlihat pada Gambar 2.7 tegangan jatuh sangat cepat pada kerapatan arus rendah. Wilayah tengah dalam kurva kedua dan ketiga hampir linear dan diatur oleh kerugian ohmik. Konduktivitas membran dan Ionomer pada lapisan katalis tergantung pada tingkat humidifikasi, dan dengan demikian pengeringan dari MEA meningkatkan ketahanan ion, menciptakan sebuah lereng yang besar di wilayah tengah. *overpotentials* transportasi massa yang dominan pada kerapatan arus yang tinggi, dimana laju reaksi perpindahan massa terbatas. Manajemen air adalah kunci penting dalam mengendalikan *overpotential* transportasi massal. Produk air terbentuk pada katoda dan sebaran air di anoda dapat menghalangi difusi gas reaktan ke daerah reaksi jika penghilangan air melalui lapisan gas difusi berjalan lambat.



Gambar 2.6. Karakteristik kurva polarisasi pada PEM *fuel cell* (Cooper, 2005)



Gambar 2.7. Pengaruh Jenis *Overpotensial* terhadap kerugian tegangan. (Cooper, dkk, 2005)

Pengukuran kurva polarisasi adalah metode elektrokimia karakterisasi yang terkenal, dan secara luas digunakan untuk karakterisasi PEM *fuel cell*. Menggabungkan data yang diperoleh dari pengukuran impedansi elektrokimia, dari pengukuran resistansi dengan teknik interupsi arus, dan dari kurva polarisasi, informasi mengenai overpotentials bisa diperoleh. Informasi tentang overpotentials dan parameter elektrokimia yang mengatur overpotentials ini berguna untuk karakterisasi bahan *fuel cell*.

2.4. POLYTETRAFLUOROETILEN (PTFE)

PTFE atau yang lebih dikenal dengan nama dagang Teflon merupakan senyawa sintesis yang bersifat sangat tidak reaktif, bersifat hidrofobik (menolak air), anti lengket dan mempunyai titik didih diatas 260°C. Oleh karena sifat-sifat itulah PTFE cocok digunakan sebagai pelapis pada MEA sehingga diharapkan dapat mengatasi permasalahan manajemen air yang sering terjadi. Adanya PTFE juga akan memberikan stabilitas yang lebih tinggi pada membrane Nafion hingga suhu 150°C karena kekuatan ikatan C-F dan perlindungan dari atom F (Wilkie dkk, 1991). PTFE menyebabkan PEMFC memiliki daya tahan yang lebih kuat.

Pembuatan GDL dengan material hidrofobik seperti PTFE sangat penting untuk pengaturan kadar air yang baik, namun PTFE bukan merupakan material konduktor listrik

sehingga kadarnya harus diperhatikan secara serius. Karena sifatnya yang hidrofilik, GDL biasa dilapisi dengan politetrafluoroetena (PTFE) yang bersifat hidrofobik agar pori-pori pada GDL tidak tertutup air (*flooding*) dan tetap dapat dilalui oleh partikel gas (Carrette dkk, 2001).

2.5. FLUORINATED ETHYLENE PROPYLENE (FEP)

FEP adalah kopolimer dari hexafluoropropylene dan tetrafluoroethylene, ditemukan oleh DuPont dan dijual dengan nama dagang Teflon[®]FEP. Nama dagang yang lain adalah Neoflon[®] dari Daikin atau Dyneon[®] FEP dari Dyneon/3M. Memiliki sifat yang menyerupai PTFE, tetapi memiliki suspensi yang lebih halus dari PTFE, memiliki titik leleh lebih rendah dari PTFE yaitu 260°C, lebih transparan dan tahan terhadap sinar matahari (Dupont, 2007).

Karena sifatnya yang menyerupai PTFE, Lim dan Wang (2004) memanfaatkannya sebagai material hidrofobik untuk mengatasi permasalahan manajemen air didalam lapisan difusi gas. Lim dan Wang telah menguji kemampuan FEP untuk mengatasi masalah dalam Fuel Cell yang berbasis etanol (DEFC). FEP memiliki beberapa karakteristik yang menjadikannya lebih baik daripada PTFE.

Tabel 2.1 Perbandingan Sifat Termal antara PTFE dan FEP (Dupont, 2007).

Sifat	Standar ASTM	Unit	Teflon [®] PTFE	Teflon [®] FEP
Titik Leleh	D3418	°C (°F)	327 (621)	260 (500)
Temperatur kerja	--	°C (°F)	379-429 (715-805)	360-385 (680-725)
<i>Flame Rating*</i>	UL94	--	V0	V0
<i>Limiting Oxygen Index (LOI)</i>	D2863	%	>95	>95
Panas Pembakaran	D240	MJ/kg (Btu/lb)	5,1 (2.200)	5,1 (2.200)

Tabel 2.2 Perbandingan Sifat Mekanik antara PTFE dan FEP (Dupont, 2007).

Sifat	Standar ASTM	Unit	Teflon [®] PTFE	Teflon [®] FEP
Spesifik Gravity	D792	--	2,15	2,15
Kuat Tarik	D1457 D1708 D638	MPa (psi)	21-34 (3.000-5.000)	23 (3.400)
Elongasi	D1457 D1708 D638	%	300-500	325
Modulus Lendut	D790	MPa (psi)	496 (72.000)	586 (85.000)
Ketahanan Lipat	D2176	(MIT) cycles	>10 ⁶	5-80 x 10 ³
Kuat Dampak	D256	J/m (ft·lb/in)	189 (3,5)	Tidak patah
Kekerasan	D2240	Shore D pensil	50-65 HB	56 HB
Koefisien gesek, Dinamik	D1894	--	0,05-0,10	0,08-0,3

Tabel 2.3 Perbandingan Sifat Kimia antara PTFE dan FEP (Dupont, 2007).

Sifat	Standar ASTM	Unit	Teflon [®] PTFE	Teflon [®] FEP
Ketahanan terhadap kimia/pelarut	D543	--	Sempurna	Sempurna
Penyerapan air, 24 jam	D570	%	<0,01	<0,01
Ketahanan semprot garam (1) -pada aluminium -pada baja	B-117	Jam Jam	744+ 192	744+ --
Ketahanan terhadap detergent (2) -pada aluminium -pada grit-blasted aluminium -pada grit-blasted steel	--	Jam Jam Jam	264 624 24	744 600 480
Ketahanan terhadap cuaca	Sengatan florida	Tahun tidak berpengaruh	20	20

Tabel 2.4 Perbandingan Sifat Elektrik antara PTFE dan FEP (Dupont, 2007).

Sifat	ASTM Standard	Unit	Teflon® PTFE	Teflon® FEP
Konstanta Dielektrik	D150	1 MHz	2,1	2,1
Kuat Dielektik*	D149	V/μm	18	53
Faktor Dissipasi	D150	1 MHz	<0.0001	0.0006
Ketahanan sudut	D495	sec	>300	300
Resistivitas Volum	D257	ohm·cm	>10 ¹⁸	>10 ¹⁸
Resistivitas permukaan	D257	ohm/sq	>10 ¹⁸	>10 ¹⁶

2.6. CARBON NANOTUBE (CNT)

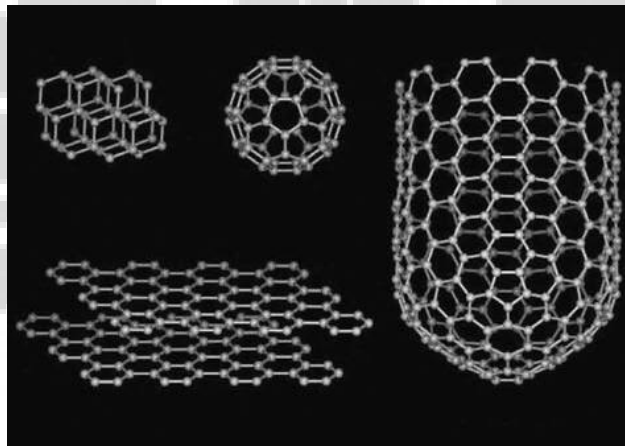
2.6.1. DESKRIPSI CARBON NANOTUBE

Carbon nanotube (CNT) adalah suatu rangkaian karbon berukuran nano yang mempunyai rasio antara panjang dan diameter hingga 28.000.000 : 1 (Zheng.L.X dkk., 2004). Rasio ini jauh lebih besar dibanding material lain. CNT memiliki sifat-sifat yang baik sehingga berpotensi untuk digunakan pada berbagai aplikasi dalam nanoteknologi, elektronik, optik, dan lainnya. CNT memiliki kekuatan yang luar biasa dan sifat elektrik yang unik serta merupakan konduktor panas yang efisien. Namun, penggunaan CNT cukup terbatas karena berpotensi menimbulkan keracunan.

Carbon nanotube adalah ikatan antar atom karbon, dimana 1 atom karbon berikatan dengan 3 atom karbon yang lain. Bentuk ikatannya berupa silinder yang jari-jarinya berada dalam orde nanometer. Unsur karbon dapat memiliki berbagai macam bentuk geometri, yang disebut dengan alotrop (Gambar 2.8), yang memiliki sifat berbeda. Hal tersebut disebabkan karbon memiliki tiga kemungkinan untuk berhibridisasi, yaitu sp, sp² dan sp³, sebagai konsekuensi sifatnya sebagai unsur golongan IV.

Karbon yang berada dalam fasa padat memiliki tiga jenis alotrop, yaitu grafit, intan, dan buckminsterfullerene. Intan merupakan karbon padat dengan struktur kristalin di mana

setiap atom karbon memiliki hibridisasi sp^3 dan terikat dalam susunan tetrahedral ke 4 atom karbon lain yang serupa. Struktur kristalin tersebut mengakibatkan intan menjadi material paling keras dan memiliki konduktivitas panas yang sangat baik. Selain itu, ikatan hibridisasi sp^3 pada intan juga mengakibatkan sifat transparansi optikal dan insulasi elektrik. Sementara itu, grafit tersusun dari atom-atom karbon berhibridisasi sp^2 yang berikatan dalam bentuk heksagonal dan membentuk berlapis-lapis lembaran planar. Geometri ikatan pada grafit mengakibatkan grafit bersifat lunak, tak tembus cahaya, dan memiliki konduktivitas elektrik yang baik. Sementara itu, buckminsterfullerene atau fullerene tersusun dari atom-atom karbon berhibridisasi sp^2 yang membentuk struktur bola. *Carbon nanotube* (CNT) merupakan fullerene yang memiliki bentuk tabung. (O'Connel, 2006)



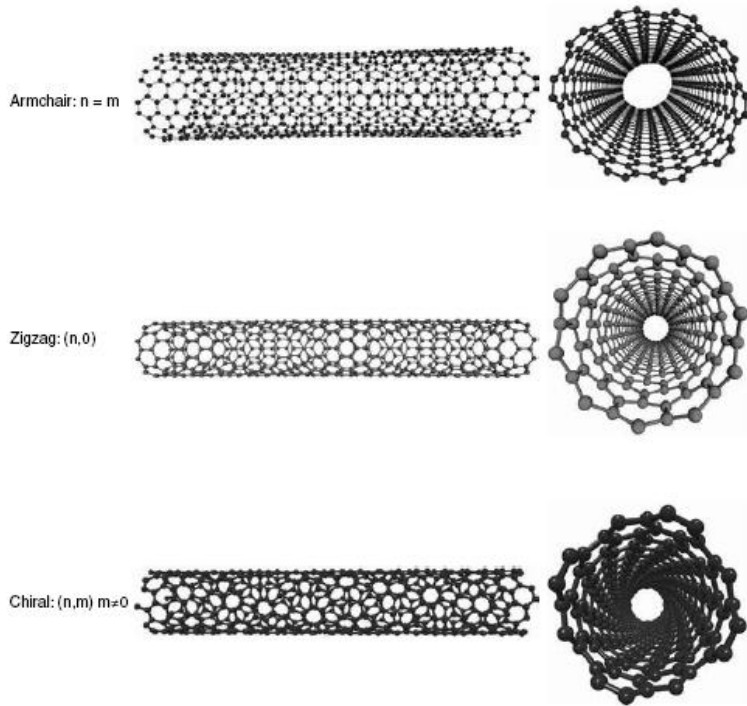
Gambar 2.8. Bentuk-bentuk alotrop karbon (intan, grafit, fullerene) dan CNT.

(O'Connel, 2006)

Berdasarkan jumlah penyusun dindingnya, CNT dibagi menjadi dua jenis, yaitu *single walled nanotube* (SWNT) dan *multi walled nanotube* (MWNT).

a. *Single Walled Nanotube* (SWNT)

Sebagian besar SWNT memiliki diameter mendekati 1 nanometer dengan panjang yang dapat mencapai jutaan kali. Berdasarkan dari arah susunan karbon, SWNT dibagi menjadi tiga, yaitu armchair, zig-zag dan chiral. (Gambar 2.9). SWNT adalah sebuah CNT yang sangat istimewa karena menunjukkan sifat-sifat elektrik yang tidak dimiliki oleh MWNT.



Gambar 2.9. Armchair, zig-zag, dan chiral SWNT (O'Connell, 2006)

b. *Multi Walled Nanotube* (MWNT)

Berbeda dengan SWNT, MWNT terdiri dari beberapa lapis grafit. Pelapisan ini menyerupai model “boneka Rusia”. Salah satu anggota dari MWNT adalah double walled nanotube (DWNT). DWNT sangatlah menarik karena morfologi dan sifat-sifatnya mirip dengan SWNT, tetapi kekuatannya terhadap bahan kimia jauh meningkat.

CNT memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

a. Kekuatan

CNT adalah material terkuat yang telah ditemukan dalam hal kekuatan tarik dan modulus elastisitas. Kekuatan ini disebabkan oleh ikatan sp² yang terbentuk antara masing-masing atom karbon. Pada tahun 2000, pengujian dilakukan pada sebuah MWNT, memiliki kekuatan tarik sebesar 63 gigapascal (GPa). CNT memiliki densitas sebesar 1,3 hingga 1,4 g.cm⁻³ dan memiliki kekuatan spesifik sebesar 48.000 kN.m.kg⁻¹. Inilah yang membuat CNT merupakan material yang paling kuat karena carbon steel hanya memiliki kekuatan spesifik sebesar 154 kN.m.kg⁻¹. Ketika ditarik, suatu saat tube ini akan memasuki fase deformasi plastis, yang akan menyebabkan CNT tersebut berdeformasi permanen.

b. Elektrik

CNT memiliki sifat-sifat elektrik yang baik karena bersimetri dan memiliki struktur elektronik yang unik. Secara teoritis, CNT dapat membawa arus listrik sebesar 4×10^9 A/cm², sekitar 1000 kali lebih baik dibanding tembaga.

c. Termal

Seluruh CNT memiliki konduktansi termal yang sangat baik pada bagian tabungnya, karena menunjukkan sifat yang disebut sebagai “konduksi balistik”, tetapi merupakan insulator yang baik pada bagian axis tabung tersebut. Sebuah CNT diprediksi memiliki kemampuan untuk mengirimkan 6000 W/mK pada temperatur ruang. Hal ini secara signifikan melampaui tembaga yang dapat mengirimkan 385 W/mK.

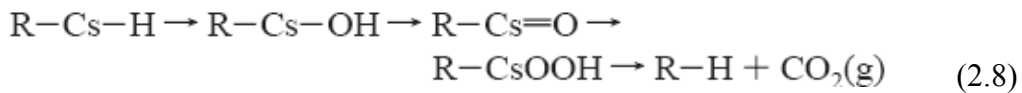
2.6.2. PENGGUNAAN CNT SEBAGAI LAPISAN MICROPOROUS PADA PEMFC

CNT merupakan material yang menarik untuk digunakan sebagai lapisan microporous pada PEMFC karena beberapa sifatnya, antara lain ukuran nanometer, luas area permukaan yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, konduktivitas elektik yang baik, dan stabilitas yang tinggi. Pemanfaatan CNT dalam lapisan MPL juga berfungsi sebagai penyangga katalis.

Banyak studi sistematis yang mempelajari performa CNT sebagai penyangga katalis pada DMFC menunjukkan bahwa single-walled CNT (SWCNT) jauh lebih baik dari material berbasis karbon lainnya. Secara umum, SWCNT hanya terlihat sebagai silinder, namun sesungguhnya SWCNT memiliki area yang cacat (*defect sites*) yang dapat menjadi tempat penempelan partikel katalis. (Reddy, 2007)

SWCNT lebih menarik untuk digunakan dari MWCNT karena konstruksinya yang lebih sederhana dan karena semua atom karbon pada SWCNT tersusun pada bagian permukaan. Selain itu, SWCNT juga dapat mentransportasikan H₂ dengan baik secara interstitial dan bulk sehingga meningkatkan performa PEMFC. (Koprinarov, 2005)

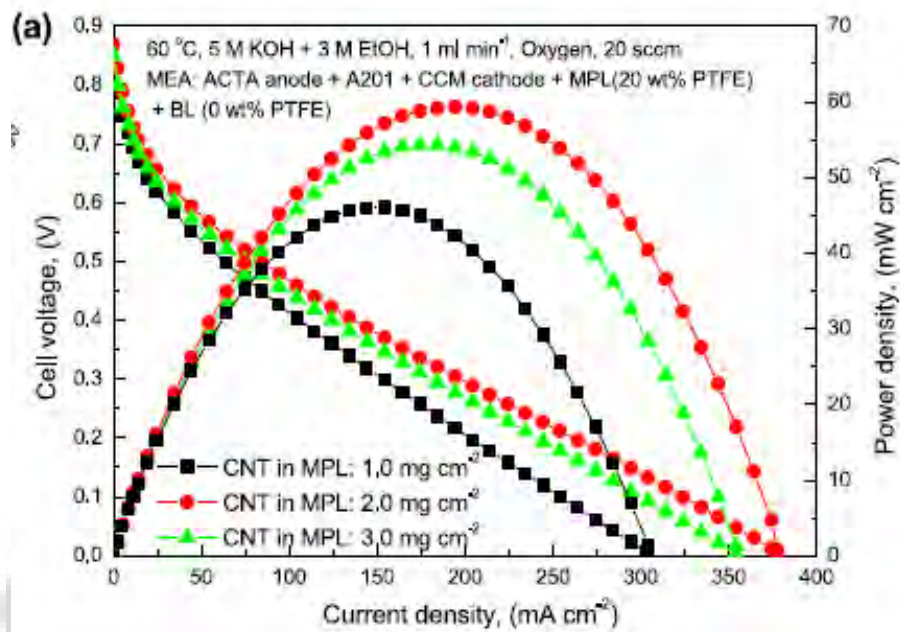
Dalam beberapa tahun terakhir, ketahanan penggunaan PEMFC dalam waktu lama telah menjadi salah satu masalah terpenting yang harus diatasi sebelum PEMFC dapat digunakan secara komersial. Di antara semua aspek degradasi, degradasi dari katalis Pt berpenyangga karbon (Pt/C) karena korosi pada penyangga karbon adalah faktor utama penyebab rendahnya usia PEMFC. Korosi tersebut disebabkan oleh reaksi oksidasi elektrokimia yang dialami karbon pada kondisi operasi PEMFC sehingga karbon terdegradasi membentuk CO₂ dan oksida karbon lainnya. Salah satu mekanisme reaksi yang diusulkan untuk pembentukan oksida karbon dan evolusi CO₂ ditunjukkan pada persamaan reaksi berikut.



Jika penyangga karbon teroksidasi menjadi CO₂, Pt akan hilang dari penyangga karbon. Dengan demikian, semakin banyak karbon yang teroksidasi, semakin banyak pula Pt yang hilang. Jika karbon teroksidasi secara parsial membentuk oksida permukaan, keberadaan gugus-gugus yang mengandung oksigen akan menurunkan konduktivitas katalis dan melemahkan interaksi antara karbon penyangga dan partikel logam katalis. Selain itu, oksida karbon pada permukaan juga menurunkan tingkat hidrofobisitas yang sangat penting dalam pengaturan kadar air. Karena kadar air merupakan faktor yang sangat kritis dalam aplikasi PEMFC, korosi karbon sangat mempengaruhi usia PEMFC.

Dalam beberapa saat terakhir, *carbon nanotube* (CNT) telah dikemukakan sebagai material penyangga katalis yang menjanjikan karena karakteristiknya yang unik. Karakteristik tersebut antara lain aspek rasio yang tinggi, konduktivitas elektron yang tinggi, dan kapabilitas transport massa yang baik. Selain itu, beberapa studi telah melaporkan bahwa CNT memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap oksidasi elektrokimia dibandingkan dengan carbon black yang umum digunakan saat ini. CNT memiliki struktur yang lebih tertutup dari carbon black sehingga lebih sulit untuk diserang oleh atom-atom oksidan. Sebagai akibatnya, CNT bersifat lebih stabil dalam kondisi oksidatif (Wang, dkk, 2008)

Selain menurunkan tingkat degradasi, penggunaan CNT juga dapat menurunkan jumlah katalis Pt yang digunakan pada PEMFC. Hal ini telah dibuktikan oleh penelitian yang menunjukkan bahwa penggunaan CNT dapat menurunkan loading katalis Pt hingga 6 µg tanpa menurunkan kinerja PEMFC (Wang dkk, 2008). Selain itu, penelitian lain (Tanaka et.al, 2009) juga membuktikan bahwa CNT dapat meningkatkan ketahanan PEMFC terhadap CO. Hal tersebut sangat penting karena dapat mengatasi permasalahan degradasi katalis pada katoda akibat adanya CO pada gas H₂ hasil reforming.



Gambar 2.10. Pengaruh jumlah CNT dalam MPL pada Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC),(Li dkk, 2011)

Pada Gambar 2.10 Li dkk (2011) melakukan percobaan dengan menggunakan Fuel Cell yang berbahan bakar etanol (DEFC), memvariasikan kandungan CNT dalam MPLnya dan mendapatkan hasil yang serupa, pemakaian CNT yang terlalu banyak dari nilai optimalnya menyebabkan meningkatnya resistansi didalam elektroda. Bentuk dan ukuran CNT (Gambar 4.27 dan 4.28) yang lebih besar daripada Vulcan menyebabkan meningkatnya ketebalan lapisan MPL sehingga jarak transport ion menuju luar lapisan semakin besar.

Beberapa kelebihan lain CNT jika dibandingkan dengan carbon black Vulcan XC-72 antara lain:

- CNT memiliki kekuatan yang jauh lebih tinggi dari carbon black karena ikatan antar atom karbon pada CNT merupakan salah satu ikatan terkuat di alam. Ikatan tersebut menyebabkan CNT memiliki modulus Young dan yield strength yang tinggi.
- CNT memiliki konduktivitas elektrik yang tinggi, mendekati 10⁶ S/m
- CNT memiliki luas area spesifik yang tinggi sehingga jumlah katalis yang dapat terdispersi pada permukaan CNT lebih tinggi dari jumlah katalis yang dapat terdispersi pada carbon black. (O'Connel, 2006)
- Partikel katalis dapat terdispersi di dalam struktur CNT karena adanya ujung terbuka pada CNT. Hal tersebut mengakibatkan katalis terdispersi dengan lebih efektif (Rajesh, 2003)

Katalis platina yang berdiameter 0,139 nm dapat masuk dan terdispersi dalam struktur CNT yang berdiameter 0,5 – 0,8 nm.

2.7. FABRIKASI MEA

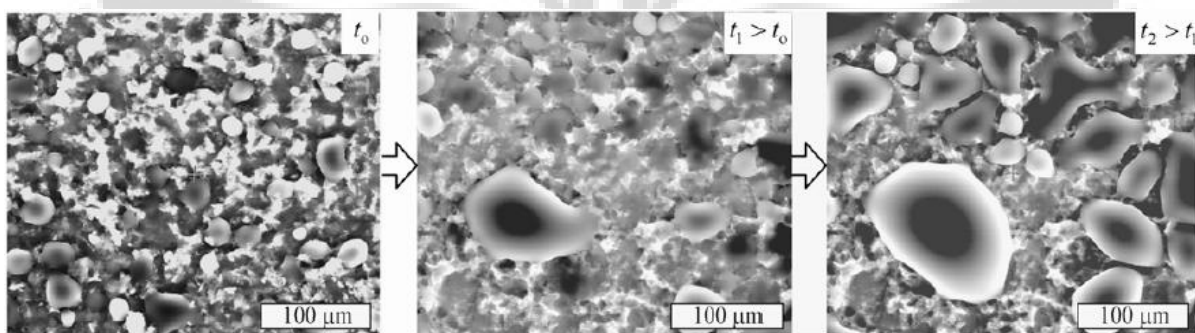
Struktur fisik dan sifat difusi dari elektroda difusi gas PEMFC yang sangat berpengaruh terhadap kinerjanya (Gharibi, 2003). Seperti disebutkan dalam subbab sebelumnya, kinerja PEMFC dapat ditingkatkan dengan mengurangi overpotentials yang menyebabkan tegangan jatuh pada kisaran yang berbeda kerapatan arus. Overpotential ohmic dan overpotential transportasi massa sangat dipengaruhi oleh struktur (yaitu ketebalan dan porositas) dan komposisi (bahan karbon dan agen hidrofobik) dari elektrode difusi gas. Agen Hidrofobik secara luas digunakan dalam difusi gas elektroda untuk menangani masalah manajemen air yang merupakan penyebab utama overpotential transportasi massa. Penggunaan agen hidrofobik menciptakan pori-pori pada elektroda yang menolak air untuk menjaga jalannya transportasi gas. Menurut Antolini (2004), pendapat literatur yang berlaku adalah bahwa gas diangkut ke situs reaksi melalui pori-pori hidrofobik sedangkan air dihilangkan dari elektrode melalui pori-pori hidrofilik. Jadi dengan menyesuaikan kandungan agen hidrofobik dalam elektroda dapat merubah sifat pengelolaan air elektroda dan overpotential transportasi massa. Struktur fisik elektroda seperti ketebalan dan porositas bergantung pada metode fabrikasi dan bahan yang digunakan.

Didalam lab kami, pada Tabel 3 Jamal dkk (2008) dan Wahyudi dkk (2010) melakukan penelitian mengenai fabrikasi MEA menggunakan metode sputtering dengan tujuan mengurangi pemakaian katalis Pt dalam MEA. Mereka berhasil mengembangkan MEA dengan kandungan Platinun hingga $< 0.1 \text{ mg Pt/cm}^2$, namun kerapatan arus yang dihasilkan masih rendah $< 160 \text{ mA/cm}^2$, daya tahan MEA terhadap air juga masih sangat kecil. Metoda yang digunakan dalam fabrikasi MEA adalah dengan metoda pengecatan pengkuasan, kertas karbon yang dikuasi dengan tinta NCI (Nafion-Carbon-Ink), lalu dikeringkan dengan Oven lalu dilapisi katalis dengan menggunakan metode sputtering. Elektroda tersebut kemudian di Press dengan menggunakan hotpress dengan suhu 135°C selama 5 menit.

Pada saat pengujian durability dengan sistem PEMFC sel tunggal yang dilakukan dalam waktu 24 jam kemudian terjadi penurunan kualitas, setelah diteliti salah satu penyebabnya adalah terlepasnya ikatan antara lapisan difusi dengan lapisan katalis sehingga menurunnya jumlah elektron yang teraliri dari dan menuju lapisan katalis.

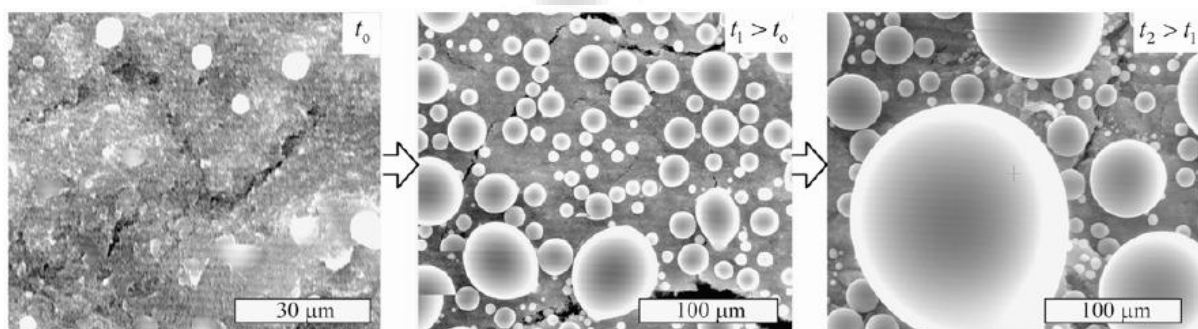
Penyebab terlepasnya lapisan difusi dengan lapisan katalis disebabkan karena terjabaknya sejumlah air hasil reaksi yang tidak ikut terbawa keluar (*flooding*). Hal ini mungkin dikarenakan karena struktur lapisan yang tidak mendukung terjadinya proses pengaliran air dari dalam lapisan ke luar lapisan, baik itu secara fisik maupun secara material kimianya. Karena itu perlu pengkajian ulang mengenai teknik fabrikasi maupun komposisi kimia yang mampu mendukung proses pemindahan air hasil reaksi dari dalam lapisan ke luar lapisan.

Air terbentuk pada lapisan katalis dimana terjadinya reaksi pembentukan antara ion H^+ yang tembus melalui membran nafion bertemu dengan ion O^- yang datang dari arah lapisan difusi. Pada Gambar 2.11, Kavianny 2009, menangkap fenomena terbentuknya air dalam lapisan katalis, bermula dari embun kecil yang kemudian terkumpul hingga membentuk embun yang besar.



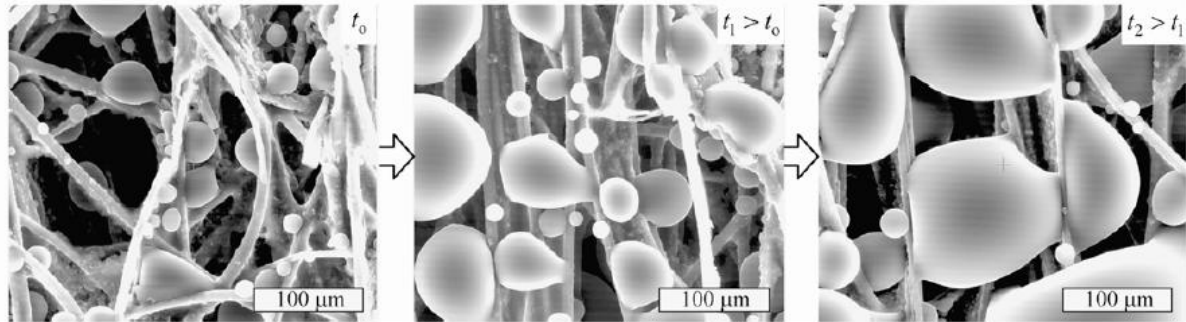
Gambar 2.11. Foto SEM pembentukan air dalam lapisan katalis (Kavianny, 2009)

Air yang terbentuk dalam lapisan katalis kemudian terdorong oleh tekanan balik hingga air meresap menembus lapisan MPL. Adanya kandungan teflon dalam MPL akan memberikan bentuk embunan air yang mendekati bentuk bola, karena air tidak mampu melekat pada lapisan MPL. Bola-bola air akan menembus lapisan MPL melalui retakan dan celah didalam MPL. Gambar 2.12 menunjukkan bola-bola air terbentuk didalam lapisan MPL.



Gambar 2.12. Foto SEM bola air didalam lapisan MPL (Kavianny, 2009)

Bola-bola air yang terbentuk dari lapisan MPL kemudian melekat pada serat-serat karbon pada lapisan GDL. Air tersebut terkumpul membentuk embun-embun besar yang kemudian akan terdorong oleh aliran gas. Gambar 2.13 foto SEM yang diambil adalah GDL yang belum dilakukan penambahan teflon atau material lainnya.



Gambar 2.13. Foto SEM Kondisi GDL ketika terbentuk embun air (Kaviany, 2009)

2.8. KARAKTERISASI

Untuk mengetahui kualitas dari MEA, maka perlu dilakukan karakterisasi terhadap MEA yang telah dibuat. Analisis kurva polarisasi perlu dilakukan untuk mengetahui sifat elektrokimia dari MEA, karena sifat elektrokimia mempengaruhi keluaran arus dan tegangan yang dihasilkan. Sifat elektrokimia juga tergantung kepada struktur dan morfologi sebaran katalis pada lapisan elektroda. Untuk mengetahuinya maka perlu dilakukan analisa SEM pada lapisan elektroda sebelum dilakukan pengepressan MEA.

2.8.1. Analisis kurva polarisasi

Ketika *fuel cell* terhubung ke beban, Arus listrik diambil dari sel. Tegangan sel akan berubah seiring dengan perubahan arus, dan perilaku arus tergantung dari tegangan sel, sifat elektrokimia dari MEA dapat dianalisis. Untuk mendapatkan parameter elektrokimia dan memahami mekanisme, simulasi dan pemodelan dari MEA dan fitting kurva eksperimental melalui metoda umum. Pemodelan yang lengkap yang mempertimbangkan seluruh MEA disajikan oleh Bernadi (1992) dan Springer (1993). Model dinamik satu dimensi elektroda difusi gas sebagai bagian dari model lengkap *Fuel cell* juga disajikan oleh Bevers dkk. (2005). Berning dkk.(2003) juga menyajikan model tiga-dimensi, non-isotermal dari sebuah PEM *Fuel cell*. Pengulasan mengenai pendekatan yang berbeda untuk pemodelan PEM *fuel cell* ditulis oleh Cheddie dan Munroe (2005).

Kebanyakan simulasi menggunakan empat persamaan dasar untuk memecahkan fenomena yang berbeda di berbagai daerah sel (Bernadi, 1992). Persamaan model diturunkan menggunakan persamaan Butler-Volmer untuk menggambarkan kinetika elektroda, persamaan Nernst-Planck untuk menggambarkan transport proton, persamaan Schlögl untuk transportasi air cair, persamaan Stefan Maxwell (Bernadi, 1992) atau generalisasi hukum Fick's (Berning, 2003) untuk difusi gas. Simulasi ini melibatkan banyak persamaan dengan perhitungan volume yang memerlukan waktu komputasi yang lama (Berning, 2003). Simulasi di atas tidak bisa menghasilkan data yang sesuai dengan data eksperimen. Deviasi antara prediksi model dan percobaan terlihat baik di daerah kerapatan arus rendah (Bernadi, 1992) atau transportasi massa yang didominasi wilayah dalam (Berning, 2003).

2.8.2. Scanning Elektron Microscopy (SEM)

Elektron Microscopy (EM) adalah salah satu teknik yang digunakan untuk karakterisasi material komposit. Dua teknik utama EM dibedakan menjadi Scanning Elektron Microscopy (SEM) dan Transmission Elektron Microscopy (TEM). Karakterisasi SEM bertujuan untuk mengetahui struktur permukaan (morfologi), porositas, serta ketebalan suatu specimen. Prinsip dasar proses ini adalah dengan menembakkan elektron ke permukaan specimen yang ingin dianalisis. Penembakan elektron tersebut menghasilkan sinyal berupa transmisi elektron yang akan memberikan kondisi gambar dari daerah specimen yang ditembakkan. Bentuk transmisi elektron tersebut ada menyebar sehingga mampu menghasilkan gambar yang terang, dan ada juga yang penyebarannya tidak elastik sehingga menghasilkan gambar yang gelap.

Metode mikroskopi dapat secara cepat menunjukkan ukuran nominal dan bentuk serat. Permukaan specimen yang akan diuji, di-*scan* dengan pancaran berkas elektron dan pantulan dari elektron ditangkap, kemudian ditampilkan di atas tabung sinar katoda. Bayangan yang tampak di atas *layer* menampilkan gambaran permukaan dari specimen.

2.8.3. Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive (SEM-EDX)

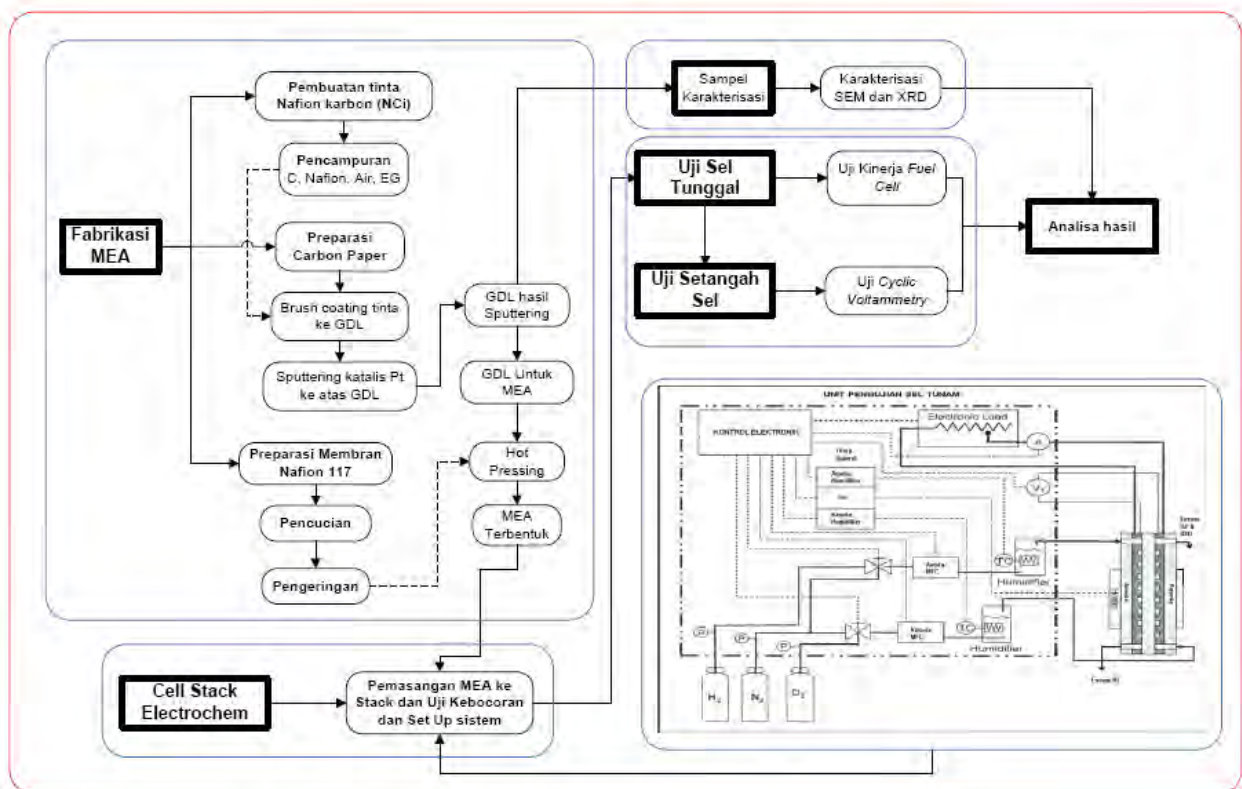
Uji ini dilakukan untuk melihat morfologi permukaan material dan mengetahui persentase komposisi suatu unsur atau senyawa dari material yang dianalisa, selain itu uji ini digunakan untuk mengetahui apakah partikel-partikel platinum telah tersebar merata di bagian permukaan GDL.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang rancangan penelitian, peralatan, bahan yang digunakan dalam penelitian, diagram alir penelitian, serta prosedur yang harus dilakukan untuk mencapai tujuan dari penelitian ini.

3.1. RANCANGAN PENELITIAN

Variabel yang diharapkan untuk menunjukkan adanya peningkatan kualitas adalah Daya yang dihasilkan tiap luasan elektrodanya (Watt/cm^2) dari MEA - PEMFC yang diteliti. Daya keluaran dapat dianalisa melalui analisa polarisasi dengan skema pengujian



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2 VARIABEL PENELITIAN

Berikut adalah variable-variabel dalam penelitian ini

1. Variabel bebas 1: Perbandingan Pemanfaatan Teflon jenis PTFE dengan FEP dalam lapisan difusi gas dan lapisan *Microporous*
2. Variabel bebas 2: Komposisi MWCNT yang digunakan pada MPL yaitu: 30%, 50%, 70%, 100% , SWCNT dan Karbon Vulcan
3. Variabel terikat: *Voltage dan current density* pada kurva V-I.
4. Variabel control: tekanan dan suhu operasi, menggunakan bahan yang sama, ketebalan yang sama, loading katalis Pt yang sama.

Kandungan Teflon dalam lapisan Difusi dan lapisan *Microporous* ditentukan 20% dari berat karbon (Wiranata, 2010). Loading total komposisi pada MPL diset 2 mg/cm².

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

3.3. RINCIAN KEGIATAN PENELITIAN

Dalam penelitian ini akan dilaksanakan beberapa tahapan penelitian dalam fabrikasi *membran electrode assembly* (MEA), yaitu :

3.3.1. Pembuatan lapisan difusi gas dan MPL

Terjadinya pelepasan elektroda dari membran setelah dianalisa diantaranya disebabkan timbulnya air akibat reaksi yang terjebak ditengah – tengah lapisan sehingga tidak bisa terdorong keluar oleh tekanan gas. Karena itu dalam penelitian ini akan ditambahkan komponen Teflon kedalam komposisi pelapisan lapisan difusi gas.

Selain disebabkan oleh adanya air, pelepasan elektroda juga disebabkan karena ikatan antara karbon dan membran kurang kuat, karena sifat dari kertas karbon yang rapuh sehingga ikatan tersebut mudah pecah ketika terbanjiri oleh air. Karena itu dalam penelitian ini akan dilakukan pemadatan kertas karbon dengan karbon tambahan untuk memperkuat struktur yang rapuh.

Alat dan Bahan

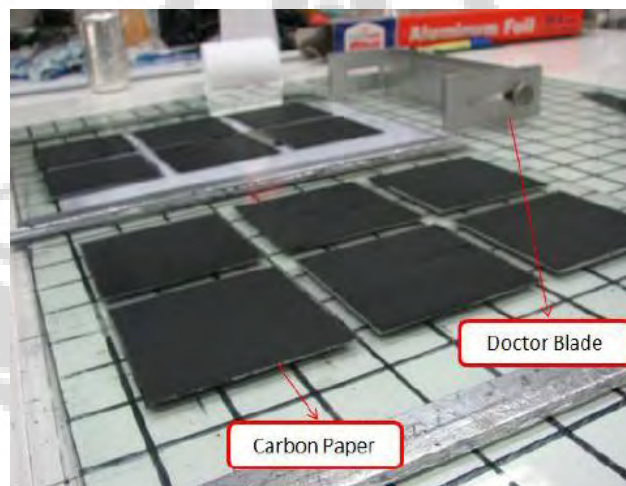
- | | |
|--------------------------|--------------------------------|
| 1. <i>Beaker glass</i> | 9. Kertas Karbon (Toray) |
| 2. <i>Cutter</i> | 10. PTFE |
| 3. Penjepit dan statif | 11. Ethanol |
| 4. <i>Hot Plate</i> | 12. Deionized water |
| 5. <i>Ultrasonicator</i> | 13. Karbon Vulcan XC72 (Cabot) |
| 6. Timbangan Analitik | |
| 7. Mesin Press (Carver) | |
| 8. Oven | |

Prosedur :

1. Potong dua lembar kertas karbon 50 cm² (ketebalan khas = 0,26 mm)
2. Kuaskan dengan PTFE yang terdispersi dalam air pada kedua sisi kertas karbon. Seperti dijelaskan PTFE hidrofobik ditambahkan untuk mencegah banjir di elektroda
3. Kertas-kertas karbon dikeringkan pada hotplate dan kemudian ditimbang untuk menentukan kandungan Teflon pada kertas-kertas karbon. Kandungan Teflon pada kertas karbon sekitar 38 wt% sampai 42% wt untuk anoda dan katoda.
4. Kertas-kertas karbon Teflonized kemudian dipindahkan ke oven dan dipanaskan sampai 350°C dengan kenaikan sebesar 4,5°C / menit secara bertahap menghapus

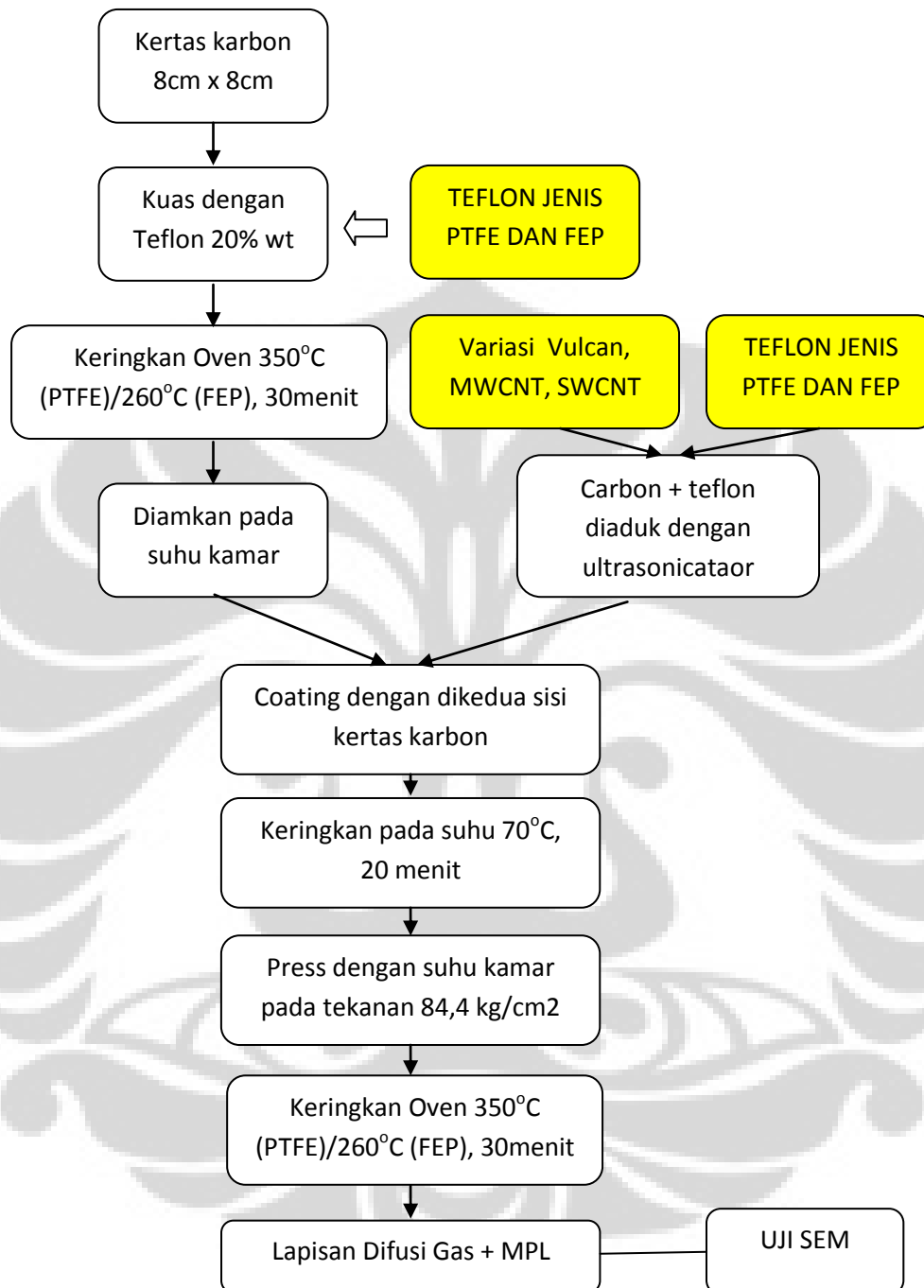
dispersant yang ada dalam larutan PTFE dan untuk mencairkan PTFE cluster besar pada 350°C selama 30 menit.

5. Lapisan difusi Gas (GDL) untuk elektroda terdiri dari karbon hitam (VXC72-R) dan partikel PTFE. Rasio berat karbon hitam untuk PTFE adalah 7:3 pada anoda dan 3:2 pada katoda. karbon hitam diaduk dengan ultrasonicator dalam campuran 3ml air DI dan etanol (1:2 jilid rasio). Diaduk dalam PTFE 1ml air DI. Larutan PTFE ditambahkan ke karbon tinta hitam dan diaduk untuk membuat dispersi homogen.
6. Tinta elektroda dilapisakan pada satu sisi kertas karbon dengan penyemprotan menggunakan sprayer.
7. Loading khas dari tinta difusi sekitar 3,6 mg/cm². keringkan elektroda difusi gas dengan hotplate lalu dipadatkan menggunakan mesin press pada tekanan 84,4 kg/cm² sebelum dipindahkan ke oven.
8. Elektroda difusi gas disinter pada suhu 350°C di bawah kondisi yang sama dengan perlakuan panas dari kertas karbon yang telah ditambah teflon



Gambar 3.2. Pembuatan Lapisan Difusi (P3TKEBT)

TREATMENT LAPISAN DIFUSI DAN MPL



Gambar 3.3. Flow Diagram GDL treatment

3.3.2. Pembuatan lapisan katalis

Setelah lapisan difusi terbentuk, maka selanjutnya membuat lapisan katalis, dimana pada lapisan ini akan digunakan Platinum dalam carbon vulcan.

Alat dan Bahan

1. *Beaker glass*
2. *Oven*
3. Penjepit dan statif
4. *Hot Plate*
5. *Ultrasonicator*
6. Timbangan Analitik
8. Karbon Nanotube (MWCNTs)(Chengdu)
9. Deionized water
10. Ethanol

Pembuatan Tinta Elektroda Katalis

1. Siapkan kertas karbon yang telah ditreatment dengan Teflon dan MPL
2. Buat tinta elektroda dengan menambahkan Pt/C, Larutan Nafion, Ethanol dan Deionize water, lalu aduk dengan Ultrasonicator
3. Lapiskan tinta elektroda dengan menggunakan Sprayer Air Brush ke kedua elektroda tersebut.
4. Keringkan dalam Oven suhu 80°C selama 30 menit.
5. Elektroda siap digunakan

3.3.3. Pembuatan MEA

Hasil dari elektroda yang telah terlapis dengan katalis kemudian dilakukan penumpukan (sandwiches) dengan membran PEM yang telah dipreparasi sebelumnya. Membran PEM diapit oleh kedua elektroda kemudian dilakukan pengepressan pada suhu 130°C tekanan 441 psi selama 5 menit.

A. Preparasi Membran

Alat dan bahan

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

Prosedur

1. Memanaskan 500 ml hidrogen peroksida, 500 ml asam sulfat, dan 4×500 ml *deionized water* masing-masing dalam *beaker glass* sampai bersuhu 80°C – 90°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.

B. Pengepressan

Alat dan bahan

1. Alat *hot press* (*Carver*)
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 441 psi dan pemanasan pada suhu 130°C selama 5 menit.
3. Mendinginkan MEA setelah di-*hot press* dan MEA siap digunakan.

3.3.4. Pengujian Polarisasi PEMFC

MEA yang sudah jadi dipasang pada PEMFC sel tunggal dengan luasan aktif 50cm². Sel tunggal PEMFC diuji dialiri dengan Hidrogen dan Oksigen pada tekanan 10 Psig pada temperatur 25°C, selama 8 jam.

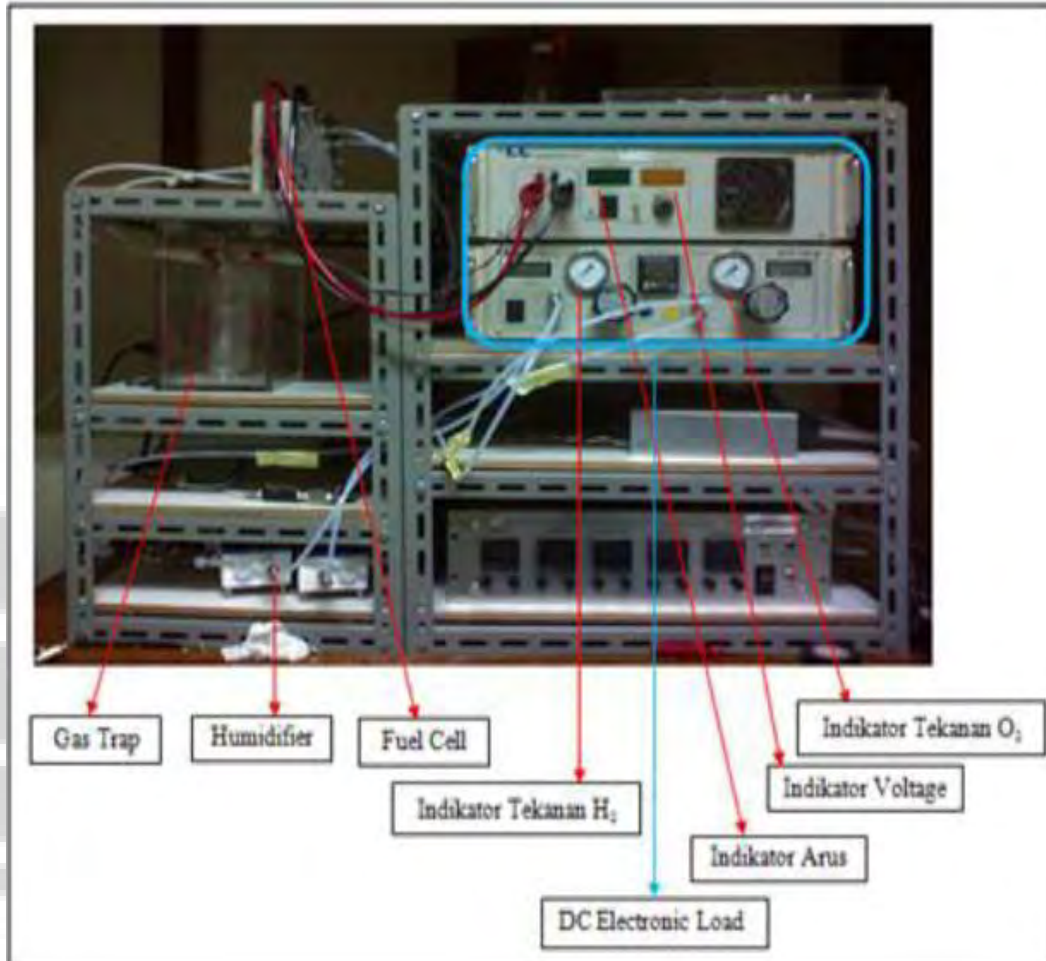
Alat dan bahan

1. *Cell stack Fuel cell* (Electrochem)
2. MEA yang telah difabrikasi
3. Kunci pas
4. DC *Elektronic load* (Electrochem)
5. Air sabun
6. Kuas kecil
7. Udara tekan, gas H₂, O₂, dan N₂

Prosedur

1. Merangkai seluruh sistem *fuel cell*.
2. Melakukan tes kebocoran unit dan sistem *fuel cell* dengan cara mengalirkan N₂.
3. Menguaskan air sabun di setiap celah pada sambungan antara pelat bipolar serta pada tiap sambungan antar peralatan pada sistem.
4. Jika terjadi gelembung sabun, maka menandakan adanya kebocoran pada sistem.

5. Setelah kebocoran tidak terjadi, alirkan bahan bakar pada anoda dan oksigen atau udara tekan pada katoda.
6. Menjalankan *fuel cell* selama 8 jam.
7. Mengambil data volt dan arus menggunakan DC *elektronik load*.



Gambar 3.4. Alat Uji Polarisasi PEMFC (P3TKEBT)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

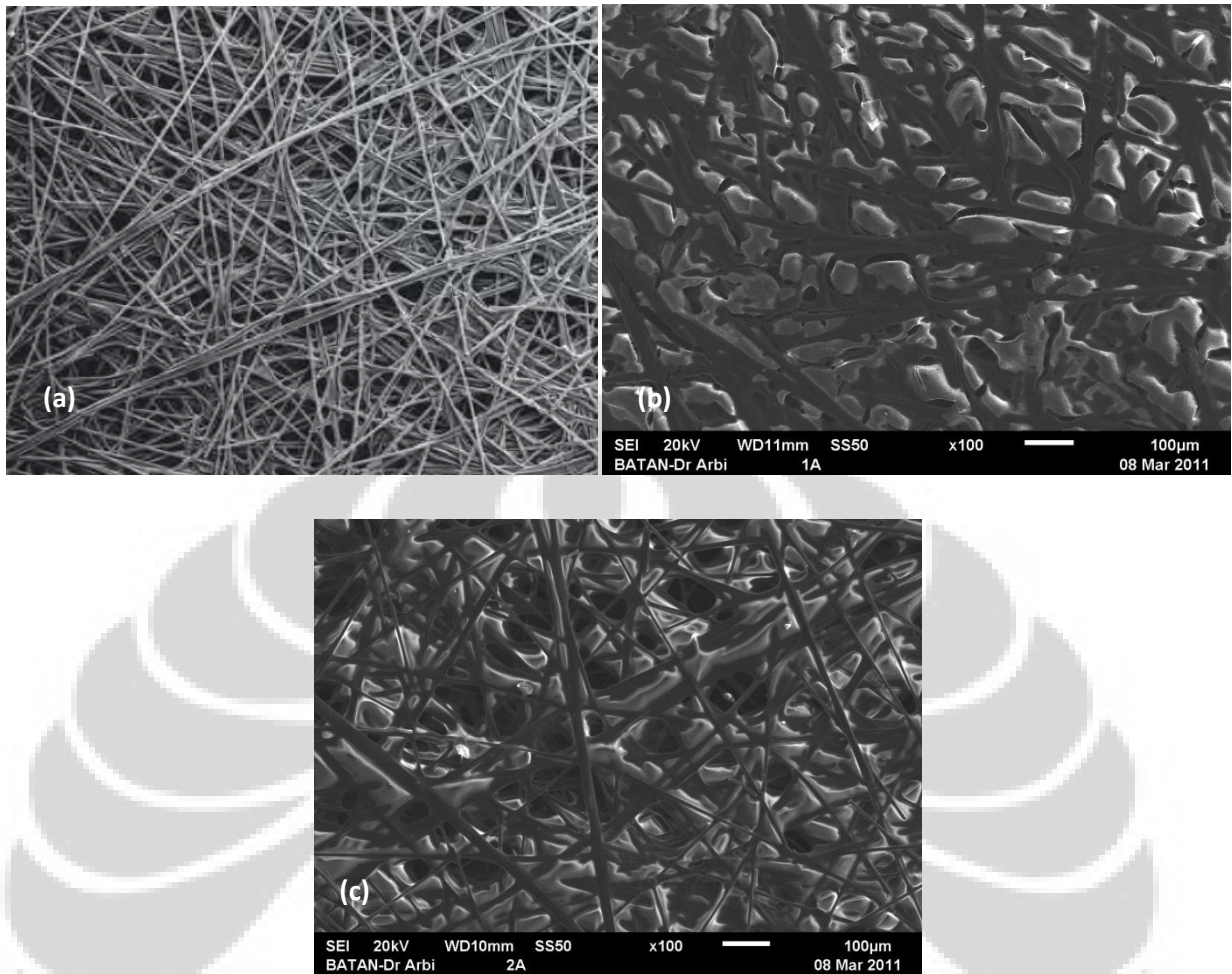
4.1. PENINGKATAN KUALITAS IKATAN ANTAR LAPISAN

Pemanfaatan Teflon kedalam komposisi pembuatan elektroda diharapkan dapat mengatasi permasalahan air didalam lapisan. Teflon memiliki sifat *hydrofobic* diharapkan dapat mengalirkan air hasil produksi keluar dari lapisan. Pada percobaan ini teflon ditambahkan pada lapisan difusi gas dan lapisan MPL. Teflon yang digunakan pada percobaan ini menggunakan 2 jenis teflon yang dikeluarkan oleh Dupont. Yaitu Polytetrafluoroethylene (PTFE) dan Fluorinated ethylene propylene (FEP).

4.1.1. Pengujian SEM

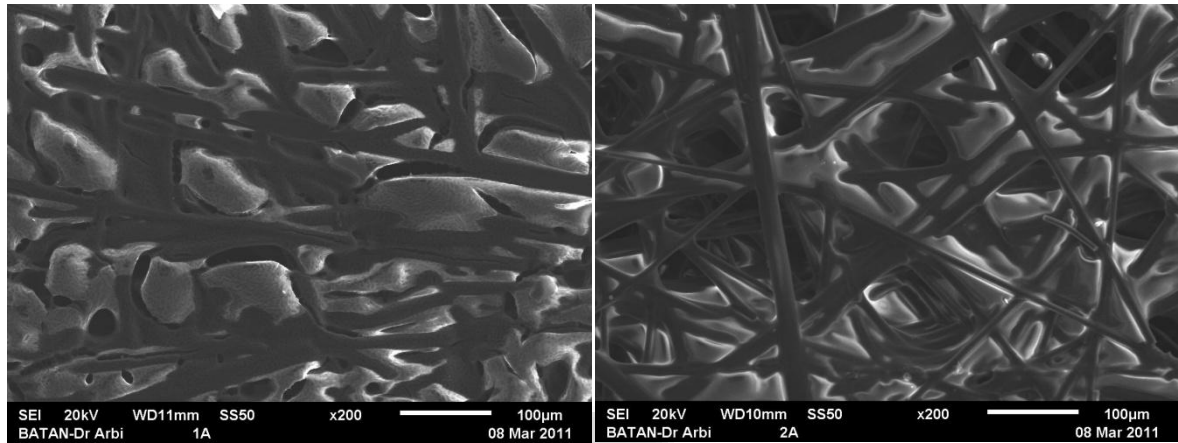
Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dilakukan untuk menganalisa pengaruh teflon terhadap struktur elektroda. Teflon tersebut dilapiskan pada lapisan difusi gas (GDL) dan lapisan *Microporous*. Pada lapisan GDL, teflon dilapisi dengan cara menyemprotkan keatas permukaan GDL dengan airbrush. Kandungan teflon yang digunakan adalah 20% terhadap bobot kertas karbon. Kertas karbon yang digunakan adalah Toray *carbon paper*, dengan struktur batang karbon yang dapat dilihat pada Gambar 4.1.(a) memiliki ketebalan 0,11 mm, dengan porositas 78%, bulk density 0,44 g/cm³.

Tujuan dari pelapisan ini adalah dengan melekatkan material hidrofobik kebatang-batang karbon akan membantu melepaskan ikatan air dengan batang karbon sehingga air tidak melekat dan terkumpul dalam GDL dan menyebabkan banjir.



Gambar 4.1. Perbandingan hasil treatment kertas karbon dengan penambahan teflon; (a) Kertas karbon tanpa teflon; (b) Kertas karbon dengan teflon jenis PTFE; (c) Kertas Karbon dengan teflon jenis FEP

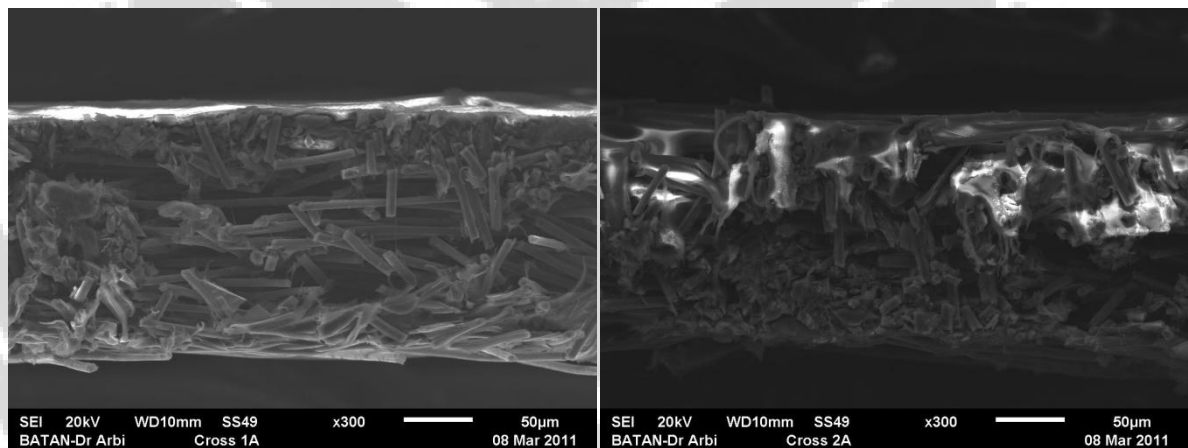
Berdasarkan Gambar 4.1 terlihat teflon melekat pada batang-batang karbon, sebagian menutupi rongga antar karbon sehingga rongganya menjadi lebih kecil. Jika dibandingkan kerapatan rongga antara kertas karbon dengan PTFE dibandingkan dengan FEP seperti Gambar 4.2 terlihat bahwa rongga yang dihasilkan akibat penambahan teflon lebih besar jika menggunakan FEP. Hal ini disebabkan karena FEP memiliki ukuran partikel $0,3 \mu\text{m}$ lebih kecil dibandingkan dengan PTFE, sehingga hanya sebagian kecil FEP tertahan oleh serat karbon dan sebagian lainnya masuk ke dalam rongga karbon. Sebaliknya, ukuran PTFE yang besar $0,5 \mu\text{m}$ sebagian besar tertahan oleh serat karbon dan kemudian mencair ketika dipanaskan membentuk lapisan film yang lebih besar dibandingkan film yang dihasilkan oleh FEP.



(a)

(b)

Gambar 4.2. Kertas karbon dengan teflon (a) PTFE (b) FEP (foto SEM perbesaran 200x)



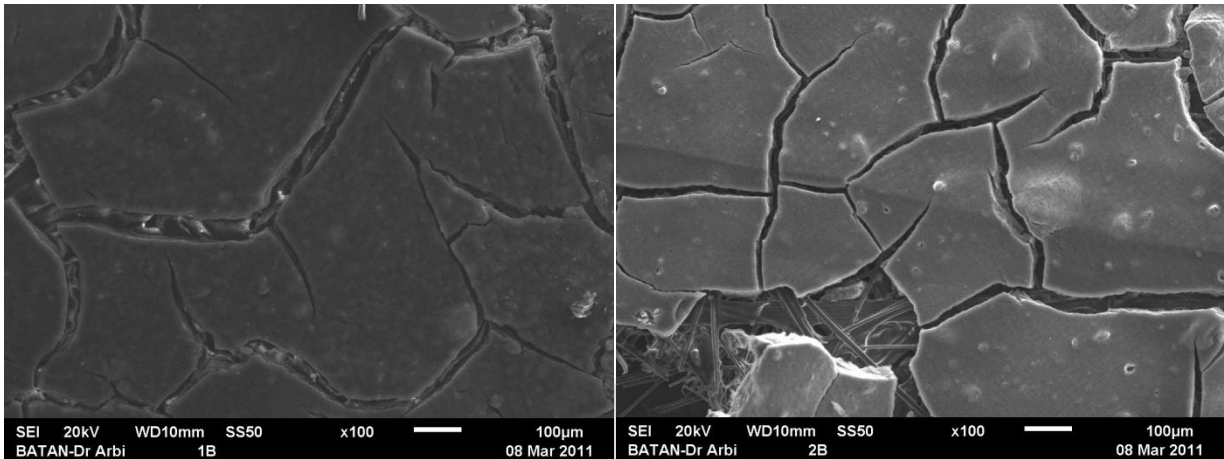
(a)

(b)

Gambar 4.3. Kertas karbon dengan teflon (a) PTFE (b) FEP (foto SEM cross section perbesaran 300x)

Jika melihat pada hasil SEM potongan melintang (Gambar 4.3) maka terlihat bahwa lapisan PTFE hanya mampu melapisi bagian permukaan atas dari kertas karbon, sedangkan dengan menggunakan FEP mampu menembus hingga ketengah lapisan kertas karbon.

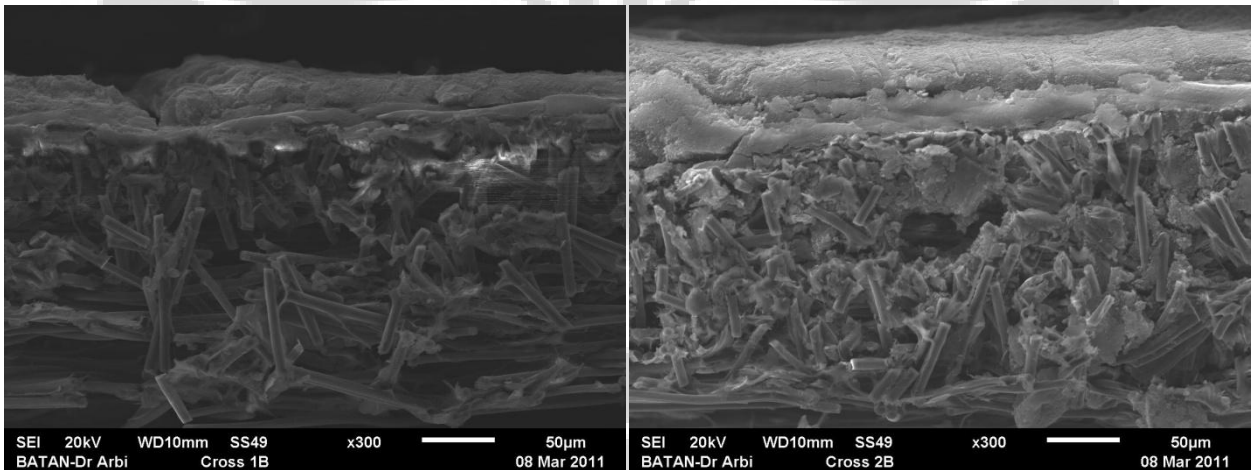
Setelah penambahan teflon, maka percobaan dilanjutkan dengan pembuatan lapisan *Microporous Layer* (MPL), MPL terdiri dari kandungan karbon dan teflon dengan kandungan teflon 20% (Wiranata, 2010). MPL tersebut dilapisi dengan metoda penyemprotan (*spray*). Hasil pelapisan MPL dapat dilihat pada Gambar 4.4



(a)

(b)

Gambar 4.4. Pelapisan MPL diatas kertas karbon berteflon; (a) PTFE; (b) FEP (foto SEM perbesaran 100x)



(a)

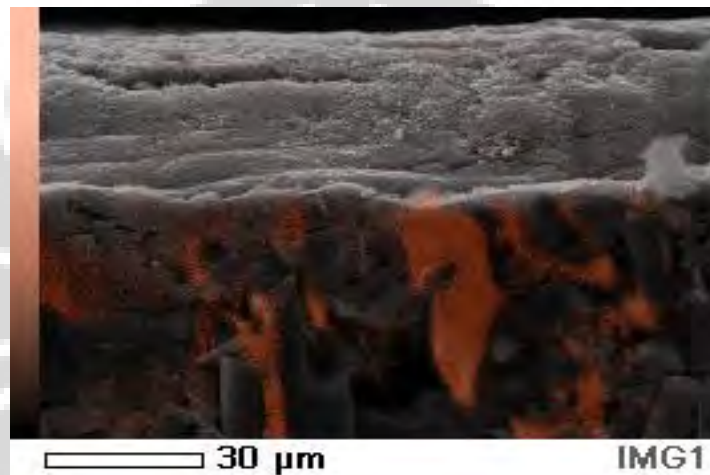
(b)

Gambar 4.5. Pelapisan MPL diatas kertas karbon berteflon; (a) PTFE; (b) FEP (foto SEM *cross section* perbesaran 300x)

Struktur permukaan lapisan kedua contoh diatas adalah sama dikarenakan menggunakan komposisi dan perlakuan yang sama, yang membedakan adalah kandungan teflon masing-masing contoh, tampak keduanya membentuk patahan/retakan pada permukaan lapisan. Jika dilihat dari hasil SEM potongan penampang (Gambar 4.5) terlihat bahwa MPL yang dilapisi pada permukaan kertas karbon FEP mampu menembus hingga bagian tengah lapisan, sedangkan pada permukaan kertas karbon PTFE hanya mampu diatas permukaannya saja. Ini dikarenakan karena besarnya rongga antar karbon yang tertutupi oleh sebagian teflon

sehingga kertas karbon FEP yang memiliki rongga yang besar mampu berikatan dengan MPL hingga tengah lapisan.

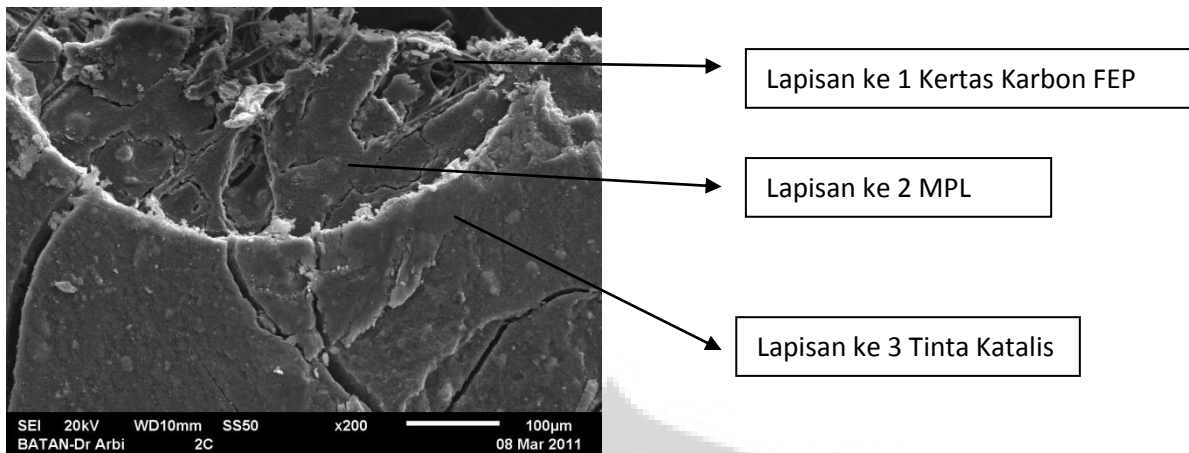
Dengan menggunakan foto SEM EDX (Gambar 4.6) maka kandungan Fluor dalam lapisan mampu terdeteksi hingga ketengah lapisan. Adanya ikatan yang baik antara teflon dengan lapisan penyangganya diharapkan mampu mengatasi permasalahan adanya air ditengah lapisan sehingga air mampu terdorong keluar. Warna jingga pada Gambar 4.6 merupakan hasil *scanning* terhadap unsur fluor yang merupakan unsur utama dari teflon.



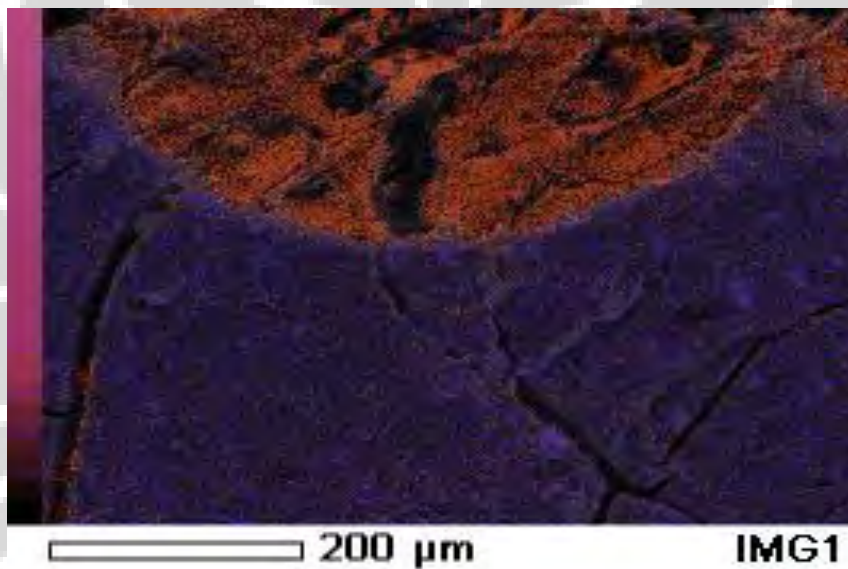
Gambar 4.6. Foto SEM EDX unsur Fluor (warna jingga) pada potongan melintang lapisan elektroda (teflon jenis FEP)

Berdasarkan Gambaran foto SEM diatas terlihat bahwa FEP memiliki kemampuan lebih baik untuk terserap kedalam lapisan dibanding PTFE, hal ini dibutuhkan agar lapisan dapat berikatan kuat tidak hanya dipermukaan lapisan saja namun terikat hingga kedalam lapisannya sehingga dengan sifat hidrofobiknya mampu menarik air dari dalam lapisan menuju luar lapisan difusi gas. FEP juga memiliki titik leleh lebih rendah dibanding PTFE (FEP=260°C, PTFE=350°C), sehingga dalam proses pembuatan tidak memerlukan energi yang lebih banyak.

Setelah pelapisan MPL dilanjutkan dengan pelapisan tinta katalis, katalis dibuat dengan komposisi Pt/C, Nafion, Air dan glikol. Hasil pelapisan dapat dilihat pada foto SEM Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Foto SEM lapisan tinta katalis perbesaran 200x



Gambar 4.8. Foto SEM EDX pada permukaan (biru:lapisan katalis, jingga:lapisan MPL)

Adanya Platina (Pt) yang berperan sebagai katalis dalam lapisan ketiga (lapisan tinta katalis) membuat lapisan ini sebagai lapisan inti terjadinya reaksi elektrokimia, dimana air terbentuk mulai pada lapisan ini. Kandungan Nafion yang berperan sebagai penghantar ion H^+ untuk bertemu dengan ion O^- dan membentuk air. Terbentuknya air dari mulai embun kecil hingga menjadi embun besar divisualisasikan oleh Kaviany (2009) dalam Gambar 2.11.

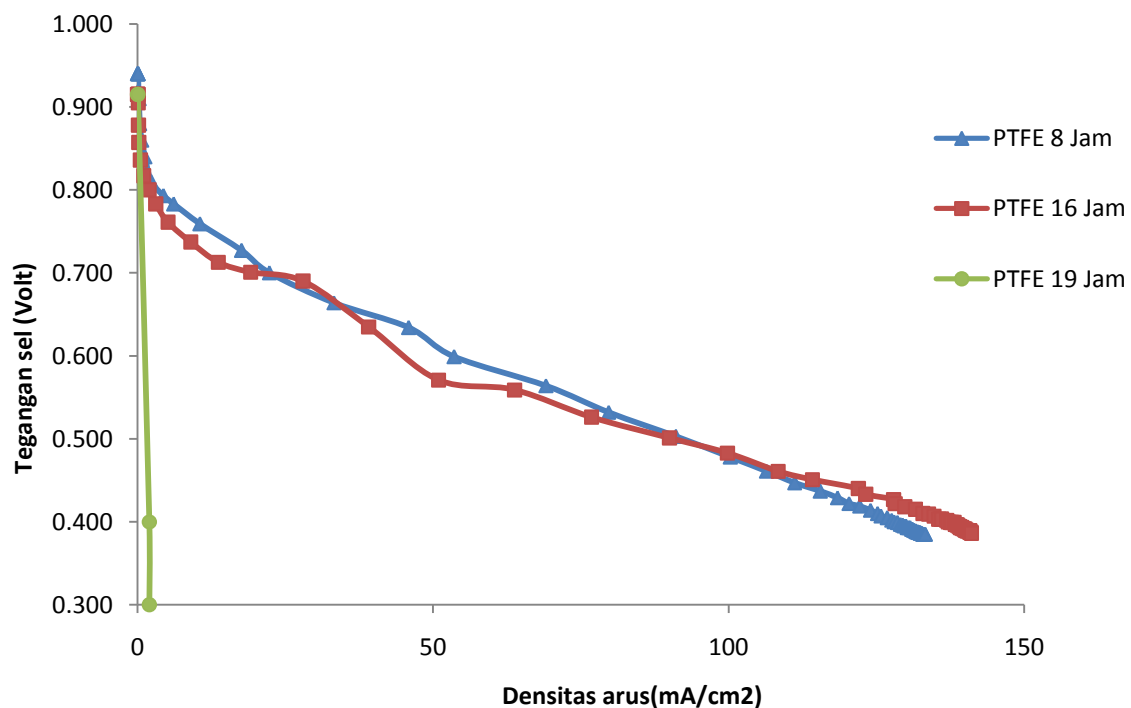
Pada Gambar 4.8 warna biru menunjukkan adanya katalis Platina diatas permukaan lapisan tinta katalis, juga sebagai indikator batasan antar lapisan katalis dengan lapisan MPL. Warna jingga merupakan indikator kandungan Fluor dalam teflon yang merupakan indikasi dari lapisan MPL.

4.1.2. Uji Polarisasi

Setelah proses pelapisan katalis selesai dilakukan proses dilanjutkan dengan pembuatan MEA yaitu dengan menumpuk membran polimer diantara kedua elektroda, kemudian ditekan pada tekanan 441 psi dengan suhu 130°C. MEA yang telah selesai dibuat kemudian dilakukan uji polarisasi satu sel. Uji satu sel merupakan pengukuran kinerja PEMFC yang dilakukan dengan cara mengukur tegangan dan arus yang dihasilkan PEMFC dalam kondisi pembebanan tertentu. Pada Laboratorium P3TKEBT, uji satu sel dilakukan dengan instrumen DC *Elektronik Load*.

4.1.2.1. Uji Polarisasi MEA Dengan Kandungan PTFE

Teflon berjenis PTFE ditambahkan kedalam lapisan GDL dan MPL dengan kandungan masing-masing 20%, lalu MEA yang dibuat tersebut diuji kemampuannya selama 8 jam/hari sehingga dihasilkan grafik polarisasi seperti dibawah ini.

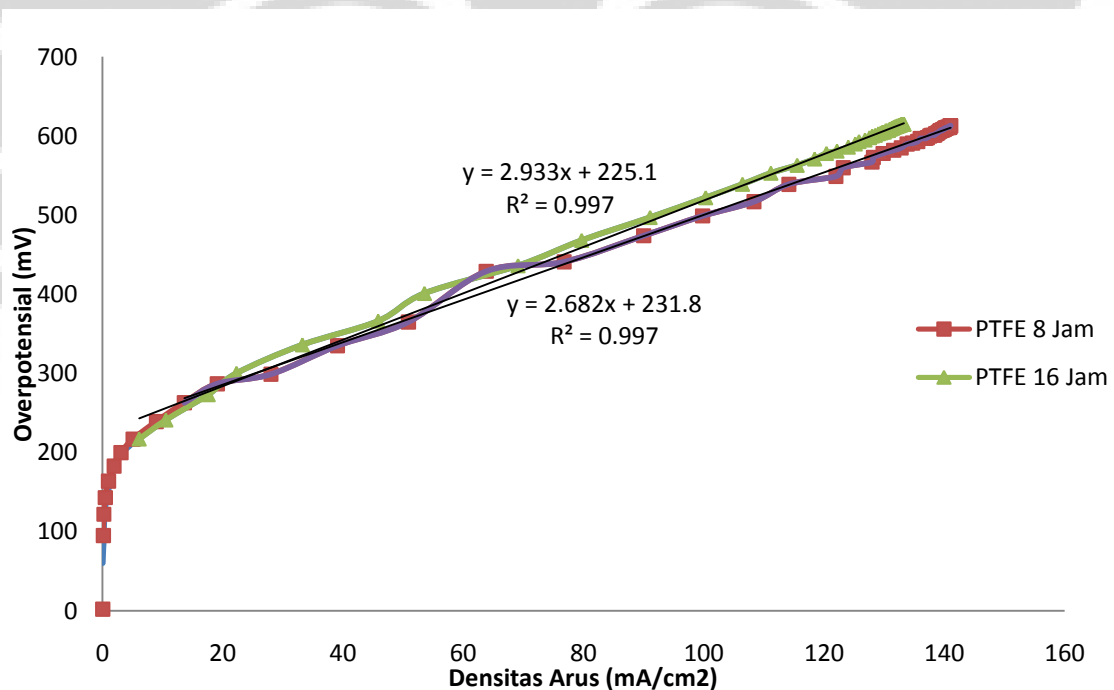


Gambar 4.9. Uji Polarisasi MEA dengan PTFE (PEMFC, Tekanan gas 10 psig, temp 25°C, Pt 0,4mg/cm²)

Gambar 4.9 merupakan grafik hasil uji polarisasi terhadap MEA yang mengandung teflon berjenis PTFE. Pengujian berlangsung selama 8 jam/hari, namun pada hari kedua hasil

polarisasi cenderung menurun. Berdasarkan kurva polarisasi di atas akan dianalisa penyebab penurunan tegangan (*losses*) akibat *ohmic losses* yang terjadi pada *current density* menengah. *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 MPL, lapisan GDL, *bipolar plate*, *current collector*, serta rangkaian-rangkaian luar. Kualitas *interface* atau pertemuan antar lapisan di atas juga sangat berpengaruh terhadap besarnya resistensi yang diterima oleh elektron. Pada percobaan ini, *cell stack* serta keseluruhan sistem yang digunakan seragam. Preparasi katalis juga dilakukan secara bersamaan menggunakan formula yang sama sehingga perbedaan yang terjadi pada *ohmic losses* hanya disebabkan oleh perbedaan kondisi lapisan MPL serta *interface*-nya dengan lapisan katalis.



Gambar 4.10. Over Potensial MEA dengan PTFE (PEMFC, Tekanan gas 10 psig, temp 25°C, Pt 0,4mg/cm²)

Dari Gambar 4.10 diatas didapat perhitungan hambatan yang terjadi pada MEA yang mengandung PTFE dalam 16 jam adalah pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Nilai Resistance MEA dengan PTFE

Pengujian MEA	r ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
MEA 8 Jam	2,682
MEA 16 Jam	2,933

Pada saat pengujian MEA dengan PTFE di hari ketiga terjadi penurunan daya yang sangat tinggi sehingga tidak dapat diukur arus dan voltasenya. Dari Tabel 4.1 tersebut terlihat terjadinya peningkatan hambatan sebesar $0,251 \Omega \cdot \text{cm}^2$ pada 16 jam pengujian sebelum akhirnya drop pada jam ke19. Setelah dilakukan pembongkaran fuel cell didapati kondisi dalam stack masih mengandung banyak air (Gambar 4.11) dan kondisi MEA ketika dikeluarkan tampak sedikit terbuka ikatan elektroda terhadap membrannya (Gambar 4.12).

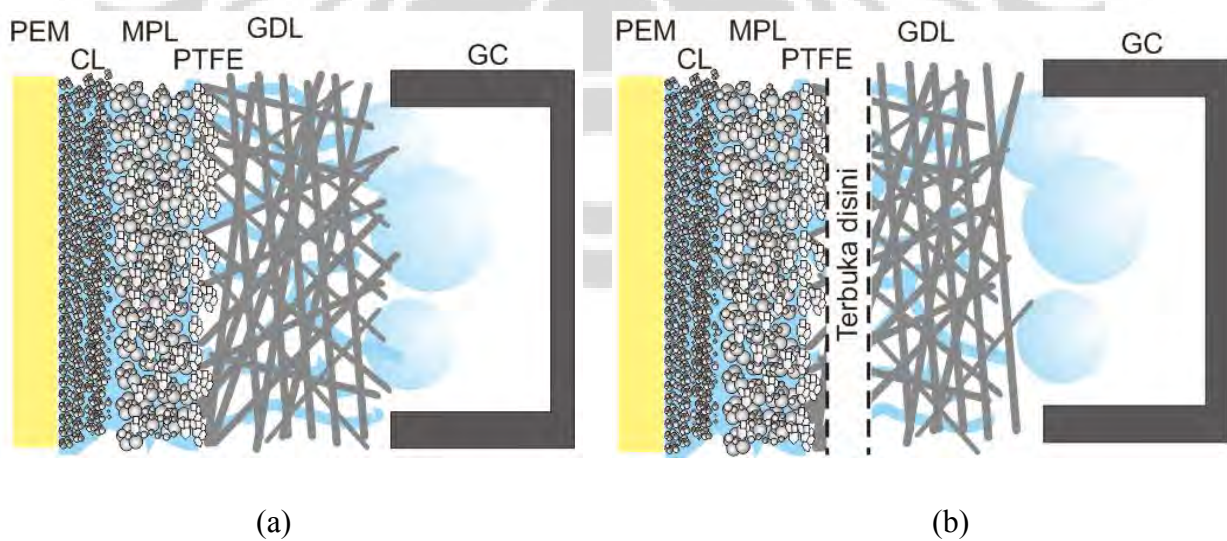


Gambar 4.11. Kondisi Plat Grafit bagian dalam pengujian MEA dengan PTFE



Gambar 4.12. Kondisi MEA dengan PTFE setelah pengujian 16 jam

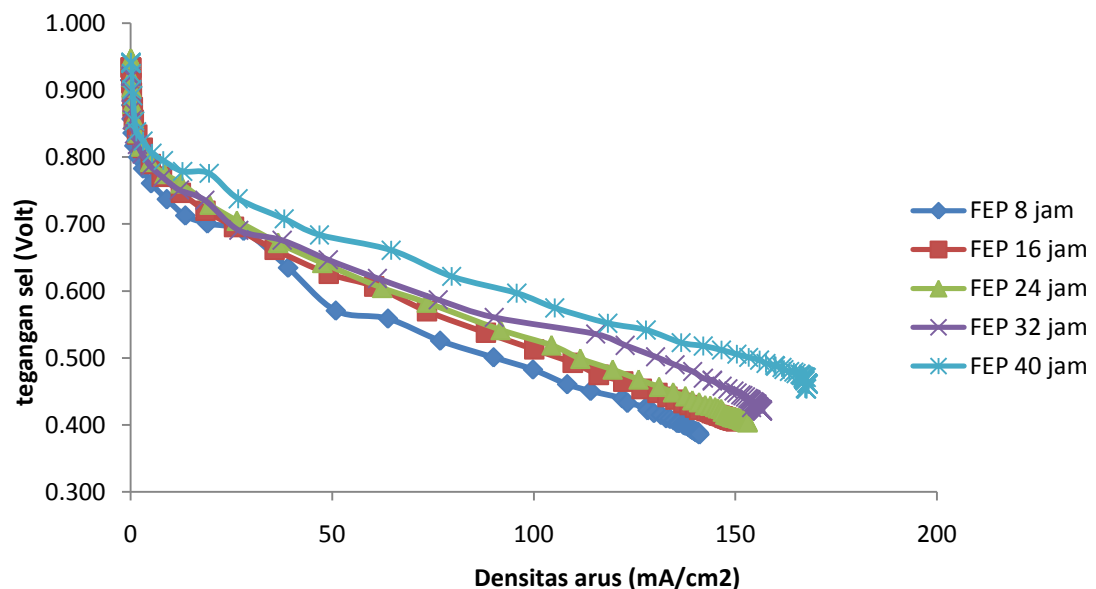
Penempatan PTFE diantara lapisan katalis dan GDL dimaksudkan untuk melancarkan jalan air ke dalam GDL, meminimalkan resistansi kontak listrik dengan lapisan katalis, dan mencegah tinta lapisan katalis bocor ke GDL. Hal tersebut akan meningkatkan pemanfaatan katalis dan mengurangi kecenderungan banjir elektroda (Lim dan Wang, 2004). Kondisi basah pada plat grafit mengindikasikan bahwa PTFE telah berperan sangat baik untuk mengalirkan air hasil reaksi dari dalam elektroda menuju plat grafit. Namun terjadinya pelepasan ikatan antar lapisan pada MEA disebabkan karena ikatan PTFE hanya mengikat pada permukaan lapisan GDL saja seperti yang terlihat pada foto SEM Gambar 4.3.(a) dimana terlihat PTFE tidak masuk kedalam pori-pori GDL dan terkonsentrasi hanya pada permukaan saja.



Gambar 4.13. Ilustrasi Lapisan Elektroda MEA dengan PTFE; (a) kondisi awal pengujian; (b) kondisi akhir pengujian

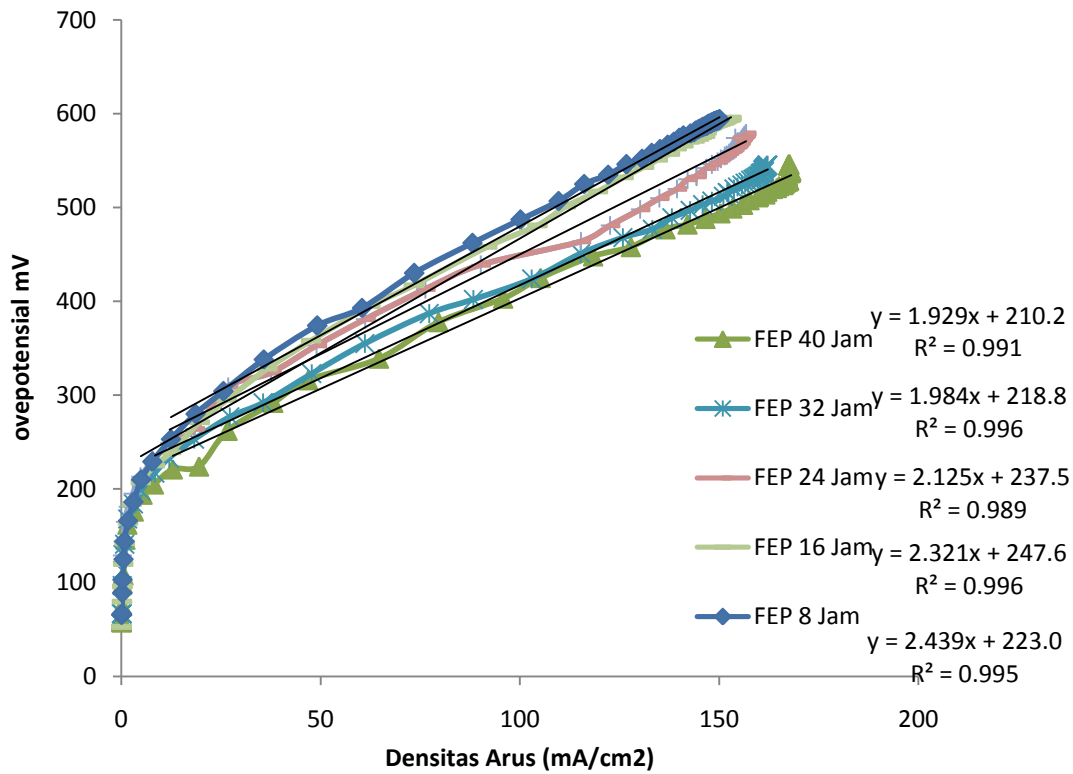
Gambar 4.13 ilustrasi diatas dibuat berdasarkan hasil foto SEM (gambar 4.3.(a) dan gambar 4.5.(a)), dimana kandungan PTFE dalam MPL berikatan kuat dengan PTFE pada permukaan GDL, dikarenakan sifat kertas karbon yang sangat rapuh sehingga tidak mampu menahan tekanan air yang terdorong dari lapisan bagian dalam elektroda sehingga pada saat pengujian hari ke tiga (>16 jam) ikatan antara PTFE dengan GDL terlepas. Terlepasnya ikatan antara lapisan MPL dengan GDL menyebabkan tidak mampu mengalirnya ion listrik untuk mengalir menuju plat pengumpul arus.

4.1.2.2. Uji Polarisasi MEA dengan kandungan FEP



Gambar 4.14. Uji Polarisasi MEA dengan FEP (PEMFC, Tekanan gas 10 psig, temp 25°C, Pt 0,4mg/cm²)

Dari Gambar 4.14 MEA FEP memiliki kemampuan yang baik dikarenakan mampu bertahan lebih lama dan lebih baik. MEA FEP diuji selama 8 jam hingga 40 jam. Peningkatan terjadi didaerah Ohmic dimana area tersebut mengindikasikan peningkatan dikarenakan transportasi ion berjalan meningkat.



Gambar 4.15. Overpotensial MEA dengan FEP (PEMFC, Tekanan gas 10 psig, temp 25°C, Pt 0,4mg/cm²)

Hambatan Ohmik yang terjadi selama pengujian MEA ini terlihat pada Gambar 4.15 dan terangkum pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Nilai Resistance MEA dengan FEP

Pengujian MEA	r (Ω.cm ²)
MEA 8 jam	2,439
MEA 16 jam	2,321
MEA 24 jam	2,125
MEA 32 jam	1,984
MEA 40 Jam	1,929

Hambatan yang terdapat pada area Ohmik terus menurun terhadap lamanya pengujian, ini mengindikasikan bahwa konduktifitas elektroda meningkat. Salah satu penyebabnya adalah meningkatnya jumlah air hasil reaksi yang mengalir keluar dan memenuhi pori-pori didalam elektroda. Air diperlukan sebagai konduktor pada membran dan konduktor ion di lapisan katalis untuk konduktansi proton. Semakin tinggi kadar air, semakin baik konduktivitas ionic (Zhigang dan Kaufman, 2002).

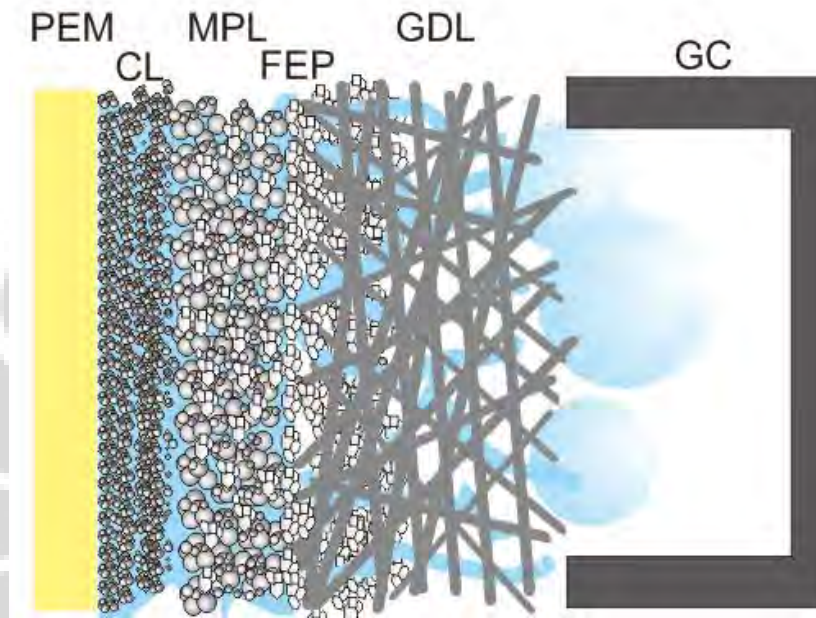


Gambar 4.16. Kondisi Plat Grafit bagian dalam pengujian MEA dengan FEP



Gambar 4.17. Kondisi MEA dengan FEP setelah pengujian 40 jam

Setelah pengujian selama 40 jam kondisi plat grafit pada saluran gas (Gambar 4.16) terlihat basah namun airnya tidak sebanyak pada MEA PTFE (Gambar 4.11), FEP juga berhasil mengeluarkan molekul air dari dalam lapisan elektroda keluar menuju plat grafit dimana air yang keluar terdorong langsung oleh gas keluar dari fuel cell. Kondisi MEA juga sangat baik, ikatan antar lapisan pada elektroda masih melekat dengan baik (Gambar 4.17).



Gambar 4.18. Ilustrasi Elektroda MEA dengan FEP

Gambar 4.18 berdasarkan hasil foto SEM (Gambar 4.3(b), Gambar 4.5(b) dan Gambar 4.6). Gambar tersebut memperlihatkan bahwa FEP mampu menyerap hingga sebagian dalam lapisan GDL. FEP membuat ikatan yang kuat antara MPL dengan GDL, dan juga sangat baik menyalurkan air menuju keluar lapisan elektroda. Banyaknya air bersifat sebagai konduktor yang baik dalam rongga-rongga elektroda menyebabkan meningkatnya konduktifitas MEA.



(a)



(b)

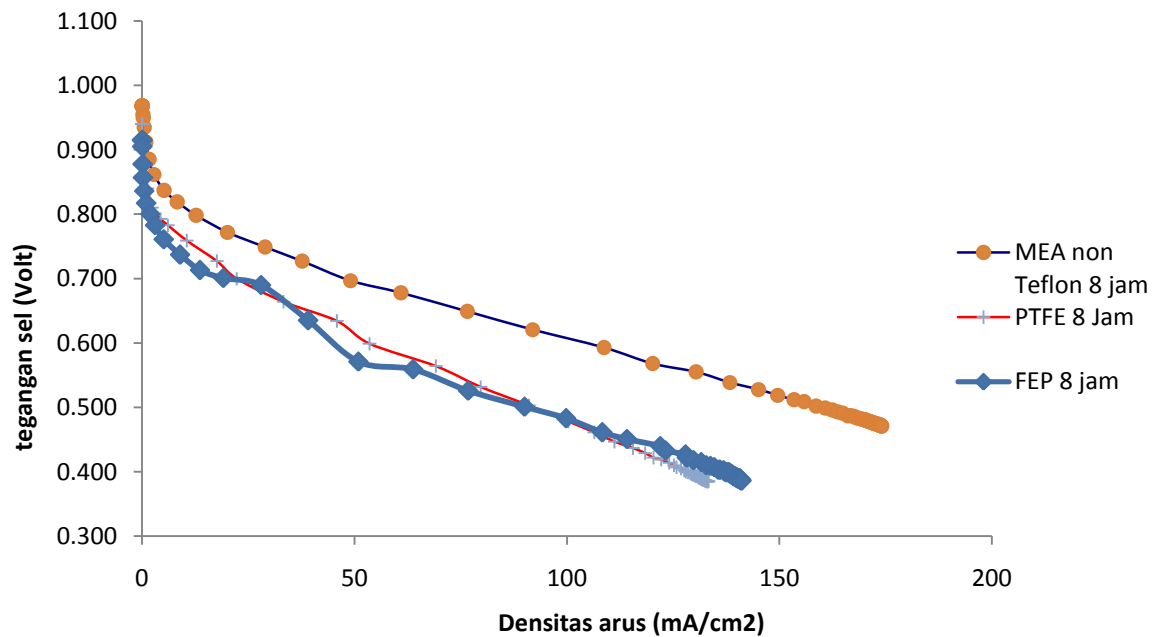
Gambar 4.19. Hasil keluaran air hasil samping reaksi selama 8 jam; (a) MEA PTFE, (b) MEA FEP

Banyaknya air yang keluar dari fuel cell merupakan indikasi bahwa reaksi berjalan dengan baik dan mampu mengalir dengan baik dari dalam lapisan elektroda. Gambar 4.19 dan tabel 4.3 merupakan perbandingan jumlah volume air yang dikeluarkan oleh MEA yang mengandung PTFE(a) dan FEP(b). Air yang dihasilkan oleh MEA FEP lebih banyak 3 kali dibandingkan air yang dihasilkan oleh MEA PTFE, membuktikan bahwa FEP mampu mendorong air keluar lebih baik dari PTFE.

Tabel 4.3. Volume keluaran air dari PEMFC

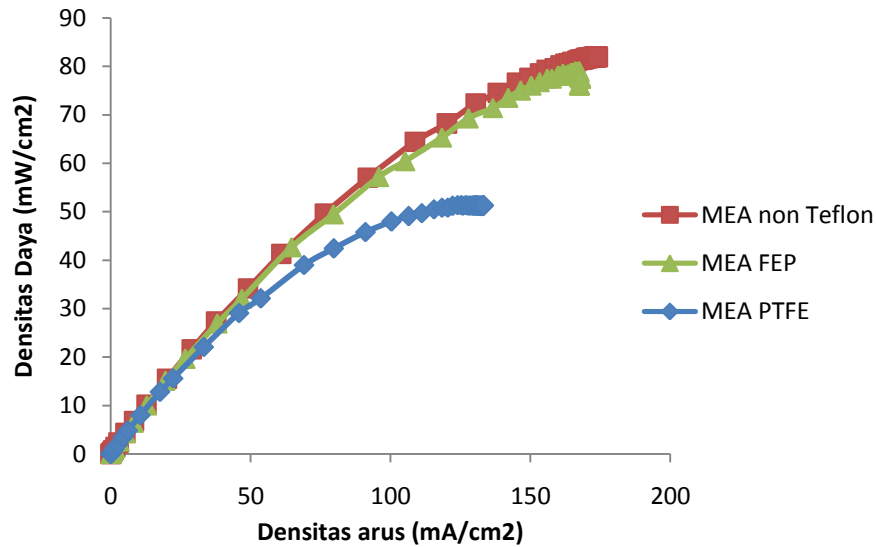
Sample	Volume H ₂ O output
MEA tanpa Teflon	0,87 ml / jam
Sample A (MEA dengan PTFE)	1,25 ml / jam
Sample B (MEA dengan FEP)	4,35 ml / jam

Kecilnya keluaran air dari fuel cell tidak berarti bahwa reaksi tidak berjalan dengan baik, seperti terlihat pada Gambar 4.20 walaupun MEA tanpa teflon hanya mengeluarkan air yang sedikit namun memiliki kualitas daya yang sangat baik. Banyaknya air yang dihasilkan dalam reaksi sebanding dengan meningkatnya kualitas arus yang dihasilkan, tetapi kemampuannya mengalir keluar tergantung kepada komponen yang terkandung dalam elektroda.



Gambar 4.20. Perbandingan Polarisasi MEA terhadap penggunaan teflon dalam GDL dan MPL, 8 jam operasional (PEMFC , tekanan operasi 10 psig, suhu 25°C, Pt 0,4mg/cm²).

Pada 8 jam pertama operasional, MEA yang mengandung Teflon baik itu PTFE dan FEP memiliki konduktifitas yang sangat rendah, dikarenakan adanya sifat non-konduktif dari teflon menjadi penghambat mengalirnya ion. Pada 8 jam pertama, air yang terbentuk berjalan lambat dikarenakan sedikitnya ion negatif dari yang dibutuhkan tidak mengalir dengan baik. Air memiliki sifat konduktif yang dibutuhkan untuk menghantarkan ion tersebut.



Gambar 4.21 Perbandingan Daya MEA maksimum terhadap penggunaan Teflon dalam GDL dan MPL (PEMFC , tekanan operasi 10 psig, suhu 25°C, Pt 0,4mg/cm²).

Daya maksimum yang dihasilkan oleh MEA yang mengandung teflon memang masih lebih rendah dibandingkan dengan daya yang dihasilkan tanpa menggunakan teflon (Gambar 4.21). Sifat teflon yang non konduktif menyebabkan meningkatnya hambatan didalam elektroda, namun tanpa adanya teflon didalam MEA menyebabkan manajemen air didalam elektroda tidak baik. Banjir atau flooding yang terjadi didalam elektroda malah mampu menyebabkan perubahan struktur didalamnya sehingga MEA tersebut langsung turun kualitasnya. MEA tanpa teflon meskipun memiliki daya yang tinggi namun memiliki jam operasional yang sangat rendah (Tabel 4.4).

Tabel 4.4. Waktu Operasional MEA terhadap penggunaan Teflon

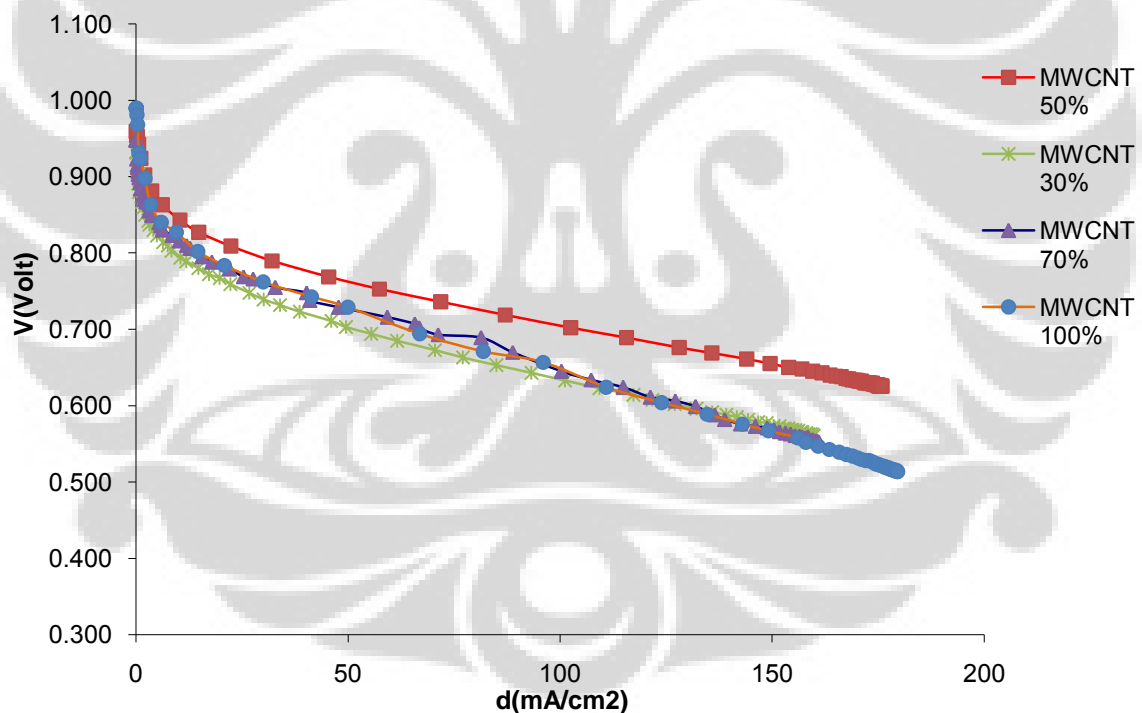
Sample	Waktu operasional
MEA tanpa Teflon	± 11 jam
Sample A (MEA dengan PTFE)	± 19 jam
Sample B (MEA dengan FEP)	± 40 jam

4.2. PENINGKATAN KUALITAS DENGAN MEMANFAATKAN CARBON NANOTUBE (CNT)

Pemanfaatan teflon untuk meningkatkan kualitas MEA melalui peningkatan ketahanan elektroda terhadap air telah dilakukan, untuk terus meningkatkan kualitasnya maka komposisi MPL perlu dilakukan pengembangan yaitu salah satunya dengan memanfaatkan karbon nanotube sebagai pengganti karbon vulcan.

4.2.1. Optimalisasi Kandungan MWCNT

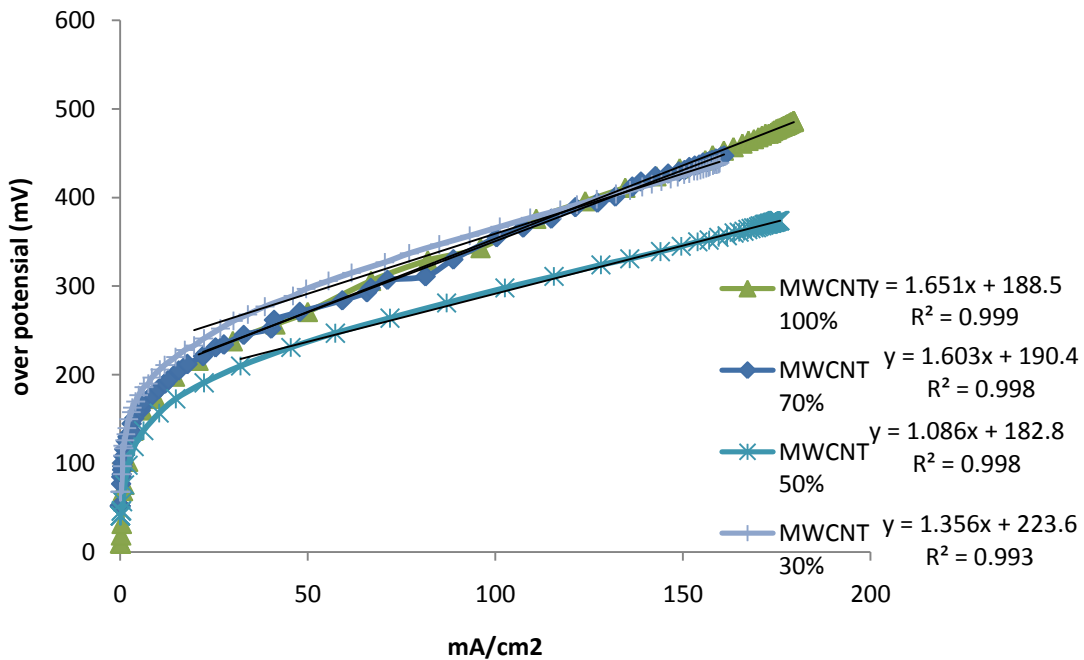
Variasi komposisi telah dilakukan untuk mengetahui optimalitas komposisi pemanfaatan CNT sebagai pengganti karbon vulcan. CNT yang diuji coba pertama kali berjenis Multi Wall Carbon Nanotube (MWCNT). Kemampuan MEA dengan variasi komposisi MWCNT dapat dilihat pada Gambar 4.22



Gambar 4.22. Polarisasi MEA dengan MWCNT pada MPL (PEMFC , tekanan operasi 10 psig, suhu 25°C, Pt 0,4mg/cm²).

Dari Gambar 4.23 dan Tabel 4.5 dihasilkan bahwa adanya kandungan MWCNT didalam MPL dapat meningkatkan konduktivitas, terlihat ketika penambahan MWCNT 30% dan 50%, akan tetapi setelah penambahan MWCNT berlebih dari 70% hingga 100% terjadi

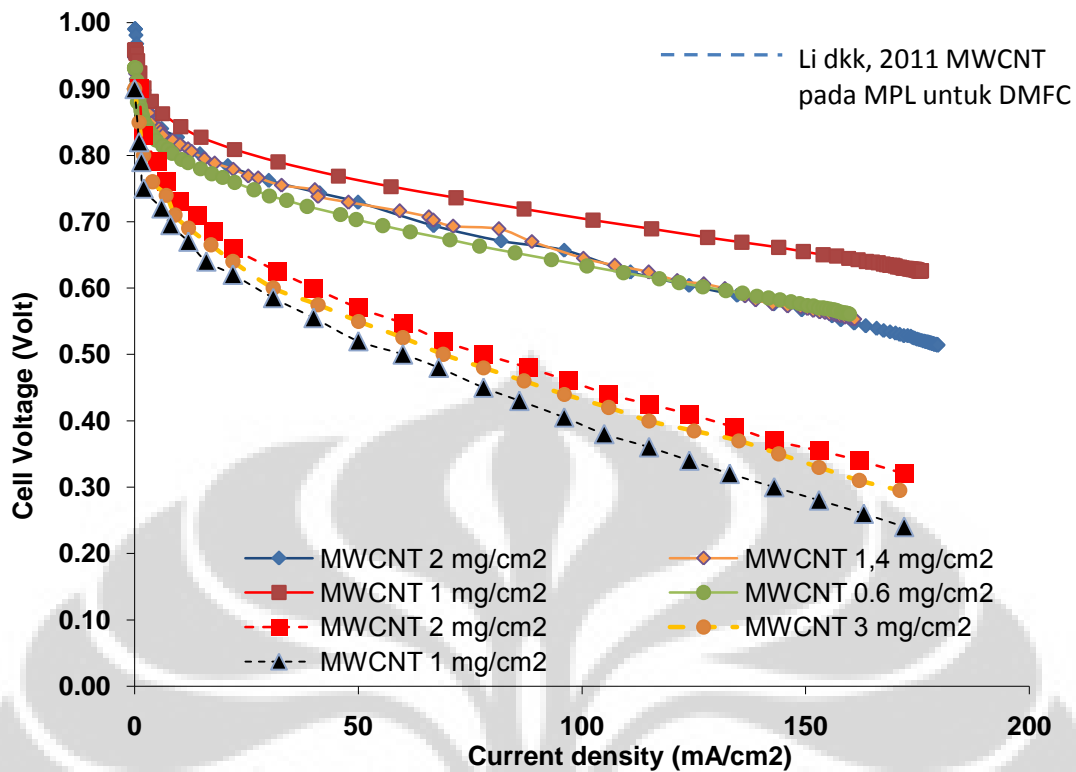
peningkatan resistansi didalam elektroda. Yang jadi penyebabnya adalah ketika penambahan MWCNT dilakukan maka ketebalan lapisan MPL semakin meningkat, meningkatnya konduktansi lebih kecil dibandingkan dengan meningkatnya hambatan akibat jarak transport ion semakin jauh.



Gambar 4.23. Grafik Over Potensial MEA dengan MWCNT pada MPL

Tabel 4.5. Nilai Resistance MEA dengan MWCNT

Pengujian MEA	r ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
MEA MWCNT 100%	1,651
MEA MWCNT 70%	1,603
MEA MWCNT 50%	1,086
MEA MWCNT 30%	1,356



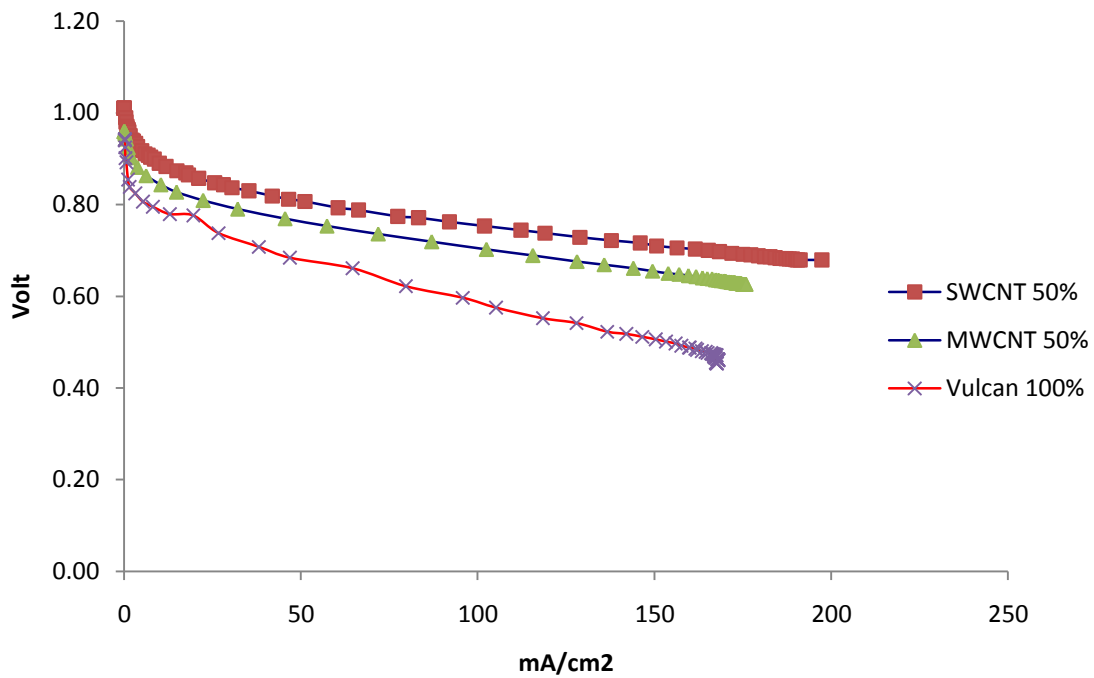
Gambar 4.24. Perbandingan hasil pemanfaatan MWCNT pada MPL milik Li dkk (2011)

Jika dibandingkan hasil pemanfaatan MWCNT pada MPL dengan milik Li dkk (2011), ada fenomena yang sama dimana pemakaian MWCNT yang lebih besar dari jumlah optimalnya akan menurunkan kualitas MEA nya. Kualitas MEA milik Li lebih rendah dari hasil penelitian kami dikarenakan diuji dengan menggunakan DMFC, sedangkan kami menggunakan PEMFC.

4.2.2. Pemanfaatan SWCNT

Setelah didapatkan komposisi CNT yang optimal (50%) dalam pemanfaatannya pada MPL, maka penelitian dilanjutkan dengan mengganti MWCNT 50% dengan SWCNT 50%, dengan harapan ada kontribusi lebih untuk meningkatkan kualitas dari MEA.

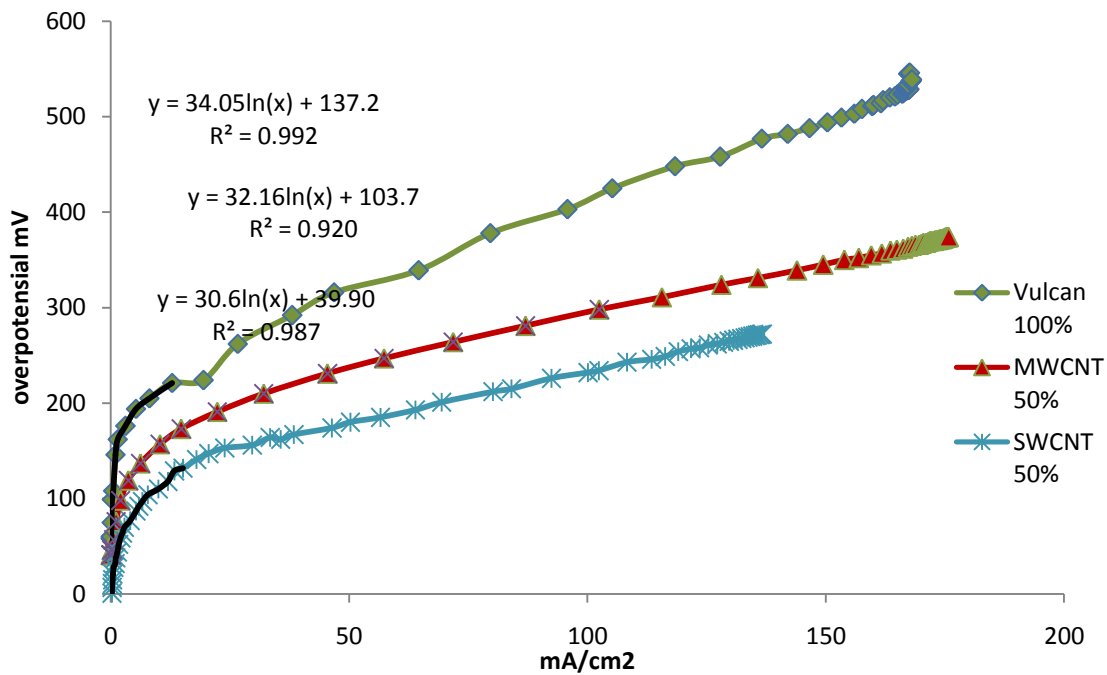
Wu (2009), melakukan percobaan pada Fuel Cell berbahan bakar metanol (DMFC), memanfaatkan CNT untuk penyangga katalisnya dan mendapatkan bahwa SWCNT memiliki luasan area aktif yang lebih baik dari MWCNT dan Vulcan xc72, sehingga mampu meningkatkan nilai aktifasi MEA dari DMFC nya.



Gambar 4.25. Polarisasi Pemanfaatan Carbon Nanotube pada MPL (PEMFC , tekanan operasi 10 psig, suhu 25°C, Pt 0,4mg/cm²).

Berdasarkan Gambar 4.25 dengan memanfaatkan SWCNT 50% pada MPL mampu meningkatkan kualitas lebih baik dari MWCNT 50%. MWCNT mampu memberikan kontribusi peningkatan lebih dibanding jika hanya menggunakan vulcan saja. Untuk lebih jelasnya maka grafik tersebut akan dianalisa berdasarkan segment polarisasi yang terbentuk. Pertama adalah melihat polarisasi aktivasi yang terjadi pada MEA tersebut. Memanfaatkan CNT mampu meningkatkan kemampuan aktivasi dari MEA walaupun CNT hanya ditempatkan pada lapisan MPL saja. Untuk ketiga jenis MEA di atas dapat dibuat plot tafel untuk daerah *activation losses* yang ditunjukkan pada Gambar 4.26.

Untuk daerah aktivasi dapat dihitung nilai *charge transfer coefficient* (α) serta *exchange current density constant* (i_0) berdasarkan persamaan (2.7): . Dari persamaan ini dapat dihitung nilai α , yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.4 Nilai α menunjukkan besarnya proporsi energi listrik yang timbul saat perubahan laju reaksi. Nilai α berkisar 0,1 sampai 0,5. Makin besar nilainya, maka makin besar energi listrik yang dihasilkan dengan berubahnya laju reaksi.



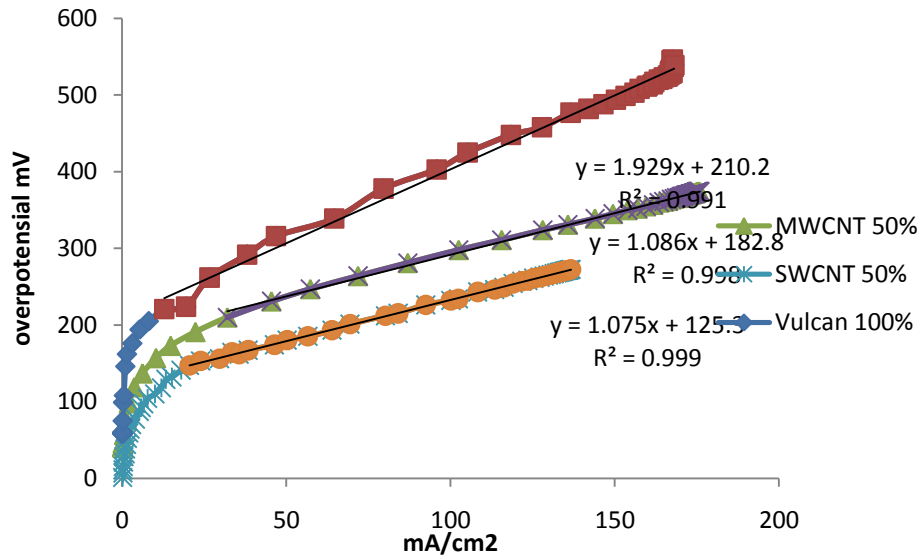
Gambar 4.26. Polarisasi aktivasi pemanfaatan CNT pada MPL

Tabel 4.6. Nilai *Charge Transfer Coefficient* (α) pemanfaatan CNT pada MPL

Sample	a	b	α
Vulcan 100%	34,05	137,2	0,377
MWCNT 50%	32,16	103,7	0,399
SWCNT 50%	30,61	39,9	0,419

Dari Tabel 4.4, SWCNT memiliki nilai koefisien transfer energi paling besar setelah MWCNT. Dan koefisien MWCNT lebih besar dari pada Vulcan, hasil tersebut menjelaskan bahwa CNT memberikan kontribusi peningkatan kualitas daripada hanya menggunakan vulcan pada MPLnya.

Analisa berikutnya berdasarkan *ohmic losses*. *Ohmic losses* terjadi karena adanya hambatan terhadap aliran elektron ke *bipolar plate*. Plotnya berupa garis lurus dengan persamaan $V = ir$. Di mana V adalah *overpotentials*, i adalah *current density*, serta r adalah area specific resistance. Plot polarisasi ohmik dari kedua jenis GDL ditunjukkan pada Gambar 4.27 di bawah ini.



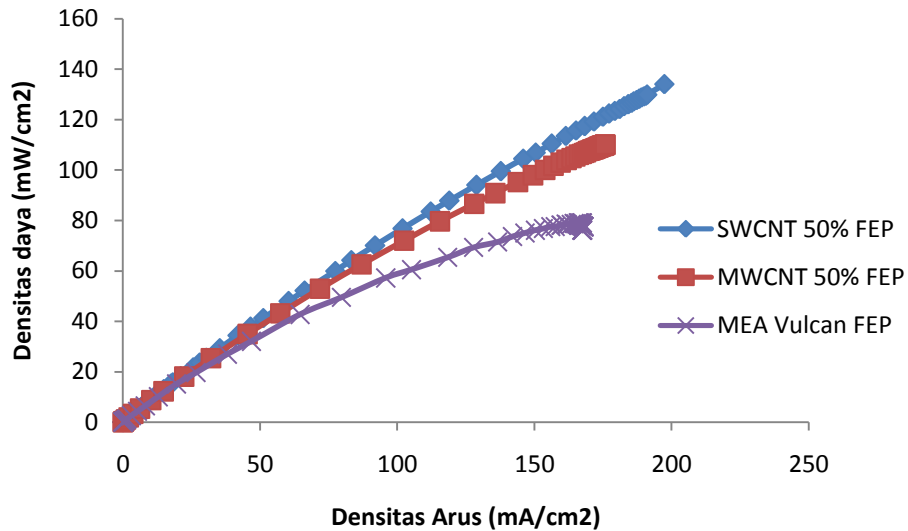
Gambar 4.27. Overpotensial hambatan ohmic pemanfaatan CNT

Dari hasil persamaan Gambar 4.26 diatas didapatkan nilai hambatan ohmic yang terbentuk karena pemanfaatan CNT ini pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Nilai Resistance MEA dengan MWCNT

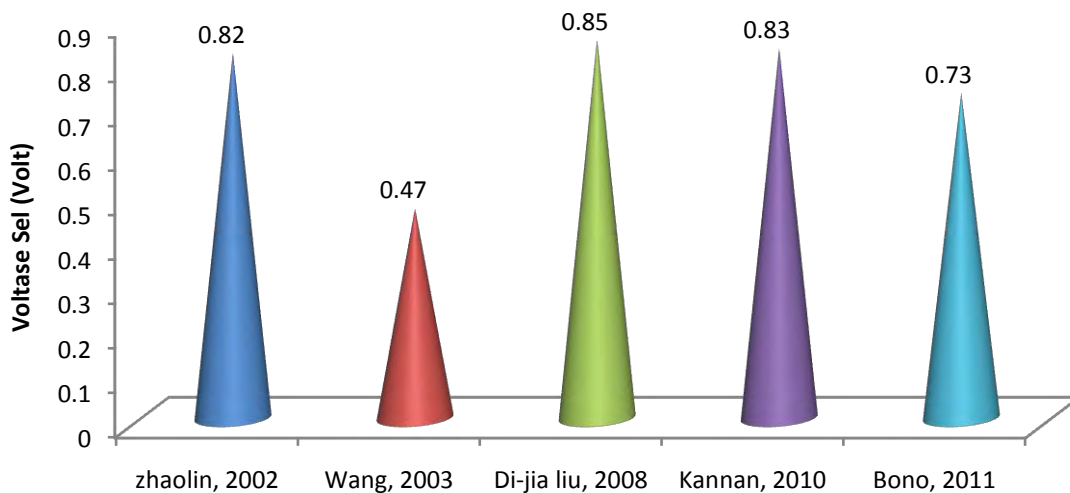
Sampel	r ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
MEA Vulcan 100%	1,929
MEA MWCNT 50%	1,086
MEA SWCNT 50%	1,075

Dalam Tabel 4.7 disimpulkan bahwa dengan mengganti 50% kandungan vulcan dengan MWCNT pada MPL mampu menurunkan hambatan sebanyak 43,7% dari hambatan yang sebelumnya $1,929 \Omega \text{cm}^2$ menjadi $1,086 \Omega \text{cm}^2$. Dan jika 50% vulcan pada MPL diganti dengan SWCNT mampu menurunkan hambatan sebesar 44,3% dari hambatan yang sebelumnya $1,929 \Omega \text{cm}^2$ menjadi $1,075 \Omega \text{cm}^2$.



Gambar 4.28. Densitas daya pemanfaatan CNT

Dari Gambar 4.28, pemanfaatan 50% MWCNT pada MPL yang mengandung Teflon FEP meningkatkan densitas daya sebesar 32 mW/cm² lebih besar dari pada hanya menggunakan karbon Vulcan saja. Dengan memanfaatkan 50% SWCNT pada MPL mampu menaikkan densitas daya sebesar 56 mW/cm² lebih besar dari pada hanya menggunakan karbon Vulcan saja.



Gambar 4.29. Pemanfaatan CNT pada MEA untuk PEMFC pada kerapatan arus 150 mA/cm²

Gambar 4.29 merupakan perbandingan hasil polarisasi terhadap pemanfaatan CNT pada MEA yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Keempat peneliti sebelumnya memanfaatkan CNT sebagai penyangga karbon untuk katalis pada lapisan katalis, sehingga memiliki kualitas yang lebih tinggi dikarenakan penempatan CNT yang berdekatan dengan terjadinya proses reaksi kimia. Transportasi ion yang masuk/keluar lapisan berjalan sangat baik karena konduktivitas yang tinggi pada lapisan katalis. Sedangkan yang kami lakukan adalah memanfaatkan CNT sebagai lapisan microporous (MPL). Ion yang dihantarkan pada lapisan MPL adalah ion yang keluar atau masuk kedalam lapisan katalis.

Zhaolin (2002), memanfaatkan CNT sebagai penyangga katalis dengan cara melakukan fungsionalisasi oksidasi dengan HNO_3 dan $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}_2\text{SO}_4$. Katalis platinum melekat pada permukaan luar CNT sehingga memiliki konduktivitas dan aktivasi yang tinggi. Menghasilkan tegangan sel 0,82 Volt pada densitas arus 150 mA/cm^2 . Wang (2003), melakukan hal yang sama yaitu memanfaatkan CNT sebagai penyangga katalis. CNT yang ditumbuhkan melalui deposisi uap kimia pada kertas karbon, menghasilkan tegangan sel sebesar 0,47 Volt pada densitas arus 150 mA/cm^2 . Kannan (2010), memanfaatkan CNT sebagai penyangga katalis dengan cara fungsionalisasi menggunakan asam citrat menghasilkan tegangan sel sebesar 0,83 Volt pada densitas arus 150 mA/cm^2 .

BAB 5

KESIMPULAN

Peningkatan kualitas MEA dari PEMFC telah dilakukan dengan cara menambahkan komponen Teflon dan CNT kedalam MPL pada elektroda. Dan didapatkan kesimpulan sebagai berikut ;

1. Didapatkan bahwa FEP memberikan ketahanan dan pengaturan air lebih baik dari PTFE dan mampu bertahan hingga lebih dari 40 jam operasional.
2. Kualitas daya maksimum yang dihasilkan dari MEA yang mengandung FEP adalah 79 mW/cm^2 , sedangkan daya maksimum yang dihasilkan MEA yang mengandung PTFE adalah 55 mW/cm^2 .
3. Komposisi optimal yang bisa dimanfaatkan untuk meningkatkan kualitas daya MEA adalah 50% MWCNT dari total karbon pada MPL.
4. Kualitas daya yang dihasilkan dari pemanfaatan 50%MWCNT adalah 110 mW/cm^2 , sedangkan kualitas daya yang dihasilkan dari pemanfaatan 50% SWCNT adalah 134 mW/cm^2 .

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Baghdadi, M. A. R. S. *Modelling of proton exchange membrane fuel cell performance based on semi-empirical equations*, Renewable Energy, 30, 1587 (2005).
- Antolini E, *Recent developments in polymer electrolyte fuel cell electrodes* J. Appl. Electrochem. 34, 563 (2004).
- Bernadi DM and M. W. Verbrugge, *A Mathematical Model of the Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cell* J. Electrochem. Soc. 139, 2477 (1992).
- Berning T and N. Djilali, *Three-dimensional Computational Analysis of Transport Phenomena in a PEM Fuel Cell - A Parametric Study* J. Power Sources 124, 440 (2003).
- Berning T., D. M. Lu and N. Djilali, *Three-Dimensional Computational Analysis of Transport Phenomena in a PEM Fuel Cell* J. Power Sources, 106, 284 (2002).
- Bevers D, M. Wöhr, K. Yasuda and K. Oguro, *Simulation of a polymer electrolyte fuel cell electrode* J. Appl. Electrochem. 27, 1254 (1997).
- Bockris J. O'M. and S. Srinivasan, *Fuel Cells: Their Electrochemistry*, McGraw-Hill, New York, (1969).
- Cheddie D and N. Munroe, *Review and Comparison of Approaches to Proton Exchange Membrane Fuel Cell Modeling* J. Power Sources 147, 72 (2005).
- Connel O, Michael J. *Carbon Nano Tubes : Property and Applications*. London: Taylor and Francis. (2006).
- Cooper, KR., Ramani V, Fenton JM, Kunz HRv. *Experimental Method and Data Analyses for PEFC*. Scribner Associates, Inc. North Carolina USA. (2005).
- Costamagna P, and S. Srinivasan, *Quantum Jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000; Part I Fundamental Scientific Aspects* J. Power Sources 102, 242 (2001).
- EG&G Technical Services, Inc. *Fuel Cell Handbook*, 7th Edition, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, November (2004).
- Fan S, M. G. Chapline, N. R. Franklin, T. W. Tombler, A. M. Cassell and H. Dai, *Self-oriented regular arrays of carbon nanotube and their field emission properties* Science 283, 512 (1999).

Frackowiak E and F. Béguin, *Electrochemical storage of energy in carbon nanotube and nanostructured carbons* Carbon 40, 1775 (2002).

Gharibi H and R. A. Mirzaie T, *Fabrication of gas-diffusion electrodes at various pressures and investigation of synergetic effects of mixed electrocatalysts on oxygen reduction reaction* J. Power Sources 115, 194 (2003).

Hoogers G, *Fuel Cell Technology Handbook*, CRC Press LLC, (2003).

Grot W.G., *Discovery and development of Nafion perfluorinated membranes*, Chem. Ind. 19, 647 (1985).

Kaviany.M, J.H. Nam, K.J. Lee, G.S. Hwang, C.J. Kim, *Microporous Layer for Water Morphology Control in PEMFC*, Int. J. Heat and Mass Transfer, 52, 2779-2791, (2009).

Koprinarov, N., M. Konstantinova, G. Pchelarov, dan M. Marinov. *Fullerene Structures Suitable For Fuel Cells Electrodes. Full Cell Technologies: State and Perspectives*. 81-95. Netherlands: Springer. (2005).

Koryta J, J. Dvořák and L. Kavan, *Principles of Electrochemistry*, 2nd Edition, John Wiley and Sons, Ltd, Chichester, (1993).

Kyotani T, S. Nakazaki, W.-H. Xu and A. Tomita, *Chemical modification of the inner walls of carbon nanotube by HNO₃ oxidation* Carbon 39, 782 (2001).

Larminie J, A. Dicks, *Fuel Cell System Explained*, John Wiley and Sons, Ltd, Chichester, (2000).

Lee S.J, S. Mukerjee, J. McBreen, Y. W. Rho, Y. T. Kho and T. H. Lee, *Effects of Nafion impregnation on performances of PEMFC electrodes* Electrochimica Acta 43, 3693 (1998).

Li Q, R. He, J. O. Jensen, and N. J. Bjerrum, *Fuel Cells*, 4, 147-159, (2004).

Li W, C. Liang, W. Zhou, J. Qiu, H. Li, G. Sun and Q. Xin, *Homogeneous and controllable Pt particles deposited on multi-wall carbon nanotube as cathode catalyst for direct methanol fuel cells* Carbon 42, 436 (2004).

Li W, C. Liang, W. Zhou, J. Qiu, Z. Zhou, G. Sun and Q. Xin, *Preparation and characterization of multi-walled carbon nanotube-supported platinum for cathode catalyst of direct methanol fuel cells* J. Phys. Chem. B 107, 6292 (2003).

Li.W , C. Liang, J. Qiu, W. Zhou, H. Han and Z. Wei et al. *Carbon nanotube as support for cathode catalyst of a direct methanol fuel cell* Carbon 40, 787 (2002).

Li.Y.S, T.S. Zhao, J.B. Xu, S.Y. Shen, W.W. Yang *Effect of cathode micro-porous layer on performance of anion-exchange membrane direct ethanol fuel cells* Journal of Power Sources 196 1802–1807, (2011).

Liu J, A. G. Rinzler, Hongjie Dai, Jason H. Hafner, R. Kelley Bradley, Peter J. Boul, Adrian Lu, Terry Iverson, Konstantin Shelimov, Chad B. Huffman, Fernando Rodriguez-Macias, Young-Seok Shon, T. Randall Lee, Daniel T. Colbert and Richard E. Smalley, *Fullerene Pipes* Science 280, 1253 (1998).

Liu Z, X. Lin, J. Y. Lee, W.e Zhang, M. Han, and L. M. Gan, *Preparation and Characterization of Platinum-Based Electrocatalysts on Multiwalled Carbon Nanotube for Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, Langmuir 18, 4054 (2002).

Matsumoto T, Komatsu T, Arai K, Yamazaki T, Kijima M, Shimizu H, Takasawa Y, Nakamura J *Efficient usage of highly dispersed Pt on carbon nanotube for electrode catalysts of polymer electrolyte fuel cells.*, Catal. Today, 90, 277 (2004).

Matsumoto T, Komatsu T, Arai K, Yamazaki T, Kijima M, Shimizu H, Takasawa Y, Nakamura J, *Reduction of Pt usage in fuel cell electrocatalyst with carbon nanotube electrodes*, Chem . Commun. 7, 840 (2004).

Mawhinney, DB, Naumenko V, Kuznetsova A, Yates J T Jr., Liu J and Smalley R E, *Infrared Spectral Evidence for the Etching of Carbon Nanotube: Ozone Oxidation at 298 K* J. Am. Chem. Soc. 122, 2383 (2000).

Nadrul Jamal, W.W.Purwanto, Bono Pranoto, Verina J.Wargadalam, , *Aplikasi Teknik Sputtering untuk Desposisi Katalis pada Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*, SEMINAR NASIONAL, ITS, Surabaya (2008).

Planeix J.M, Coustel, N., Coq, B. *Application of Carbon Nanotube as Supports in. Heterogeneous Catalysis* J. Am. Chem. Soc. 116, 7935 (1994).

Poh Chee Kok “*fabrication of membrane-electrode-assembly for polymer electrolyte membrane fuel cell*”, National University of Singapore (2007)

Rajesh, B., K. Ravindranathan Thampi, J.-M. Bonard, N. Xanthopoulos, H. J. Mathieu, and B. Viswanathan. *Carbon Nanotube Generated from Template Carbonization of Polyphenyl Acetylene as the Support for Electrooxidation of Methanol*. J. Phys. Chem. 107: 2701-2708. (2003).

Reddy, A. Leela Mohana dan S. Ramaprabhu. *Pt/SWNT-Pt/C Nanocomposite Electrocatalysts for Proton-Exchange Membrane Fuel Cells*. J. Phys. Chem., 111, 16138-16146. (2007).

Springer T.E., M. S. Wilson and S. Gottesfeld, *Modeling and Experimental Diagnostics in Polymer Electrolyte Fuel Cells*, J. Electrochem. Soc. 140, 3513 (1993).

Srinivasan S, D. Manko, H. Koch, M. Enayetullah, A. Appleby, *Recent advances in solid polymer electrolyte fuel cell technology with low platinum loading electrodes* J. Power Sources 29, 367 (1990).

Srinivasan S, E. Ticianelli, C. Derouin, A. Redondo, *Advances in solid polymer electrolyte fuel cell technology with low platinum loading electrodes* J. Power Sources 22, 359 (1988).

Tanaka, Ken-ichi, Masashi Shou, Hong He, Changbin Zhang, Daling Lu. *A CO-Tolerant Hydrogen Fuel Cell System Designed by Combining with an Extremely Active Pt/CNT Catalyst.* *Catal Lett*, 127:148–151. (2009).

Tang, Jason M, Kurt Jensen, Mahesh Waje, Wenzhen Li, Paul Larsen, Kevin Pauley, Zhongwei Chen, Palanisamy Ramesh, Mikhail E. Itkis, Yushan Yan, and Robert C. Haddon *High Performance Hydrogen Fuel Cells with Ultralow Pt Loading Carbon Nanotube Thin Film Catalysts.* *J. Phys. Chem.*, 111: 17901-17904. (2007).

Ticianelli E, C. Derouin, A. Redondo, S. Srinivasan, *Methods to advance technology of proton exchange membrane fuel cells* J. Electrochem. Soc. 135, 2209 (1988).

Wahyudi, W. W. Purwanto, Bono Pranoto, Verina J. Wargadalam, 2010, *Performance of PEMFC with Sputter-Deposited Pt Catalyst Layers. The Effects of Sputtering Parameters*, Indonesian Nanoletters (accepted)

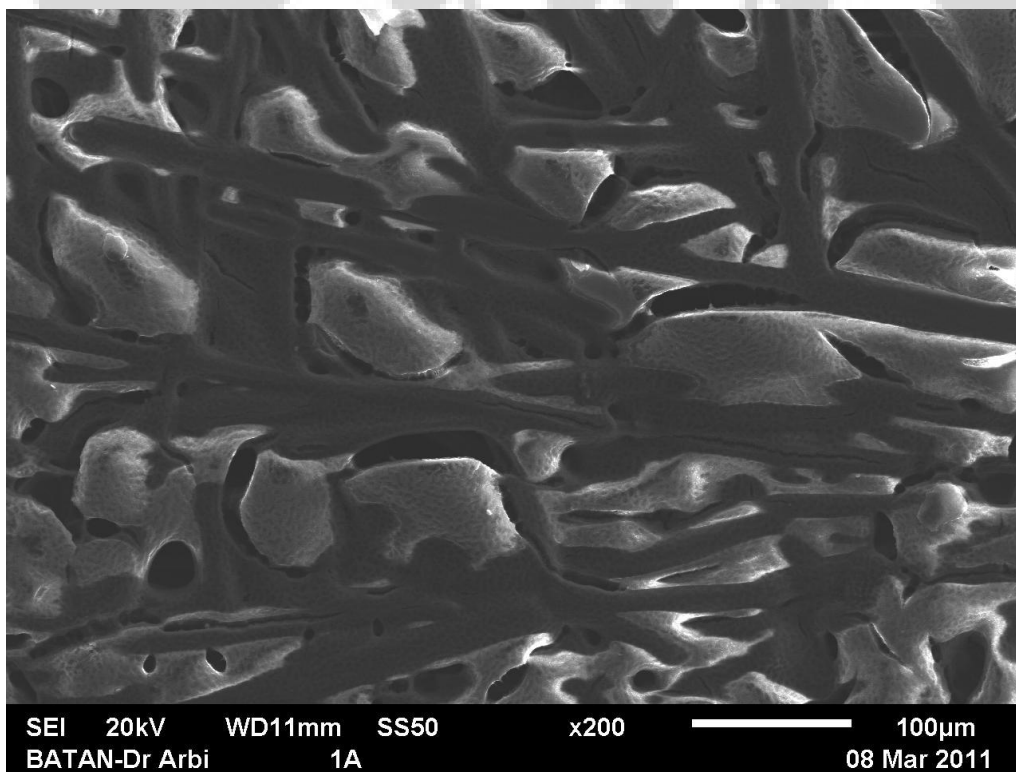
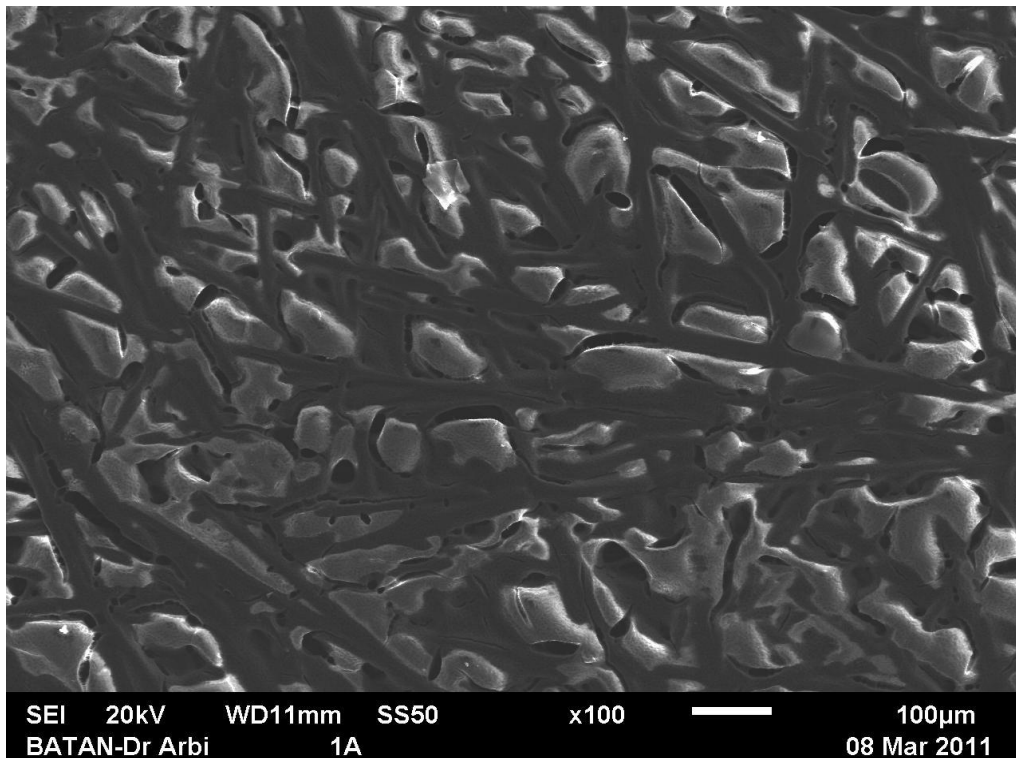
Wang, Jiajun, Geping Yin, Yuyan Shao, Zhenbo Wang, and Yunzhi Gao. *Investigation of Further Improvement of Platinum Catalyst Durability with Highly Graphitized Carbon Nanotube Support.* *J. Phys. Chem*, 112: 5784-5789. (2008).

Wilson M , S. Gottesfeld, *Thin-Film Catalyst Layers for Polymer Electrolyte Fuel Cell Electrodes*, J. Appl. Electrochem. 22, 1 (1992).

Zhigang Qi, A.Kaufman, *Improvement of water management by microporous sublayer for PEM fuel cells*, J.Power Sources 109. 38-46 (2002)

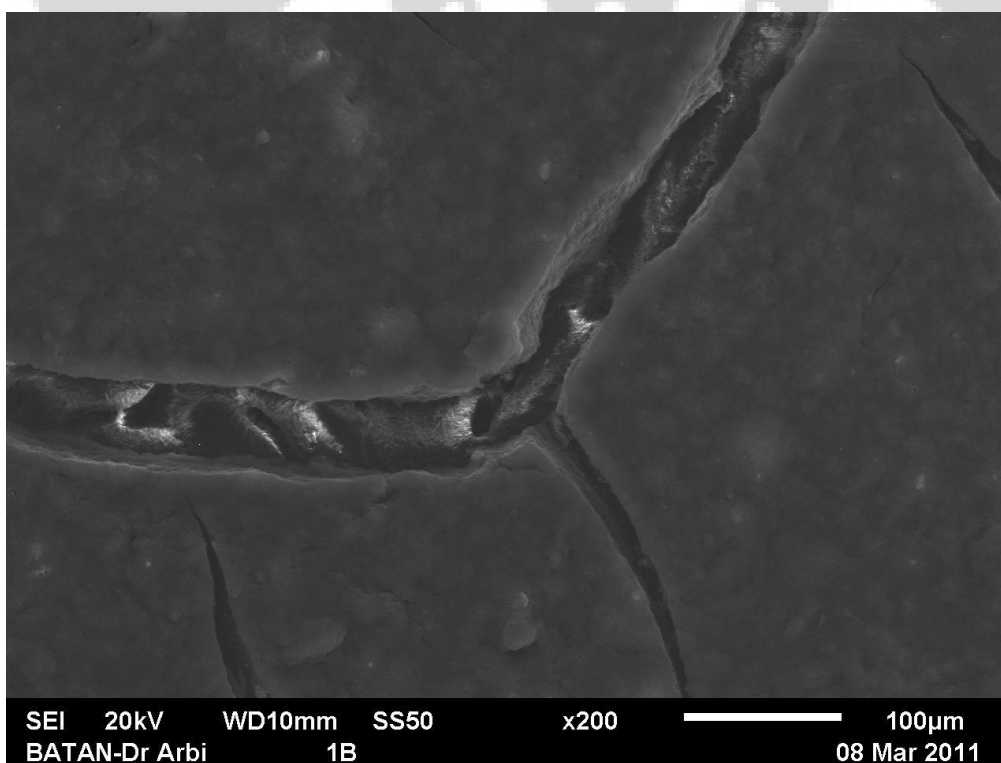
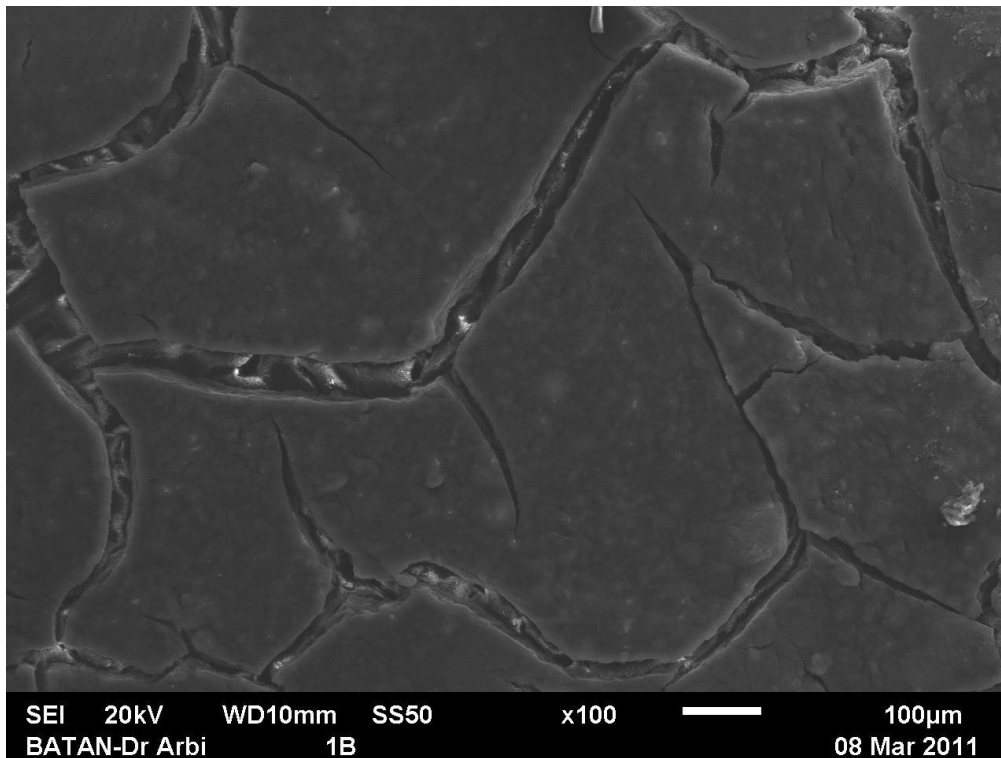
LAMPIRAN A

1. HASIL SEM PERMUKAAN SAMPLE 1A PERBESARAN 100X DAN 200X



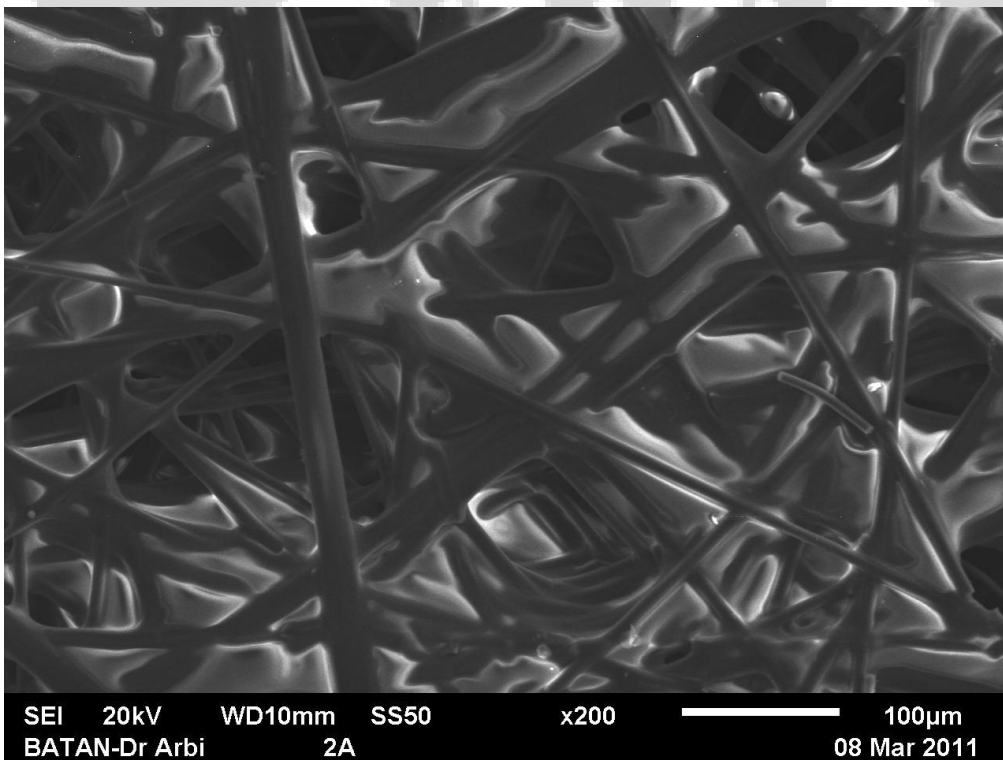
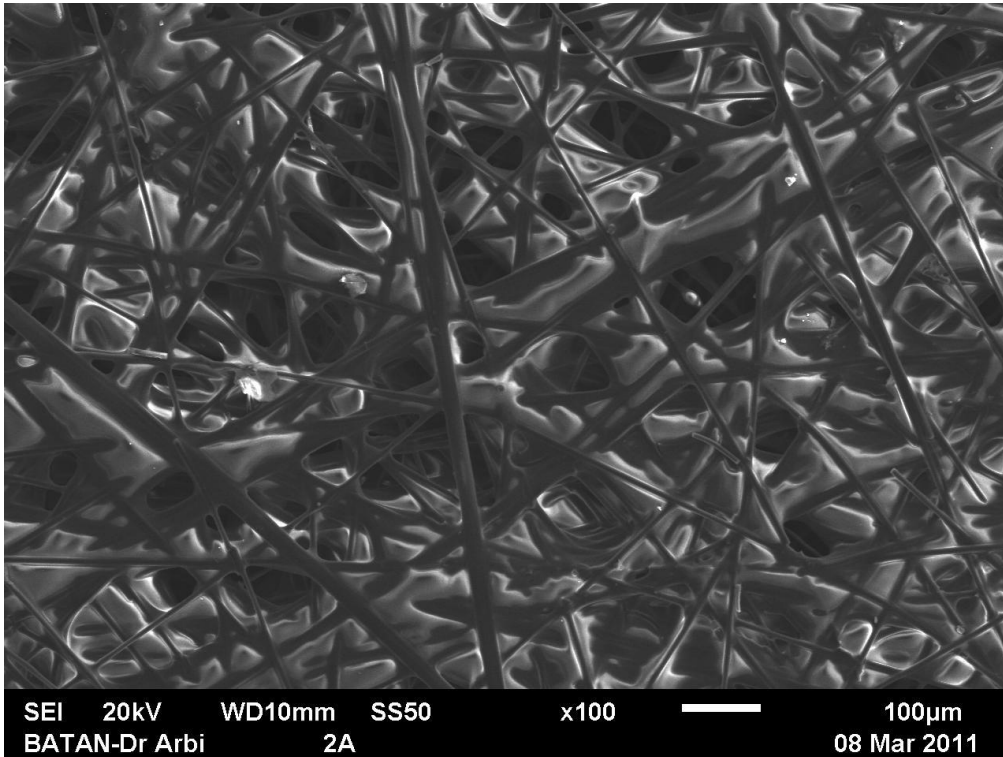
LAMPIRAN A

2. HASIL SEM PERMUKAAN SAMPLE 1B PERBESARAN 100X DAN 200X



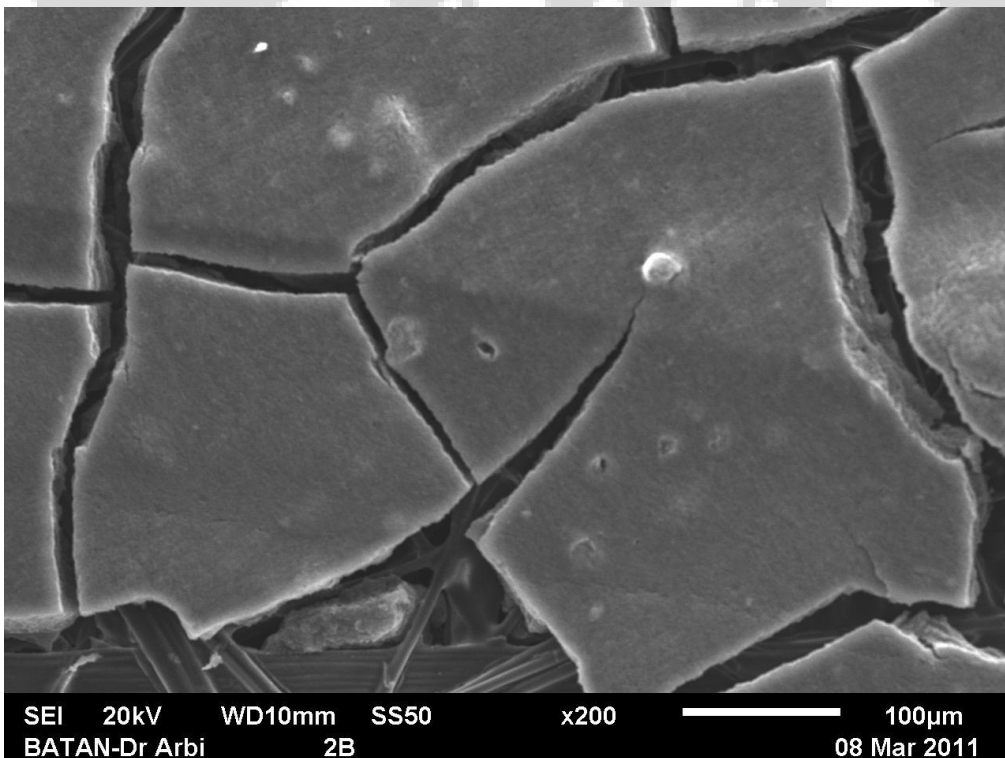
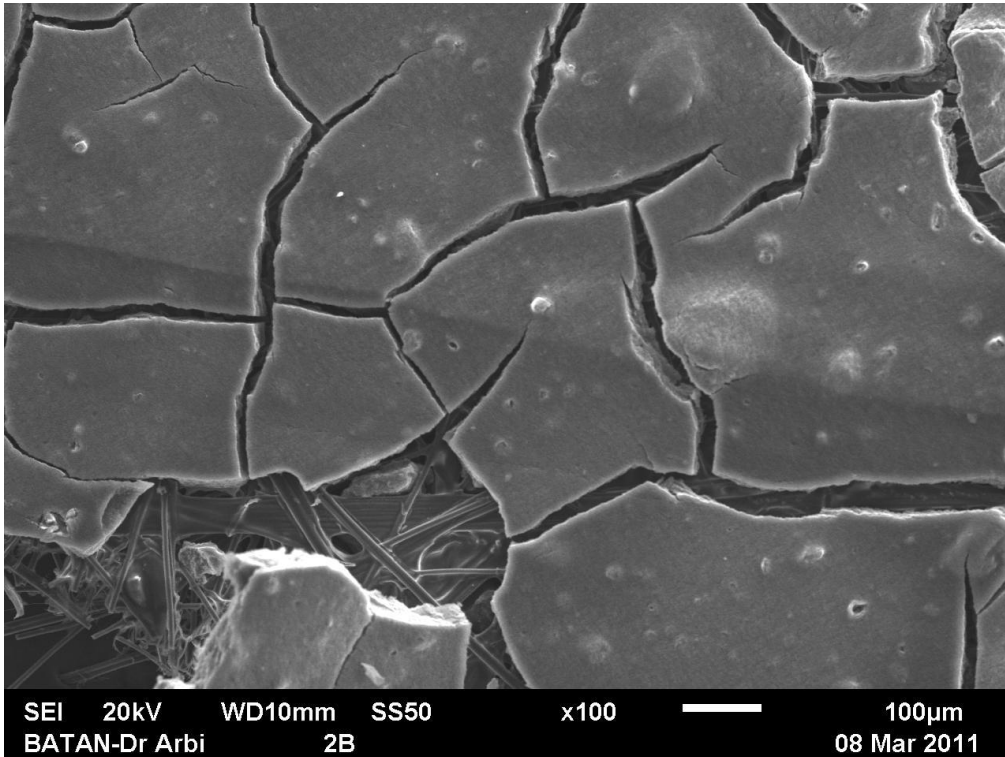
LAMPIRAN A

3. HASIL SEM PERMUKAAN SAMPLE 2A PERBESARAN 100X DAN 200X



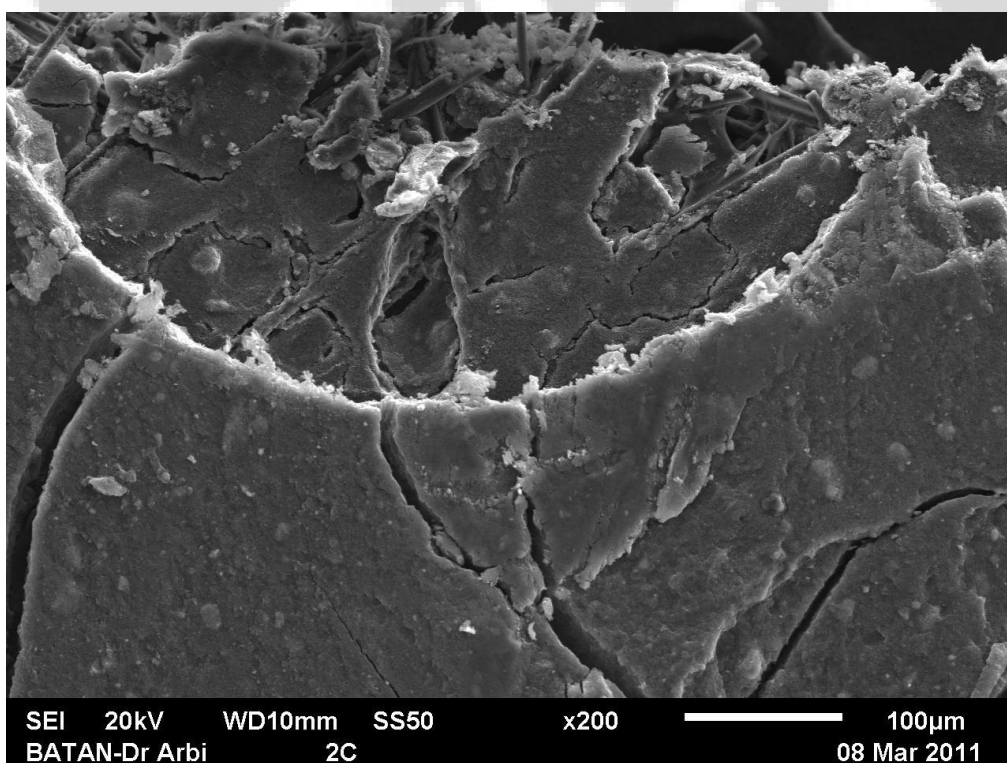
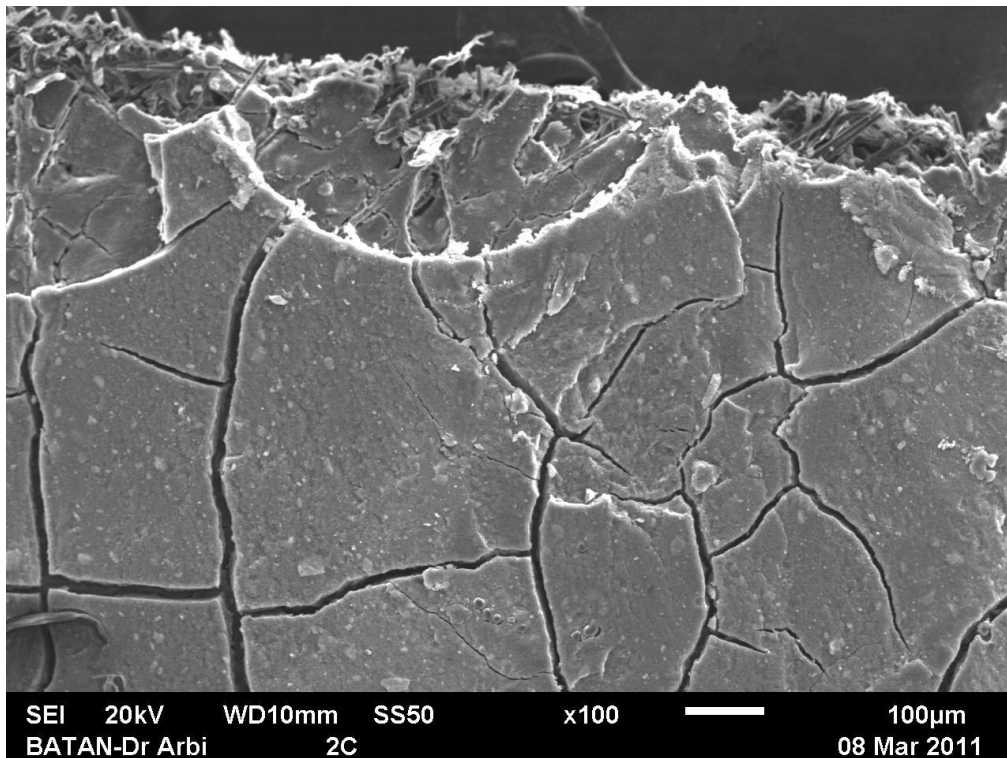
LAMPIRAN A

4. HASIL SEM PERMUKAAN SAMPLE 2B PERBESARAN 100X DAN 200X



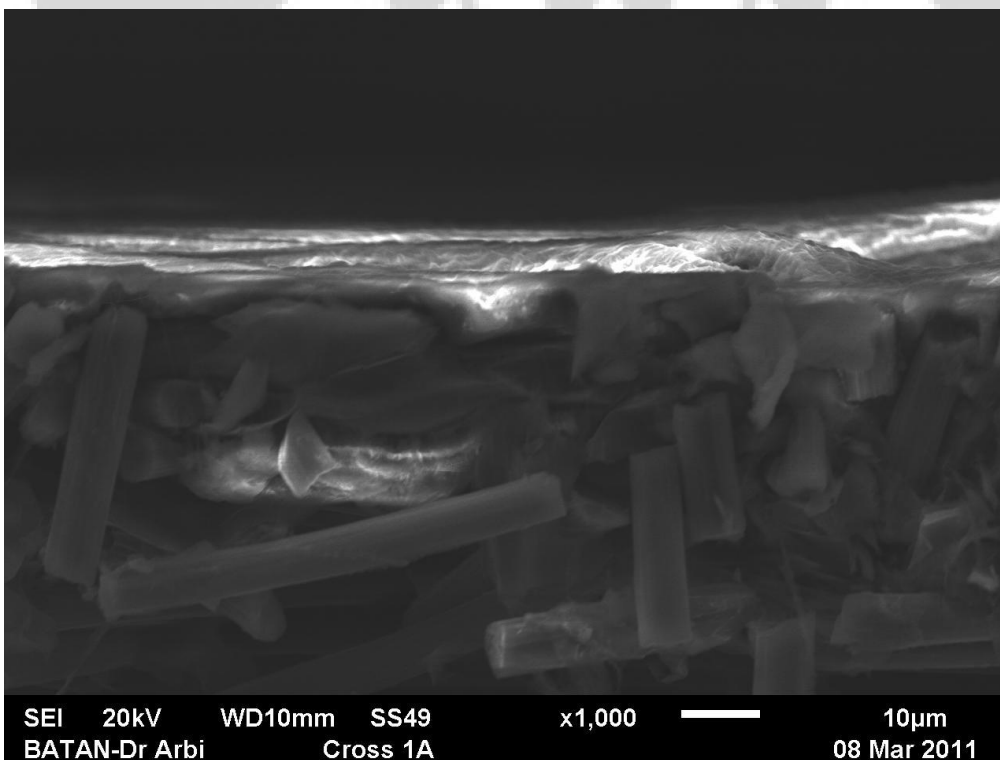
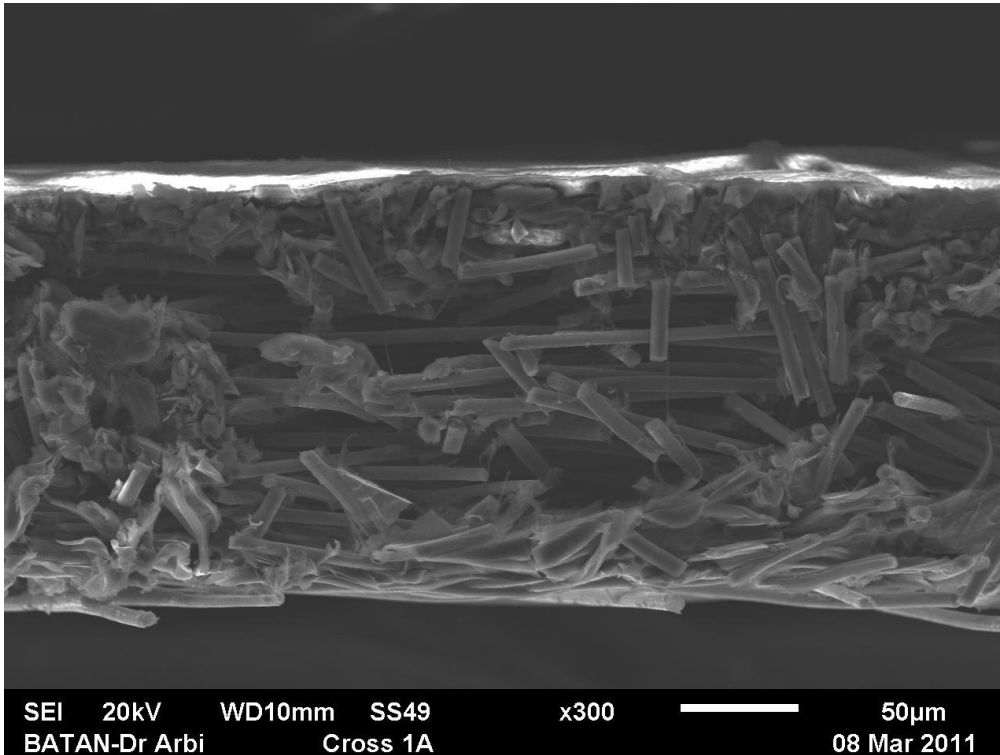
LAMPIRAN A

5. HASIL SEM PERMUKAAN SAMPLE 2C PERBESARAN 100X DAN 200X



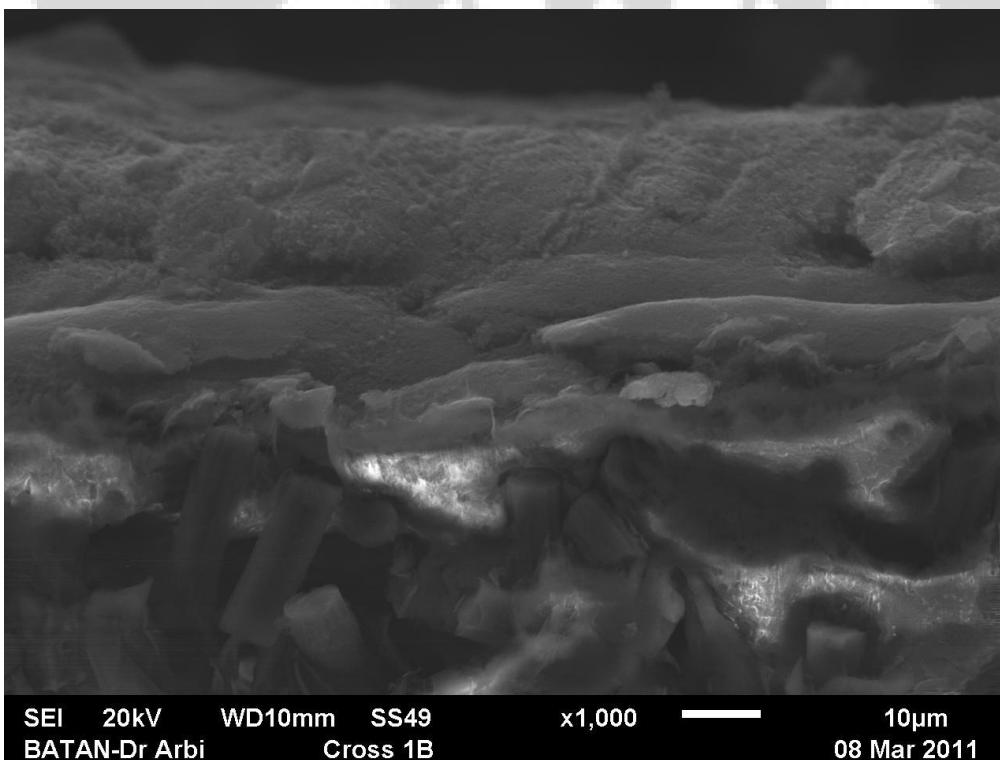
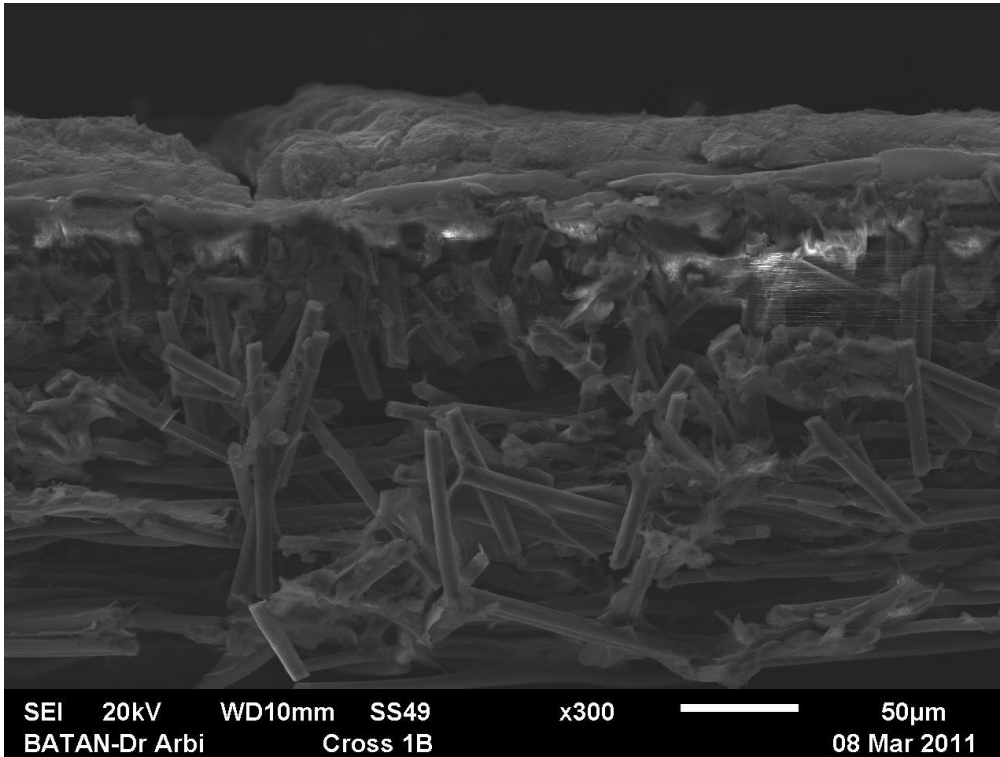
LAMPIRAN A

6. HASIL SEM CROSS SECTION SAMPLE 1A PERBESARAN 100X DAN 200X



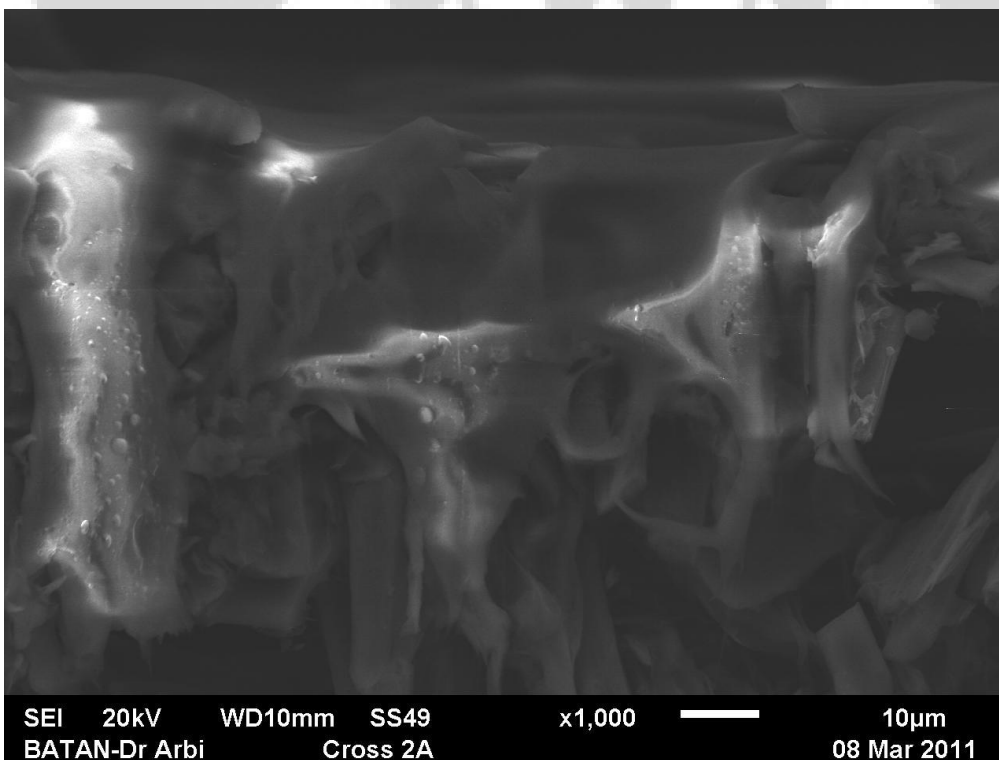
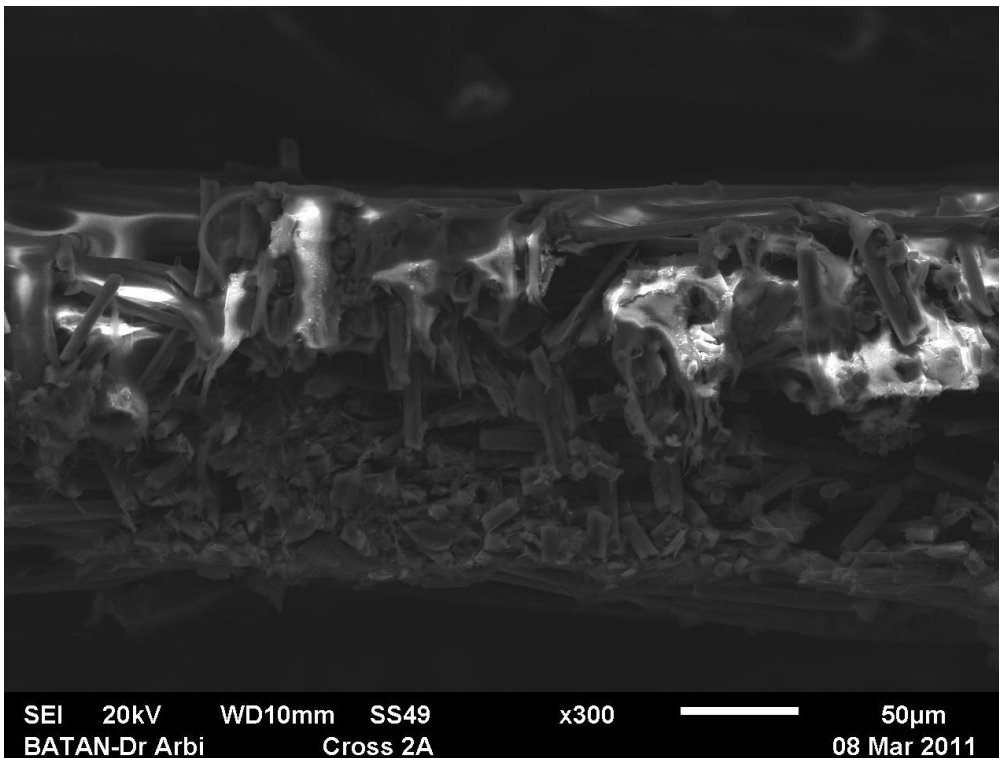
LAMPIRAN A

7. HASIL SEM CROSS SECTION SAMPLE 1B PERBESARAN 100X DAN 200X



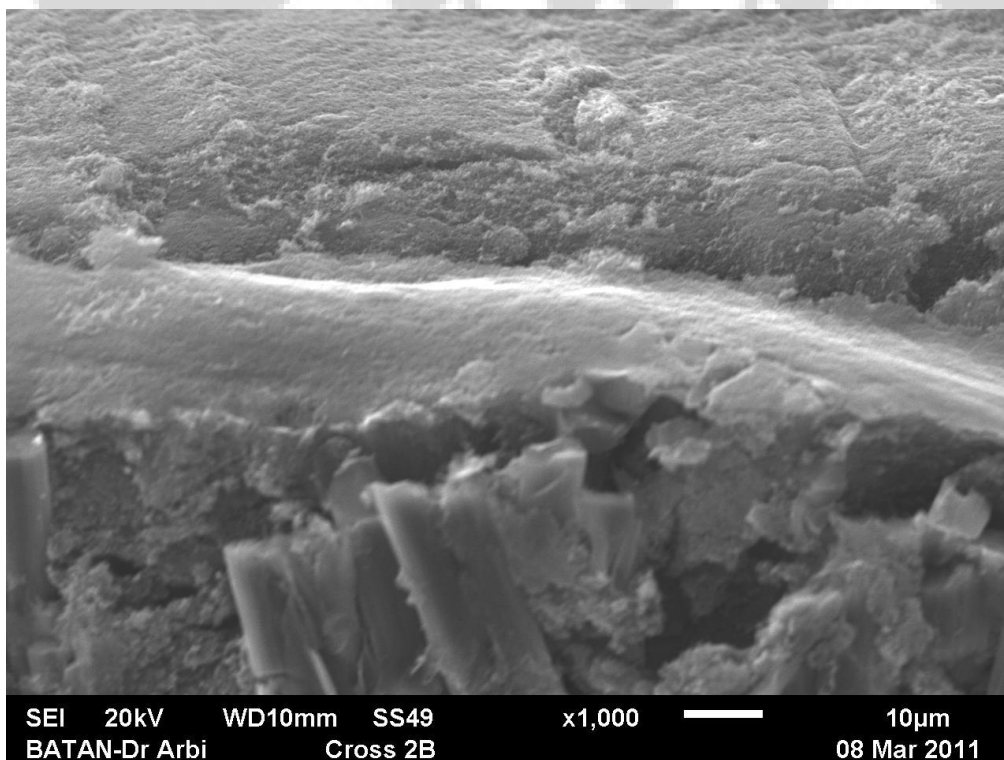
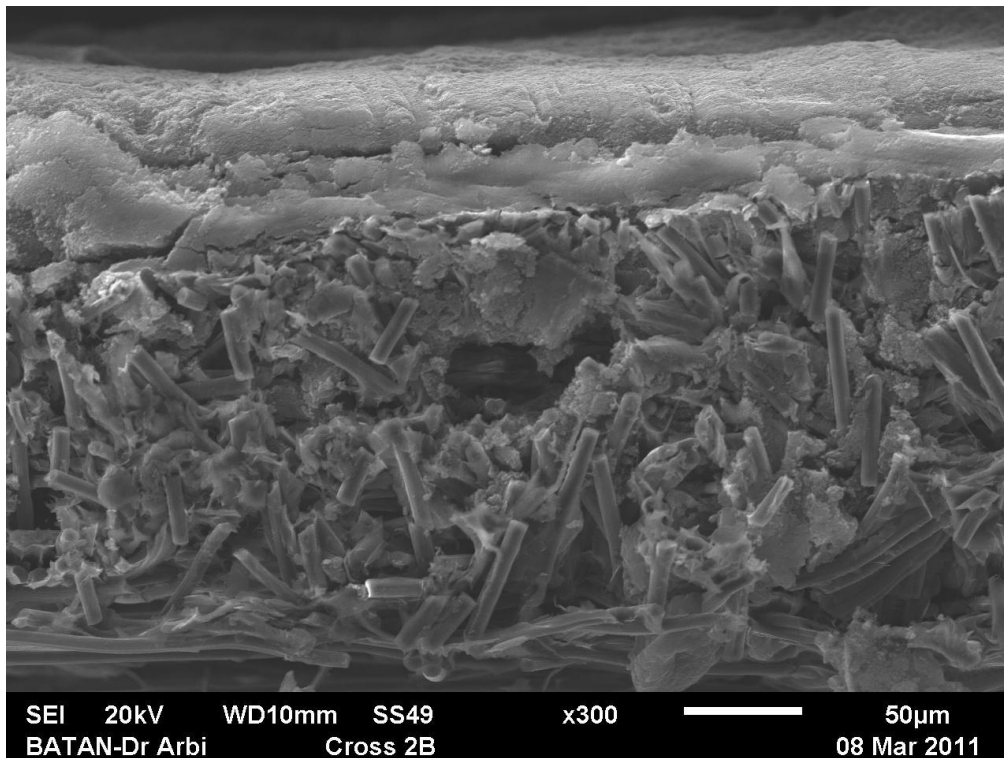
LAMPIRAN A

8. HASIL SEM CROSS SECTION SAMPLE 2A PERBESARAN 100X DAN 200X



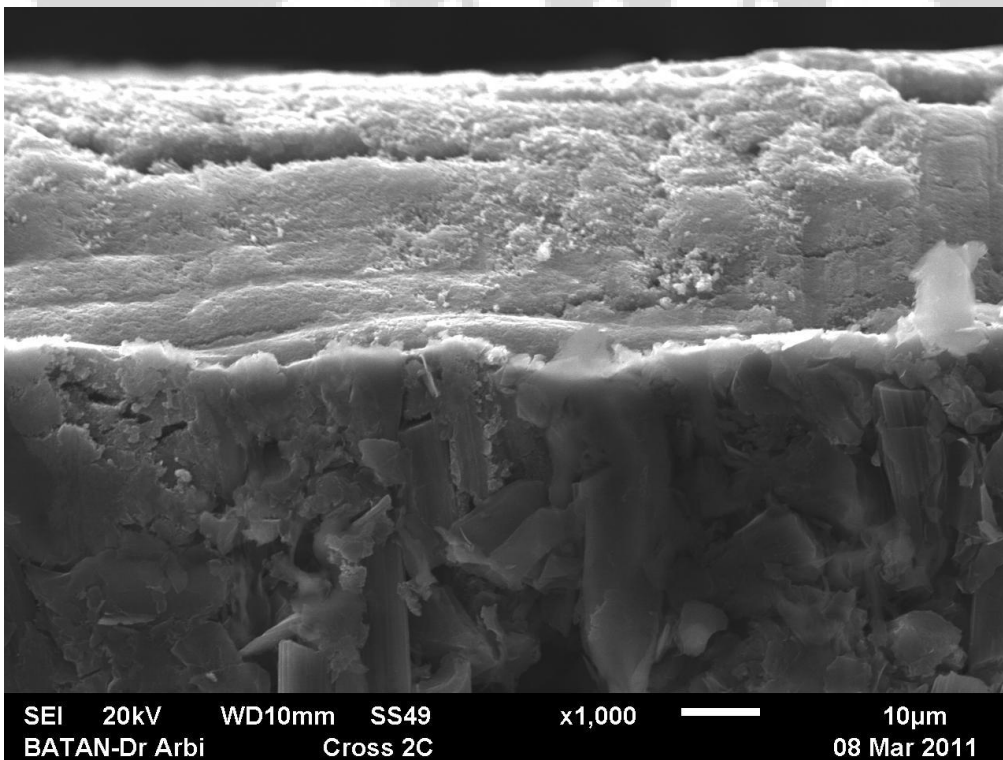
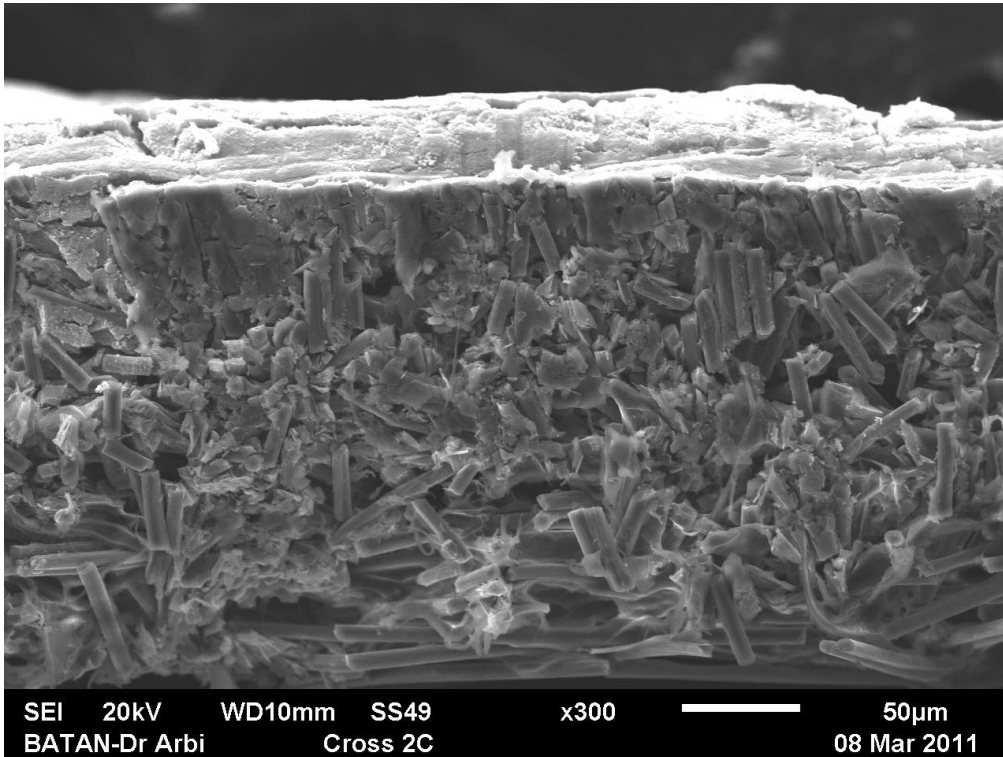
LAMPIRAN A

9. HASIL SEM CROSS SECTION SAMPLE 2B PERBESARAN 100X DAN 200X



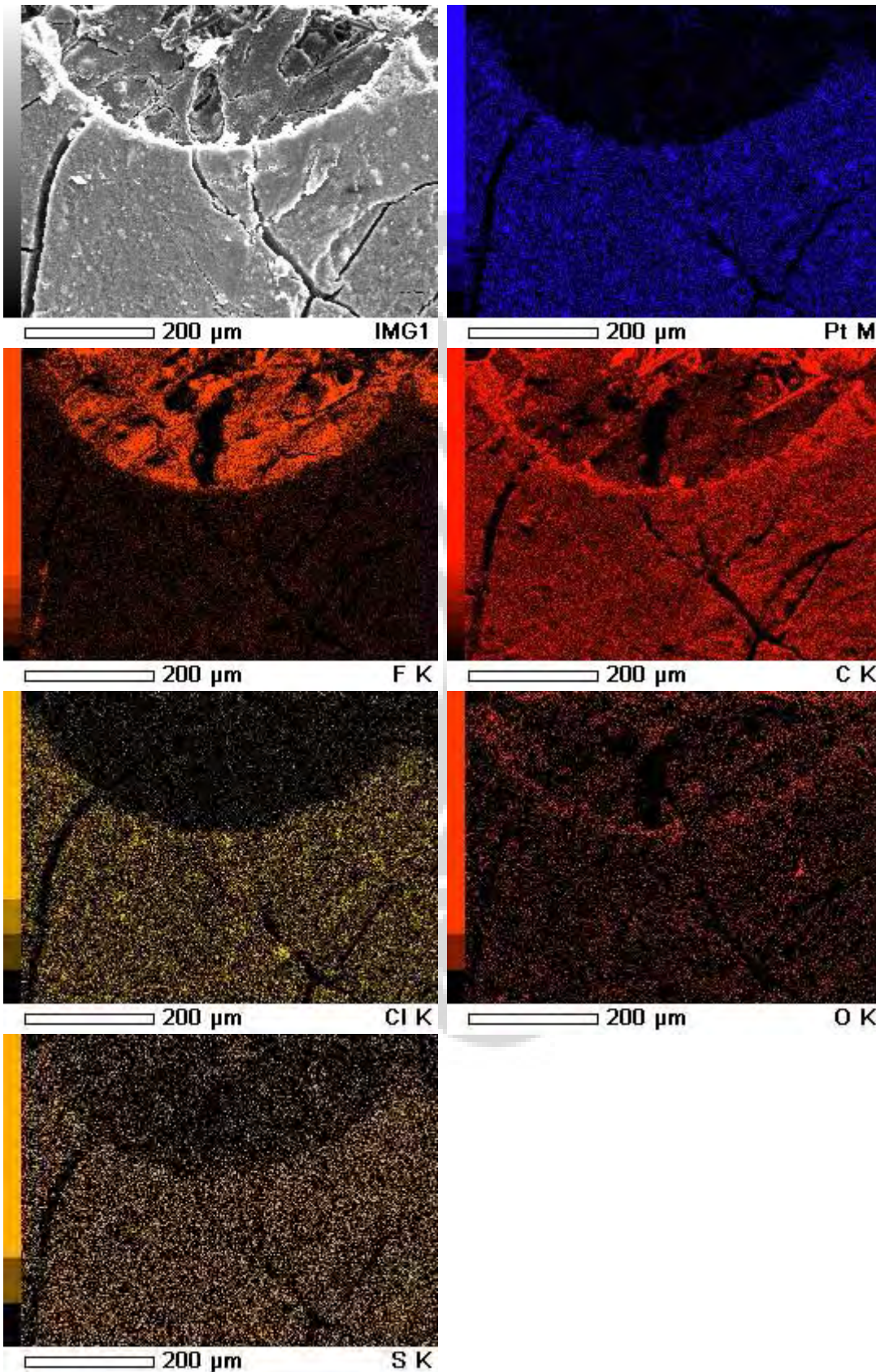
LAMPIRAN A

10. HASIL SEM CROSS SECTION SAMPLE 2C PERBESARAN 100X DAN 200X



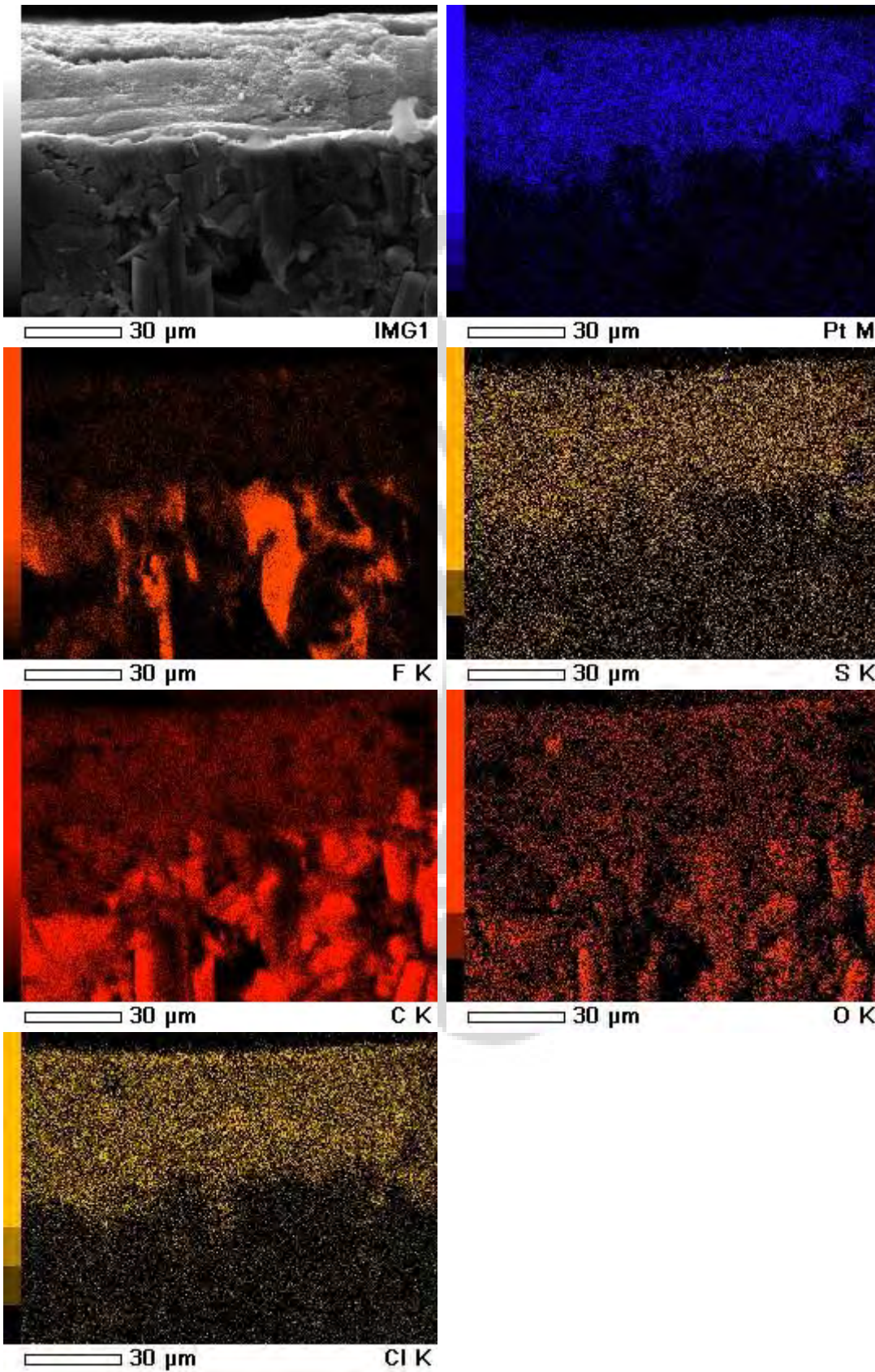
LAMPIRAN A

11. HASIL SEM MAPPING EDS PERMUKAAN SAMPLE 2C



LAMPIRAN A

12. HASIL SEM MAPPING EDS CROSS SECTION SAMPLE 2C



LAMPIRAN B

Tanggal : 2 Desember 2010
 Penguji : Bono
Sampel
 Ukuran : 50 cm²
 MEA : Buatan sendiri(Ptc 10%wt)1 sel
 Kode : 1/12/2010
 Platinum : mg/cm²

Tekanan
 H₂ (psig) : 10 psi
 O₂ (psig) : 10 psi
 suhu : 25.5C
 Pelat PA : Komersial
 Gasket : Komersial

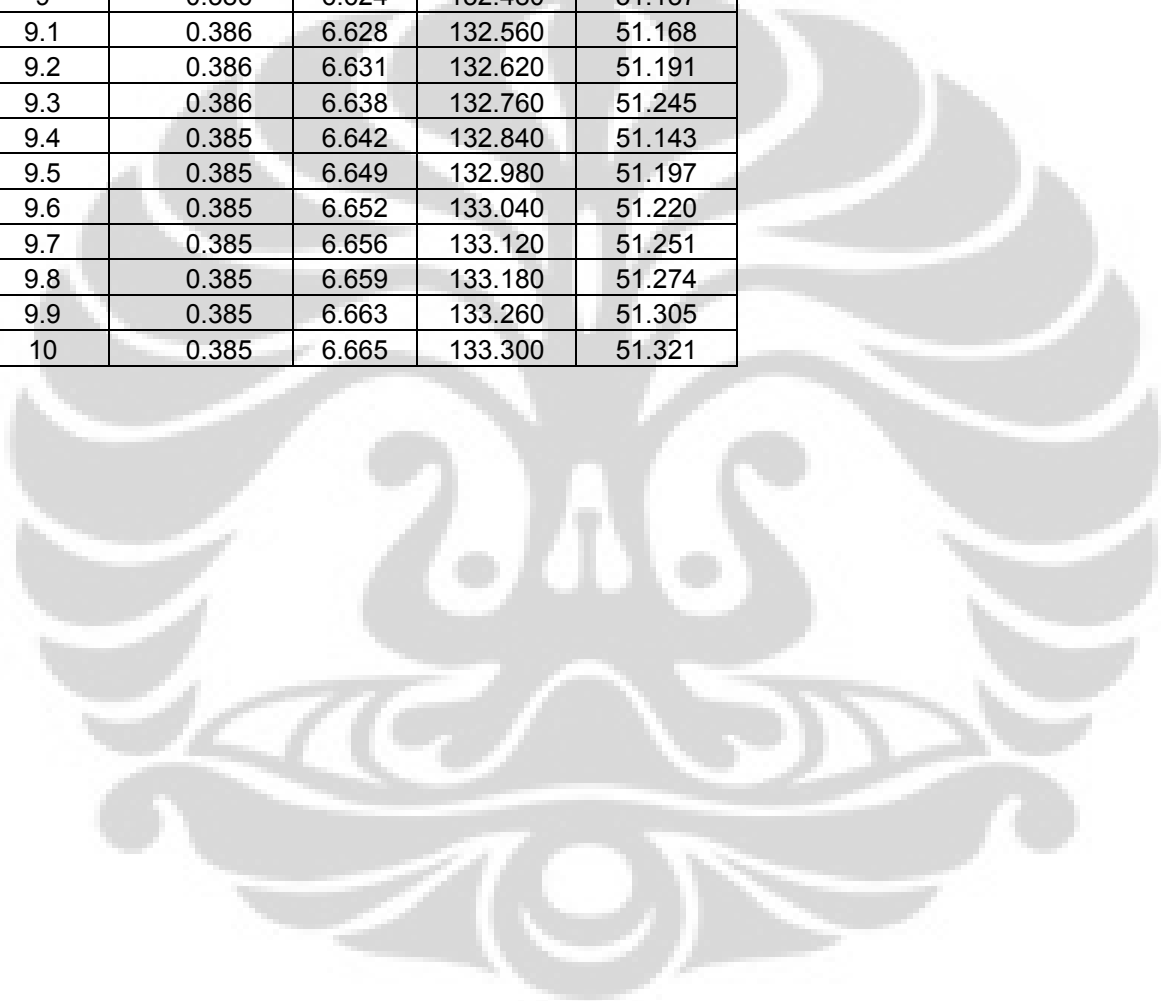
Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.940	0.000	0.000	0.000
0	0.940	0.000	0.000	0.000
1	0.940	0.004	0.080	0.075
2	0.940	0.004	0.080	0.075
3	0.940	0.004	0.080	0.075
4	0.920	0.009	0.180	0.166
4.1	0.910	0.013	0.260	0.237
4.2	0.880	0.018	0.360	0.317
4.3	0.860	0.035	0.700	0.602
4.4	0.840	0.063	1.260	1.058
4.5	0.810	0.116	2.320	1.879
4.6	0.793	0.219	4.380	3.473
4.7	0.783	0.306	6.120	4.792
4.8	0.759	0.528	10.560	8.015
4.9	0.727	0.880	17.600	12.795
5	0.700	1.115	22.300	15.610
5.1	0.664	1.663	33.260	22.085
5.2	0.634	2.293	45.860	29.075
5.3	0.599	2.678	53.560	32.082
5.4	0.564	3.456	69.120	38.984
5.5	0.532	3.985	79.700	42.400
5.6	0.503	4.554	91.080	45.813
5.7	0.478	5.016	100.320	47.953
5.8	0.461	5.322	106.440	49.069
5.9	0.447	5.558	111.160	49.689
6	0.437	5.777	115.540	50.491
6.1	0.429	5.922	118.440	50.811
6.2	0.422	6.020	120.400	50.809
6.3	0.419	6.108	122.160	51.185
6.4	0.414	6.202	124.040	51.353
6.5	0.410	6.260	125.200	51.332
6.6	0.407	6.291	125.820	51.209
6.7	0.405	6.341	126.820	51.362
6.8	0.402	6.379	127.580	51.287
6.9	0.400	6.401	128.020	51.208
7	0.399	6.427	128.540	51.287
7.1	0.397	6.452	129.040	51.229
7.2	0.396	6.472	129.440	51.258
7.3	0.395	6.486	129.720	51.239
7.4	0.395	6.501	130.020	51.358
7.5	0.393	6.513	130.260	51.192
7.6	0.393	6.527	130.540	51.302
7.7	0.393	6.536	130.720	51.373

open jam: 09:00 V: 0.947
A: 0.000

load jam: 16:30 V: 0.930
A: 0.005

LAMPIRAN B

7.8	0.391	6.547	130.940	51.198
7.9	0.391	6.555	131.100	51.260
8	0.390	6.565	131.300	51.207
8.1	0.390	6.570	131.400	51.246
8.2	0.389	6.578	131.560	51.177
8.3	0.389	6.583	131.660	51.216
8.4	0.388	6.591	131.820	51.146
8.5	0.388	6.596	131.920	51.185
8.6	0.388	6.602	132.040	51.232
8.7	0.387	6.608	132.160	51.146
8.8	0.387	6.613	132.260	51.185
8.9	0.387	6.620	132.400	51.239
9	0.386	6.624	132.480	51.137
9.1	0.386	6.628	132.560	51.168
9.2	0.386	6.631	132.620	51.191
9.3	0.386	6.638	132.760	51.245
9.4	0.385	6.642	132.840	51.143
9.5	0.385	6.649	132.980	51.197
9.6	0.385	6.652	133.040	51.220
9.7	0.385	6.656	133.120	51.251
9.8	0.385	6.659	133.180	51.274
9.9	0.385	6.663	133.260	51.305
10	0.385	6.665	133.300	51.321



LAMPIRAN B

Tanggal : 14 Desember 2010
 Penguji : Danu
Sampel
 Ukuran : 50 cm²
 MEA : Buatan sendiri(PtC 10%wt)1sel
 Kode : 1/12/2010
 Platinum : mg/cm²

Tekanan
 H₂ (psig) : 10 psi
 O₂ (psig) : 10 psi
 suhu : 25.4 C
 Pelat PA : Komersial
 Gasket : Komersial

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.915	0.000	0.000	0.000
0	0.915	0.002	0.040	0.037
1	0.915	0.002	0.040	0.037
2	0.915	0.002	0.040	0.037
3	0.905	0.004	0.080	0.072
4	0.878	0.008	0.160	0.140
4.1	0.857	0.012	0.240	0.206
4.2	0.836	0.024	0.480	0.401
4.3	0.817	0.050	1.000	0.817
4.4	0.800	0.097	1.940	1.552
4.5	0.783	0.155	3.100	2.427
4.6	0.761	0.256	5.120	3.896
4.7	0.737	0.448	8.960	6.604
4.8	0.713	0.681	13.620	9.711
4.9	0.701	0.955	19.100	13.389
5	0.690	1.401	28.020	19.334
5.1	0.635	1.955	39.100	24.829
5.2	0.571	2.544	50.880	29.052
5.3	0.559	3.191	63.820	35.675
5.4	0.526	3.839	76.780	40.386
5.5	0.501	4.501	90.020	45.100
5.6	0.483	4.990	99.800	48.203
5.7	0.461	5.417	108.340	49.945
5.8	0.451	5.707	114.140	51.477
5.9	0.440	6.098	121.960	53.662
6	0.433	6.160	123.200	53.346
6.1	0.427	6.397	127.940	54.630
6.2	0.422	6.410	128.200	54.100
6.3	0.418	6.491	129.820	54.265
6.4	0.415	6.579	131.580	54.606
6.5	0.410	6.641	132.820	54.456
6.6	0.409	6.690	133.800	54.724
6.7	0.407	6.736	134.720	54.831
6.8	0.403	6.778	135.560	54.631
6.9	0.403	6.799	135.980	54.800
7	0.403	6.801	136.020	54.816
7.1	0.402	6.845	136.900	55.034
7.2	0.400	6.860	137.200	54.880
7.3	0.399	6.878	137.560	54.886
7.4	0.399	6.891	137.820	54.990
7.5	0.399	6.907	138.140	55.118
7.6	0.397	6.919	138.380	54.937

open jam: 10:00

load jam: 15:30

LAMPIRAN B

7.7	0.397	6.927	138.540	55.000
7.8	0.396	6.936	138.720	54.933
7.9	0.395	6.945	138.900	54.866
8	0.394	6.953	139.060	54.790
8.1	0.393	6.962	139.240	54.721
8.2	0.393	6.967	139.340	54.761
8.3	0.393	6.973	139.460	54.808
8.4	0.392	6.981	139.620	54.731
8.5	0.392	6.985	139.700	54.762
8.6	0.391	6.993	139.860	54.685
8.7	0.391	6.999	139.980	54.732
8.8	0.390	7.002	140.040	54.616
8.9	0.390	7.007	140.140	54.655
9	0.390	7.013	140.260	54.701
9.1	0.389	7.016	140.320	54.584
9.2	0.389	7.022	140.440	54.631
9.3	0.389	7.027	140.540	54.670
9.4	0.389	7.031	140.620	54.701
9.5	0.389	7.036	140.720	54.740
9.6	0.389	7.041	140.820	54.779
9.7	0.387	7.044	140.880	54.521
9.8	0.387	7.047	140.940	54.544
9.9	0.387	7.051	141.020	54.575
10	0.386	7.053	141.060	54.449

LAMPIRAN B

Tanggal	: 16 Desember 2010	Tekanan		
Penguji	: Danu	H2 (psig)	: 10	psi
Sampel		O2 (psig)	: 10	psi
Ukuran	: 50 cm ²	suhu	: 25.9	C
MEA	: Buatan sendiri(PtC 10%wt)1sel	Pelat PA	: Komersial	
Kode	: 1/12/2010	Gasket	: Komersial	
Platinum	: mg/cm ²			

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.934	0.005	0.100	0.093
0	0.934	0.005	0.100	0.093
1	0.934	0.005	0.100	0.093
2	0.934	0.005	0.100	0.093
3	0.933	0.006	0.120	0.112
4	0.911	0.010	0.200	0.182
4.1	0.897	0.015	0.300	0.269
4.2	0.875	0.026	0.520	0.455
4.3	0.856	0.041	0.820	0.702
4.4	0.834	0.082	1.640	1.368
4.5	0.814	0.150	3.000	2.442
4.6	0.790	0.250	5.000	3.950
4.7	0.771	0.387	7.740	5.968
4.8	0.747	0.622	12.440	9.293
4.9	0.720	0.929	18.580	13.378
5	0.696	1.282	25.640	17.845
5.1	0.662	1.787	35.740	23.660
5.2	0.626	2.458	49.160	30.774
5.3	0.607	3.020	60.400	36.663
5.4	0.570	3.675	73.500	41.895
5.5	0.538	4.405	88.100	47.398
5.6	0.513	5.007	100.140	51.372
5.7	0.493	5.484	109.680	54.072
5.8	0.475	5.806	116.120	55.157
5.9	0.465	6.108	122.160	56.804
6	0.454	6.337	126.740	57.540
6.1	0.448	6.534	130.680	58.545
6.2	0.442	6.656	133.120	58.839
6.3	0.438	6.758	135.160	59.200
6.4	0.433	6.856	137.120	59.373
6.5	0.430	6.932	138.640	59.615
6.6	0.426	6.998	139.960	59.623
6.7	0.423	7.051	141.020	59.651
6.8	0.421	7.141	142.820	60.127
6.9	0.420	7.180	143.600	60.312
7	0.418	7.205	144.100	60.234
7.1	0.417	7.234	144.680	60.332
7.2	0.416	7.253	145.060	60.345
7.3	0.415	7.279	145.580	60.416
7.4	0.414	7.297	145.940	60.419
7.5	0.414	7.312	146.240	60.543
7.6	0.413	7.329	146.580	60.538
7.7	0.413	7.345	146.900	60.670

open jam: 09:30

V: 0.945

A: 0.000

load jam: 15:30

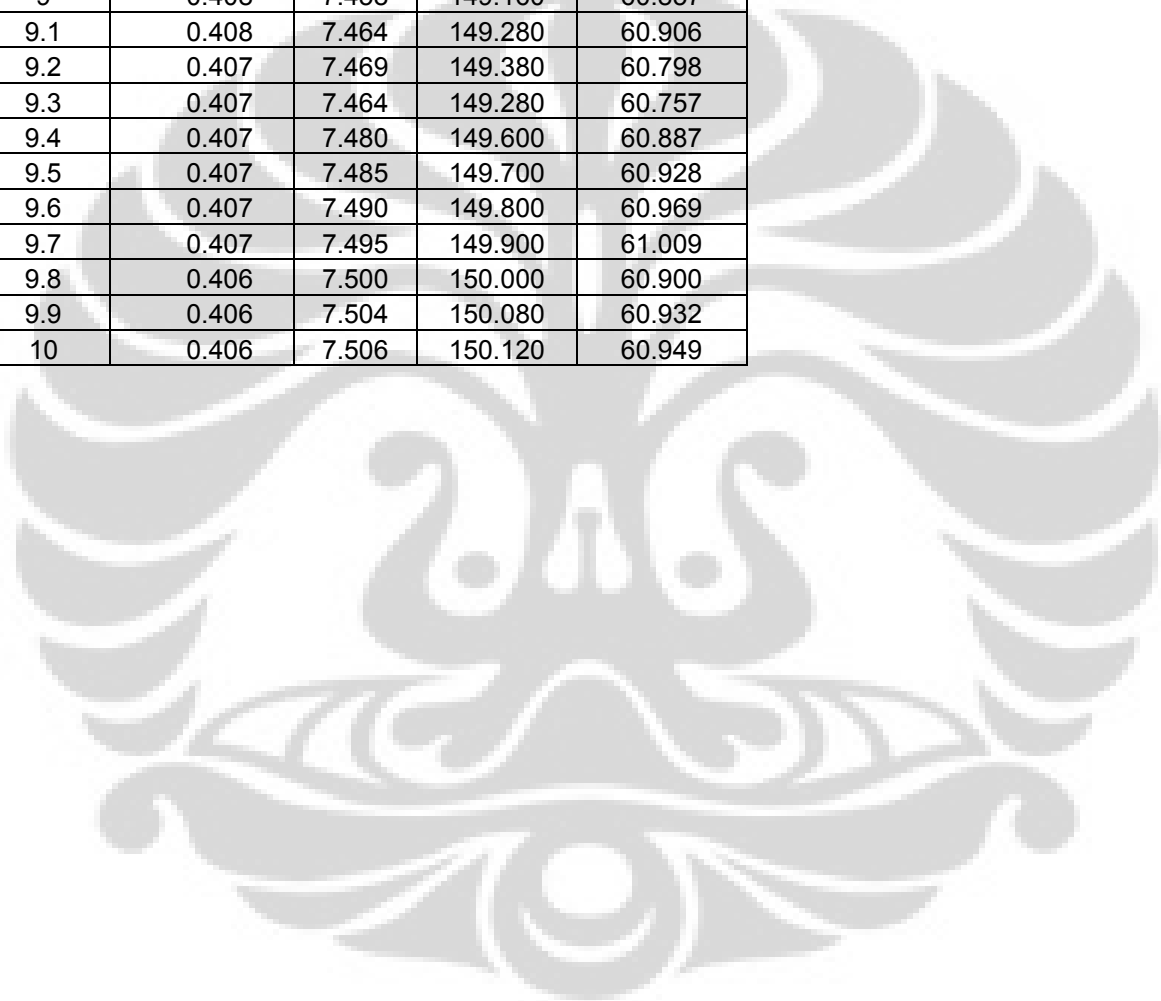
V: 0.915

A: 0.005

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.412	7.355	147.100	60.605
7.9	0.411	7.367	147.340	60.557
8	0.411	7.378	147.560	60.647
8.1	0.411	7.388	147.760	60.729
8.2	0.410	7.398	147.960	60.664
8.3	0.410	7.406	148.120	60.729
8.4	0.409	7.415	148.300	60.655
8.5	0.409	7.424	148.480	60.728
8.6	0.408	7.432	148.640	60.645
8.7	0.408	7.439	148.780	60.702
8.8	0.408	7.446	148.920	60.759
8.9	0.408	7.452	149.040	60.808
9	0.408	7.458	149.160	60.857
9.1	0.408	7.464	149.280	60.906
9.2	0.407	7.469	149.380	60.798
9.3	0.407	7.464	149.280	60.757
9.4	0.407	7.480	149.600	60.887
9.5	0.407	7.485	149.700	60.928
9.6	0.407	7.490	149.800	60.969
9.7	0.407	7.495	149.900	61.009
9.8	0.406	7.500	150.000	60.900
9.9	0.406	7.504	150.080	60.932
10	0.406	7.506	150.120	60.949



LAMPIRAN B

Tanggal	: 27 Desember 2010	Tekanan	
Penguji	: Danu	H2 (psig)	: 10 psi
Sampel		O2 (psig)	: 10 psi
Ukuran	: 50 cm ²	suhu	: 25.1C
MEA	: Buatan sendiri(Pt C 10%wt)1 sel	Pelat PA	: Komersial
Kode	: 1/12/1011	Gasket	: Komersial
Platinum	: mg/cm ²		

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.947	0.000	0.000	0.000
0	0.947	0.003	0.060	0.057
1	0.947	0.003	0.060	0.057
2	0.947	0.003	0.060	0.057
3	0.920	0.007	0.140	0.129
4	0.904	0.012	0.240	0.217
4.1	0.880	0.022	0.440	0.387
4.2	0.858	0.041	0.820	0.704
4.3	0.836	0.083	1.660	1.388
4.4	0.816	0.131	2.620	2.138
4.5	0.793	0.243	4.860	3.854
4.6	0.775	0.420	8.400	6.510
4.7	0.761	0.620	12.400	9.436
4.8	0.729	0.980	19.600	14.288
4.9	0.705	1.320	26.400	18.612
5	0.672	1.832	36.640	24.622
5.1	0.642	2.380	47.600	30.559
5.2	0.605	3.122	62.440	37.776
5.3	0.583	3.672	73.440	42.816
5.4	0.542	4.589	91.780	49.745
5.5	0.519	5.219	104.380	54.173
5.6	0.499	5.578	111.560	55.668
5.7	0.483	5.978	119.560	57.747
5.8	0.468	6.300	126.000	58.968
5.9	0.457	6.555	131.100	59.913
6	0.449	6.731	134.620	60.444
6.1	0.443	6.880	137.600	60.957
6.2	0.437	6.966	139.320	60.883
6.3	0.434	7.052	141.040	61.211
6.4	0.430	7.127	142.540	61.292
6.5	0.429	7.190	143.800	61.690
6.6	0.427	7.248	144.960	61.898
6.7	0.425	7.283	145.660	61.906
6.8	0.424	7.323	146.460	62.099
6.9	0.420	7.343	146.860	61.681
7	0.416	7.377	147.540	61.377
7.1	0.415	7.402	148.040	61.437
7.2	0.414	7.424	148.480	61.471
7.3	0.413	7.448	148.960	61.520
7.4	0.412	7.465	149.300	61.512
7.5	0.412	7.483	149.660	61.660
7.6	0.411	7.495	149.900	61.609
7.7	0.411	7.511	150.220	61.740

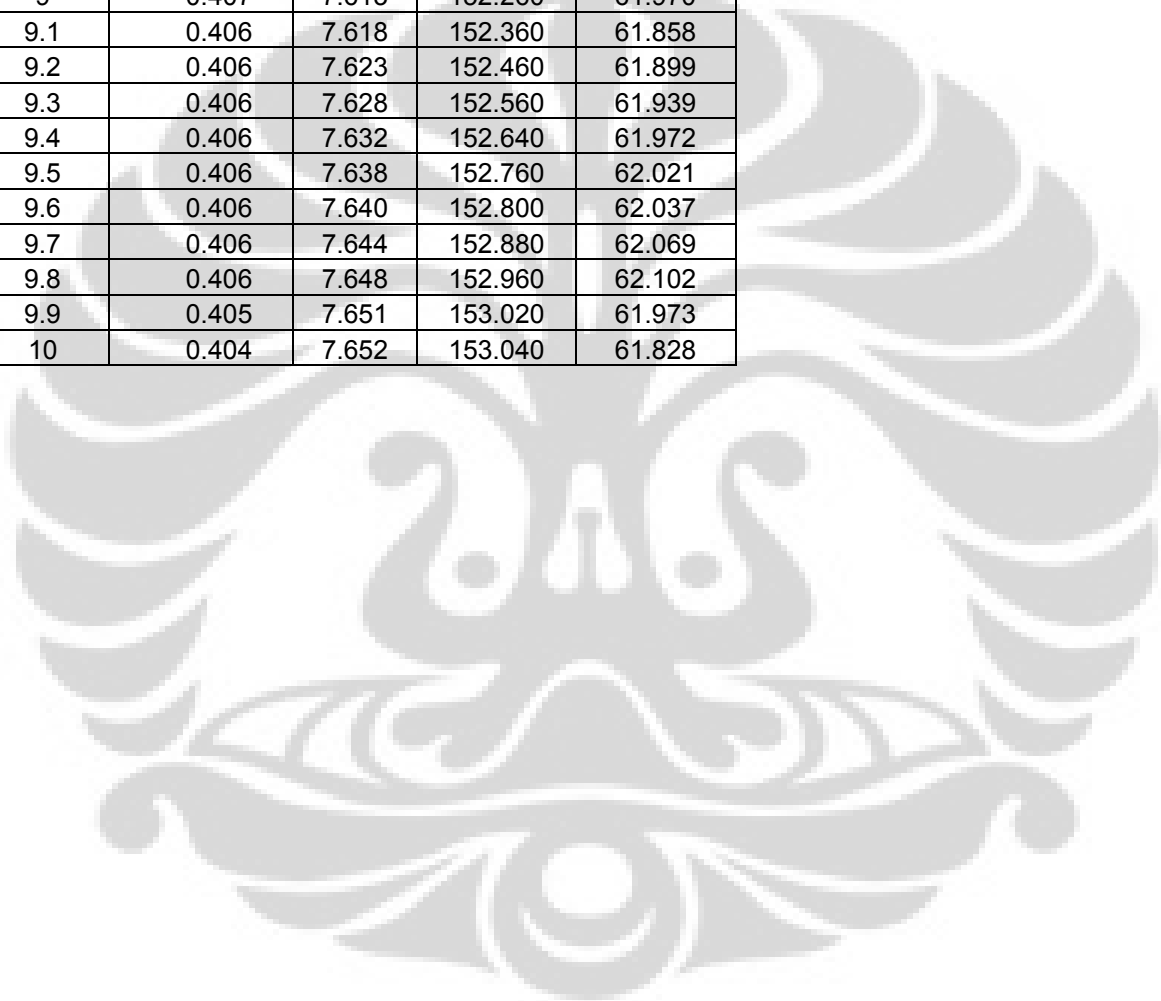
open jam: 09:30 V: 0.947
 A: 0.000

load jam: 16:30 V: 0.930
 A: 0.005

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.411	7.521	150.420	61.823
7.9	0.410	7.531	150.620	61.754
8	0.410	7.541	150.820	61.836
8.1	0.410	7.551	151.020	61.918
8.2	0.409	7.557	151.140	61.816
8.3	0.409	7.567	151.340	61.898
8.4	0.409	7.574	151.480	61.955
8.5	0.408	7.582	151.640	61.869
8.6	0.408	7.589	151.780	61.926
8.7	0.407	7.596	151.920	61.831
8.8	0.407	7.601	152.020	61.872
8.9	0.407	7.608	152.160	61.929
9	0.407	7.613	152.260	61.970
9.1	0.406	7.618	152.360	61.858
9.2	0.406	7.623	152.460	61.899
9.3	0.406	7.628	152.560	61.939
9.4	0.406	7.632	152.640	61.972
9.5	0.406	7.638	152.760	62.021
9.6	0.406	7.640	152.800	62.037
9.7	0.406	7.644	152.880	62.069
9.8	0.406	7.648	152.960	62.102
9.9	0.405	7.651	153.020	61.973
10	0.404	7.652	153.040	61.828



LAMPIRAN B

Tanggal	: 3 Januari 2011	Tekanan	
Penguji	: Danu	H2 (psig)	: 10 psi
Sampel		O2 (psig)	: 10 psi
Ukuran	: 50 cm ²	suhu	: 23.3 C
MEA	: Buatan sendiri(Pt C 10%wt)1 sel	Pelat PA	: Komersial
Kode	: 1/12/1011	Gasket	: Komersial
Platinum	: mg/cm ²		

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.921	0.000	0.000	0.000
0	0.921	0.000	0.000	0.000
1	0.921	0.003	0.060	0.055
2	0.921	0.003	0.060	0.055
3	0.921	0.003	0.060	0.055
4	0.897	0.008	0.160	0.144
4.1	0.871	0.013	0.260	0.226
4.2	0.856	0.021	0.420	0.360
4.3	0.835	0.047	0.940	0.785
4.4	0.819	0.085	1.700	1.392
4.5	0.805	0.142	2.840	2.286
4.6	0.787	0.241	4.820	3.793
4.7	0.770	0.397	7.940	6.114
4.8	0.751	0.606	12.120	9.102
4.9	0.736	0.921	18.420	13.557
5	0.691	1.341	26.820	18.533
5.1	0.676	1.880	37.600	25.418
5.2	0.647	2.451	49.020	31.716
5.3	0.619	3.061	61.220	37.895
5.4	0.587	3.815	76.300	44.788
5.5	0.561	4.510	90.200	50.602
5.6	0.536	5.767	115.340	61.822
5.7	0.519	6.132	122.640	63.650
5.8	0.502	6.509	130.180	65.350
5.9	0.490	6.751	135.020	66.160
6	0.480	6.972	139.440	66.931
6.1	0.470	7.104	142.080	66.778
6.2	0.467	7.215	144.300	67.388
6.3	0.466	7.215	144.300	67.244
6.4	0.458	7.337	146.740	67.207
6.5	0.454	7.408	148.160	67.265
6.6	0.451	7.483	149.660	67.497
6.7	0.448	7.521	150.420	67.388
6.8	0.445	7.568	151.360	67.355
6.9	0.444	7.595	151.900	67.444
7	0.442	7.625	152.500	67.405
7.1	0.440	7.655	153.100	67.364
7.2	0.439	7.673	153.460	67.369
7.3	0.438	7.691	153.820	67.373
7.4	0.436	7.701	154.020	67.153
7.5	0.435	7.724	154.480	67.199
7.6	0.434	7.738	154.760	67.166

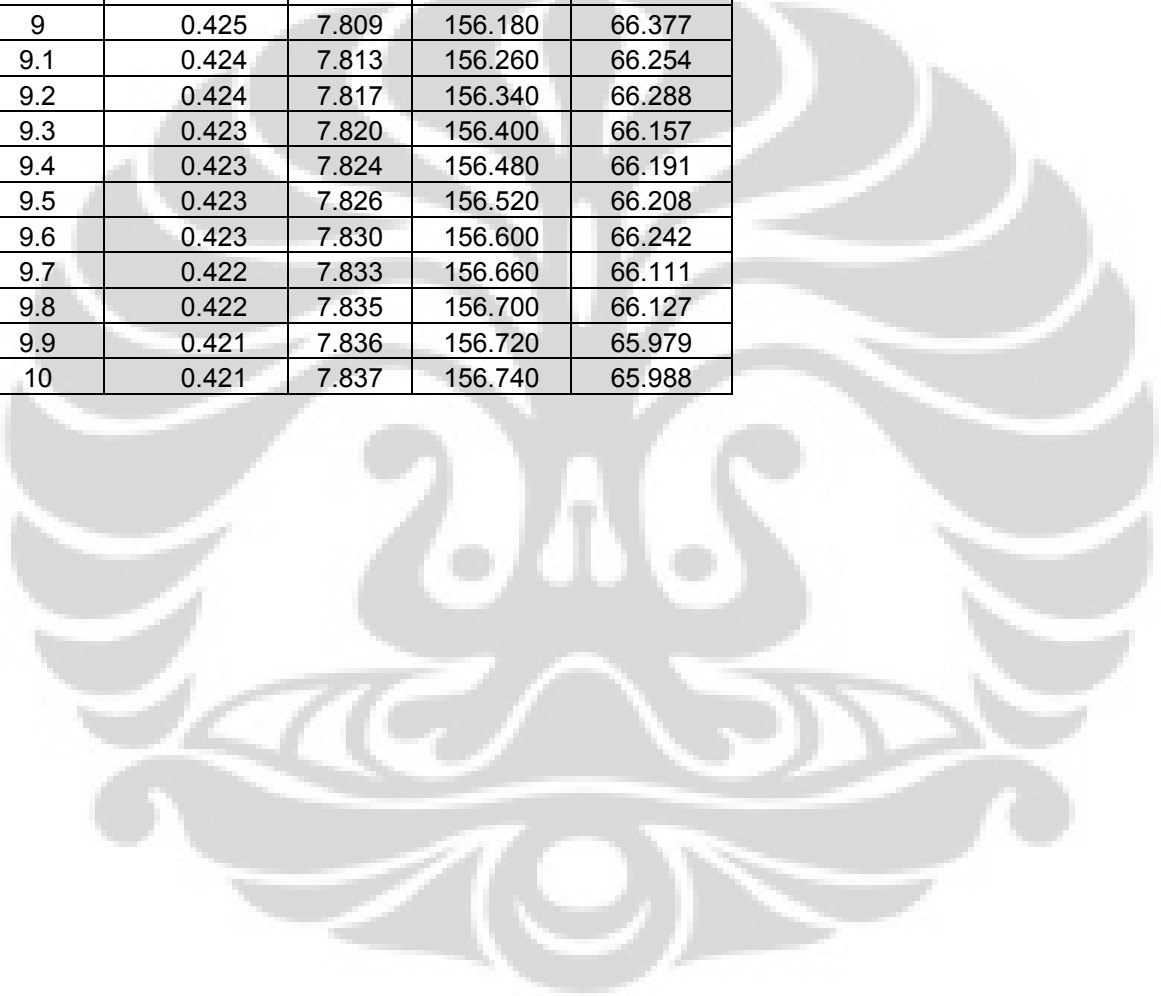
open jam: 09:00 V: 0.989
A: 0.000

load jam: 16:00 V: 0.921
A: 0.005

Catatan :

LAMPIRAN B

7.7	0.433	7.744	154.880	67.063
7.8	0.432	7.752	155.040	66.977
7.9	0.431	7.763	155.260	66.917
8	0.431	7.765	155.300	66.934
8.1	0.430	7.768	155.360	66.805
8.2	0.429	7.773	155.460	66.692
8.3	0.428	7.775	155.500	66.554
8.4	0.428	7.782	155.640	66.614
8.5	0.427	7.789	155.780	66.518
8.6	0.427	7.792	155.840	66.544
8.7	0.426	7.796	155.920	66.422
8.8	0.426	7.701	154.020	65.613
8.9	0.425	7.804	156.080	66.334
9	0.425	7.809	156.180	66.377
9.1	0.424	7.813	156.260	66.254
9.2	0.424	7.817	156.340	66.288
9.3	0.423	7.820	156.400	66.157
9.4	0.423	7.824	156.480	66.191
9.5	0.423	7.826	156.520	66.208
9.6	0.423	7.830	156.600	66.242
9.7	0.422	7.833	156.660	66.111
9.8	0.422	7.835	156.700	66.127
9.9	0.421	7.836	156.720	65.979
10	0.421	7.837	156.740	65.988



LAMPIRAN B

Tanggal : 4 Januari 2011
 Penguji : Danu/jajat
Sampel
 Ukuran : 50 cm²
 MEA : Buatan sendiri(Pt C 10%wt)1 sel
 Kode : 1/12/1011
 Platinum : mg/cm²

Tekanan
 H2 (psig) : 15 psi
 O2 (psig) : 15 psi
 Suhu : 25.4 C
 Pelat PA : Komersial
 Gasket : Komersial

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.933	0.000	0.000	0.000
0	0.933	0.006	0.120	0.112
1	0.933	0.006	0.120	0.112
2	0.933	0.006	0.120	0.112
3	0.933	0.006	0.120	0.112
4	0.903	0.011	0.220	0.199
4.1	0.887	0.015	0.300	0.266
4.2	0.870	0.021	0.420	0.365
4.3	0.859	0.041	0.820	0.704
4.4	0.832	0.078	1.560	1.298
4.5	0.816	0.151	3.020	2.464
4.6	0.802	0.243	4.860	3.898
4.7	0.783	0.421	8.420	6.593
4.8	0.767	0.600	12.000	9.204
4.9	0.747	0.916	18.320	13.685
5	0.723	1.361	27.220	19.680
5.1	0.708	1.777	35.540	25.162
5.2	0.677	2.387	47.740	32.320
5.3	0.645	3.055	61.100	39.410
5.4	0.613	3.862	77.240	47.348
5.5	0.598	4.417	88.340	52.827
5.6	0.576	5.147	102.940	59.293
5.7	0.549	5.761	115.220	63.256
5.8	0.532	6.293	125.860	66.958
5.9	0.523	6.661	133.220	69.674
6	0.511	6.908	138.160	70.600
6.1	0.503	7.135	142.700	71.778
6.2	0.497	7.293	145.860	72.492
6.3	0.493	7.411	148.220	73.072
6.4	0.488	7.553	151.060	73.717
6.5	0.485	7.620	152.400	73.914
6.6	0.484	7.602	152.040	73.587
6.7	0.480	7.686	153.720	73.786
6.8	0.478	7.732	154.640	73.918
6.9	0.476	7.786	155.720	74.123
7	0.474	7.825	156.500	74.181
7.1	0.473	7.865	157.300	74.403
7.2	0.471	7.897	157.940	74.390
7.3	0.470	7.924	158.480	74.486
7.4	0.469	7.944	158.880	74.515
7.5	0.468	7.963	159.260	74.534
7.6	0.467	7.982	159.640	74.552
7.7	0.466	7.996	159.920	74.523

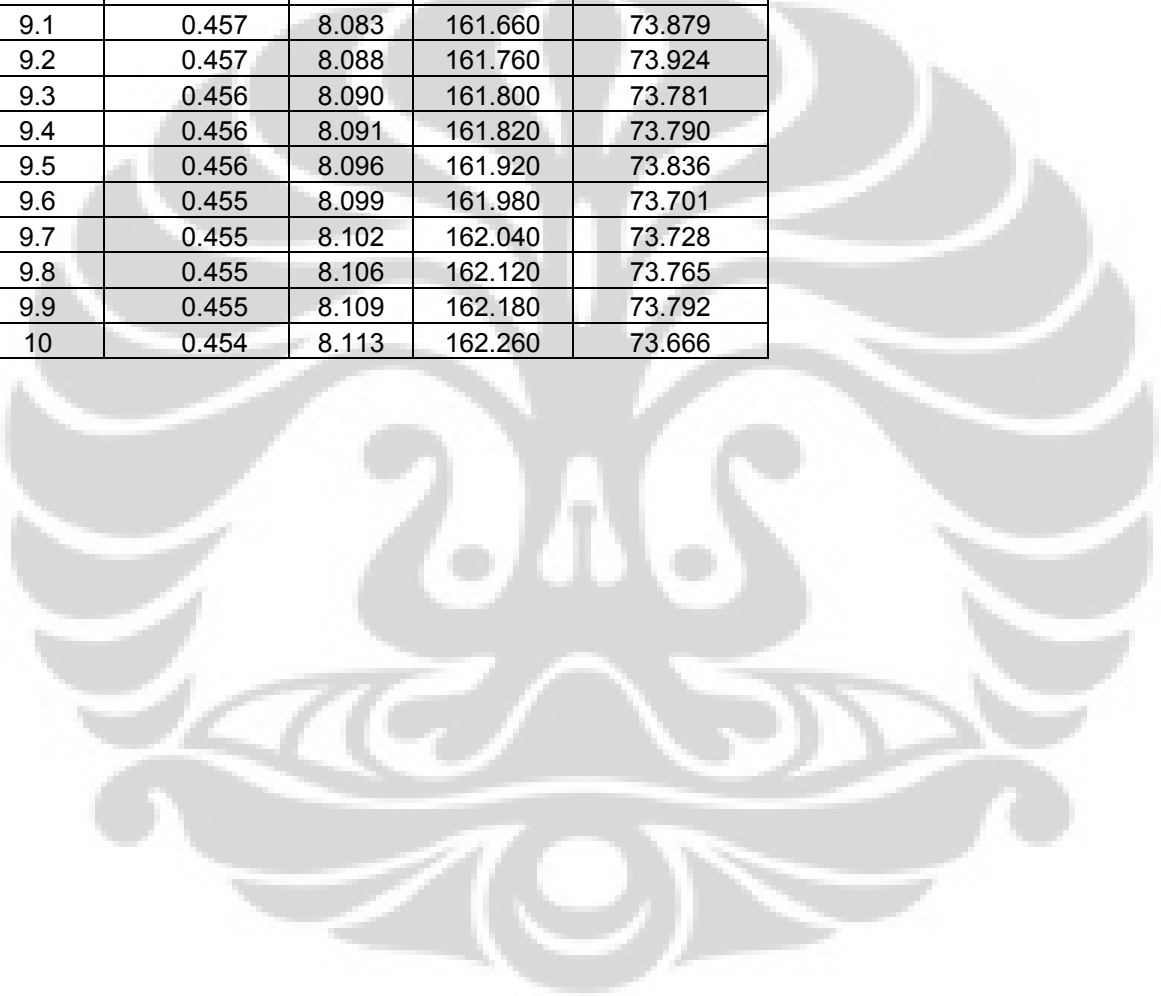
open jam: 09:30 V: 0.912
A: 0.000

load jam: 16:30 V: 0.933
A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.466	8.010	160.200	74.653
7.9	0.464	8.015	160.300	74.379
8	0.463	8.029	160.580	74.349
8.1	0.463	8.042	160.840	74.469
8.2	0.462	8.061	161.220	74.484
8.3	0.461	8.067	161.340	74.378
8.4	0.460	8.047	160.940	74.032
8.5	0.460	8.053	161.060	74.088
8.6	0.459	8.060	161.200	73.991
8.7	0.459	8.063	161.260	74.018
8.8	0.458	8.069	161.380	73.912
8.9	0.458	8.074	161.480	73.958
9	0.457	8.078	161.560	73.833
9.1	0.457	8.083	161.660	73.879
9.2	0.457	8.088	161.760	73.924
9.3	0.456	8.090	161.800	73.781
9.4	0.456	8.091	161.820	73.790
9.5	0.456	8.096	161.920	73.836
9.6	0.455	8.099	161.980	73.701
9.7	0.455	8.102	162.040	73.728
9.8	0.455	8.106	162.120	73.765
9.9	0.455	8.109	162.180	73.792
10	0.454	8.113	162.260	73.666



LAMPIRAN B

Tanggal : 5 Januari 2011
 Penguji : Danu
Sampel
 Ukuran : 50 cm²
 MEA : Buatan sendiri(Pt C 10%wt)1 sel
 Kode : 1/12/1011
 Platinum : mg/cm²

Tekanan
 H₂ (psig) : 15 psi
 O₂ (psig) : 15 psi
 Suhu : 26.6 C
 Pelat PA : Komersial
 Gasket : Komersial

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.942	0.005	0.100	0.094
0	0.942	0.005	0.100	0.094
1	0.941	0.005	0.100	0.094
2	0.940	0.005	0.100	0.094
3	0.940	0.005	0.100	0.094
4	0.925	0.010	0.200	0.185
4.1	0.901	0.015	0.300	0.270
4.2	0.892	0.028	0.560	0.500
4.3	0.854	0.050	1.000	0.854
4.4	0.838	0.074	1.480	1.240
4.5	0.824	0.156	3.120	2.571
4.6	0.806	0.266	5.320	4.288
4.7	0.795	0.407	8.140	6.471
4.8	0.779	0.645	12.900	10.049
4.9	0.776	0.975	19.500	15.132
5	0.738	1.333	26.660	19.675
5.1	0.708	1.905	38.100	26.975
5.2	0.684	2.343	46.860	32.052
5.3	0.661	3.231	64.620	42.714
5.4	0.622	3.981	79.620	49.524
5.5	0.597	4.790	95.800	57.193
5.6	0.575	5.260	105.200	60.490
5.7	0.552	5.919	118.380	65.346
5.8	0.542	6.393	127.860	69.300
5.9	0.523	6.828	136.560	71.421
6	0.518	7.102	142.040	73.577
6.1	0.512	7.328	146.560	75.039
6.2	0.506	7.518	150.360	76.082
6.3	0.501	7.665	153.300	76.803
6.4	0.497	7.800	156.000	77.532
6.5	0.492	7.880	157.600	77.539
6.6	0.489	7.989	159.780	78.132
6.7	0.488	8.000	160.000	78.080
6.8	0.486	8.079	161.580	78.528
6.9	0.483	8.103	162.060	78.275
7	0.480	8.172	163.440	78.451
7.1	0.479	8.225	164.500	78.796
7.2	0.477	8.252	165.040	78.724
7.3	0.476	8.302	166.040	79.035
7.4	0.475	8.312	166.240	78.964
7.5	0.474	8.323	166.460	78.902
7.6	0.473	8.342	166.840	78.915
7.7	0.472	8.361	167.220	78.928

open jam: 09:30

V: 0.912

A: 0.000

load jam: 16:30

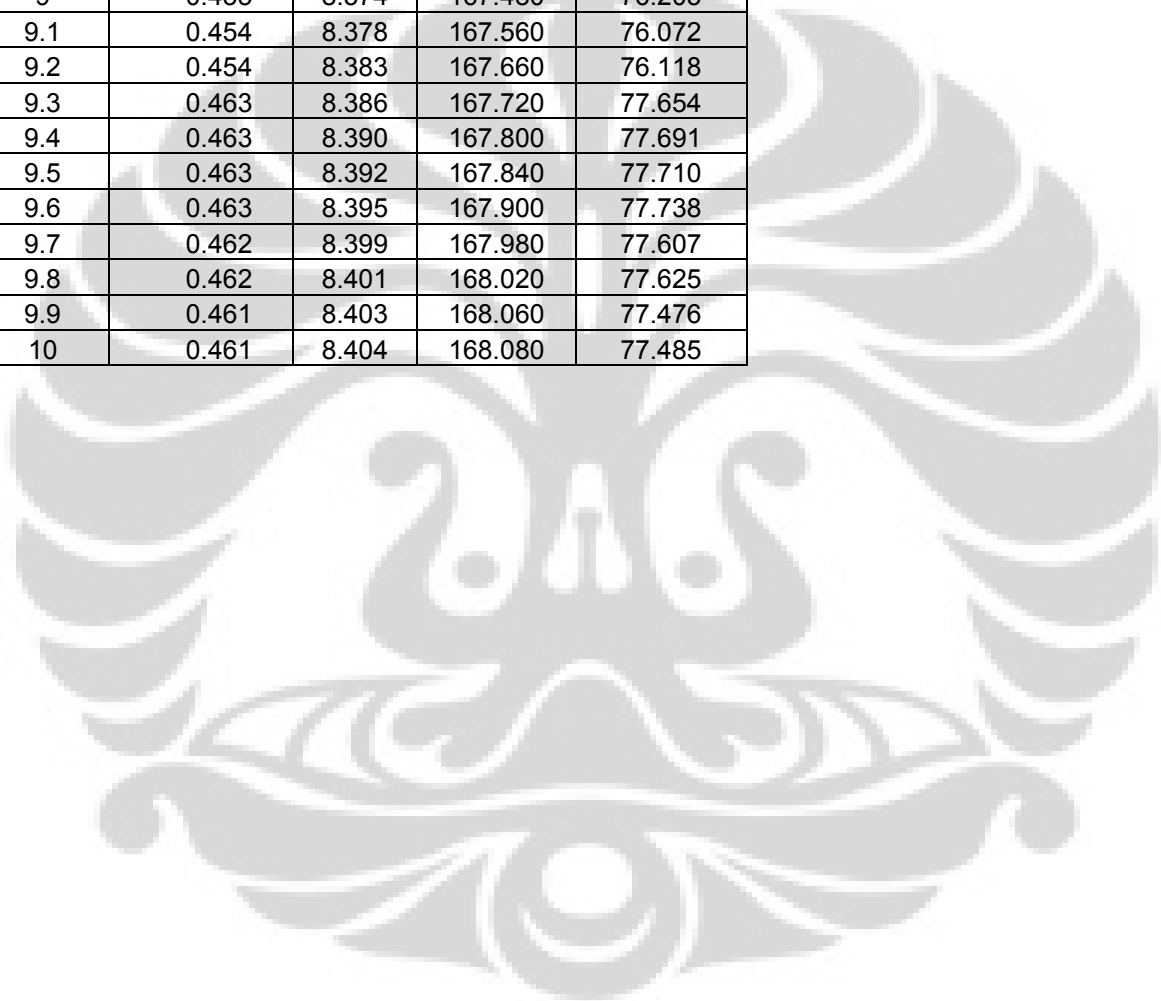
V: 0.933

A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.472	8.369	167.380	79.003
7.9	0.471	8.378	167.560	78.921
8	0.470	8.341	166.820	78.405
8.1	0.470	8.344	166.880	78.434
8.2	0.469	8.349	166.980	78.314
8.3	0.468	8.351	167.020	78.165
8.4	0.468	8.354	167.080	78.193
8.5	0.467	8.357	167.140	78.054
8.6	0.467	8.360	167.200	78.082
8.7	0.466	8.363	167.260	77.943
8.8	0.455	8.368	167.360	76.149
8.9	0.455	8.371	167.420	76.176
9	0.455	8.374	167.480	76.203
9.1	0.454	8.378	167.560	76.072
9.2	0.454	8.383	167.660	76.118
9.3	0.463	8.386	167.720	77.654
9.4	0.463	8.390	167.800	77.691
9.5	0.463	8.392	167.840	77.710
9.6	0.463	8.395	167.900	77.738
9.7	0.462	8.399	167.980	77.607
9.8	0.462	8.401	168.020	77.625
9.9	0.461	8.403	168.060	77.476
10	0.461	8.404	168.080	77.485



LAMPIRAN B

Tanggal : 5 Januari 2011
 Penguji : Danu
Sampel
 Ukuran : 50 cm²
 MEA : Buatan sendiri(Pt C 10%wt)1 sel
 Kode : 1/12/1011
 Platinum : mg/cm²

Tekanan
 H₂ (psig) : 15 psi
 O₂ (psig) : 15 psi
 Suhu : 30.2 C
 Pelat PA : Komersial
 Gasket : Komersial

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.940	0.005	0.100	0.094
0	0.940	0.005	0.100	0.094
1	0.940	0.005	0.100	0.094
2	0.940	0.005	0.100	0.094
3	0.940	0.005	0.100	0.094
4	0.921	0.010	0.200	0.184
4.1	0.907	0.015	0.300	0.272
4.2	0.891	0.026	0.520	0.463
4.3	0.868	0.045	0.900	0.781
4.4	0.851	0.083	1.660	1.413
4.5	0.827	0.150	3.000	2.481
4.6	0.808	0.251	5.020	4.056
4.7	0.787	0.438	8.760	6.894
4.8	0.768	0.651	13.020	9.999
4.9	0.744	0.972	19.440	14.463
5	0.722	1.310	26.200	18.916
5.1	0.688	1.909	38.180	26.268
5.2	0.663	2.365	47.300	31.360
5.3	0.628	3.021	60.420	37.944
5.4	0.596	3.725	74.500	44.402
5.5	0.564	4.436	88.720	50.038
5.6	0.540	5.095	101.900	55.026
5.7	0.515	5.726	114.520	58.978
5.8	0.501	6.075	121.500	60.872
5.9	0.488	6.401	128.020	62.474
6	0.478	6.710	134.200	64.148
6.1	0.470	6.886	137.720	64.728
6.2	0.464	7.027	140.540	65.211
6.3	0.460	7.159	143.180	65.863
6.4	0.456	7.255	145.100	66.166
6.5	0.453	7.336	146.720	66.464
6.6	0.450	7.410	148.200	66.690
6.7	0.448	7.473	149.460	66.958
6.8	0.446	7.526	150.520	67.132
6.9	0.444	7.564	151.280	67.168
7	0.443	7.600	152.000	67.336
7.1	0.442	7.633	152.660	67.476
7.2	0.441	7.660	153.200	67.561
7.3	0.440	7.679	153.580	67.575
7.4	0.439	7.706	154.120	67.659
7.5	0.438	7.722	154.440	67.645
7.6	0.437	7.742	154.840	67.665

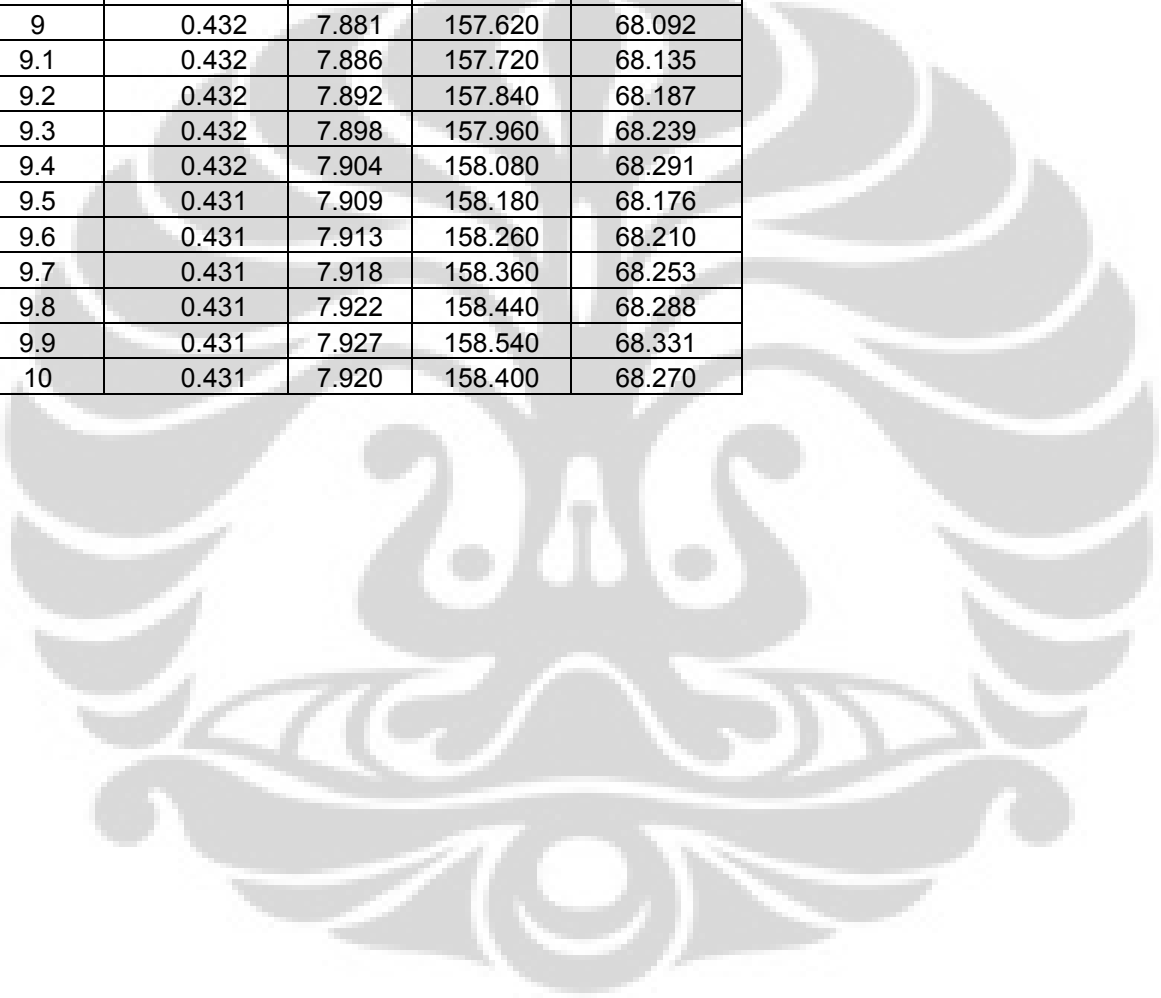
open tgl 3 Januari 2011 jam: 09:30

load tgl 5 Jan 2011 jam:

Catatan :

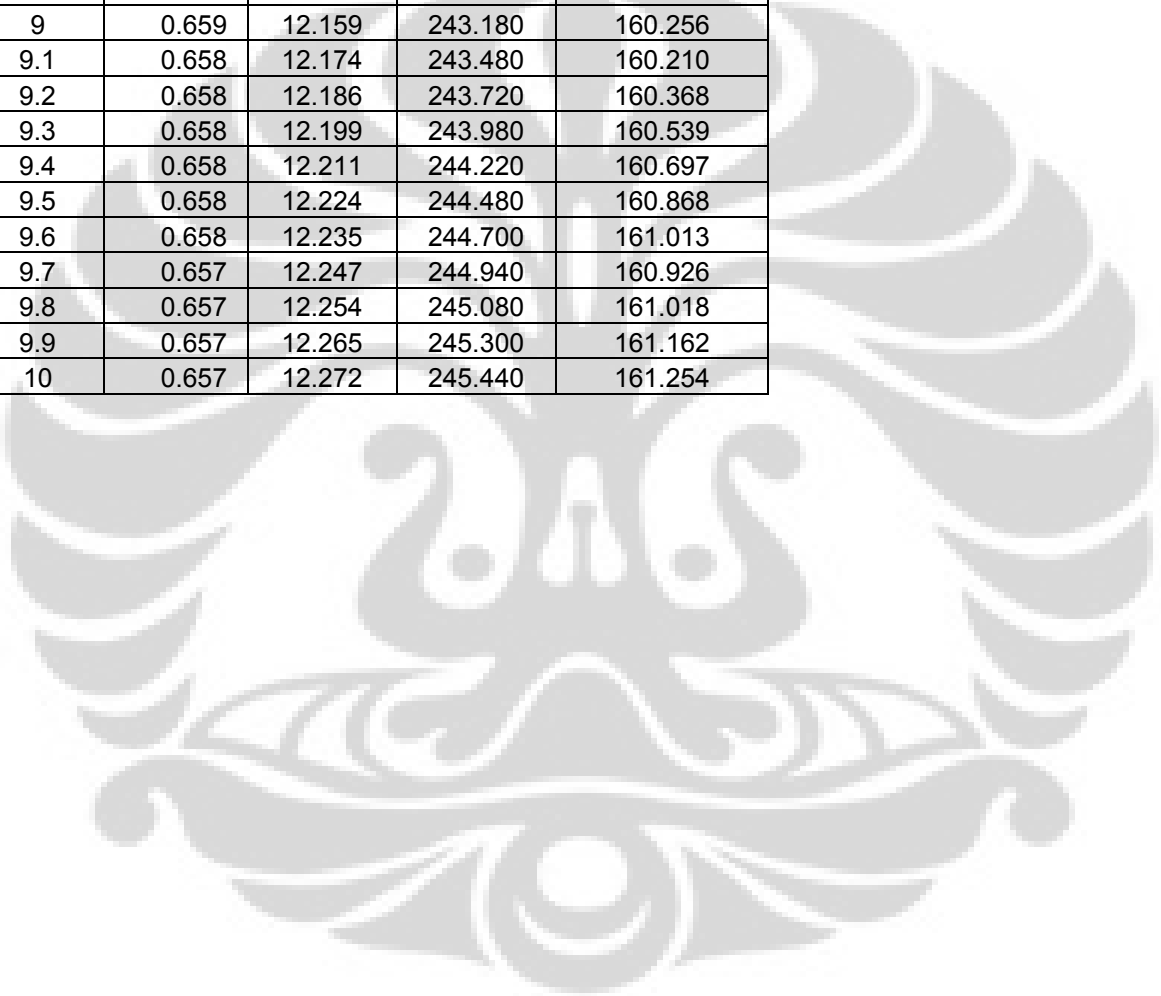
LAMPIRAN B

7.7	0.437	7.758	155.160	67.805
7.8	0.436	7.773	155.460	67.781
7.9	0.436	7.784	155.680	67.876
8	0.435	7.796	155.920	67.825
8.1	0.435	7.806	156.120	67.912
8.2	0.435	7.818	156.360	68.017
8.3	0.434	7.828	156.560	67.947
8.4	0.434	7.835	156.700	68.008
8.5	0.434	7.844	156.880	68.086
8.6	0.433	7.853	157.060	68.007
8.7	0.433	7.860	157.200	68.068
8.8	0.433	7.868	157.360	68.137
8.9	0.432	7.874	157.480	68.031
9	0.432	7.881	157.620	68.092
9.1	0.432	7.886	157.720	68.135
9.2	0.432	7.892	157.840	68.187
9.3	0.432	7.898	157.960	68.239
9.4	0.432	7.904	158.080	68.291
9.5	0.431	7.909	158.180	68.176
9.6	0.431	7.913	158.260	68.210
9.7	0.431	7.918	158.360	68.253
9.8	0.431	7.922	158.440	68.288
9.9	0.431	7.927	158.540	68.331
10	0.431	7.920	158.400	68.270



LAMPIRAN B

7.7	0.662	11.870	237.400	157.159
7.8	0.662	11.903	238.060	157.596
7.9	0.662	11.938	238.760	158.059
8	0.661	11.966	239.320	158.191
8.1	0.661	11.992	239.840	158.534
8.2	0.660	12.013	240.260	158.572
8.3	0.660	12.038	240.760	158.902
8.4	0.660	12.057	241.140	159.152
8.5	0.660	12.078	241.560	159.430
8.6	0.659	12.095	241.900	159.412
8.7	0.659	12.113	242.260	159.649
8.8	0.659	12.133	242.660	159.913
8.9	0.659	12.146	242.920	160.084
9	0.659	12.159	243.180	160.256
9.1	0.658	12.174	243.480	160.210
9.2	0.658	12.186	243.720	160.368
9.3	0.658	12.199	243.980	160.539
9.4	0.658	12.211	244.220	160.697
9.5	0.658	12.224	244.480	160.868
9.6	0.658	12.235	244.700	161.013
9.7	0.657	12.247	244.940	160.926
9.8	0.657	12.254	245.080	161.018
9.9	0.657	12.265	245.300	161.162
10	0.657	12.272	245.440	161.254



LAMPIRAN B

Tanggal : 02 Maret 2011
 Penguji : Danu
Sampel
 Ukuran : 50 cm²
 MEA : Buatan sendiri teflon Ptc
 Kode :
 Platinum : mg/cm²

Tekanan
 H₂ (psig) : 10 psi
 O₂ (psig) : 10 psi
 Suhu : 36.8C
 Pelat PA : Komersial
 Gasket : Komersial

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.968	0.000	0.000	0.000
0	0.968	0.000	0.000	0.000
1	0.968	0.004	0.080	0.077
2	0.968	0.004	0.080	0.077
3	0.968	0.004	0.080	0.077
4	0.955	0.010	0.200	0.191
4.1	0.950	0.014	0.280	0.266
4.2	0.935	0.025	0.500	0.468
4.3	0.912	0.045	0.900	0.821
4.4	0.885	0.083	1.660	1.469
4.5	0.862	0.137	2.740	2.362
4.6	0.837	0.260	5.200	4.352
4.7	0.819	0.415	8.300	6.798
4.8	0.798	0.637	12.740	10.167
4.9	0.772	1.005	20.100	15.517
5	0.749	1.444	28.888	21.637
5.1	0.727	1.882	37.640	27.364
5.2	0.697	2.450	49.000	34.153
5.3	0.678	3.046	60.920	41.304
5.4	0.649	3.825	76.500	49.649
5.5	0.621	4.594	91.880	57.057
5.6	0.593	5.434	108.680	64.447
5.7	0.568	6.006	120.120	68.228
5.8	0.555	6.521	130.420	72.383
5.9	0.539	6.914	138.280	74.533
6	0.528	7.256	145.120	76.623
6.1	0.519	7.481	149.620	77.653
6.2	0.512	7.672	153.440	78.561
6.3	0.509	7.788	155.760	79.282
6.4	0.502	7.932	158.640	79.637
6.5	0.499	8.036	160.720	80.199
6.6	0.496	8.120	162.400	80.550
6.7	0.493	8.186	163.720	80.714
6.8	0.491	8.246	164.920	80.976
6.9	0.487	8.305	166.100	80.891
7	0.487	8.339	166.780	81.222
7.1	0.486	8.378	167.560	81.434
7.2	0.484	8.404	168.080	81.351
7.3	0.483	8.433	168.660	81.463
7.4	0.482	8.459	169.180	81.545
7.5	0.481	8.481	169.620	81.587
7.6	0.481	8.501	170.020	81.780
7.7	0.480	8.517	170.340	81.763

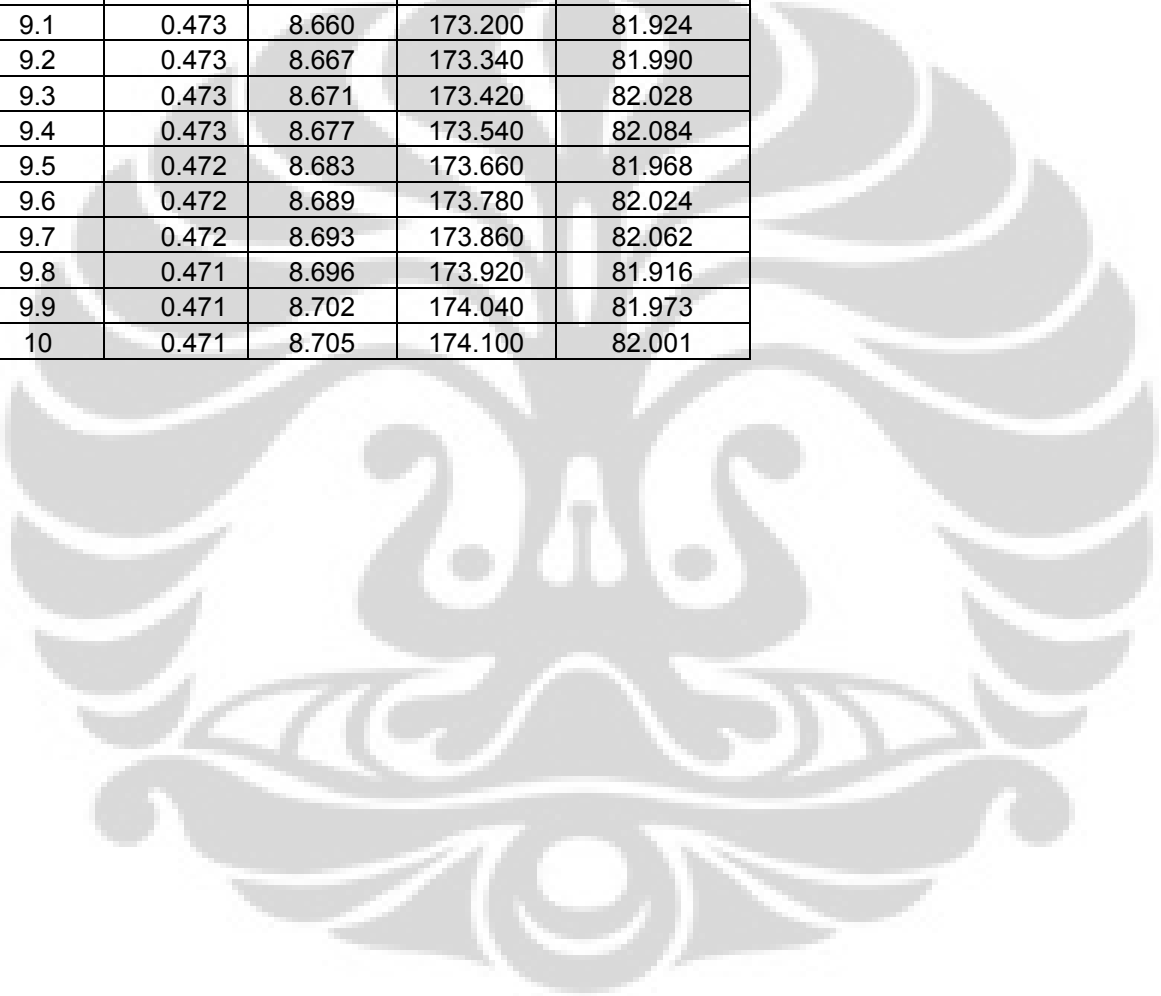
open jam: 10:00 V:0.979
A: 0.000

load jam: 16:30 V:0.968
A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.479	8.536	170.720	81.775
7.9	0.478	8.552	171.040	81.757
8	0.478	8.560	171.200	81.834
8.1	0.477	8.574	171.480	81.796
8.2	0.477	8.584	171.680	81.891
8.3	0.476	8.596	171.920	81.834
8.4	0.476	8.604	172.080	81.910
8.5	0.475	8.615	172.306	81.845
8.6	0.475	8.623	172.460	81.919
8.7	0.475	8.631	172.620	81.995
8.8	0.474	8.639	172.780	81.898
8.9	0.474	8.647	172.940	81.974
9	0.474	8.653	173.060	82.030
9.1	0.473	8.660	173.200	81.924
9.2	0.473	8.667	173.340	81.990
9.3	0.473	8.671	173.420	82.028
9.4	0.473	8.677	173.540	82.084
9.5	0.472	8.683	173.660	81.968
9.6	0.472	8.689	173.780	82.024
9.7	0.472	8.693	173.860	82.062
9.8	0.471	8.696	173.920	81.916
9.9	0.471	8.702	174.040	81.973
10	0.471	8.705	174.100	82.001



LAMPIRAN B

Tanggal : 03 Maret 2011
 Penguji : Danu
Sampel
 Ukuran : 50 cm²
 MEA : buatan sendiri
 Kode :
 Platinum : mg/cm²

Tekanan
 H₂ (psig) : 10 psi
 O₂ (psig) : 10 psi
 Suhu : 37.7C
 Pelat PA : Komersial
 Gasket : Komersial

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.984	0.000	0.000	0.000
0	0.984	0.000	0.000	0.000
1	0.984	0.004	0.080	0.079
2	0.984	0.004	0.080	0.079
3	0.984	0.004	0.080	0.079
4	0.976	0.009	0.180	0.176
4.1	0.966	0.015	0.300	0.290
4.2	0.944	0.028	0.560	0.529
4.3	0.917	0.048	0.960	0.880
4.4	0.886	0.080	1.600	1.418
4.5	0.863	0.155	3.100	2.675
4.6	0.843	0.265	5.300	4.468
4.7	0.821	0.442	8.840	7.258
4.8	0.801	0.643	12.860	10.301
4.9	0.779	1.027	20.540	16.001
5	0.759	1.349	26.980	20.478
5.1	0.735	1.909	38.180	28.062
5.2	0.711	2.446	48.920	34.782
5.3	0.686	3.035	60.700	41.640
5.4	0.665	3.644	72.880	48.465
5.5	0.631	4.732	94.640	59.718
5.6	0.602	5.549	110.980	66.810
5.7	0.585	6.044	120.880	70.715
5.8	0.567	6.660	133.200	75.524
5.9	0.554	7.044	140.880	78.048
6	0.543	7.370	147.400	80.038
6.1	0.533	7.612	152.240	81.144
6.2	0.525	7.815	156.300	82.058
6.3	0.521	7.946	158.920	82.797
6.4	0.517	8.092	161.840	83.671
6.5	0.513	8.185	163.700	83.978
6.6	0.510	8.279	165.580	84.446
6.7	0.507	8.349	166.980	84.659
6.8	0.505	8.413	168.260	84.971
6.9	0.503	8.461	169.220	85.118
7	0.501	8.504	170.080	85.210
7.1	0.500	8.537	170.740	85.370
7.2	0.499	8.576	171.520	85.588
7.3	0.498	8.602	172.040	85.676
7.4	0.497	8.627	172.540	85.752
7.5	0.496	8.649	172.980	85.798
7.6	0.495	8.670	173.400	85.833
7.7	0.494	8.686	173.720	85.818

open jam: 08:00

V:0.965
 A: 0.000

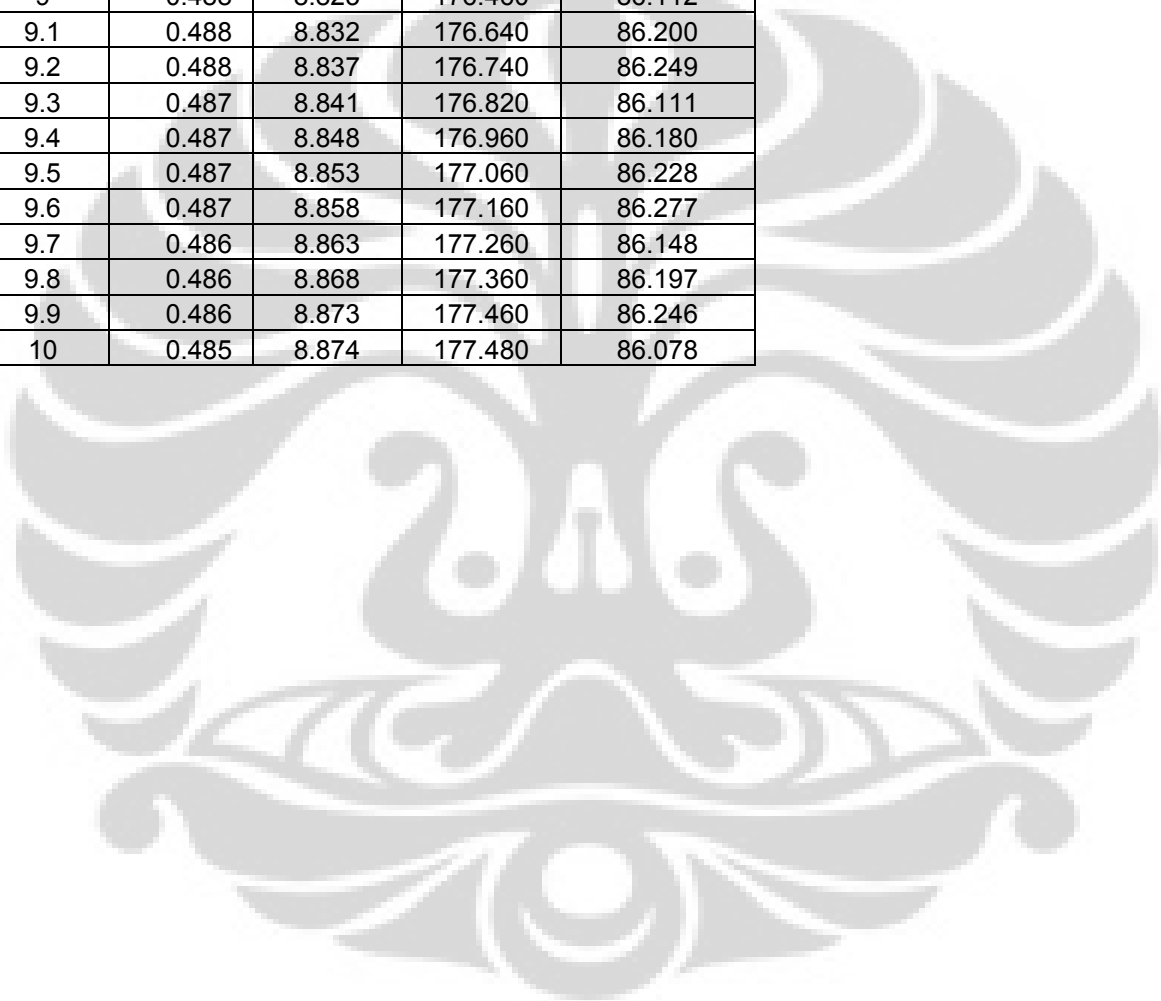
load jam: 16:00

V:0.984
 A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.493	8.705	174.100	85.831
7.9	0.493	8.718	174.360	85.959
8	0.492	8.734	174.680	85.943
8.1	0.492	8.744	174.880	86.041
8.2	0.491	8.755	175.100	85.974
8.3	0.491	8.764	175.280	86.062
8.4	0.490	8.775	175.500	85.995
8.5	0.490	8.785	175.700	86.093
8.6	0.490	8.794	175.880	86.181
8.7	0.489	8.802	176.040	86.084
8.8	0.489	8.811	176.220	86.172
8.9	0.488	8.817	176.340	86.054
9	0.488	8.823	176.460	86.112
9.1	0.488	8.832	176.640	86.200
9.2	0.488	8.837	176.740	86.249
9.3	0.487	8.841	176.820	86.111
9.4	0.487	8.848	176.960	86.180
9.5	0.487	8.853	177.060	86.228
9.6	0.487	8.858	177.160	86.277
9.7	0.486	8.863	177.260	86.148
9.8	0.486	8.868	177.360	86.197
9.9	0.486	8.873	177.460	86.246
10	0.485	8.874	177.480	86.078



LAMPIRAN B

Tanggal	: 4 Maret 2011	Tekanan	
Penguji	: Danu	H2 (psig)	: 10 psi
Sampel		O2 (psig)	: 10 psi
Ukuran	: 50 cm ²	Suhu	: 38.2C
MEA	: buatan sendiri PTC 10%	Pelat PA	: Komersial
Kode	: 20/01/2011	Gasket	: Komersial
Platinum	: mg/cm ²		

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.981	0.000	0.000	0.000
0	0.981	0.000	0.000	0.000
1	0.981	0.004	0.080	0.078
2	0.981	0.004	0.080	0.078
3	0.981	0.004	0.080	0.078
4	0.972	0.009	0.180	0.175
4.1	0.964	0.014	0.280	0.270
4.2	0.947	0.026	0.520	0.492
4.3	0.921	0.050	1.000	0.921
4.4	0.892	0.079	1.580	1.409
4.5	0.864	0.163	3.260	2.817
4.6	0.842	0.279	5.580	4.698
4.7	0.821	0.456	9.120	7.488
4.8	0.802	0.678	13.560	10.875
4.9	0.781	0.950	19.000	14.839
5	0.760	1.396	27.920	21.219
5.1	0.737	1.886	37.720	27.800
5.2	0.714	2.522	50.440	36.014
5.3	0.687	3.122	62.440	42.896
5.4	0.664	3.852	77.040	51.155
5.5	0.631	4.718	94.360	59.541
5.6	0.606	5.496	109.920	66.612
5.7	0.585	6.079	121.580	71.124
5.8	0.565	6.692	133.840	75.620
5.9	0.554	7.019	140.380	77.771
6	0.543	7.351	147.020	79.832
6.1	0.534	7.633	152.660	81.520
6.2	0.528	7.829	156.580	82.674
6.3	0.522	7.978	159.560	83.290
6.4	0.518	8.072	161.440	83.626
6.5	0.514	8.202	164.040	84.317
6.6	0.511	8.276	165.520	84.581
6.7	0.509	8.360	167.200	85.105
6.8	0.506	8.418	168.360	85.190
6.9	0.505	8.470	169.400	85.547
7	0.503	8.512	170.240	85.631
7.1	0.502	8.544	170.880	85.782
7.2	0.500	8.576	171.520	85.760
7.3	0.499	8.602	172.040	85.848
7.4	0.498	8.631	172.620	85.965
7.5	0.497	8.653	173.060	86.011
7.6	0.497	8.677	173.540	86.249
7.7	0.496	8.694	173.880	86.244

open jam: 10:00

V:
A: 0.000

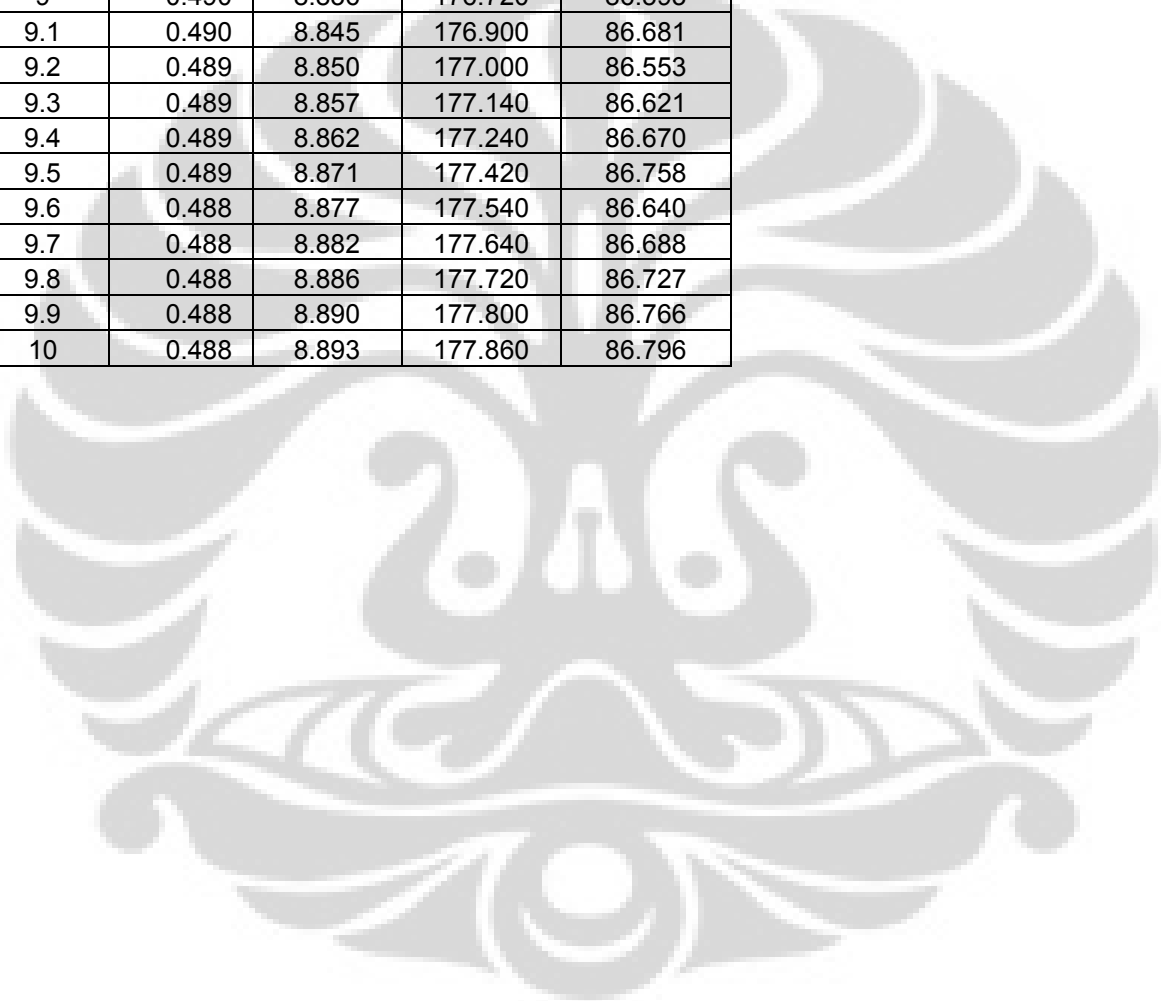
load jam: 16:30

V:
A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.495	8.712	174.240	86.249
7.9	0.495	8.725	174.500	86.378
8	0.494	8.742	174.840	86.371
8.1	0.494	8.752	175.040	86.470
8.2	0.493	8.764	175.280	86.413
8.3	0.493	8.775	175.500	86.522
8.4	0.492	8.784	175.680	86.435
8.5	0.492	8.795	175.900	86.543
8.6	0.491	8.807	176.140	86.485
8.7	0.491	8.814	176.280	86.553
8.8	0.491	8.822	176.440	86.632
8.9	0.490	8.829	176.580	86.524
9	0.490	8.836	176.720	86.593
9.1	0.490	8.845	176.900	86.681
9.2	0.489	8.850	177.000	86.553
9.3	0.489	8.857	177.140	86.621
9.4	0.489	8.862	177.240	86.670
9.5	0.489	8.871	177.420	86.758
9.6	0.488	8.877	177.540	86.640
9.7	0.488	8.882	177.640	86.688
9.8	0.488	8.886	177.720	86.727
9.9	0.488	8.890	177.800	86.766
10	0.488	8.893	177.860	86.796



LAMPIRAN B

Tanggal : 14 Maret 2011
 Penguji : Jajat/Danu
Sampel
 Ukuran : 50 cm²
 buatan sendiri ptfе 30 dan
 MEA : fep121
 Kode : PTFE/FEP
 Platinum : mg/cm²

Tekanan
 H2 (psig) : 10 psi
 O2 (psig) : 10 psi
 Suhu : 35C

Pelat PA : Komersial
 Gasket : Komersial

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.990	0.000	0.000	0.000
0	0.990	0.006	0.120	0.119
1	0.990	0.006	0.120	0.119
2	0.990	0.006	0.120	0.119
3	0.990	0.006	0.120	0.119
4	0.981	0.013	0.260	0.255
4.1	0.968	0.021	0.420	0.407
4.2	0.931	0.035	0.700	0.652
4.3	0.924	0.055	1.100	1.016
4.4	0.898	0.105	2.100	1.886
4.5	0.863	0.175	3.500	3.021
4.6	0.840	0.300	6.000	5.040
4.7	0.827	0.478	9.560	7.906
4.8	0.802	0.729	14.580	11.693
4.9	0.784	1.043	20.860	16.354
5	0.762	1.498	29.960	22.830
5.1	0.743	2.067	41.340	30.716
5.2	0.729	2.499	49.980	36.435
5.3	0.694	3.343	66.860	46.401
5.4	0.671	4.096	81.920	54.968
5.5	0.657	4.801	96.020	63.085
5.6	0.624	5.543	110.860	69.177
5.7	0.604	6.198	123.960	74.872
5.8	0.589	6.732	134.640	79.303
5.9	0.576	7.146	142.920	82.322
6	0.567	7.457	149.140	84.562
6.1	0.558	7.798	155.960	87.026
6.2	0.552	7.893	157.860	87.139
6.3	0.547	8.043	160.860	87.990
6.4	0.543	8.173	163.460	88.759
6.5	0.539	8.292	165.840	89.388
6.6	0.536	8.373	167.460	89.759
6.7	0.534	8.444	168.880	90.182
6.8	0.532	8.505	170.100	90.493
6.9	0.530	8.551	171.020	90.641
7	0.528	8.599	171.980	90.805
7.1	0.528	8.640	172.800	91.238
7.2	0.527	8.676	173.520	91.445
7.3	0.525	8.697	173.940	91.319
7.4	0.524	8.720	174.400	91.386
7.5	0.523	8.744	174.880	91.462
7.6	0.523	8.752	175.040	91.546
7.7	0.522	8.773	175.460	91.590

open jam: 10:00

V:1.045

A: 0.000

load jam: 16:30

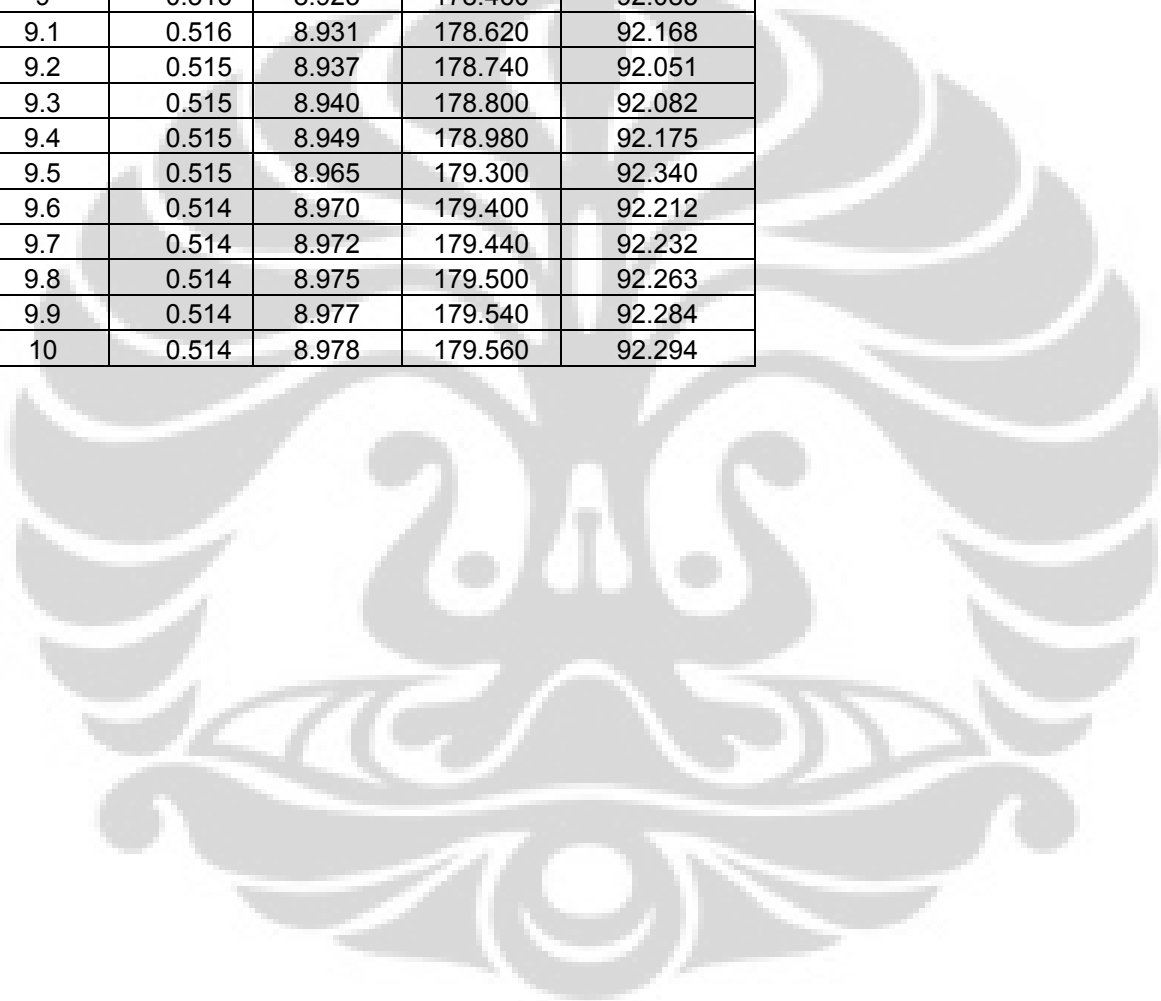
V:0.990

A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.521	8.799	175.980	91.686
7.9	0.520	8.815	176.300	91.676
8	0.520	8.829	176.580	91.822
8.1	0.519	8.841	176.820	91.770
8.2	0.519	8.850	177.000	91.863
8.3	0.519	8.865	177.300	92.019
8.4	0.518	8.871	177.420	91.904
8.5	0.518	8.883	177.660	92.028
8.6	0.517	8.891	177.820	91.933
8.7	0.517	8.899	177.980	92.016
8.8	0.517	8.908	178.160	92.109
8.9	0.516	8.916	178.320	92.013
9	0.516	8.923	178.460	92.085
9.1	0.516	8.931	178.620	92.168
9.2	0.515	8.937	178.740	92.051
9.3	0.515	8.940	178.800	92.082
9.4	0.515	8.949	178.980	92.175
9.5	0.515	8.965	179.300	92.340
9.6	0.514	8.970	179.400	92.212
9.7	0.514	8.972	179.440	92.232
9.8	0.514	8.975	179.500	92.263
9.9	0.514	8.977	179.540	92.284
10	0.514	8.978	179.560	92.294



LAMPIRAN B

Tanggal	: 4-Apr-11	Tekanan	
Penguji	: Danu/Jajat	H2 (psig)	: 10 psi
Sampel		O2 (psig)	: 10 psi
Ukuran	: 50 cm2	Suhu	:
	Buatan Sendiri (PtC		
MEA	: 20%)FEP121	Pelat PA	: Komersial
Kode	:	Gasket	: Komersial
Platinum	: 50 mg/cm2		

Load	V	A	d(mA/cm2)	mW/cm2
Off	0.987	0.000	0.000	0.000
0	0.987	0.000	0.000	0.000
1	0.987	0.003	0.060	0.059
2	0.987	0.003	0.060	0.059
3	0.987	0.003	0.060	0.059
4	0.965	0.009	0.180	0.174
4.1	0.965	0.015	0.300	0.290
4.2	0.951	0.031	0.620	0.590
4.3	0.928	0.046	0.920	0.854
4.4	0.921	0.080	1.600	1.474
4.5	0.907	0.172	3.440	3.120
4.6	0.885	0.294	5.880	5.204
4.7	0.867	0.453	9.060	7.855
4.8	0.846	0.705	14.100	11.929
4.9	0.827	1.008	20.160	16.672
5	0.805	1.445	28.900	23.265
5.1	0.785	1.948	38.960	30.584
5.2	0.763	2.528	50.560	38.577
5.3	0.741	3.188	63.760	47.246
5.4	0.713	3.992	79.840	56.926
5.5	0.679	4.899	97.980	66.528
5.6	0.653	5.593	111.860	73.045
5.7	0.627	6.371	127.420	79.892
5.8	0.607	6.941	138.820	84.264
5.9	0.590	7.338	146.760	86.588
6	0.577	7.662	153.240	88.419
6.1	0.565	7.900	158.000	89.270
6.2	0.557	8.022	160.440	89.365
6.3	0.549	8.183	163.660	89.849
6.4	0.543	8.281	165.620	89.932
6.5	0.538	8.386	167.720	90.233
6.6	0.537	8.392	167.840	90.130
6.7	0.528	8.484	169.680	89.591
6.8	0.523	8.450	169.000	88.387
6.9	0.520	8.480	169.600	88.192
7	0.510	8.505	170.100	86.751
7.1	0.515	8.529	170.580	87.849
7.2	0.513	8.539	170.780	87.610
7.3	0.511	8.555	171.100	87.432
7.4	0.510	8.565	171.300	87.363
7.5	0.508	8.574	171.480	87.112
7.6	0.507	8.582	171.640	87.021
7.7	0.505	8.587	171.740	86.729

open jam: 09:00

V:0.896

A: 0.000

load jam: 16:30

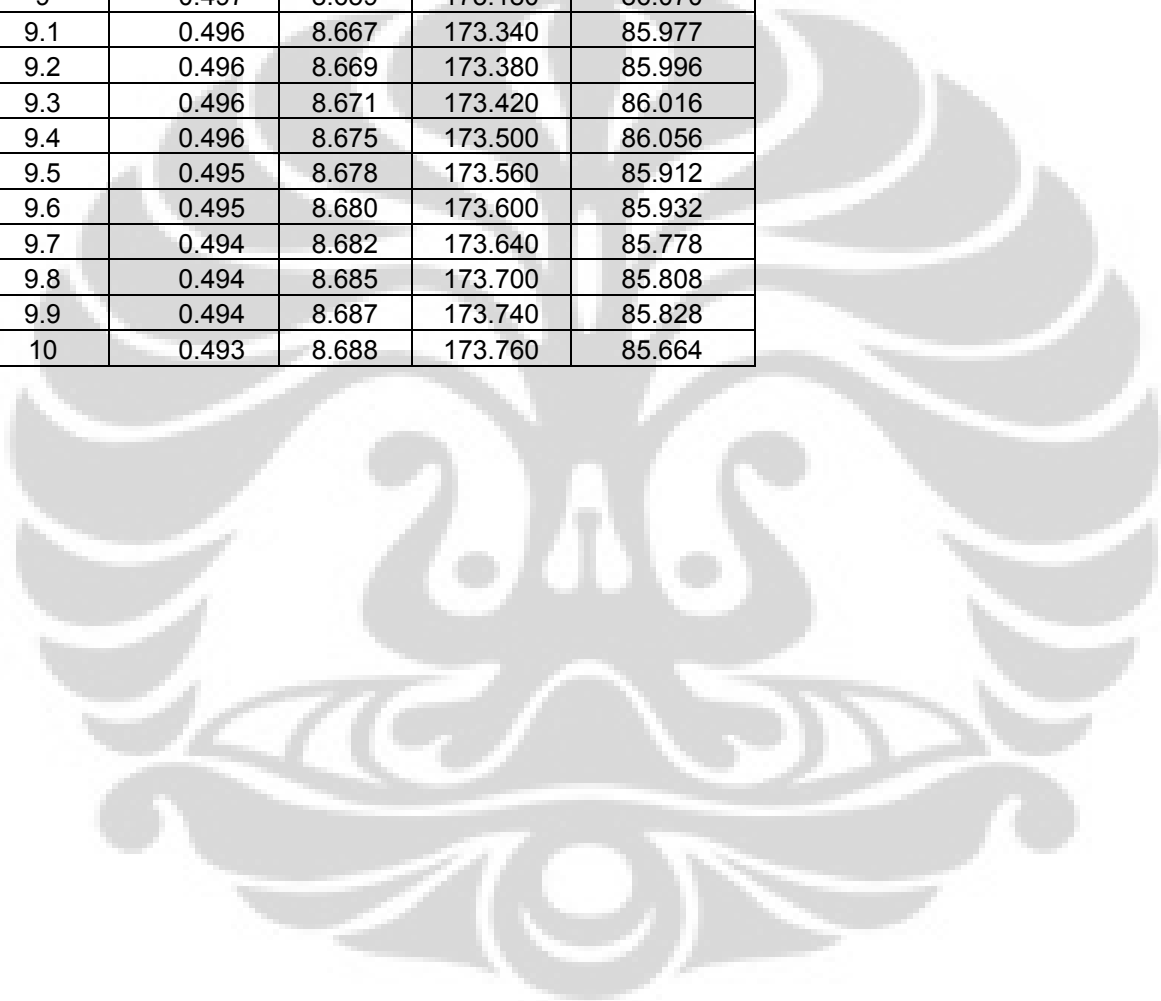
V:0.987

A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.504	8.592	171.840	86.607
7.9	0.503	8.596	171.920	86.476
8	0.502	8.600	172.000	86.344
8.1	0.502	8.623	172.460	86.575
8.2	0.501	8.639	172.780	86.563
8.3	0.501	8.641	172.820	86.583
8.4	0.499	8.645	172.900	86.277
8.5	0.499	8.645	172.900	86.277
8.6	0.499	8.648	172.960	86.307
8.7	0.499	8.650	173.000	86.327
8.8	0.498	8.652	173.040	86.174
8.9	0.497	8.656	173.120	86.041
9	0.497	8.659	173.180	86.070
9.1	0.496	8.667	173.340	85.977
9.2	0.496	8.669	173.380	85.996
9.3	0.496	8.671	173.420	86.016
9.4	0.496	8.675	173.500	86.056
9.5	0.495	8.678	173.560	85.912
9.6	0.495	8.680	173.600	85.932
9.7	0.494	8.682	173.640	85.778
9.8	0.494	8.685	173.700	85.808
9.9	0.494	8.687	173.740	85.828
10	0.493	8.688	173.760	85.664



LAMPIRAN B

Tanggal : 19-Apr-11
 Penguji : Danu
Sampel
 Ukuran : 50 cm²
 Buatan Sendiri(Ptc 20%,cnt
 MEA : 50%)
 Kode : A 18/04/2011
 Platinum : 0.5 mg/cm²

Tekanan
 H2 (psig) : 10 psi
 O2 (psig) : 10 psi
 Suhu :
 Pelat PA : Komersial
 Gasket : Komersial

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.959	0.000	0.000	0.000
0	0.959	0.003	0.060	0.058
1	0.959	0.003	0.060	0.058
2	0.959	0.003	0.060	0.058
3	0.959	0.003	0.060	0.058
4	0.954	0.010	0.200	0.191
4.1	0.953	0.017	0.340	0.324
4.2	0.943	0.031	0.620	0.585
4.3	0.924	0.056	1.120	1.035
4.4	0.902	0.104	2.080	1.876
4.5	0.881	0.186	3.720	3.277
4.6	0.863	0.311	6.220	5.368
4.7	0.843	0.517	10.340	8.717
4.8	0.827	0.740	14.800	12.240
4.9	0.809	1.117	22.340	18.073
5	0.790	1.604	32.080	25.343
5.1	0.769	2.274	45.480	34.974
5.2	0.753	2.867	57.340	43.177
5.3	0.736	3.593	71.860	52.889
5.4	0.719	4.350	87.000	62.553
5.5	0.702	5.125	102.500	71.955
5.6	0.689	5.780	115.600	79.648
5.7	0.676	6.405	128.100	86.596
5.8	0.669	6.789	135.780	90.837
5.9	0.661	7.200	144.000	95.184
6	0.655	7.475	149.500	97.923
6.1	0.650	7.696	153.920	100.048
6.2	0.648	7.848	156.960	101.710
6.3	0.645	7.978	159.560	102.916
6.4	0.643	8.088	161.760	104.012
6.5	0.640	8.179	163.580	104.691
6.6	0.639	8.247	164.940	105.397
6.7	0.638	8.313	166.260	106.074
6.8	0.636	8.364	167.280	106.390
6.9	0.635	8.405	168.100	106.744
7	0.634	8.442	168.840	107.045
7.1	0.634	8.477	169.540	107.488
7.2	0.633	8.503	170.060	107.648
7.3	0.632	8.526	170.520	107.769
7.4	0.632	8.552	171.040	108.097
7.5	0.631	8.576	171.520	108.229
7.6	0.630	8.592	171.840	108.259

open jam: 09:00

V:0.900

A: 0.000

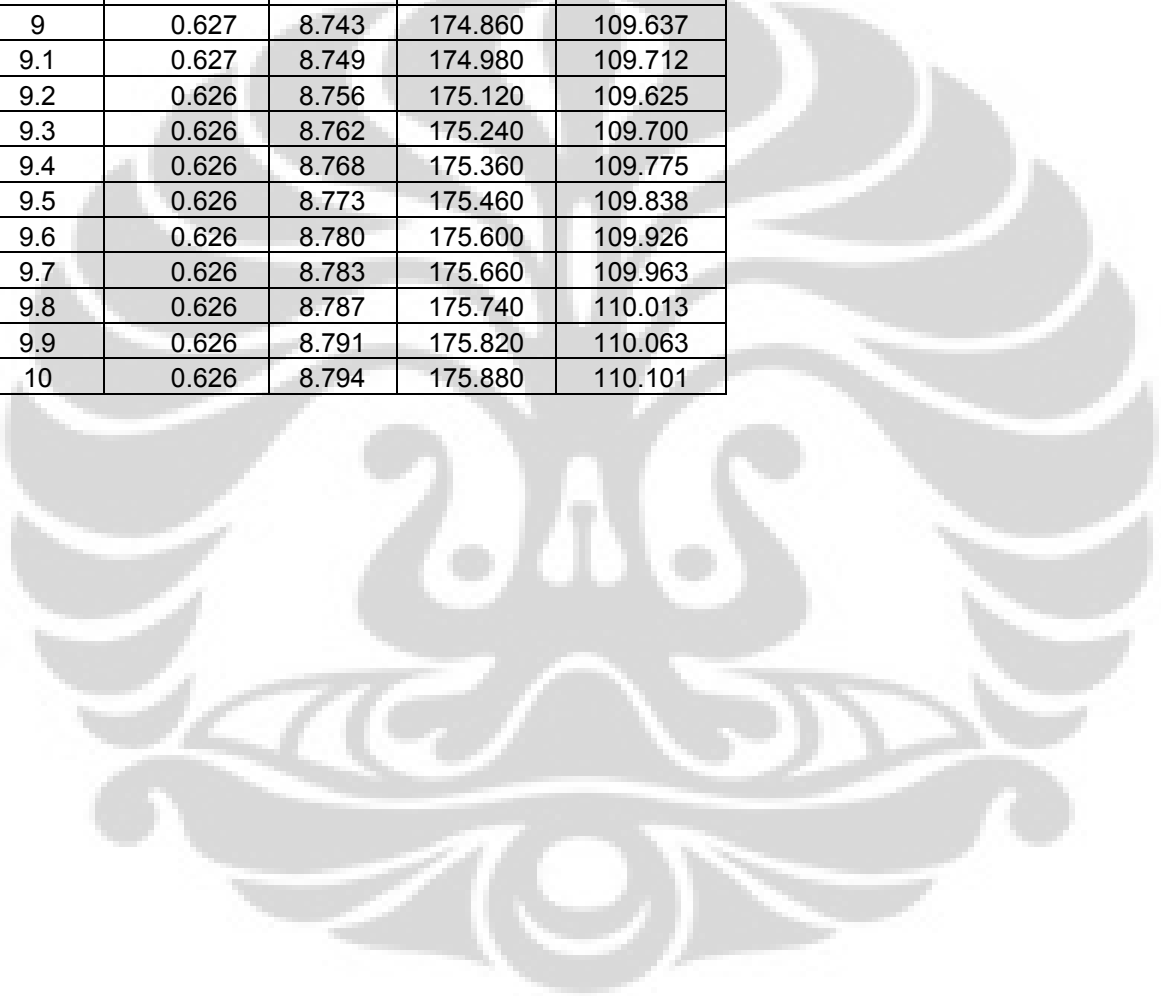
load jam: 16:30

V:0.959

A: 0.000

LAMPIRAN B

7.7	0.630	8.609	172.180	108.473
7.8	0.630	8.624	172.480	108.662
7.9	0.630	8.637	172.740	108.826
8	0.629	8.650	173.000	108.817
8.1	0.629	8.661	173.220	108.955
8.2	0.629	8.674	173.480	109.119
8.3	0.629	8.684	173.680	109.245
8.4	0.628	8.693	173.860	109.184
8.5	0.628	8.703	174.060	109.310
8.6	0.628	8.711	174.220	109.410
8.7	0.628	8.720	174.400	109.523
8.8	0.628	8.726	174.520	109.599
8.9	0.627	8.735	174.700	109.537
9	0.627	8.743	174.860	109.637
9.1	0.627	8.749	174.980	109.712
9.2	0.626	8.756	175.120	109.625
9.3	0.626	8.762	175.240	109.700
9.4	0.626	8.768	175.360	109.775
9.5	0.626	8.773	175.460	109.838
9.6	0.626	8.780	175.600	109.926
9.7	0.626	8.783	175.660	109.963
9.8	0.626	8.787	175.740	110.013
9.9	0.626	8.791	175.820	110.063
10	0.626	8.794	175.880	110.101



LAMPIRAN B

Tanggal : 27-Apr-11
 Penguji : Bono/Danu
Sampel
 Ukuran : 50 cm2
 MEA : Sendiri(Ptc20%,CNT50%)
 Kode : A 18/04/2011
 Platinum : mg/cm2

Tekanan
 H2 (psig) : 10 psi
 O2 (psig) : 10 psi
 Suhu : 37,6 C

Pelat PA : Komersial
 Gasket : Komersial

Load	V	A	d(mA/cm2)	mW/cm2
Off	0.956	0.000	0.000	0.000
0	0.956	0.000	0.000	0.000
1	0.956	0.000	0.000	0.000
2	0.956	0.000	0.000	0.000
3	0.956	0.000	0.000	0.000
4	0.956	0.026	0.520	0.497
4.1	0.940	0.034	0.680	0.639
4.2	0.930	0.044	0.880	0.818
4.3	0.921	0.058	1.160	1.068
4.4	0.909	0.066	1.320	1.200
4.5	0.897	0.082	1.640	1.471
4.6	0.889	0.103	2.060	1.831
4.7	0.882	0.123	2.460	2.170
4.8	0.870	0.147	2.940	2.558
4.9	0.865	0.194	3.880	3.356
5	0.858	0.223	4.460	3.827
5.1	0.850	0.267	5.340	4.539
5.2	0.844	0.318	6.360	5.368
5.3	0.839	0.380	7.600	6.376
5.4	0.831	0.431	8.620	7.163
5.5	0.824	0.509	10.180	8.388
5.6	0.818	0.606	12.120	9.914
5.7	0.812	0.716	14.320	11.628
5.8	0.808	0.781	15.620	12.621
5.9	0.799	0.888	17.760	14.190
6	0.791	1.103	22.060	17.449
6.1	0.785	1.254	25.080	19.688
6.2	0.778	1.441	28.820	22.422
6.3	0.770	1.661	33.220	25.579
6.4	0.764	1.901	38.020	29.047
6.5	0.755	2.101	42.020	31.725
6.6	0.748	2.381	47.620	35.620
6.7	0.740	2.687	53.740	39.768
6.8	0.731	3.027	60.540	44.255
6.9	0.721	3.385	67.700	48.812
7	0.710	3.873	77.460	54.997
7.1	0.706	4.282	85.640	60.462
7.2	0.699	4.461	89.220	62.365
7.3	0.690	4.791	95.820	66.116
7.4	0.682	5.215	104.300	71.133
7.5	0.673	5.587	111.740	75.201
7.6	0.669	6.052	121.040	80.976

open jam: 08:30

V: 0.960

A: 0.000

load jam: 16:00

V: 0.956

A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.7	0.662	6.291	125.820	83.293
7.8	0.658	6.610	132.200	86.988
7.9	0.653	6.827	136.540	89.161
8	0.650	7.092	141.840	92.196
8.1	0.646	7.265	145.300	93.864
8.2	0.644	7.453	149.060	95.995
8.3	0.642	7.586	151.720	97.404
8.4	0.640	7.693	153.860	98.470
8.5	0.638	7.807	156.140	99.617
8.6	0.638	7.893	157.860	100.715
8.7	0.636	7.979	159.580	101.493
8.8	0.635	8.057	161.140	102.324
8.9	0.633	8.116	162.320	102.749
9	0.632	8.170	163.400	103.269
9.1	0.631	8.225	164.500	103.800
9.2	0.630	8.265	165.300	104.139
9.3	0.630	8.298	165.960	104.555
9.4	0.629	8.338	166.760	104.892
9.5	0.629	8.367	167.340	105.257
9.6	0.628	8.393	167.860	105.416
9.7	0.628	8.433	168.660	105.918
9.8	0.627	8.459	169.180	106.076
9.9	0.627	8.483	169.660	106.377
10	0.626	8.503	170.060	106.458
10.1	0.626	8.555	171.100	107.109

LAMPIRAN B

Tanggal	: 3 Mei 2011	Tekanan	
Penguji	: Danu	H2 (psig)	: 10 psi
Sampel		O2 (psig)	: 10 psi
Ukuran	: 50 cm ²	Suhu	: 32.2 C
	Buatan sendiri(Ptc 20%,CNT		
MEA	: 30%)	Pelat PA	: Komersial
Kode	: B 18/04/2011	Gasket	: Komersial
Platinum	: mg/cm ²		

Load	V	A	d(mA/cm ²)	mW/cm ²
Off	0.932	0.000	0.000	0.000
0	0.932	0.000	0.000	0.000
1	0.932	0.000	0.000	0.000
2	0.932	0.000	0.000	0.000
3	0.932	0.000	0.000	0.000
4	0.932	0.010	0.200	0.186
4.1	0.912	0.024	0.480	0.438
4.2	0.903	0.026	0.520	0.470
4.3	0.891	0.029	0.580	0.517
4.4	0.880	0.034	0.680	0.598
4.5	0.883	0.047	0.940	0.830
4.6	0.874	0.060	1.200	1.049
4.7	0.867	0.073	1.460	1.266
4.8	0.860	0.086	1.720	1.479
4.9	0.850	0.111	2.220	1.887
5	0.842	0.148	2.960	2.492
5.1	0.837	0.161	3.220	2.695
5.2	0.830	0.204	4.080	3.386
5.3	0.823	0.245	4.900	4.033
5.4	0.814	0.316	6.320	5.144
5.5	0.810	0.373	7.460	6.043
5.6	0.803	0.420	8.400	6.745
5.7	0.794	0.526	10.520	8.353
5.8	0.789	0.593	11.860	9.358
5.9	0.780	0.737	14.740	11.497
6	0.772	0.862	17.240	13.309
6.1	0.767	0.985	19.700	15.110
6.2	0.759	1.115	22.300	16.926
6.3	0.748	1.335	26.700	19.972
6.4	0.739	1.507	30.140	22.273
6.5	0.732	1.699	33.980	24.873
6.6	0.723	1.928	38.560	27.879
6.7	0.711	2.301	46.020	32.720
6.8	0.703	2.477	49.540	34.827
6.9	0.694	2.774	55.480	38.503
7	0.685	3.081	61.620	42.210
7.1	0.673	3.525	70.500	47.447
7.2	0.663	3.852	77.040	51.078
7.3	0.653	4.250	85.000	55.505
7.4	0.643	4.659	93.180	59.915
7.5	0.633	5.056	101.120	64.009
7.6	0.623	5.465	109.300	68.094
7.7	0.614	5.864	117.280	72.010

open jam: 09:00

V: 0.890

A: 0.000

load jam: 16:00

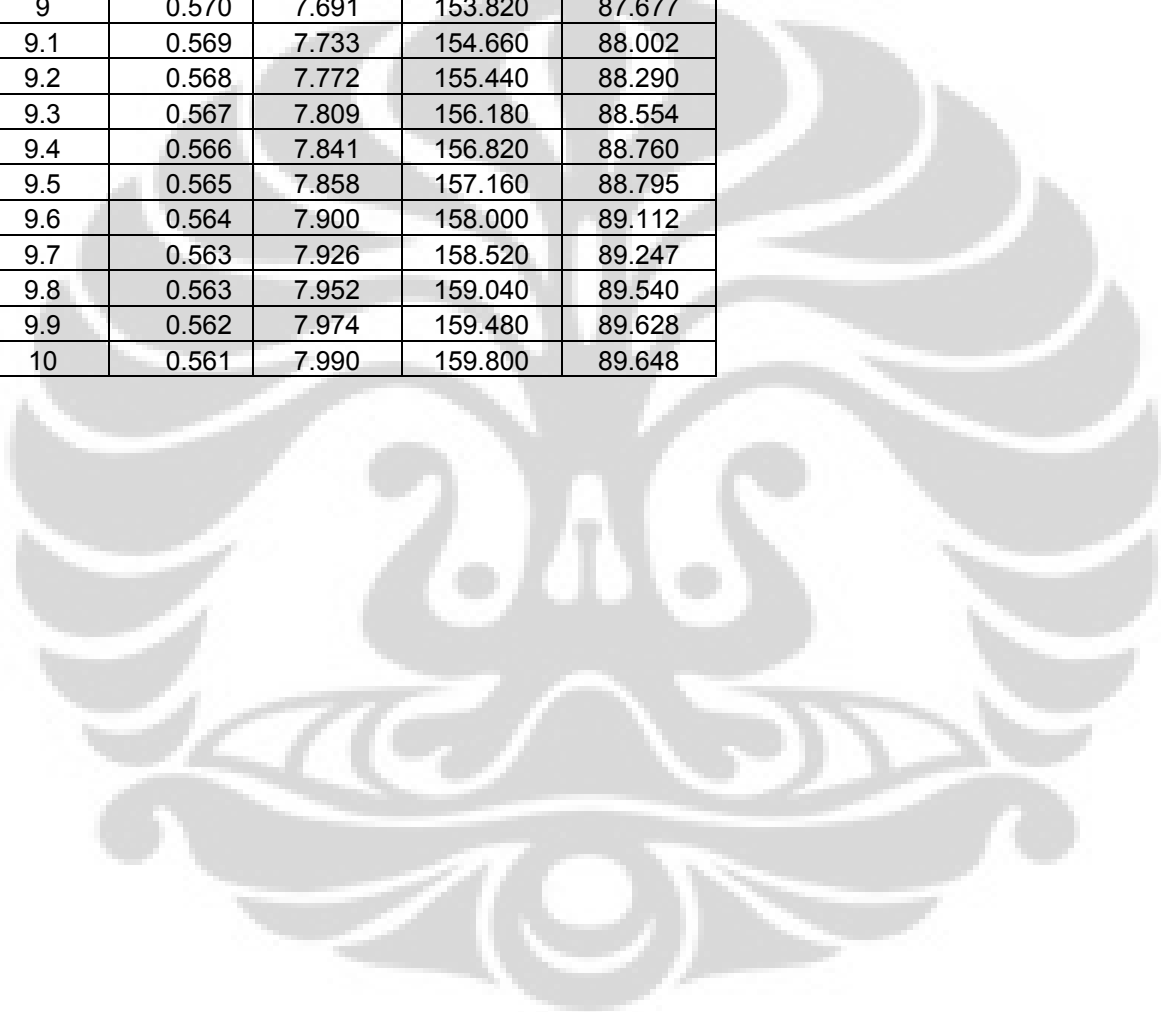
V: 0.932

A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.608	6.086	121.720	74.006
7.9	0.602	6.351	127.020	76.466
8	0.596	6.608	132.160	78.767
8.1	0.592	6.794	135.880	80.441
8.2	0.588	6.957	139.140	81.814
8.3	0.585	7.083	141.660	82.871
8.4	0.582	7.214	144.280	83.971
8.5	0.579	7.334	146.680	84.928
8.6	0.577	7.432	148.640	85.765
8.7	0.574	7.516	150.320	86.284
8.8	0.573	7.584	151.680	86.913
8.9	0.570	7.646	152.920	87.164
9	0.570	7.691	153.820	87.677
9.1	0.569	7.733	154.660	88.002
9.2	0.568	7.772	155.440	88.290
9.3	0.567	7.809	156.180	88.554
9.4	0.566	7.841	156.820	88.760
9.5	0.565	7.858	157.160	88.795
9.6	0.564	7.900	158.000	89.112
9.7	0.563	7.926	158.520	89.247
9.8	0.563	7.952	159.040	89.540
9.9	0.562	7.974	159.480	89.628
10	0.561	7.990	159.800	89.648



LAMPIRAN B

Tanggal	: 4 Mei 2011	Tekanan	
Penguji	: Danu	H2 (psig)	: 10 psi
Sampel		O2 (psig)	: 10 psi
Ukuran	: 50 cm2	Suhu	: 34.6C
	Buatan		
MEA	: sendiri(Ptc20%,CNT30%)	Pelat PA	: Komersial
Kode	: B 18/04/2011	Gasket	: Komersial
Platinum	: mg/cm2		

Load	V	A	d(mA/cm2)	mW/cm2
Off	0.948	0.000	0.000	0.000
0	0.948	0.000	0.000	0.000
1	0.948	0.000	0.000	0.000
2	0.948	0.000	0.000	0.000
3	0.948	0.000	0.000	0.000
4	0.923	0.009	0.180	0.166
4.1	0.921	0.016	0.320	0.295
4.2	0.915	0.017	0.340	0.311
4.3	0.909	0.021	0.420	0.382
4.4	0.900	0.029	0.580	0.522
4.5	0.896	0.036	0.720	0.645
4.6	0.890	0.046	0.920	0.819
4.7	0.883	0.058	1.160	1.024
4.8	0.872	0.080	1.600	1.395
4.9	0.869	0.102	2.040	1.773
5	0.863	0.112	2.240	1.933
5.1	0.855	0.135	2.700	2.309
5.2	0.849	0.168	3.360	2.853
5.3	0.842	0.213	4.260	3.587
5.4	0.839	0.234	4.680	3.927
5.5	0.832	0.288	5.760	4.792
5.6	0.824	0.361	7.220	5.949
5.7	0.814	0.475	9.500	7.733
5.8	0.807	0.522	10.440	8.425
5.9	0.806	0.537	10.740	8.656
6	0.802	0.638	12.760	10.234
6.1	0.793	0.827	16.540	13.116
6.2	0.788	0.895	17.900	14.105
6.3	0.775	1.194	23.880	18.507
6.4	0.768	1.225	24.500	18.816
6.5	0.763	1.447	28.940	22.081
6.6	0.755	1.708	34.160	25.791
6.7	0.747	1.943	38.860	29.028
6.8	0.740	2.194	43.880	32.471
6.9	0.725	2.511	50.220	36.410
7	0.718	2.973	59.460	42.692
7.1	0.707	3.390	67.800	47.935
7.2	0.700	3.743	74.860	52.402
7.3	0.699	3.683	73.660	51.488
7.4	0.690	4.078	81.560	56.276
7.5	0.674	4.769	95.380	64.286
7.6	0.669	4.999	99.980	66.887
7.7	0.660	5.428	108.560	71.650

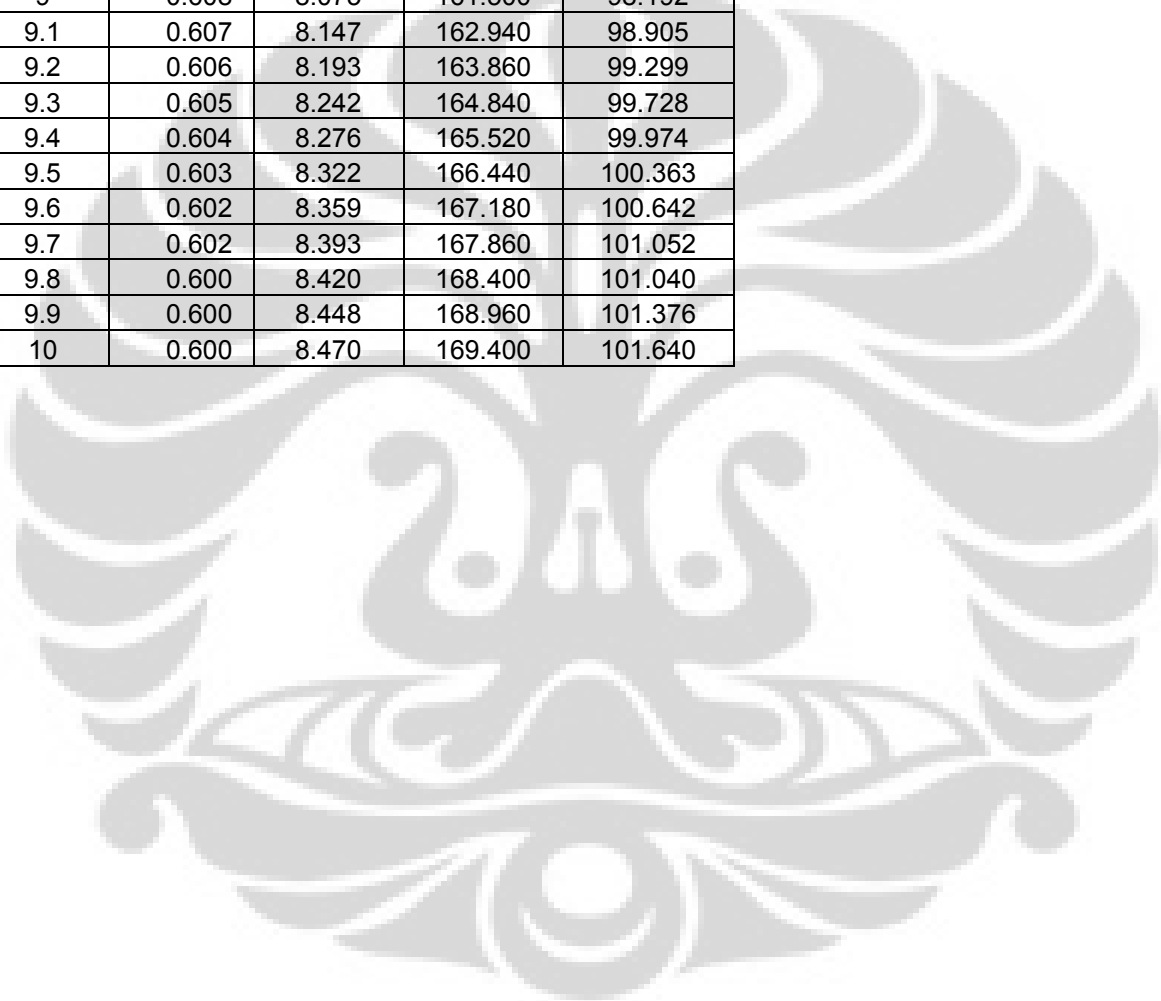
open jam: 09:00 V: 0.889
A: 0.000

load jam: 16:00 V: 0.948
A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.650	6.012	120.240	78.156
7.9	0.642	6.291	125.820	80.776
8	0.638	6.508	130.160	83.042
8.1	0.632	6.842	136.840	86.483
8.2	0.628	7.033	140.660	88.334
8.3	0.623	7.262	145.240	90.485
8.4	0.621	7.431	148.620	92.293
8.5	0.616	7.645	152.900	94.186
8.6	0.614	7.768	155.360	95.391
8.7	0.612	7.862	157.240	96.231
8.8	0.610	7.927	158.540	96.709
8.9	0.609	8.006	160.120	97.513
9	0.608	8.075	161.500	98.192
9.1	0.607	8.147	162.940	98.905
9.2	0.606	8.193	163.860	99.299
9.3	0.605	8.242	164.840	99.728
9.4	0.604	8.276	165.520	99.974
9.5	0.603	8.322	166.440	100.363
9.6	0.602	8.359	167.180	100.642
9.7	0.602	8.393	167.860	101.052
9.8	0.600	8.420	168.400	101.040
9.9	0.600	8.448	168.960	101.376
10	0.600	8.470	169.400	101.640



LAMPIRAN B

Tanggal	: 11 Mei 2011	Tekanan		
Penguji	: Danu	H2 (psig)	: 10	psi
Sampel		O2 (psig)	: 10	psi
Ukuran	: 50 cm2	Suhu	: 33.3	C
	Buatan			
MEA	: sendiri(Ptc20%,CNT70%)	Pelat PA	: Komersial	
Kode	:	Gasket	: Komersial	
Platinum	: mg/cm2			

Load	V	A	d(mA/cm2)	mW/cm2
Off	0.948	0.000	0.000	0.000
0	0.948	0.000	0.000	0.000
1	0.948	0.000	0.000	0.000
2	0.948	0.000	0.000	0.000
3	0.948	0.000	0.000	0.000
4	0.923	0.010	0.200	0.185
4.1	0.915	0.017	0.340	0.311
4.2	0.912	0.020	0.400	0.365
4.3	0.907	0.022	0.440	0.399
4.4	0.903	0.029	0.580	0.524
4.5	0.899	0.034	0.680	0.611
4.6	0.892	0.045	0.900	0.803
4.7	0.884	0.054	1.080	0.955
4.8	0.875	0.080	1.600	1.400
4.9	0.870	0.095	1.900	1.653
5	0.867	0.116	2.320	2.011
5.1	0.855	0.151	3.020	2.582
5.2	0.864	0.158	3.160	2.730
5.3	0.849	0.186	3.720	3.158
5.4	0.840	0.272	5.440	4.570
5.5	0.836	0.290	5.800	4.849
5.6	0.830	0.315	6.300	5.229
5.7	0.823	0.426	8.520	7.012
5.8	0.816	0.509	10.180	8.307
5.9	0.810	0.596	11.920	9.655
6	0.806	0.637	12.740	10.268
6.1	0.795	0.779	15.580	12.386
6.2	0.788	0.896	17.920	14.121
6.3	0.779	1.103	22.060	17.185
6.4	0.769	1.270	25.400	19.533
6.5	0.766	1.382	27.640	21.172
6.6	0.755	1.643	32.860	24.809
6.7	0.748	2.013	40.260	30.114
6.8	0.738	2.051	41.020	30.273
6.9	0.729	2.390	47.800	34.846
7	0.716	2.961	59.220	42.402
7.1	0.707	3.287	65.740	46.478
7.2	0.702	3.339	66.780	46.880
7.3	0.693	3.561	71.220	49.355
7.4	0.689	4.070	81.400	56.085
7.5	0.670	4.440	88.800	59.496
7.6	0.645	5.015	100.300	64.694
7.7	0.634	5.368	107.360	68.066

open jam: 10:00

V:

A: 0.000

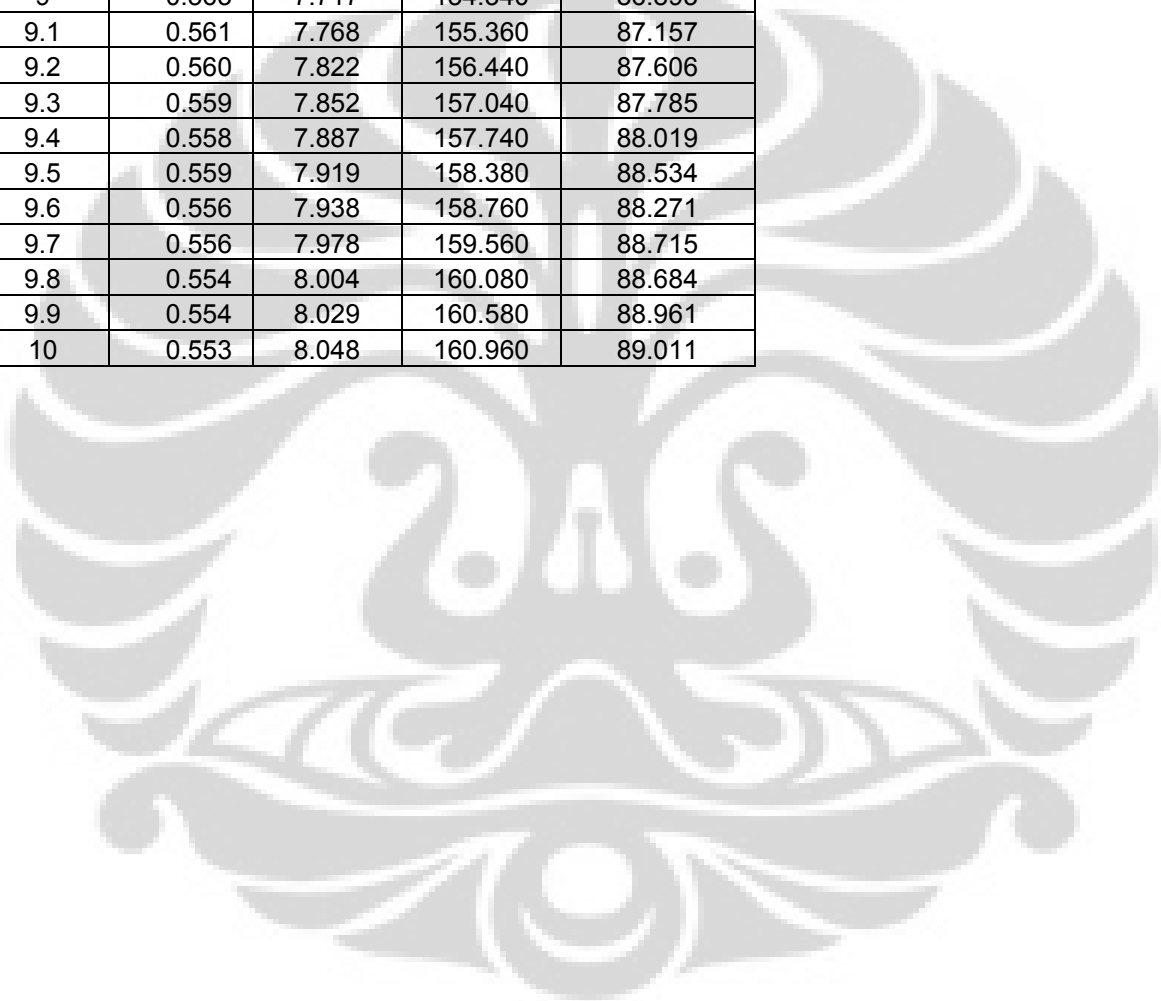
load jam: 16:30

V:

A: 0.000

LAMPIRAN B

7.8	0.624	5.745	114.900	71.698
7.9	0.611	6.065	121.300	74.114
8	0.606	6.360	127.200	77.083
8.1	0.599	6.598	131.960	79.044
8.2	0.588	6.822	136.440	80.227
8.3	0.582	6.940	138.800	80.782
8.4	0.576	7.130	142.600	82.138
8.5	0.573	7.300	146.000	83.658
8.6	0.571	7.441	148.820	84.976
8.7	0.569	7.521	150.420	85.589
8.8	0.566	7.584	151.680	85.851
8.9	0.564	7.657	153.140	86.371
9	0.563	7.717	154.340	86.893
9.1	0.561	7.768	155.360	87.157
9.2	0.560	7.822	156.440	87.606
9.3	0.559	7.852	157.040	87.785
9.4	0.558	7.887	157.740	88.019
9.5	0.559	7.919	158.380	88.534
9.6	0.556	7.938	158.760	88.271
9.7	0.556	7.978	159.560	88.715
9.8	0.554	8.004	160.080	88.684
9.9	0.554	8.029	160.580	88.961
10	0.553	8.048	160.960	89.011



LAMPIRAN B

Tanggal	: 26 Mei 2011	Tekanan	
Penguji	: Danu	H2 (psig)	: 10 psi
Sampel		O2 (psig)	: 10 psi
Ukuran	: 50 cm2	Suhu	: 29.8C
	Buatan		
MEA	: sendiri(Ptc50%,CNT50%)	Pelat PA	: Komersial
Kode	: single wall	Gasket	: Komersial
Platinum	: mg/cm2		

Load	V	A	d(mA/cm2)	mW/cm2
Off	0.934	0.000	0.000	0.000
0	0.934	0.000	0.000	0.000
1	0.934	0.000	0.000	0.000
2	0.934	0.000	0.000	0.000
3	0.933	0.000	0.000	0.000
4	0.911	0.008	0.160	0.146
4.1	0.897	0.013	0.260	0.233
4.2	0.875	0.024	0.480	0.420
4.3	0.856	0.043	0.860	0.736
4.4	0.834	0.086	1.720	1.434
4.5	0.814	0.158	3.160	2.572
4.6	0.790	0.254	5.080	4.013
4.7	0.771	0.403	8.060	6.214
4.8	0.747	0.615	12.300	9.188
4.9	0.720	0.905	18.100	13.032
5	0.696	1.261	25.220	17.553
5.1	0.662	1.600	32.000	21.184
5.2	0.626	2.187	43.740	27.381
5.3	0.607	2.654	53.080	32.220
5.4	0.570	3.249	64.980	37.039
5.5	0.538	3.617	72.340	38.919
5.6	0.513	3.980	79.600	40.835
5.7	0.493	4.292	85.840	42.319
5.8	0.475	4.526	90.520	42.997
5.9	0.465	4.682	93.640	43.543
6	0.454	4.815	96.300	43.720
6.1	0.448	4.911	98.220	44.003
6.2	0.442	4.979	99.580	44.014
6.3	0.438	5.045	100.900	44.194
6.4	0.433	5.076	101.520	43.958
6.5	0.430	5.120	102.400	44.032
6.6	0.426	5.156	103.120	43.929
6.7	0.423	5.186	103.720	43.874
6.8	0.421	5.210	104.200	43.868
6.9	0.420	5.231	104.620	43.940
7	0.418	5.251	105.020	43.898
7.1	0.417	5.266	105.320	43.918
7.2	0.416	5.283	105.660	43.955
7.3	0.415	5.293	105.860	43.932
7.4	0.414	5.304	106.080	43.917
7.5	0.414	5.314	106.280	44.000
7.6	0.413	5.325	106.500	43.985
7.7	0.413	5.333	106.660	44.051

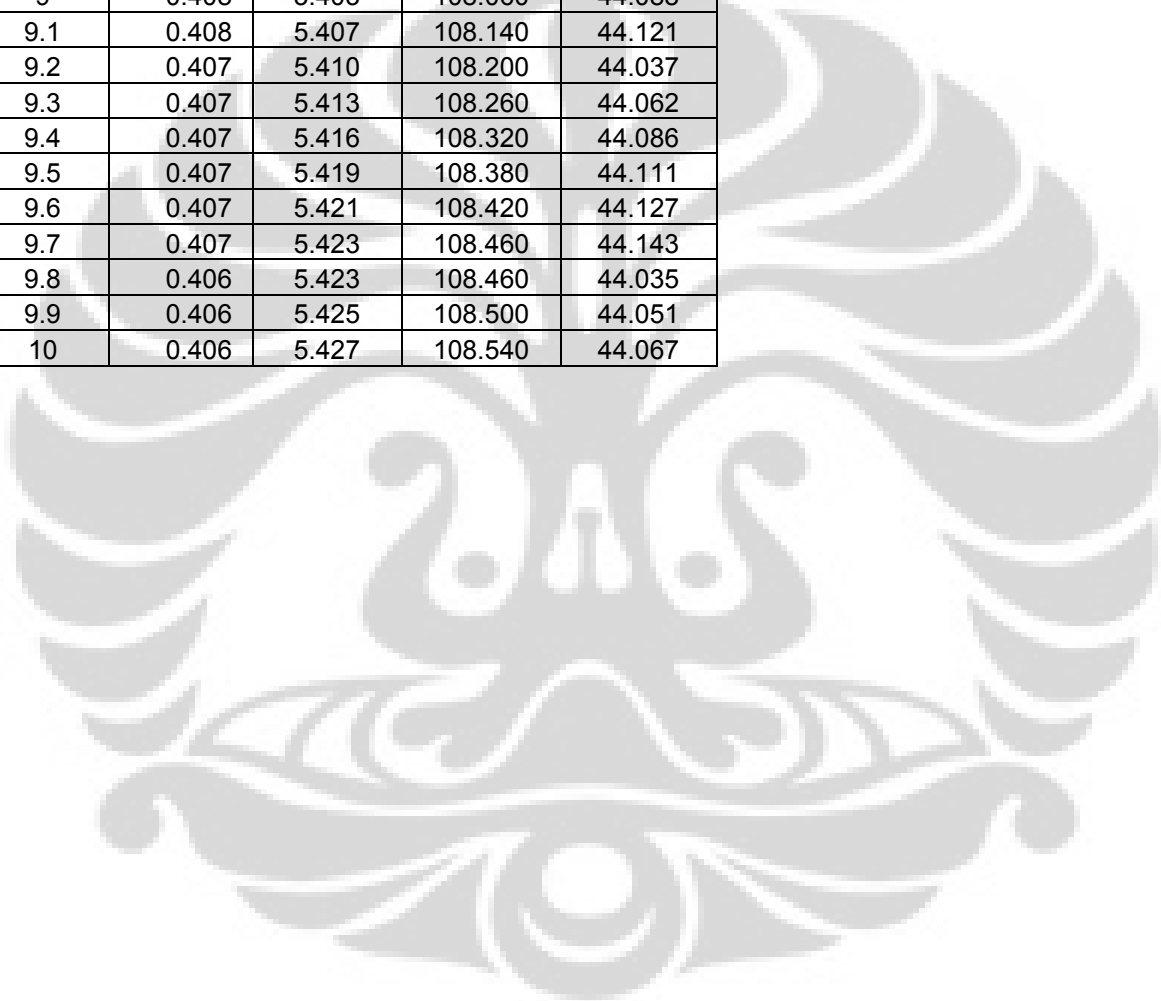
open jam: 10:00 V: 0.972
A: 0.000

load jam: 16:30 V: 0.934
A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.412	5.340	106.800	44.002
7.9	0.411	5.347	106.940	43.952
8	0.411	5.352	107.040	43.993
8.1	0.411	5.360	107.200	44.059
8.2	0.410	5.365	107.300	43.993
8.3	0.410	5.371	107.420	44.042
8.4	0.409	5.376	107.520	43.976
8.5	0.409	5.381	107.620	44.017
8.6	0.408	5.383	107.660	43.925
8.7	0.408	5.388	107.760	43.966
8.8	0.408	5.392	107.840	43.999
8.9	0.408	5.396	107.920	44.031
9	0.408	5.403	108.060	44.088
9.1	0.408	5.407	108.140	44.121
9.2	0.407	5.410	108.200	44.037
9.3	0.407	5.413	108.260	44.062
9.4	0.407	5.416	108.320	44.086
9.5	0.407	5.419	108.380	44.111
9.6	0.407	5.421	108.420	44.127
9.7	0.407	5.423	108.460	44.143
9.8	0.406	5.423	108.460	44.035
9.9	0.406	5.425	108.500	44.051
10	0.406	5.427	108.540	44.067



LAMPIRAN B

Tanggal	: 11 Mei 2011	Tekanan	
Penguji	: Danu	H2 (psig)	: 10 psi
Sampel		O2 (psig)	: 10 psi
Ukuran	: 50 cm2	Suhu	: 29.9C
	Buatan		
MEA	: sendiri(Ptc20%,CNT50%)	Pelat PA	: Komersial
Kode	: single wall	Gasket	: Komersial
Platinum	: mg/cm2		

Load	V	A	d(mA/cm2)	mW/cm2
Off	0.945	0.000	0.000	0.000
0	0.945	0.000	0.000	0.000
1	0.945	0.000	0.000	0.000
2	0.945	0.000	0.000	0.000
3	0.945	0.000	0.000	0.000
4	0.909	0.010	0.200	0.182
4.1	0.900	0.013	0.260	0.234
4.2	0.891	0.020	0.400	0.356
4.3	0.883	0.022	0.440	0.389
4.4	0.872	0.028	0.560	0.488
4.5	0.866	0.036	0.720	0.624
4.6	0.858	0.044	0.880	0.755
4.7	0.848	0.057	1.140	0.967
4.8	0.840	0.070	1.400	1.176
4.9	0.831	0.088	1.760	1.463
5	0.823	0.108	2.160	1.778
5.1	0.811	0.125	2.500	2.028
5.2	0.808	0.155	3.100	2.505
5.3	0.800	0.212	4.240	3.392
5.4	0.787	0.250	5.000	3.935
5.5	0.772	0.332	6.640	5.126
5.6	0.767	0.352	7.040	5.400
5.7	0.762	0.415	8.300	6.325
5.8	0.751	0.516	10.320	7.750
5.9	0.741	0.616	12.320	9.129
6	0.728	0.676	13.520	9.843
6.1	0.712	0.876	17.520	12.474
6.2	0.699	0.999	19.980	13.966
6.3	0.694	1.010	20.200	14.019
6.4	0.689	1.099	21.980	15.144
6.5	0.670	1.362	27.240	18.251
6.6	0.663	1.456	29.120	19.307
6.7	0.641	1.788	35.760	22.922
6.8	0.621	1.945	38.900	24.157
6.9	0.600	2.248	44.960	26.976
7	0.596	2.543	50.860	30.313
7.1	0.571	2.753	55.060	31.439
7.2	0.559	3.068	61.360	34.300
7.3	0.542	3.516	70.320	38.113
7.4	0.530	3.704	74.080	39.262
7.5	0.518	4.074	81.480	42.207
7.6	0.503	4.238	84.760	42.634
7.7	0.492	4.548	90.960	44.752

open jam: 10:00 V: 0.987

A: 0.000

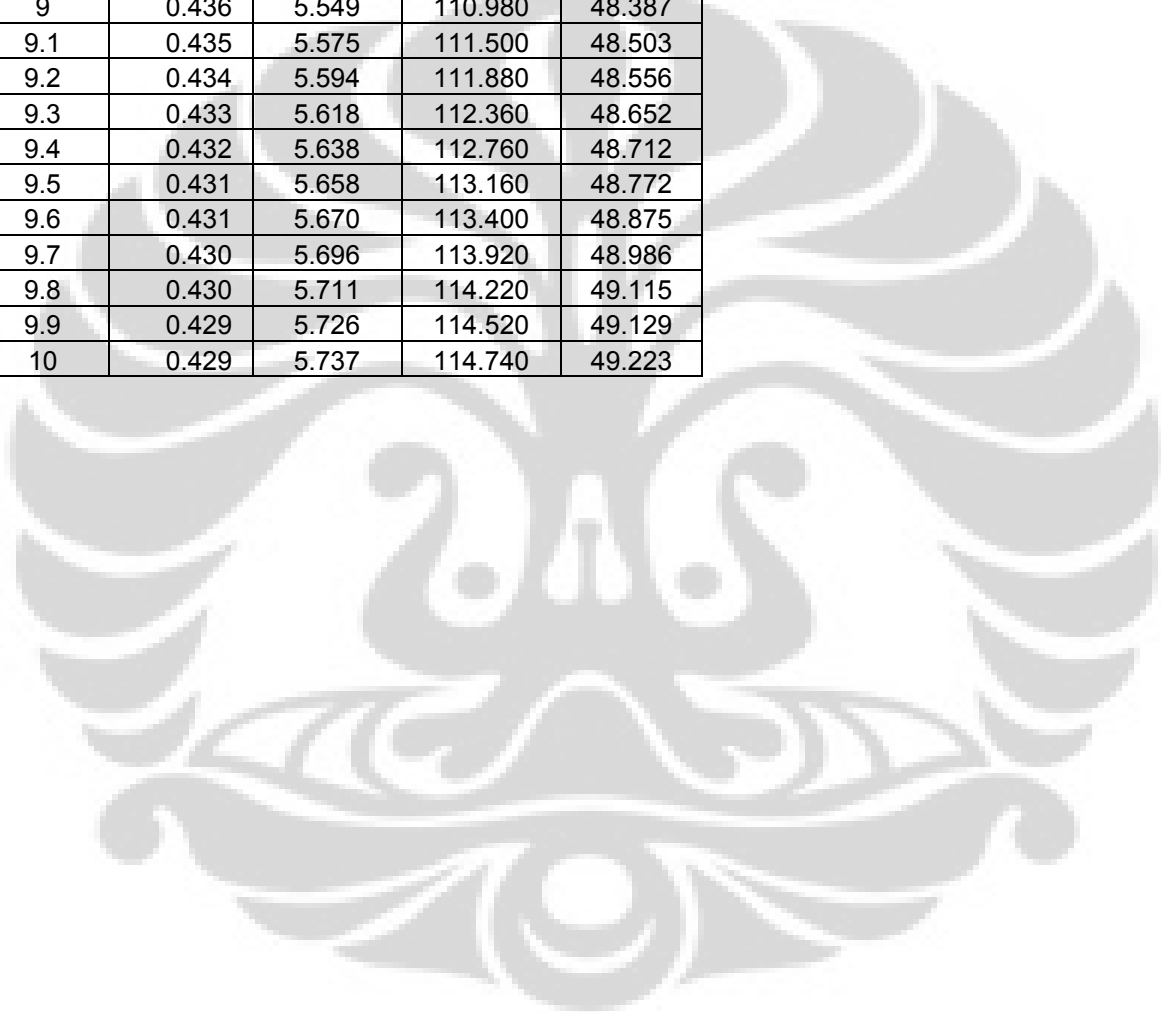
load jam: 16:30 V: 0.945

A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.483	4.623	92.460	44.658
7.9	0.472	4.851	97.020	45.793
8	0.468	4.901	98.020	45.873
8.1	0.462	5.037	100.740	46.542
8.2	0.458	5.150	103.000	47.174
8.3	0.453	5.215	104.300	47.248
8.4	0.450	5.289	105.780	47.601
8.5	0.447	5.343	106.860	47.766
8.6	0.443	5.403	108.060	47.871
8.7	0.440	5.450	109.000	47.960
8.8	0.439	5.480	109.600	48.114
8.9	0.438	5.513	110.260	48.294
9	0.436	5.549	110.980	48.387
9.1	0.435	5.575	111.500	48.503
9.2	0.434	5.594	111.880	48.556
9.3	0.433	5.618	112.360	48.652
9.4	0.432	5.638	112.760	48.712
9.5	0.431	5.658	113.160	48.772
9.6	0.431	5.670	113.400	48.875
9.7	0.430	5.696	113.920	48.986
9.8	0.430	5.711	114.220	49.115
9.9	0.429	5.726	114.520	49.129
10	0.429	5.737	114.740	49.223



LAMPIRAN B

Tanggal	: 31 Mei 2011	Tekanan	
Penguji	: Danu	H2 (psig)	: 10 psi
Sampel		O2 (psig)	: 10 psi
Ukuran	: 50 cm2	Suhu	: 30.2C
	Buatan		
MEA	: sendiri(Ptc20%,CNT70%)	Pelat PA	: Komersial
Kode	: single wall	Gasket	: Komersial
Platinum	: mg/cm2		

Load	V	A	d(mA/cm2)	mW/cm2
Off	0.949	0.000	0.000	0.000
0	0.949	0.000	0.000	0.000
1	0.949	0.000	0.000	0.000
2	0.949	0.000	0.000	0.000
3	0.949	0.000	0.000	0.000
4	0.914	0.012	0.240	0.219
4.1	0.909	0.015	0.300	0.273
4.2	0.905	0.017	0.340	0.308
4.3	0.899	0.020	0.400	0.360
4.4	0.888	0.024	0.480	0.426
4.5	0.884	0.032	0.640	0.566
4.6	0.871	0.047	0.940	0.819
4.7	0.869	0.053	1.060	0.921
4.8	0.860	0.070	1.400	1.204
4.9	0.851	0.084	1.680	1.430
5	0.842	0.105	2.100	1.768
5.1	0.835	0.123	2.460	2.054
5.2	0.829	0.145	2.900	2.404
5.3	0.816	0.205	4.100	3.346
5.4	0.810	0.265	5.300	4.293
5.5	0.806	0.295	5.900	4.755
5.6	0.796	0.334	6.680	5.317
5.7	0.790	0.391	7.820	6.178
5.8	0.779	0.501	10.020	7.806
5.9	0.765	0.601	12.020	9.195
6	0.763	0.670	13.400	10.224
6.1	0.759	0.759	15.180	11.522
6.2	0.749	0.901	18.020	13.497
6.3	0.742	1.029	20.580	15.270
6.4	0.726	1.197	23.940	17.380
6.5	0.715	1.485	29.700	21.236
6.6	0.710	1.673	33.460	23.757
6.7	0.700	1.783	35.660	24.962
6.8	0.693	1.922	38.440	26.639
6.9	0.675	2.321	46.420	31.334
7	0.664	2.515	50.300	33.399
7.1	0.654	2.829	56.580	37.003
7.2	0.640	3.196	63.920	40.909
7.3	0.631	3.471	69.420	43.804
7.4	0.610	4.010	80.200	48.922
7.5	0.603	4.203	84.060	50.688
7.6	0.591	4.623	92.460	54.644
7.7	0.576	5.007	100.140	57.681

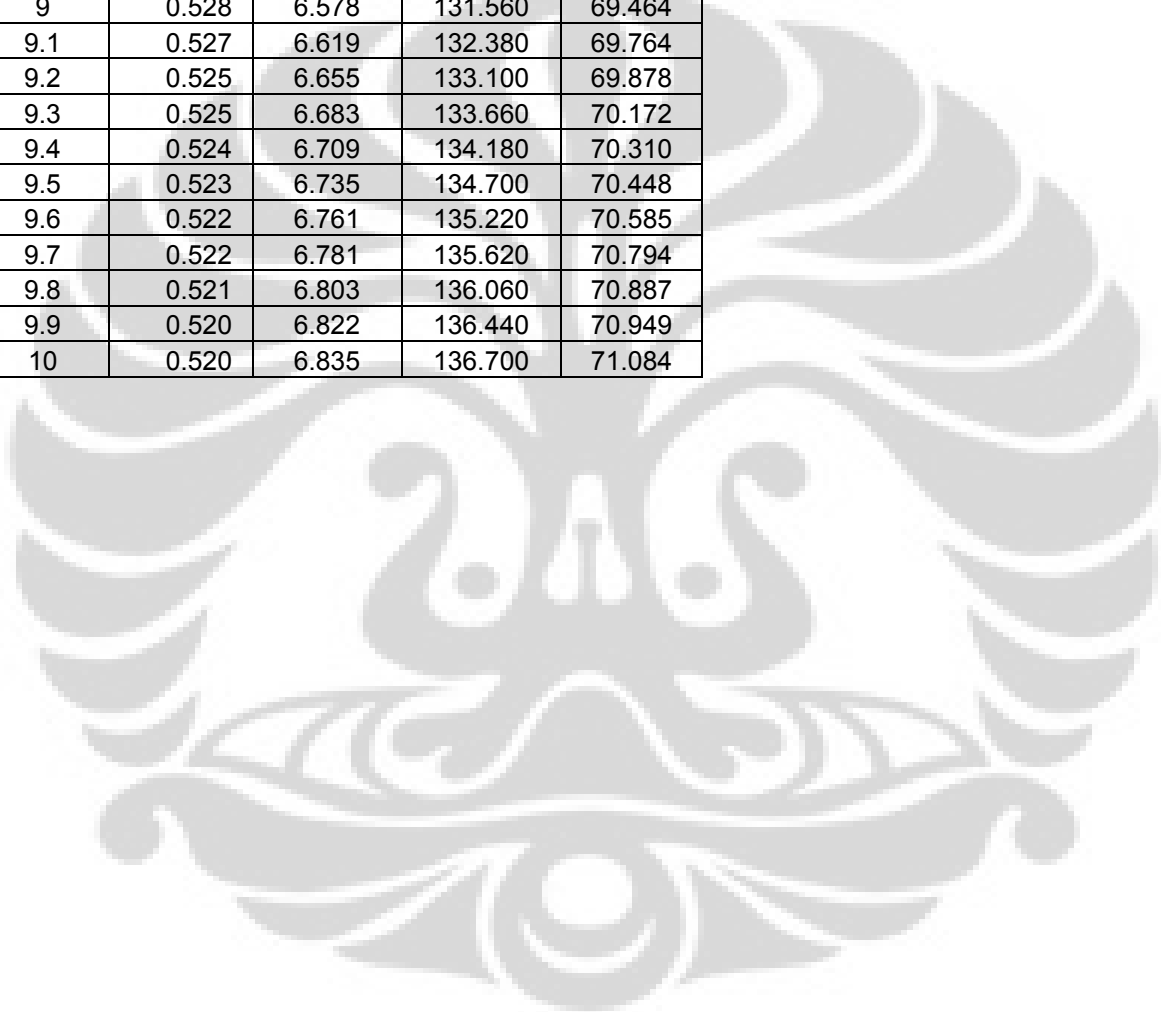
open jam: 10:00 V: 0.948
 A: 0.000

load jam: 16:30 V: 0.949
 A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.568	5.121	102.420	58.175
7.9	0.563	5.415	108.300	60.973
8	0.558	5.673	113.460	63.311
8.1	0.551	5.816	116.320	64.092
8.2	0.547	5.954	119.080	65.137
8.3	0.542	6.087	121.740	65.983
8.4	0.540	6.177	123.540	66.712
8.5	0.537	6.269	125.380	67.329
8.6	0.534	6.363	127.260	67.957
8.7	0.532	6.428	128.560	68.394
8.8	0.530	6.488	129.760	68.773
8.9	0.529	6.534	130.680	69.130
9	0.528	6.578	131.560	69.464
9.1	0.527	6.619	132.380	69.764
9.2	0.525	6.655	133.100	69.878
9.3	0.525	6.683	133.660	70.172
9.4	0.524	6.709	134.180	70.310
9.5	0.523	6.735	134.700	70.448
9.6	0.522	6.761	135.220	70.585
9.7	0.522	6.781	135.620	70.794
9.8	0.521	6.803	136.060	70.887
9.9	0.520	6.822	136.440	70.949
10	0.520	6.835	136.700	71.084



LAMPIRAN B

Tanggal	: 08 Juni 2011	Tekanan			
Penguji	: Danu	H2 (psig)	:	10	psi
Sampel		O2 (psig)	:	10	psi
Ukuran	: 50 cm2	Suhu	:	31C	
	Buatan				
MEA	: sendiri(Ptc20%,CNT70%)	Pelat PA	:	Komersial	
Kode	: B single wall	Gasket	:	Komersial	
Platinum	: mg/cm2				

Load	V	A	d(mA/cm2)	mW/cm2
Off	1.016	0.000	0.000	0.000
0	1.016	0.000	0.000	0.000
1	1.016	0.000	0.000	0.000
2	1.016	0.000	0.000	0.000
3	1.016	0.000	0.000	0.000
4	0.999	0.015	0.240	0.219
4.1	0.993	0.021	0.300	0.273
4.2	0.989	0.026	0.340	0.308
4.3	0.985	0.034	0.400	0.360
4.4	0.979	0.045	0.480	0.426
4.5	0.972	0.057	0.640	0.566
4.6	0.968	0.064	0.940	0.819
4.7	0.962	0.083	1.060	0.921
4.8	0.956	0.105	1.400	1.204
4.9	0.948	0.128	1.680	1.430
5	0.941	0.179	2.100	1.768
5.1	0.936	0.185	2.460	2.054
5.2	0.930	0.221	2.900	2.404
5.3	0.923	0.267	4.100	3.346
5.4	0.913	0.347	5.300	4.293
5.5	0.908	0.397	5.900	4.755
5.6	0.903	0.440	6.680	5.317
5.7	0.896	0.489	7.820	6.178
5.8	0.890	0.581	10.020	7.806
5.9	0.882	0.682	12.020	9.195
6	0.871	0.852	13.400	10.224
6.1	0.868	0.913	15.180	11.522
6.2	0.859	1.077	18.020	13.497
6.3	0.848	1.310	20.580	15.270
6.4	0.842	1.445	23.940	17.380
6.5	0.835	1.628	29.700	21.236
6.6	0.828	1.816	33.460	23.757
6.7	0.813	2.216	35.660	24.962
6.8	0.807	2.449	38.440	26.639
6.9	0.797	2.877	46.420	31.334
7	0.785	3.126	50.300	33.399
7.1	0.776	3.641	56.580	37.003
7.2	0.769	3.916	63.920	40.909
7.3	0.760	4.391	69.420	43.804
7.4	0.749	4.860	80.200	48.922
7.5	0.740	5.306	84.060	50.688
7.6	0.730	5.827	92.460	54.644
7.7	0.720	6.384	100.140	57.681

open jam: 10:00 V: 0.999
 A: 0.000

load jam: 16:30 V: 1.016
 A: 0.000

Catatan :

LAMPIRAN B

7.8	0.711	6.823	102.420	58.175
7.9	0.705	7.075	108.300	60.973
8	0.700	7.337	113.460	63.311
8.1	0.693	7.661	116.320	64.092
8.2	0.689	7.882	119.080	65.137
8.3	0.684	8.125	121.740	65.983
8.4	0.680	8.291	123.540	66.712
8.5	0.677	8.488	125.380	67.329
8.6	0.673	8.638	127.260	67.957
8.7	0.671	8.761	128.560	68.394
8.8	0.669	8.854	129.760	68.773
8.9	0.666	8.905	130.680	69.130
9	0.664	8.972	131.560	69.464
9.1	0.663	9.033	132.380	69.764
9.2	0.661	9.084	133.100	69.878
9.3	0.660	9.137	133.660	70.172
9.4	0.659	9.175	134.180	70.310
9.5	0.658	9.212	134.700	70.448
9.6	0.657	9.254	135.220	70.585
9.7	0.656	9.285	135.620	70.794
9.8	0.656	9.316	136.060	70.887
9.9	0.655	9.346	136.440	70.949
10	0.654	9.368	136.700	71.084

