

**APLIKASI KATALIS BIMETAL BERBASIS KARBON UNTUK
PENGEMBANGAN ELEKTRODA *PROTON EXCHANGE*
MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)**

ANIS NAHDI

0606068865



**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
2009**

**APLIKASI KATALIS BIMETAL BERBASIS KARBON UNTUK
PENGEMBANGAN ELEKTRODA *PROTON EXCHANGE*
MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Sarjana Sains

OLEH:

ANIS NAHDI

0606068865



DEPOK

2009

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, segenap puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat ridho dan rahmat-Nya, saya dapat menjalani ranting-ranting kehidupan dengan penuh keberkahan dan *maghfiroh*. Sholawat beserta salam saya persembahkan untuk idola umat manusia sejagat raya Nabi Muhammad SAW.

Tak terkira, saya dapat memperoleh kesempatan untuk menyelesaikan studi sarjana ini. Kesempatan ini berawal dari sebuah pembicaraan di warung nasi uduk Kang Bani. Dari gubuk nasi uduk itu saya memperoleh kesempatan untuk melanjutkan studi sarjana dengan dukungan dan bantuan dari DKM Al Fath ASC. Hari demi hari saya lewati dan akhirnya sampailah pada penghujung studi yang memakan waktu cukup lama ini. Semua ini merupakan jalan Allah yang telah ditetapkan untuk kehidupan saya dan orang-orang di sekitar saya.

Skripsi ini saya persembahkan secara khusus kepada bundaku tercinta almarhumah Hj. Siti A'idah. Kesedihanku akan kerinduan kepadamu selama ini telah membuat anakmu ini kuat dalam menempuh kehidupan dengan segala rintangan, terutama dalam studi sarjana ini.

Universitas Indonesia

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Program Studi Kimia pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan, dukungan, motivasi dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) DKM Al Fath ASC yang telah membantu pendanaan perkuliahan saya dari awal sampai akhir.
- (2) Ibu Dr. Eng. Eniya Listiani Dewi, selaku Pembimbing I yang dengan sabar senantiasa membantu, mengarahkan, memotivasi serta memberikan waktu, materi, fasilitas, dan sebagainya selama menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi ini. Terutama telah memberikan kesempatan kepada saya untuk poster dan oral presentasi di ajang internasional.
- (3) Ibu Dr. Widajanti Wibowo, selaku Pembimbing II yang telah membimbing, memberi saran, serta masukan yang berguna selama penelitian berlangsung hingga tersusunnya skripsi ini.
- (4) Ibu Dra. Tresye Utari, M.Si. dan Ir. Widyastuti Samadi M.Si. selaku pembimbing akademik dan koordinator penelitian Departemen Kimia FMIPA Universitas Indonesia.

Universitas Indonesia

- (5) Dr. Ridla Bakri selaku ketua Departemen Kimia FMIPA Universitas Indonesia.
- (6) Bapak dan Ibu dosen Departemen Kimia Universitas Indonesia yang telah mendidik kami dengan sabar dan memberikan ilmunya dengan tulus ikhlas.
- (7) Asep Saefumillah, S.Si, M.Si, Ph.D sebagai dosen pembimbing akademik yang telah memberikan banyak masukan dan motivasi serta bimbingannya kepada saya selama proses perkuliahan.
- (8) Pak Moko, Pak Agung, Pak Bambang, dan Pak Muhlisin, yang telah memberikan banyak dukungan, motivasi, dan masukan kepada saya.
- (9) Keluarga besar H. A. Far'uddin (Abah, almarhumah Ema, a Imat, t Lina, t Njul, a Mimin, t Titi, om Hari, a Lel, Ulum, Ruli, Enti, l'an, Hilmi, karo Githa) yang telah memberikan dukungan berharga untuk kesuksesan dan kehidupan saya ke depan.
- (10) Keluarga besar Asgard (Mas Nyoto, Umi Nita, Arvin, Akhdan, Altha, dan Mpok Mar) yang telah menjadi keluarga saya di Depok, dan anak-anak kosan Asgard; Riko, Po'eng, Wiwin, Tyo, Surya, Guruh, Dipta, Riyadi, Lian, dan sebagainya.
- (11) Seluruh staf Laboratorium *Fuel Cell* Pusat Teknologi Material BPPT; Mas Oka, Mas Kurniawan, Mas iqbal, Mba Liana, yang telah membantu penyediaan dan penggunaan alat serta penyediaan bahan kimia yang digunakan saat penelitian.

Universitas Indonesia

- (12) Bapak Mardji selaku ketua Tata Usaha dan seluruh karyawan Departemen Kimia FMIPA Universitas Indonesia.
- (13) Teman penelitian seperjuangan, Syarif dan Ardie. Teringat malam kita bersama menyelesaikan tugas skripsi ini hingga kesiangan sahur di Padaringan, hujan-hujan mencari percetakan, malam-malam mencari kertas kuarto di Margonda, beli kertas harus mengangkat mayat terlebih dahulu di Stasiun Pondok Cina, dan sebagainya.
- (14) Teman-teman kimia 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, dan 2009, terutama Syarif, Agung, Ardie, Indra, Wisnu, Zico, Tirta, Ade, Yudha, Didit, Noval, Firman, Rindu, Stevanus, Adi, Irwan Limans, dan Arief serta teman-teman perempuan 2006 yang telah saling berbagi motivasi dan dukungan dalam penulisan skripsi ini.
- (15) Semua pihak yang telah membantu penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu dan bagi kemashlahatan umat manusia di jagat raya ini. Aamiin.

Depok, 19 November 2009

Penulis

Universitas Indonesia

ABSTRAK

Nama : Anis Nahdi
Program Studi : S1 Kimia
Judul : Aplikasi Katalis Bimetal Berbasis Karbon untuk Pengembangan Elektroda *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC)

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) merupakan tipe *fuel cell* yang paling banyak digunakan dalam aplikasi. Efisiensi dan performa merupakan hal yang sangat penting dalam pengembangan PEMFC. Elektrokatalis memiliki peranan penting dalam menentukan performa *fuel cell*. Penelitian katalis baru untuk peningkatan aktifitas, stabilitas, daya tahan, dan mengurangi biaya (40% biaya satu unit *fuel cell*) merupakan tantangan teknologi dan komersialisasi *fuel cell*. Makalah ini, efisiensi dan performa PEMFC telah dipelajari menggunakan katalis Pt/C (kontrol) dan beberapa katalis bimetal (Pt-Co/C, Pt-Ni/C, and Pt-Ru/C), menggunakan *single stack* PEMFC standar, luasan aktif 25 cm² dan *bipolar plate* paralel. Sistem operasi diatur dengan kecepatan alir H₂ dan O₂ 100 mL/menit, tekanan 0.1 bar dan temperatur 50°C. Performa PEMFC diukur dengan *electronic discharge meter*, 3300 C Electronic Load Mainframe[®]Prodigit 3311D 60V/ 60A, 300V.

Universitas Indonesia

Pt-Co/C pada katoda menghasilkan performa PEMFC tertinggi (0,445 V, 0,131 A, 0,058 W) dimana Pt-Co/C > Pt-Ni/C > Pt-Ru/C, dan pada anoda, Pt-Ru/C menghasilkan performa PEMFC tertinggi (0,403 V, 0,101 A, 0,041 W) dimana Pt-Ru/C > Pt-Co/C > Pt-Ni/C. Transfer massa dan efisiensi konsumsi H₂ telah dihitung berdasarkan energi bebas Gibbs dan potensial selnya. Dari transfer massa, diperoleh efisiensi 57,51 % untuk Pt-Co/C di katoda dan 53,54 % untuk Pt-Ru/C di anoda.

Kata kunci; fuel cell, proton exchange membran, bimetal, energi, efisiensi, transfer massa.

xx + 139 hlm.; gbr.; tbl.; lamp; pub.

Bibliografi : 48 (1975-2009)

ABSTRACT

Name : Anis Nahdi
Study Program : Undergraduate of Chemistry
Title : Application of Carbon Base Bimetal Catalyst for
Developing the Electrode Proton Exchange Membrane
Fuel Cell

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is the most available fuel cell type in various applications. Efficiency and performance are important focus on developing proton exchange membrane (PEM) fuel cell. Electrocatalysts and their corresponding catalyst layers thus play critical roles in fuel cell performance. Therefore, exploring new catalysts, improving catalyst activity, stability, durability, and reducing catalyst cost (40% for 1 unit fuel cell) are currently the major tasks in fuel cell technology and commercialization. In this paper, efficiency and performance of PEM fuel cell were studied with Pt/C catalyst as control and some bimetal catalyst (Pt-Co/C, Pt-Ni/C, and Pt-Ru/C) as electrode materials. The membrane electrode assembly (MEA) was made using those catalyst then used with standard PEM fuel cell single stack 25 cm² active areas with parallel bipolar plate. System operation was running in flow rate of 100 ml/min for hydrogen and oxygen at pressure 0.1 Bar and

Universitas Indonesia

temperature was set constantly at 50°C. Performance of PEM fuel cell has measured by electronic discharge meter, 3300 C Electronic Load Mainframe ®Prodigit 3311D 60V/ 60A, 300V. Using Pt-Co/C on cathode was obtained the highest performance of PEMFC (0,445 V, 0,131 A, 0,058 W) whereas Pt-Co/C > Pt-Ni/C > Pt-Ru/C. Using Pt-Ru/C on cathode was obtained the highest performance of PEMFC (0,403 V, 0,101 A, 0,041 W) whereas Pt-Ru/C > Pt-Co/C > Pt-Ni/C. Mass transfer reaction and efficiency of H₂ consumption in cell has been calculated by Gibbs free energy and open circuit voltage. Efisiensi was calculated based on mass transfer reaction and obtained 57,51% for Pt-Co/C as cathode material and 53,54% for Pt-Ru/C as anode material in PEMFC.

Keywords; fuelcell, proton exchange membrane, bimetal, energy, efficiency, mass transfer.

xx + 139 hlm.; gbr.; tbl.; lamp; pub.

Bibliografi : 48 (1975-2009)

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Elektrokimia.....	5
2.2. Sel Bahan bakar (<i>Fuel Cell</i>)i	6
2.3. Katalis Heterogen.....	8
2.4. <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>	9
2.4.1. Desain PEMFC secara Umum	10
2.4.2. <i>Membran Electrode Assembly (MEA)</i>	11
2.4.2.1. Membran Nafion.....	13
2.4.2.2. Lapisan Difusi Gas dan Elektroda	
PEMFC	16
2.4.2.3. Elektrokatalis PEMFC.....	18
2.4.3. <i>Graphite Bipolar Plates</i>	20

Universitas Indonesia

2.4.4. Lempengan Tembaga sebagai <i>Current Collector</i>	23
2.4.5. Mekanisme Reaksi Sistem Operasi PEMFC	23
2.4.5.1. <i>Oxygen Reduction Reaction (ORR)</i>	24
2.4.5.2. <i>Hydrogen Oxidation Reaction (HOR)</i>	25
2.4.6. Performa dan Efisiensi PEMFC secara	
Termodinamika	27
2.4.6.1. Kurva Polarisasi	28
2.4.6.1.1. Penurunan Potensial akibat Aktivasi	
Polarisasi.....	29
2.4.6.1.2. Penurunan Potensial akibat Hambatan	
Ohmik.....	30
2.4.6.1.2. Penurunan Potensial akibat Transfer	
Massa.....	31
2.4.6.2 Transfer Massa.....	32
2.4.6.3. Efisiensi <i>Fuel Cell</i> secara Teoritis	33
2.5. Logam Mulia sebagai Katalis dalam Elektroda	35
2.5.1. Platinum	35
2.5.2. Ruthenium	36
2.5.3. Kobalt	37
2.5.4. Nikel	37

BAB III BAHAN DAN CARA KERJA

3.1. Alat dan Bahan	39
---------------------------	----

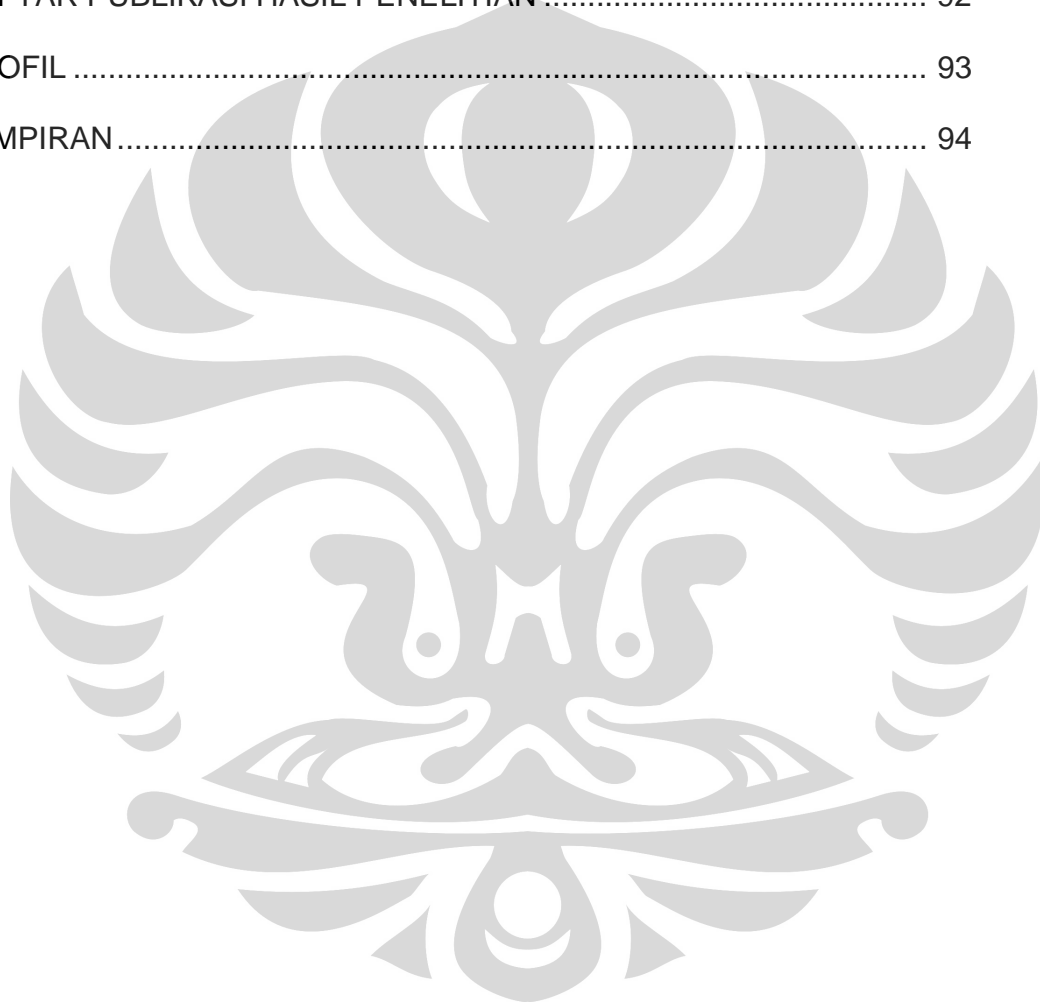
3.1.1. Peralatan.....	39
3.1.2. Bahan.....	41
3.2. Cara Kerja	42
3.2.1. Preparasi Larutan	42
3.2.1.1. Larutan Nafion	42
3.2.1.2. Larutan Isopropanol:air (3:1)	42
3.2.2. Pelapisan (<i>Coating</i>) Kertas Karbon <i>MPL Supported</i> dengan Katalis Pt/C 40%, Pt- Ru/C 60 %, Pt-Co/C 10 %, dan Pt-Ni/C 10%	42
3.2.2.1. Preparasi Tinta Katalis	42
3.2.2.2. Pelapisan Kertas Karbon dengan Katalis (<i>Coating Electrode</i>).....	43
3.2.3. Preparasi <i>Single Stack</i> PEMFC	44
3.2.3.1. Treatment untuk Aktivasi Membran Nafion..	44
3.2.3.2. Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	45
3.2.3.3. Penyusunan (<i>Stacking</i>) <i>Single Stack</i> PEMFC	46
3.2.4. Pengujian MEA dengan Katalis Pt/C 40%, Pt- Ru/C 60 %, Pt-Co/C 10 %, dan Pt-Ni/C 10% dalam <i>Single Stack</i> PEMFC.....	47
3.2.4.1. Uji Kebocoran (<i>Leak-Cross Leak Test</i>).....	48

3.2.4.2. Pengkondisian Kelembaban Membran (<i>Conditioning</i>).....	49
3.2.5. Pengukuran Performa dan Transfer Massa Gas Hidrogen pada <i>Single Stack</i> PEMFC	49
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1. Preparasi Elektroda	51
4.1.1. Preparasi Tinta Katalis	51
4.1.2. Pelapisan (<i>Coating</i>) Kertas Karbon <i>MPL Supported</i> dengan Katalis.....	55
4.2. Preparasi <i>Single Stack</i> PEMFC.....	56
4.2.1. Treatment untuk Aktivasi Membran Nafion.....	56
4.2.2. Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i>	56
4.2.3. Penyusunan (<i>Stacking</i>) <i>Single Stack</i> PEMFC.....	57
4.3. Uji Kebocoran (<i>Leak-Cross Leak Test</i>) pada sistem <i>Single Stack</i> PEMFC.....	58
4.4. Kondisi Sistem Operasi Pengukuran <i>Single Stack</i> PEMFC..	60
4.4.1. Pengaruh Kondisi Sistem Operasi terhadap Performa <i>Single Stack</i> PEMFC	60
4.4.1.1. Pengaruh Ukuran kabel dalam Sistem Operasi Pengukuran Performa <i>Single Stack</i> PEMFC	60

4.4.1.2. Pengaruh <i>Conditioning</i> terhadap Performa <i>Single Stack</i> PEMFC	60
4.4.2. Penentuan kondisi Optimum Sistem Operasi Pengukuran <i>Single Stack</i> PEMFC.....	64
4.4.2.1. Penentuan Tekanan Optimum Sistem Operasi Pengukuran <i>Single Stack</i> PEMFC	64
4.4.2.2. Penentuan Kecepatan Alir (<i>flow rate</i>) Gas Hidrogen dan Oksigen Optimum Sistem Operasi Pengukuran <i>Single Stack</i> PEMFC.....	66
4.4.2.3. Pengukuran Transfer massa Hidrogen dan Efisiensi <i>Single Stack</i> PEMFC.....	69
4.5. Pengukuran Performa dan Penentuan Efisiensi <i>Single Stack</i> PEMFC dengan Katalis Pt pada Anoda dan Katoda.....	70
4.6. Penentuan Performa <i>Single Stack</i> PEMFC dengan Variasi Katalis pada Anoda.....	73
4.7. Penentuan Performa <i>Single Stack</i> PEMFC dengan Variasi Katalis pada Katoda.....	78
4.8. Pengukuran Transfer Massa Hidrogen dan Efisiensi <i>Single Stack</i> PEMFC dengan Variasi Katalis pada Anoda dan Katoda	82

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

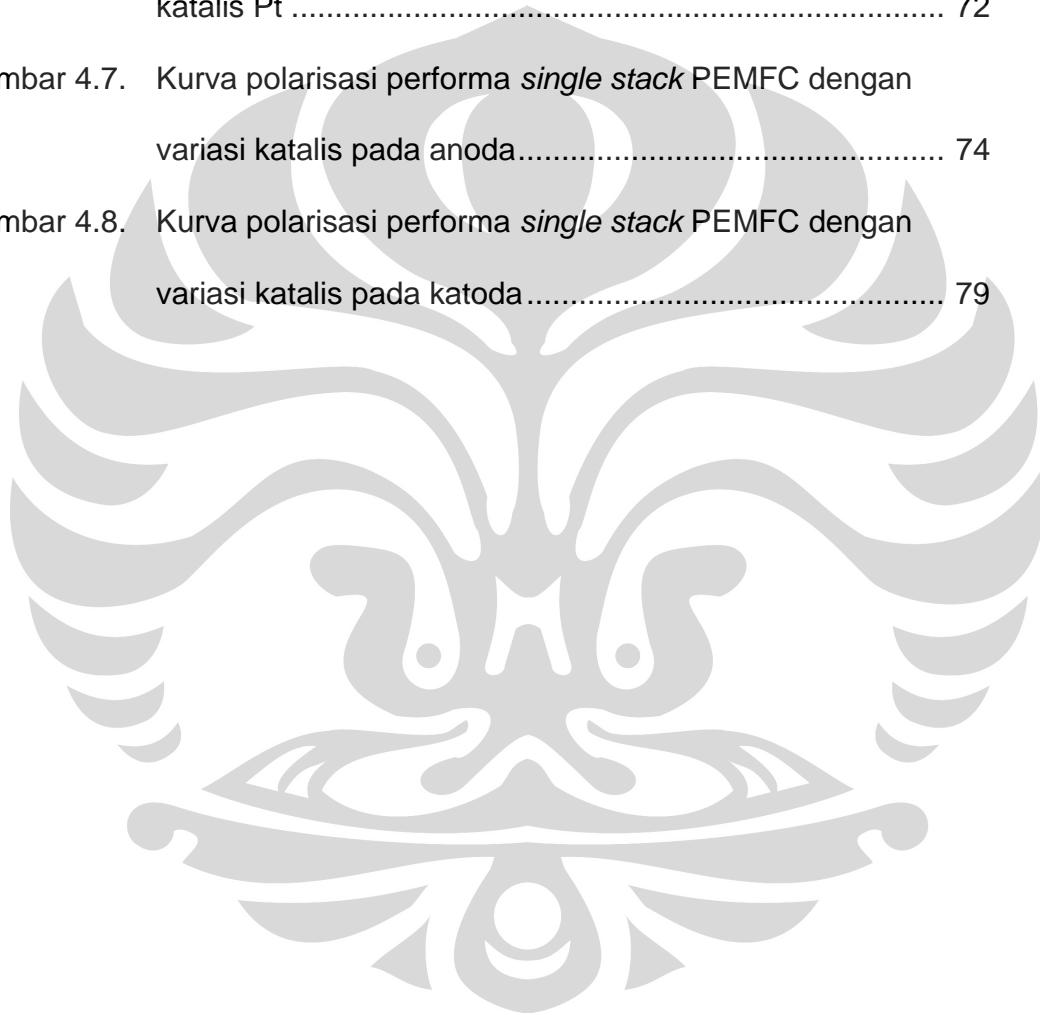
5.1. Kesimpulan.....	85
5.2. Saran.....	86
DAFTAR PUSTAKA	87
DAFTAR PUBLIKASI HASIL PENELITIAN	92
PROFIL	93
LAMPIRAN.....	94

**Universitas Indonesia**

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Proses dan Reaksi pada berbagai <i>Fuel Cell</i>	7
Gambar 2.2. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	10
Gambar 2.3. Komponen PEMFC.....	11
Gambar 2.4. Komponen MEA.....	12
Gambar 2.5. Struktur Nafion dan Komponen Penyusunnya	16
Gambar 2.6. Lapisan Gas Difusi.....	17
Gambar 2.7. Mekanisme Reaksi Reduksi Oksigen	25
Gambar 2.8. Kurva Polarisasi PEMFC	28
Gambar 3.1. Alat Hot Press.....	45
Gambar 3.2. Skema <i>stacking</i> PEMFC.....	46
Gambar 3.3. Skema pengujian dan pengukuran <i>single stack</i> PEMFC ..	47
Gambar 3.4. Sistem pengujian dan pengukuran <i>single stack</i> PEMFC ..	48
Gambar 3.5. <i>Electronic Discharge Meter</i>	50
Gambar 4.1. Kurva polarisasi pengaruh diameter kabel sistem operasi PEMFC	61
Gambar 4.2. Kurva polarisasi pengaruh <i>conditioning</i> terhadap performa PEMFC	62
Gambar 4.3. Pengaruh air dalam menentukan konduktifitas membran. .	63
Gambar 4.4. Kurva polarisasi penentuan tekanan optimum untuk	

	<i>single stack</i> PEMFC.....	65
Gambar 4.5.	Kurva polarisasi penentuan <i>flow rate</i> optimum untuk <i>single stack</i> PEMFC.....	67
Gambar 4.6.	Kurva polarisasi performa <i>single stack</i> PEMFC dengan katalis Pt	72
Gambar 4.7.	Kurva polarisasi performa <i>single stack</i> PEMFC dengan variasi katalis pada anoda.....	74
Gambar 4.8.	Kurva polarisasi performa <i>single stack</i> PEMFC dengan variasi katalis pada katoda.....	79



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Komponen MEA dan Fungsinya	12
Tabel 3.1.	Kombinasi variasi katalis.....	44
Tabel 4.1.	Ukuran Partikel Katalis.....	53
Tabel 4.2.	Performa <i>single stack</i> PEMFC pada berbagai tekanan	66
Tabel 4.3.	Performa <i>single stack</i> PEMFC pada berbagai <i>flow rate</i> (0,1 Bar)	68
Tabel 4.4.	Transfer massa hidrogen dan efisiensi reaksi <i>single stack</i> PEMFC pada berbagai beban	70
Tabel 4.5.	Data pengamatan pengukuran <i>single stack</i> PEMFC dengan katalis Pt pada anoda dan katoda.....	71
Tabel 4.6.	Efisiensi katalis pada anoda PEMFC	75
Tabel 4.7.	Efisiensi katalis pada katoda PEMFC	80
Tabel 4.8.	Transfer Massa Hidrogen dan Efisiensi Reaksi PEMFC dengan Variasi Katalis pada Anoda dan Katoda.....	83

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Penggunaan katalis bimetal berbasis karbon dan larutan nafion	94
Lampiran 2	Desain penelitian	94
Lampiran 3	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan kabel besar untuk sistem operasinya	96
Lampiran 4	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan kabel kecil untuk sistem operasinya	97
Lampiran 5	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC sebelum conditioning	98
Lampiran 6	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC setelah conditioning	99
Lampiran 7	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada tekanan 0 Bar	100
Lampiran 8	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada tekanan 0.1 Bar	101
Lampiran 9	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada tekanan 0.2 Bar	102
Lampiran 10	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada tekanan 0.3 Bar	103

Lampiran 11	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada kecepatan alir gas hidrogen dan oksigen 50-50 mL/Menit.....	104
Lampiran 12	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada kecepatan alir gas hidrogen dan oksigen 100-50 mL/Menit.....	105
Lampiran 13	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada kecepatan alir gas hidrogen dan oksigen 100-100 mL/Menit.....	106
Lampiran 14	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada kecepatan alir gas hidrogen dan oksigen 150-100 mL/Menit.....	107
Lampiran 15	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada kecepatan alir gas hidrogen dan oksigen 150-150 mL/Menit.....	108
Lampiran 16	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt pada anoda dan katoda.....	109
Lampiran 17	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt pada anoda dan Pt-Co pada katoda.....	110
Lampiran 18	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt pada anoda dan Pt-Ni	

	pada katoda	111
Lampiran 19	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt pada anoda dan Pt-Ru pada katoda	112
Lampiran 20	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt-Co pada anoda dan Pt pada katoda	113
Lampiran 21	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt-Ni pada anoda dan Pt pada katoda	114
Lampiran 22	Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt-Ru pada anoda dan Pt pada katoda	115
Lampiran 23	Gambar bahan-bahan yang digunakan.....	116
Lampiran 24	Gambar alat-alat yang digunakan	119
Lampiran 25	Gambar Sistem Pengujian dan pengukuran	121
Lampiran 26	Publikasi Hasil Penelitian	124

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Listrik merupakan salah satu bentuk energi yang hampir menguasai hajat hidup orang banyak. Tercermin dari rasio elektrifikasi atau jumlah penduduk yang teraliri listrik rata-rata meningkat sebesar 2,12 % per tahun. Alhasil pada tahun 2007 rasio elektrifikasi telah mencapai 66,23 % dari total penduduk. ¹

Krisis energi listrik sudah di depan mata. Padamnya listrik di Jawa-Bali merupakan pertanda bahwa pasokan listrik dalam sistem interkoneksi sudah tidak mampu lagi memenuhi kebutuhan listrik masyarakat dan industri yang terus meningkat. Ditambah dengan harga bahan bakar minyak (BBM) yang melonjak, maka upaya lebih menggiatkan penggunaan energi alternatif non-BBM di Indonesia di sektor pembangkitan listrik tidak dapat ditawar-tawar lagi. ²

Seiring dengan meningkatnya konsumsi energi adalah meningkatnya permasalahan lingkungan hidup, mulai dari produksi energi (pertambangan dan proses pembuatan energi primer), transportasi (penyaluran) energi

primer, produksi dan transmisi, serta distribusi energi sekunder (listrik). Pada areal pertambangan sumber energi fosil (seperti minyak bumi, batubara dan gas alam) terjadinya perubahan bentang alam dan dampak terhadap lingkungan hidup harus menjadi perhatian.³

Teknologi sel bahan bakar (*fuel cell*) merupakan salah satu teknologi energi alternatif yang mempunyai prospek dimasa mendatang yang bahan bakarnya berbasis hidrogen atau metanol. Sistem energi ini memiliki keunggulan yaitu; *transportable*, ramah lingkungan dan efisiensi tinggi.^{4,5}

Teknologi ini juga dapat digunakan pada

kendaraan bermotor, rumah, maupun pembangkit listrik besar, dengan tanpa menimbulkan polusi, tidak menimbulkan bunyi (karena tidak ada yang bergerak), serta mempunyai efisiensi yang tinggi dibanding dengan sistem energi lainnya.

Prinsip kerja *fuel cell* adalah proses elektrokimia, dimana hidrogen atau metanol dan oksigen (udara) digunakan sebagai bahan bakarnya (*fuel*). *Fuel cell* terdiri dari beberapa tipe, yaitu; *Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)*, *Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)*, *Molten Carbonate Fuel Cell (MOFC)*, *Alkaline Fuel Cell (AFC)*, *Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)*, *Regenerative*, and *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*.

PEMFC merupakan tipe *fuel cell* yang banyak digunakan pada aplikasi karena rata-rata temperatur operasionalnya hanya mencapai 120°C dan

menggunakan padatan polimer sebagai elektrolit sehingga mudah dalam penggunaannya. Komponen utama PEMFC terdiri dari elektrolit padatan polimer berupa lapisan khusus yang diletakkan diantara dua buah elektroda, anoda dan katoda. Proses kimia yang disebut pertukaran ion terjadi di dalam elektrolit ini dan hasilnya adalah listrik, air dan panas.

Ditinjau dari harga komponen-komponen PEMFC, maka 43 % dari total komponennya adalah untuk katalis elektroda, 19 % untuk separator, 14 % untuk elektroda, 10 % untuk pendingin, 7 % untuk *assembling*, 2 % untuk membran dan 5 % untuk komponen lainnya, sehingga pemilihan katalis yang tepat akan mempengaruhi harga PEMFC keseluruhan.⁶

Dilatarbelakangi hal tersebut, diperlukan penelitian-penelitian lebih lanjut mengenai modifikasi katalis elektroda untuk PEMFC. Katalis yang umum digunakan pada *fuel cell* adalah katalis platinum berbasis karbon (Pt/C) yang digunakan untuk mereduksi oksigen pada katoda dan untuk mengoksidasi hidrogen atau metanol pada anoda. Katalis ini merupakan katalis yang terbaik hingga saat ini. Salah satu kelemahan dari katalis Pt/C adalah sensitif terhadap gas CO dan H₂S, selain itu harganya yang relatif mahal. Untuk itu perlu dikembangkan katalis lain yang lebih tahan terhadap korosi gas CO.

Beberapa peneliti terdahulu telah mempelajari mengenai reaksi oksidasi hidrogen dan reduksi oksigen menggunakan katalis Pt dan katalis bimetal. Kunz (1977) memberitahukan bahwa modifikasi katalis untuk reduksi

oksigen menggunakan katalis Pt *alloy* (V, Ni, Cr) dapat menambah aktivitas intrinsik dan kestabilan dibandingkan katalis Pt murni. Atas dasar ini maka dilakukan penelitian untuk mempelajari katalis bimetal berbasis karbon seperti terhadap oksidasi hidrogen dan reduksi oksigen.

Katalis Pt-Ru/C, Pt-Ni/C dan Pt-Co/C merupakan alternatif katalis yang dapat digunakan dalam teknologi *fuel cell*. Ketiga katalis tersebut memiliki sifat yang tahan terhadap oksidasi dan gangguan gas CO. Selain itu harga katalis Pt-Ru/C, Pt-Ni/C dan Pt-Co/C relatif lebih murah dibandingkan Pt/C. Pada penelitian ini, akan dikembangkan katalis bimetal dan uji kesesuaian katalis tersebut pada teknologi *fuel cell* khususnya PEMFC.

1.2. Tujuan Penelitian

1. Menentukan performa katalis bimetal berbasis karbon (Pt-Co/C, Pt-Ni/C, dan Pt-Ru/C) sebagai alternatif material elektroda pada PEMFC.
2. Menentukan mass transfer hidrogen dan efisiensi reaksi dari masing-masing variasi katalis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Elektrokimia

Elektrokimia merupakan bidang ilmu pengetahuan yang berhubungan dengan reaksi-reaksi kimia yang diinisiasi oleh energi listrik atau yang menghasilkan energi listrik. Dalam elektrokimia, reaksi kimia yang terjadi adalah reaksi reduksi dan reaksi oksidasi yang dikenal sebagai reaksi redoks. Prinsip dasarnya adalah transfer elektron antara permukaan elektroda dengan molekul spesies kimia di dalam larutan.

Sel elektrokimia terdiri dari sistem yang memiliki dua elektroda yang dipisahkan oleh setidaknya satu fasa elektrolit. Fasa elektrolit merupakan medium penghantar dimana transfer muatan terjadi melalui pergerakan ion-ion. Elektrolit dapat berupa larutan, garam, atau padatan konduktor seperti natrium- β -alumina yang memiliki ion natrium yang dapat bergerak. Untuk menambah konduktivitas elektrolit maka perlu ditambahkan elektrolit pendukung yang merupakan larutan konduktif tempat terjadinya reaksi elektrokimia dan bersifat ion nonelektroaktif. Elektrolit pendukung ini biasanya merupakan elektrolit larutan garam anorganik, asam, atau basa.^{7,8,9}

Sel elektrokimia dapat berupa sel galvanik atau sel elektrolisis. Sel galvanik adalah sel dimana sejumlah energi dilepaskan secara spontan melalui suatu reaksi kimia dan diubah menjadi energi listrik. Pada sel galvanik reaksi yang terjadi tidak dapat dikendalikan. Sel elektrolisis adalah suatu sel yang membutuhkan energi agar reaksi kimia dapat berlangsung.

Elektroda merupakan tempat terjadinya pergerakan elektron. Elektroda adalah suatu media penghantar listrik atau konduktor dalam suatu sistem elektrokimia. Permukaan elektroda merupakan penghubung antara larutan konduktor ionik dengan konduktor elektronik. Sel elektrokimia harus memiliki setidaknya dua buah elektroda. Elektroda tempat terjadinya reaksi reduksi disebut katoda, sedangkan elektroda tempat terjadinya reaksi oksidasi disebut anoda. Efektifitas elektroda dapat dilihat dari keadaan permukaannya dan besarnya hambatan.^{10,11}

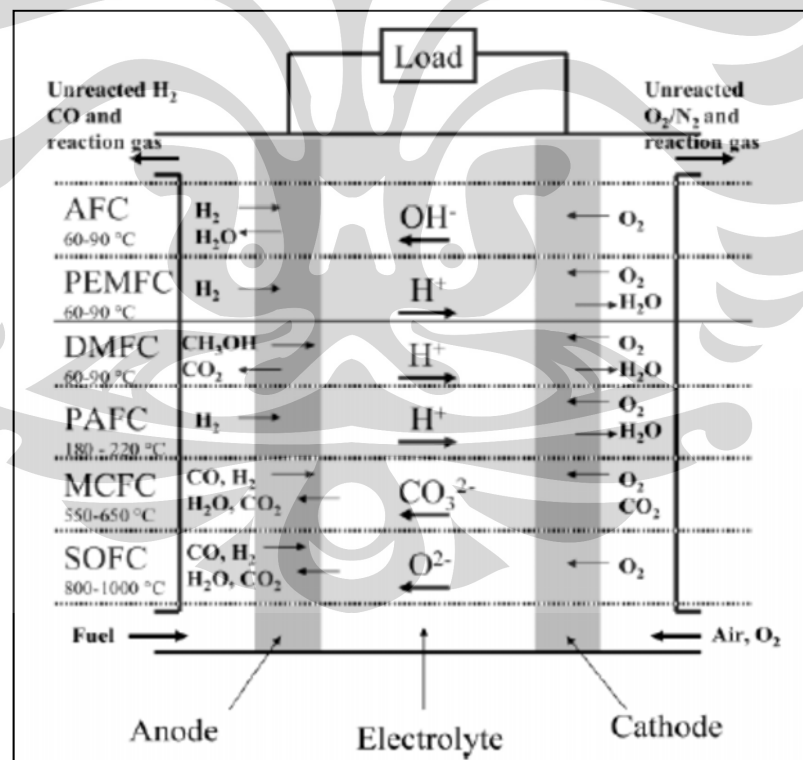
2.2. Sel Bahan Bakar (Fuel Cell)

Fuel cell adalah suatu peralatan berbasis elektrokimia yang dapat mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik (dan beberapa energi panas) secara berkelanjutan selama bahan bakar dan oksidator terpenuhi¹². *Fuel cells* merupakan sumber energi alternatif dengan suatu potensi untuk menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dengan bahan bakar yang dapat diperbaharui dan memiliki dampak lingkungan yang minim.

Universitas Indonesia

Keuntungan penggunaan *fuel cell* adalah mempunyai efisiensi yang cukup tinggi, tidak menimbulkan emisi, tidak perlu perawatan khusus, tidak menimbulkan suara, ramah lingkungan, aman dan mempunyai densitas energi yang tinggi. Sedangkan kelemahan dari *fuel cell* adalah sulit untuk dioperasikan, adanya pengotor pada gas akan memperpendek umur hidup sel bahan bakar, harganya relatif mahal dan daya tahannya rendah.¹³

Fuel cell terdiri dari beberapa tipe, yaitu; *Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)*, *Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)*, *Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)*, *Alkaline Fuel Cell (AFC)*, *Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)*, *Regenerative*, and *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*.



Gambar 2.1. Proses dan Reaksi pada berbagai *Fuel Cell*¹⁴

Dari kelima tipe fuel cell, teknologi fuel cell yang banyak diaplikasikan adalah *polymer electrolyte membrane or proton exchange membrane fuel cells* (PEM fuel cells or PEMFCs). Proses dan reaksi yang terjadi pada berbagai *fuel cell* dapat dilihat pada Gambar 2.1.¹⁴

2.3. Katalis Heterogen

Katalis adalah zat lain selain reaktan dan produk, yang ditambahkan pada suatu sistem reaksi untuk mengubah/ meningkatkan laju reaksi kimia mencapai keadaan kesetimbangan kimianya. Katalis berinteraksi dengan reaktan menghasilkan intermediet reaktif, menyangkut banyak reaksi atomik/molekular hingga kemudian menentukan jalan reaksi sehingga produk reaksi terbentuk. Katalis dapat mempromosikan pembentukan produk-produk reaksi yang dikehendaki atau bersifat selektif. Katalis dapat meningkatkan laju reaksi dan tidak dapat menginisiasi suatu reaksi yang secara termodinamika tidak dapat berlangsung. Faktor-faktor kinetika reaksi yang dapat dipengaruhi oleh katalis diantaranya; energi aktivasi, keadaan transisi, dan laju reaksi.

Katalis yang memiliki fase yang berbeda dengan reaktan disebut sebagai katalis heterogen atau katalis kontak. Proses katalisis heterogen lebih kompleks dari proses katalisis homogen karena katalisis heterogen tidak dapat terdistribusi secara uniform dalam medium reaksi. Pada suatu reaksi

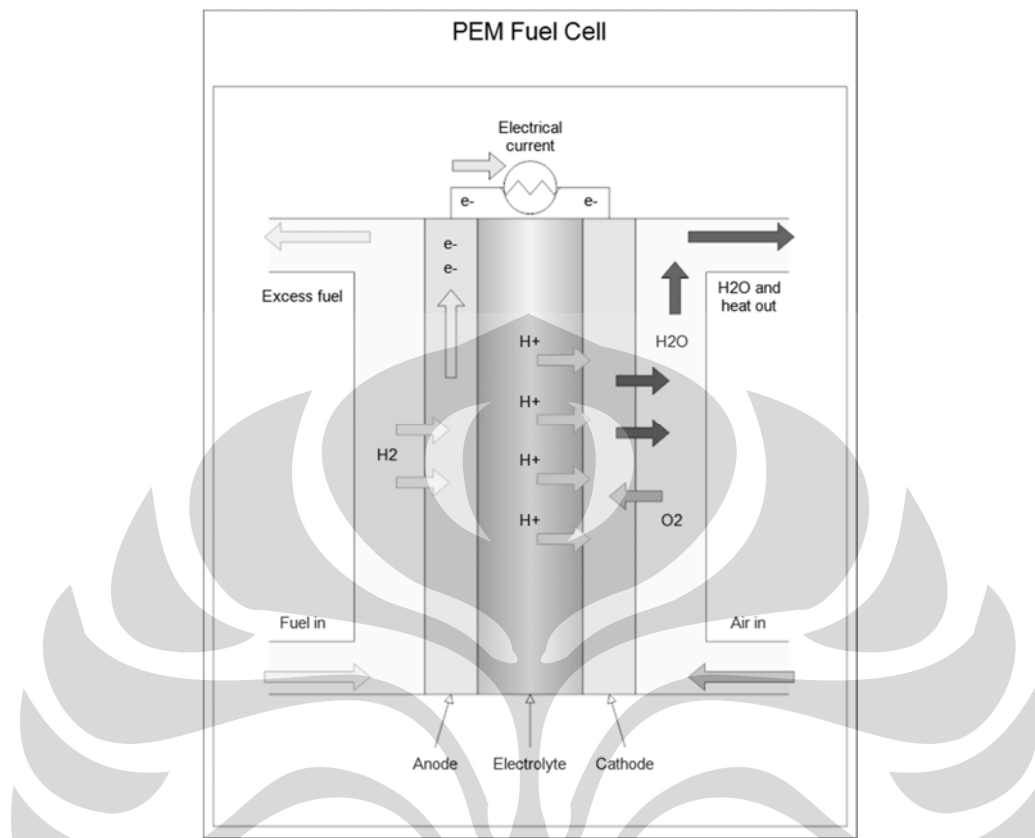
Universitas Indonesia

kimia, katalis heterogen harus memiliki kemampuan yang cukup dalam mengadsorpsi molekul-molekul gas atau cairan reaktan pada permukaannya.

Untuk sistem semacam ini dibutuhkan beberapa tahapan untuk satu siklus katalisis, diantaranya (1) transportasi reaktan ke katalis (2) interaksi/adsorpsi reaktan-reaktan oleh katalis (3) reaksi dari spesies-spesies yang teradsorpsi menghasilkan produk reaksi (4) desorpsi produk dari katalis (5) transportasi produk menjauhi katalis.¹⁵

2.4. Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) merupakan tipe *fuel cell* yang menggunakan membran polimer yang konduktif terhadap proton sebagai elektrolit. Membran tersebut tidak dapat ditembus oleh gas tetapi dapat menghantarkan proton. Membran yang paling terkenal dan banyak digunakan dalam pengembangan PEMFC adalah ®Nafion (Dupont). Elektroda PEMFC terbuat dari bahan karbon atau kertas karbon fiber. Pada interfase antara poros elektroda dan membran polimer terdapat lapisan dengan partikel katalis, biasanya katalis platinum dalam karbon.

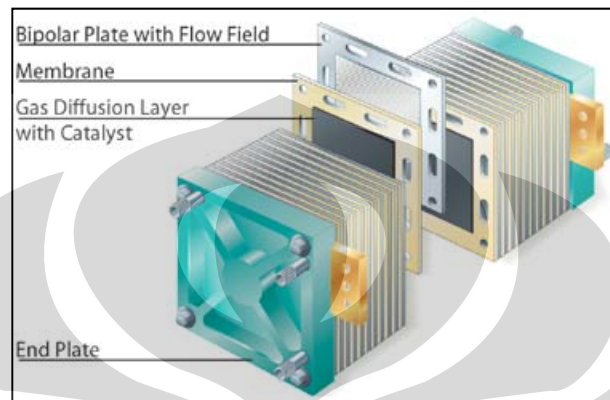


Gambar 2.2. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)¹⁶

2.4.1. Desain PEMFC Secara Umum

Komponen pada PEMFC terdiri dari *bipolar plate* sebagai separator, dan *membrane electrode assembly* (MEA). MEA merupakan jantung dari PEMFC. Pada kedua belah sisi membran dilapisi dengan lapisan tipis elektroda logam mulia pada kertas karbon berpori (ketebalan kurang dari 100 mikron) sebagai elektrokatalis yang mengontrol proses elektrokimia pada

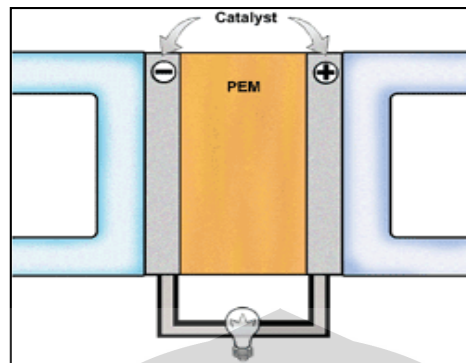
PEMFC. Komponen PEMFC secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Komponen PEMFC¹⁷

2.4.2. Membrane Electrode Assembly (MEA)

Membrane Electrode Assembly (MEA) terdiri dari “*Proton Exchange Membrane* (PEM)” dan lapisan katalis. PEM yang digunakan pada PEMFC berupa elektrolit padatan polimer (*solid polymer electrolyte*). Fungsi dari komponen MEA dapat dilihat pada Tabel 2.1. Sedangkan komponen MEA dapat dilihat pada Gambar 2.4.

Gambar 2.4. Komponen MEA¹⁸Tabel 2.1. Komponen MEA dan Fungsinya¹⁹

Komponen MEA	Fungsi
Substrat anoda	Penyedia dan pendistribusi bahan bakar Penghantar elektron Penghilang panas dari hasil reaksi Penyedia uap air untuk elektrokatalis
Lapisan katalis anoda	Katalis untuk reaksi anoda Penghantar proton menuju membran Penghantar elektron menuju substrat Pembawa air Pembawa panas
<i>Proton Exchange Membrane</i>	Penghantar proton Pembawa air Bukan penghantar elektron

Lapisan katalis katoda	Katalis untuk reaksi katoda Pembawa oksigen menuju tempat reaksi Penghantar proton menuju tempat reaksi Penghilang air dari tempat reaksi menuju substrat Penghilang atau penghantar panas
Substrat katoda	Penyedia oksigen (udara) Penghantar elektron menuju tempat reaksi Penghilang panas Pembawa air

2.4.2.1. Membran Nafion

Elektrolit padatan polimer berbentuk lapisan membran tipis yang merupakan penyekat elektron dan penghalang gas antara dua elektroda tetapi penghantar proton yang baik dan memiliki densitas arus yang tinggi. Fungsi utama membran pada PEMFC adalah untuk mentransfer proton dari anoda ke katoda. Untuk hal tersebut, polimer membran memiliki gugus sulfonik yang dapat memfasilitasi transfer proton tersebut. Fungsi membran yang lain adalah menjaga bahan bakar dan oksidator sehingga tidak kontak langsung dengan bahan bakar.¹² Apabila kontak langsung terjadi, akan timbul

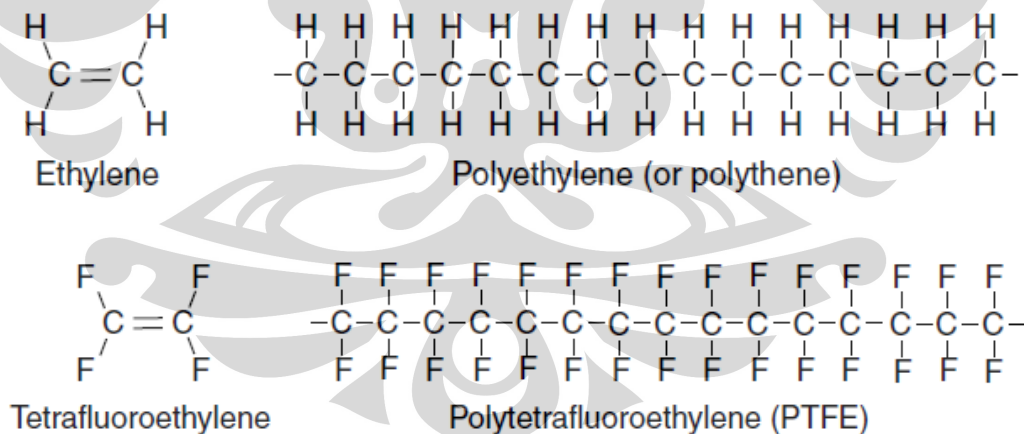
kondisi yang buruk seperti terbakarnya katalis yang aktif, terjadinya kenaikan temperatur yang fluktuatif, oksidasi besar-besaran, dan menghasilkan radikal yang reaktif. Dengan demikian polimer yang ideal harus memiliki konduktivitas proton yang tinggi, stabil terhadap cahaya dan senyawa kimia, kuat, fleksibel, sedikit dalam menyerap dan melewatkan gas dan air, murah dan siap pakai.

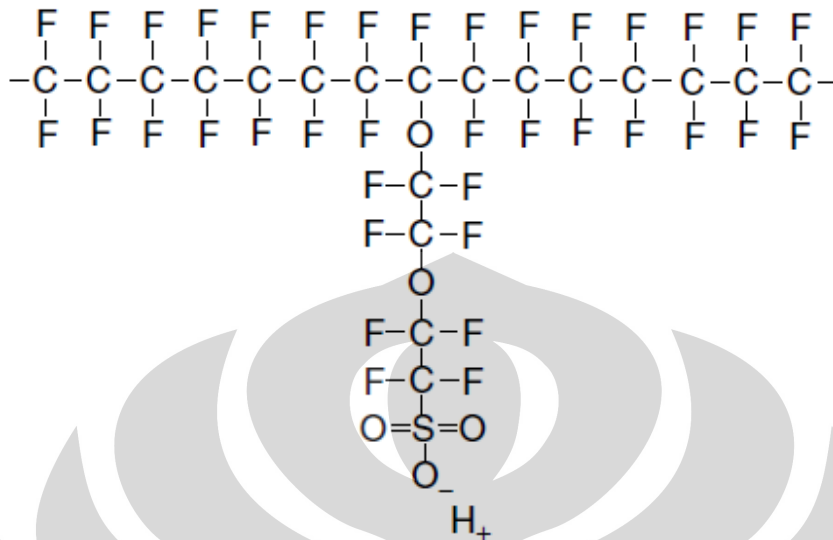
Suatu membran PEMFC biasanya merupakan polimer yang dimodifikasi dengan ion tertentu, seperti dengan gugus sulfonik. Gugus ion yang hidrofilik tersebut merupakan kunci terjadinya transfer proton melewati membran. Transfer proton pada elektrolit padatan polimer mengikuti prinsip mekanisme "Grotthuss", dimana transfer proton dari satu tempat ke tempat lain dibantu oleh ikatan hidrogen. Membran yang kaya akan proton akan memiliki jalur migrasi proton.¹⁹

Membrane perfluorinated sulfonic acid yang dikenal dengan nama nafion merupakan PEM yang banyak digunakan dalam industri *fuel cell*. Nafion terdiri dari PTFE (*polymerized tetrafluoroethylene*, nama dagang Dupont "Teflon") sebagai kerangka utama yang memberikan sifat inert terhadap reaksi kimia. Rantai samping *perfluorinated vinyl polyether*, terikat pada kerangka utama PTFE melalui atom oksigen dengan gugus *sulfonic acid*, $-SO_3H$ pada ujung rantainya yang memiliki kapasitas sebagai penukar kation.¹² Struktur nafion beserta komponen penyusunnya dapat dilihat pada Gambar 2.5.

Nafion memiliki sebuah gugus alifatik perfluoro yang berikatan dengan rantai eter disamping dan ditutup dengan gugus pengganti kation *sulfonate*. Nafion merupakan kopolimer dari *tetrafluoroethylene* dan *sulfonyl fluoride vinyl ether* yang memiliki struktur semi kristalin. Struktur nafion yang mengandung teflon, membuat nafion tahan lama dan stabil pada kondisi oksidasi dan reduksi.

Pada keadaan kering, struktur nafion akan membalik membentuk morfologi *micelle* dimana kluster yang ionik akan terdispersi ke dalam fase *tetrafluoroethylene*. Ketika membran menyerap air, daerah gugus yang ionik akan mengembang dan membentuk saluran penghantar proton.¹² Konduktifitasnya akan meningkat dengan kandungan air yang cukup.



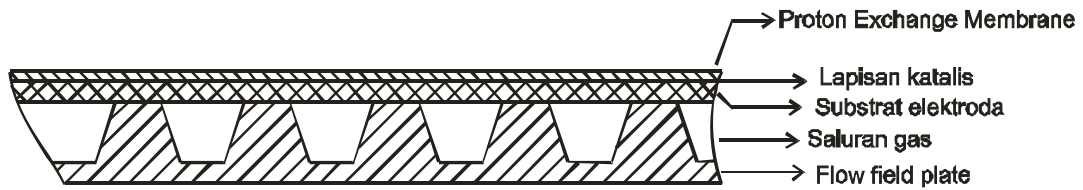


Gambar 2.5. Struktur Nafion dan Komponen Penyusunnya²⁰

2.4.2.2. Lapisan Difusi Gas dan Elektroda PEMFC

Elektroda PEMFC modern ialah elektroda difusi gas yang terdiri dari lapisan pori gas yang memiliki luas permukaan katalis yang besar. Baik katoda ataupun anoda bersentuhan langsung dengan membran elektrolit polimer. Lapisan difusi gas berfungsi sebagai ruangan kosong sehingga gas reaktan dapat berdifusi ke lapisan katalis. Setelah elektron dihantarkan dari lapisan katalis anoda menuju lapisan katalis katoda, maka lapisan gas difusi akan kosong sehingga gas reaktan berdifusi kembali menuju lapisan katalis. Lapisan gas difusi sering disebut sebagai daerah landasan. Komponen lapisan gas difusi dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Universitas Indonesia



Gambar 2.6. Lapisan Gas Difusi¹⁹

Lapisan difusi gas merupakan komponen yang kritis dalam PEMFC. Lapisan difusi gas bersama dengan piringan aliran gas dan pengumpul arus (*current collector*) telah didesain untuk menghasilkan performa yang baik dari operasi PEMFC. Namun, lapisan difusi gas bukan sepenuhnya merupakan bagian dari MEA. Fungsi utama dari lapisan difusi gas adalah menyebarkan gas. Poros yang secara alami terbentuk dari material memfasilitasi penyebaran secara efektif setiap gas reaktan kepada katalis pada MEA¹². Lapisan difusi gas juga merupakan penghubung listrik antara karbon pada katalis dengan *bipolar plate* atau *current collector*. Kemudian, lapisan difusi gas juga membantu pengaturan air dalam PEMFC, lapisan ini membawa keluar air produk reaksi dari permukaan elektrolit.

Lapisan difusi gas biasanya terbuat dari karbon berporos seperti kertas karbon dengan ketebalan antara 0.2 sampai 0.5 mm dengan struktur dua lapisan¹². Lapisan pertama dari lapisan difusi gas kontak dengan piringan aliran gas dan saluran gas masuk. Lapisan tersebut disebut lapisan makroporos karbon yang berlaku sebagai pengumpul arus dan secara fisik

mendukung lapisan katalis dan merupakan suatu komponen yang elastis dalam MEA.

Komponen yang elastis dibutuhkan dalam *fuel cell* untuk menangani adanya kompresi yang dibutuhkan dalam membuat suatu kontak. Lapisan kedua dari lapisan difusi gas kontak dengan lapisan katalis. Lapisan tersebut lebih tipis dan disebut sebagai lapisan mikroporos yang mengandung serbuk karbon dan beberapa agen hidrofobik yang menyediakan lubang-lubang permukaan yang berukuran tepat, dan sifat hidrofobik ini berfungsi untuk menahan air apabila terjadi banjir dan untuk meningkatkan kontak dengan elektron pada interfase lapisan difusi gas dengan lapisan katalis¹².

Suatu lapisan difusi gas yang ideal diperlukan untuk mentransfer gas reaktan ke lapisan katalis secara efektif, memiliki hambatan elektron yang rendah, memiliki permukaan yang dapat meningkatkan kontak dengan elektron, dan memiliki agen hidrofobik yang tepat untuk setiap penggunaannya.

2.4.2.3. Elektrokatalis PEMFC

Pada PEMFC terdapat dua lapisan katalis, yaitu lapisan katalis pada katoda dan anoda. Lapisan katalis ini mempunyai peranan penting pada kerja MEA. Tanpa lapisan katalis ini MEA tidak dapat berfungsi. Lapisan katalis membutuhkan desain yang dapat memberikan reaksi dengan kecepatan

tinggi dan mengurangi jumlah katalis yang dibutuhkan untuk dapat menghasilkan daya yang optimum. Untuk mencapai hal-hal tersebut, terdapat beberapa persyaratan suatu lapisan katalis pada PEMFC: (1) memiliki tiga interfase yang luas, (2) efisien dalam mentransfer proton dan elektron, (3) mudah mentransfer gas reaktan dan produk serta mudah dalam pembuangan air, (4) dapat mendistribusikan arus listrik dari tempat reaksi ke pengumpul arus (*current collector*) secara berkelanjutan.²¹

Lapisan katalis harus mempunyai reaktivitas yang tinggi untuk oksidasi elektrokimia pada anoda, baik untuk oksidasi gas hidrogen ataupun oksidasi larutan metanol, dan reduksi dari gas oksigen pada katoda. Daya tahan yang baik juga merupakan kunci yang penting karena PEMFC diharapkan dapat beroperasi untuk ratusan sampai ribuan jam. Elektrokatalis sebaiknya mempunyai hantaran yang baik sehingga dapat mengurangi hambatan pada lapisan katalis, harganya relatif murah dan mudah diproduksi.

Katalis yang baik harus mempunyai syarat daya hantar listrik yang baik, reaktivitas yang baik dengan ionomer, mudah bersentuhan dengan gas reaktan, stabil ketika bersentuhan baik dengan reaktan, produk ataupun elektrolit. Penelitian selama beberapa dekade menunjukkan bahwa katalis Pt dan Pt-*alloy* adalah yang paling efektif dalam menjaga stabilitas dan aktivitas.¹⁹

Secara umum untuk mendapatkan jumlah sisi aktif yang maksimum, katalis harus didispersikan pada penyangga yang inert. Penyangga yang inert

dapat berupa serbuk karbon hitam (*carbon black powder*) sehingga sisi aktif dari platinum dapat didispersikan secara merata pada permukaan penyangga. Hubungan antara ukuran partikel dan luas permukaan dapat ditulis sebagai berikut :

$$S = \frac{6}{(\rho_{Pt} \times d)} \quad (1)$$

S = luas permukaan (m^2/g)

ρ = densitas (g/cm^3)

d = ukuran partikel (m)

Dengan bertambahnya ukuran partikel Pt akan memperkecil luas permukaan. Oleh karena itu, untuk mendapatkan jumlah sisi aktif maksimum, partikel Pt sebaiknya didispersikan sehalus mungkin.¹⁹

2.4.3. Graphite Bipolar plates

Flow field plates biasanya terbuat dari grafit dengan alur teratur.

Lempeng ini mempunyai daya hantar listrik tinggi dan daya hantar panas tinggi yang stabil terhadap bahan kimia didalam *fuel cell*. Bahan dasar grafit dibuat melalui proses *sintering* pada suhu tinggi selama beberapa minggu.

Fungsi dari *flow field* ini adalah sebagai penghantar arus, penghantar panas pengontrol aliran gas, penghilang produk air dan pemisah gas.

Dari sekian banyak komponen penyusun *fuel cell*, *bipolar plate* merupakan suatu komponen yang perlu dipertimbangkan terhadap biaya dan problematikanya. Fungsi utama *bipolar plate* adalah untuk menyediakan gas reaktan untuk elektroda difusi gas melalui saluran alir. *Bipolar plate* harus memberikan hubungan listrik diantara sel satu dengan sel lainnya. *Bipolar plate* dapat membuang air pada katoda secara efektif. *Bipolar plate* juga harus dapat menahan gas, cukup kuat saat dikompresi, dan mudah diproduksi.

Sebagai *bipolar plate* yang kontak secara konstan dengan air yang bersifat asam ($\text{pH} = 5$) dan umumnya beroperasi pada kondisi yang tersusun, stabilitas kimia dan tahan korosi dibutuhkan untuk komponen tersebut. Tidak hanya dapat membentuk reaksi oksidasi selama proses korosi dan meracuni katalis tetapi kondisi tersebut juga dapat meningkatkan hambatan listrik piringannya sehingga akan mengurangi performa dari *fuel cell*. Material *bipolar plate* harus tahan pada temperatur 80°C , memiliki kelembaban dan potensial listrik yang tinggi. Secara teknis, desain *bipolar plate* PEMFC harus memiliki kriteria sebagai berikut:

1. Murah
2. Mudah mengalirkan gas
3. Memiliki konduktifitas listrik yang tinggi ($> 100 \text{ Scm}^{-1}$)

4. Sedikit dalam menyerap dan melewatkan gas
5. Mudah diproduksi
6. Kuat
7. Ringan
8. Kecil
9. Memiliki stabilitas kimia yang tinggi dan tahan terhadap korosi
($< 16 \mu\text{Acm}^{-2}$)
10. Tahan terhadap panas

Grafit merupakan sebuah material yang sangat baik untuk *bipolar plates* PEMFC walaupun dari biaya material dan proses pembuatannya sangat besar.¹² Walaupun piringan grafit tidak terbukti sebagai material yang paling efektif untuk aplikasi PEMFC, grafit dipilih untuk sebagian aplikasi yang membutuhkan ketahanan terhadap korosi dan tidak membutuhkan pelapisan ketika dibandingkan dengan piringan logam. Komposit polimer karbon dengan lembaran logam merupakan material murah yang berpotensi dan terutama sangat cocok untuk produksi massal karena piringan alir dapat dicetak secara langsung kedalam komposit polimer karbon dan lembaran tipis logam dapat ditambahkan pada piringan.

2.4.4. Lempengan Tembaga sebagai *Current Collector*

Pengumpul arus (*current collector*) merupakan komponen dari PEMFC yang bertanggung jawab mengakumulasi elektron yang dihasilkan dari reaksi. *Current collector* memperoleh elektron yang mengalir dari *bipolar plate* yang dihubungkan dengan suatu kertas karbon. Material untuk *current collector* harus memiliki tingkat konduktifitas yang tinggi. Sebagian besar PEMFC menggunakan tembaga (Cu) sebagai material untuk *current collector*.

2.4.5. Mekanisme Reaksi Sistem Operasi PEMFC

Sebuah PEMFC terdiri dari suatu elektrolit yang diapit diantara dua elektroda. Pada permukaan dua elektroda akan terjadi dua reaksi elektrokimia. Pada anoda gas hidrogen yang melewatinya akan mengalami reaksi oksidasi. Pada katoda gas oksigen yang melewatinya akan mengalami reaksi reduksi. Persamaan reaksi pada dua elektroda tersebut adalah sebagai berikut:

Reaksi anoda:



menghasilkan potensial pada anoda sebesar $E^\circ = 0.00\text{V}$ (pada kondisi standar) dengan SHE (*standard hydrogen electrode*).

Reaksi katoda



menghasilkan potensial pada katoda sebesar $E^\circ = 1.229\text{V}$ (pada kondisi standar) dengan SHE (*standard hydrogen electrode*). Dengan demikian, reaksi keseluruhan dalam PEMFC adalah sebagai berikut:



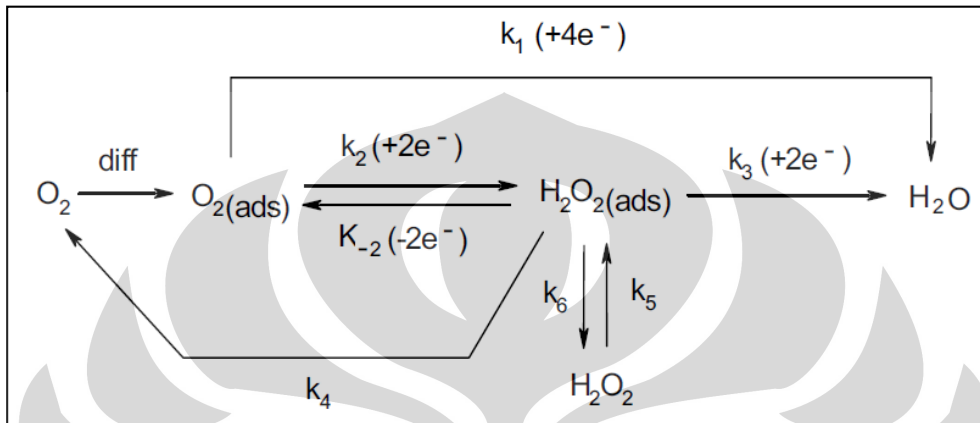
dengan standar kesetimbangan dihasilkan potensial reaksi E° sel 1.229 V.

2.4.5.1. *Oxygen Reduction Reaction (ORR)*

Oxygen Reduction Reaction (ORR) dikenal sebagai reaksi yang lambat. Kinetika yang lambat tersebut merupakan satu hal yang paling mempengaruhi menurunnya potensial sel dan tingginya overpotensial reduksi pada performa PEMFC. Pada umumnya, proses ORR pada katalis Pt terjadi dengan beberapa reaksi. Dua reaksi utama selalu terjadi dimana setiap reaksi mengantung beberapa langkah yang diskrit. Pertama, reaksi produksi air melalui jalan reaksi 4 elektron, dan kedua, reaksi produksi hidrogen peroksida melalui jalan reaksi 2 elektron seperti terlihat pada Gambar 2.7.

Katalis ORR yang baik, harus dapat menjadi media terjadinya reaksi yang melalui jalur reaksi 4 elektron yang mereduksi oksigen menjadi air. Reaksi yang tidak sempurna hanya akan mereduksi oksigen menjadi hidrogen peroksida. Reaksi ini tidak hanya menurunkan efisiensi konversi

energi namun juga dapat menghasilkan senyawa intermediet yang reaktif yang dapat mengkonversi beberapa spesi kimia menjadi spesi radikal bebas yang berbahaya.¹²



Gambar 2.7. Mekanisme Reaksi Reduksi Oksigen¹²

Penurunan potensial secara kinetika yang merupakan hasil dari lambatnya ORR pada katalis Pt telah dipelajari pada beberapa dekade yang lalu. Sebagai katalis yang maha, Pt juga tidak memberikan aktivitas yang baik untuk ORR. Dengan demikian dibutuhkan material alternatif sebagai katalis pada katoda untuk ORR pada aplikasi PEMFC. Elektroda logam mulia, non logam mulia dan organometalik dapat dikembangkan dan dipelajari untuk mengkatalisasi ORR pada PEMFC.

2.4.5.2. Hydrogen Oxidation Reaction (HOR)

Pada anoda, elektron pada hidrogen diputus sehingga terbentuk proton dan elektron. Untuk reaksi elektrokimia, tidak mudah mengakomodasi

satu elektron, reaksi tersebut membutuhkan suatu mekanisme yang terdiri dari beberapa langkah. Kecepatan reaksi keseluruhan bergantung pada bagian reaksi yang paling lambat. Langkah-langkah reaksi oksidasi H₂ pada elektroda Pt adalah sebagai berikut:



Katalis Pt merupakan katalis yang banyak digunakan sebagai material elektroda pada anoda untuk oksidasi hidrogen. HOR pada katalis Pt memiliki overpotensial oksidasi yang rendah dan secara kinetika memiliki kecepatan reaksi yang lebih tinggi dari ORR. Kepadatan pertukaran arus pada HOR jauh berbeda dengan kepadatan pertukaran arus pada ORR. Kepadatan pertukaran arus pada HOR mencapai 0,1 A/cm² sedangkan pada ORR hanya mencapai 6 μA/cm².¹²

Masalahnya, banyak sistem operasi aplikasi PEMFC yang diganggu oleh keberadaan gas karbon monoksida (CO) walaupun dalam level sangat kecil (ppm). CO tercampur dengan gas hidrogen yang diproduksi dari pembentukan ulang suatu bahan bakar, CO dapat teradsorpsi kuat pada katalis Pt di anoda. CO yang teradsorpsi, walaupun sangat sedikit (sekitar 10 ppm) dapat menghalangi area aktif dari katalis dan secara signifikan dapat menurunkan reaktivitas katalis.

Dengan pertimbangan tersebut, katalis yang baik untuk anoda pada PEMFC tidak hanya memiliki aktivitas katalitik yang tinggi terhadap oksidasi hidrogen, tetapi juga aktivitasnya bertambah dengan keberadaan CO. Penelitian katalis yang memiliki toleransi terhadap CO yang tinggi merupakan tugas untuk mensukseskan pengembangan sistem PEMFC yang lebih efisien.

2.4.6. Performa dan Efisiensi PEMFC secara Termodinamika

Performa dari sistem PEMFC dapat disimpulkan dengan suatu kurva yang mengkarakterisasi antara arus dan potensial. Kurva tersebut menampilkan potensial sel suatu PEMFC dalam memberikan arus yang telah dihasilkan. PEMFC yang memiliki luas permukaan sisi aktif katalis yang lebih luas akan menghasilkan arus yang lebih besar pula sehingga agar performanya dapat dibandingkan, arus yang dihasilkan harus dinormalisasi dengan luas permukaan dari area aktif katalis pada PEMFC menjadi kepadatan arus (A/cm^2).

Suatu *fuel cell* yang ideal dapat menghasilkan sejumlah arus selama bahan bakar masih dan tetap tersedia dengan potensial sel yang konstan. Pada kenyataannya, potensial sel aktual yang dihasilkan lebih kecil dari potensial ideal yang ditentukan secara termodinamika. Semakin besar arus (I) yang dihasilkan, maka potensial sel (V) PEMFC akan semakin kecil. Dari

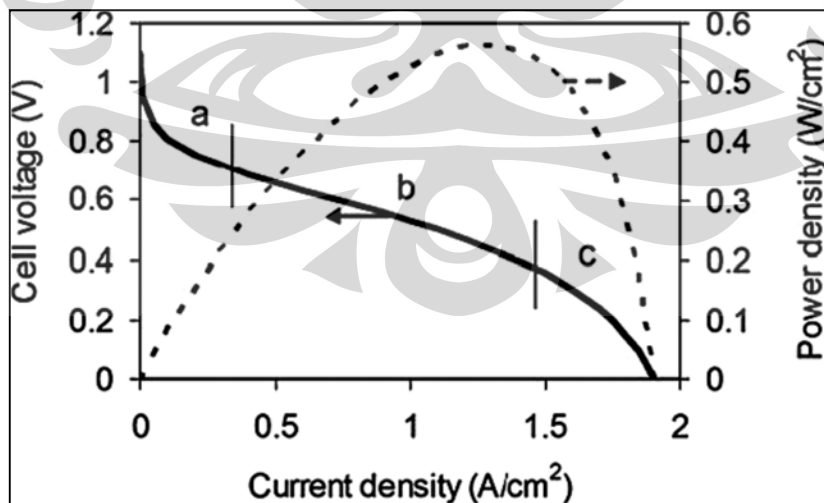
kedua besaran tersebut dapat ditentukan daya (P) optimum dari PEMFC yang dapat dihasilkan.

$$P = V \times I \quad (8)$$

Sama halnya dengan arus, daya juga perlu dinormalisasi dengan luas permukaan aktif katalis yang digunakan menjadi kepadatan daya (W/cm^2).

2.4.6.1 Kurva Polarisasi

Kurva antara potensial sel dengan kepadatan arus (*current density*) yang diukur pada kondisi operasi tertentu yang konstan dikenal sebagai kurva polarisasi. Kurva polarisasi merupakan teknik elektrokimia standard untuk mengkarakterisasi performa suatu PEMFC baik untuk setiap sel maupun *stacking*. Gambaran kurva polarisasi dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Kurva Polarisasi PEMFC²²

Universitas Indonesia

Dalam pengukuran elektrokimia, performa PEMFC diterangkan dalam kurva polarisasi. Penurunan performa PEMFC juga dapat dijelaskan dari kurva tersebut. Penurunan tersebut diakibatkan oleh beberapa fenomena diantaranya (a) aktivasi atau transfer muatan (b) hambatan ohmik (c) tranfer massa.²²

2.4.6.1.1 Penurunan Potensial akibat Aktivasi Polarisasi

Aktivasi polarisasi timbul pada kedua elektrode dan merupakan hasil penjumlahan dua kontribusi yang dapat dilihat pada keseluruhan kurva polarisasi dari sel. Jika kontribusi dari satu sel saja ingin diketahui, dibutuhkan elektroda pembanding untuk mengetahui potensialnya.

Kurva titik pada gambar 2.8. merupakan kepadatan daya yang dapat dijangkau oleh sistem fuel cell. Kurva tersebut sudah standar untuk setiap pengamatan elektrokimia di laboratorium, tetapi pembanding tidak digunakan pada pengukuran tersebut. Umumnya, fraksi utama yang berperan dalam penurunan polarisasi karena aktivasi (terutama pada sel bertemperatur rendah) adalah katoda/ elektroda oksigen.²² Hal tersebut terjadi karena proses reduksi oksigen terjadi sangat lambat dibanding proses oksidasi hidrogen.

Sebuah katalis selalu menaikkan proses tranfer muatan. Sebaiknya, agar performa PEMFC tidak terlalu rendah efisiensi katalis harus dihitung

berdasarkan kepadatan pertukaran arusnya (*exchange current density*). Dalam kesetimbangan pada potensial yang seimbang tidak ada arus yang terukur, tetapi dinamika kesetimbangan dua proses elektrokimia yang berlawanan terdapat secara simultan pada kecepatan yang seimbang (oksidasi hidrogen dan reduksi proton dalam pertukaran arus). Suatu elektroda yang baik memiliki kepadatan pertukaran arus yang tinggi. Arus dapat dinormalisasi terhadap luas permukaan aktif katalis menjadi kepadatan arus.

Luas permukaan katalis merupakan hal yang lebih mendasar, namun hal tersebut mudah diketahui. Biasanya, luas elektroda secara geometris yang digunakan secara normal. Kepadatan pertukaran arus bergantung pada beberapa faktor, seperti material katalis, kecocokan, luas permukaan area aktif dari katalis, morfologi elektroda dan kontaminasi pada permukaan katalis.²²

2.4.6.1.2. Penurunan Potensial akibat Hambatan Ohmik

Penurunan potensial (overpotensial) akibat aktivasi hanya terjadi sedikit dalam polarisasinya. Kontribusi utama yang menyebabkan overpotensial tersebut adalah hambatan ohmik yang secara normal diperoleh dari elektrolit dan linier dengan hambatan elektrolit. (satuan: volt/ampere = ohm).²²

Sama halnya dengan arus, hambatan ohmik juga dapat dinormalisasi terhadap luas permukaan katalis sebagai hambatan spesifik (bukan kepadatan hambatan). Untuk menjaga hambatan ohmik yang kecil dibutuhkan elektrolit yang tipis. Walaupun, harus juga mempertimbangkan antara hambatan pada satu bidang dengan stabilitas mekaniknya serta daya tahannya terhadap komponen yang lain. Hambatan ohmik (ΔE_r) dapat diturunkan dari persamaan (3) berikut.

$$\Delta E_r = I \cdot R = i \cdot r \quad (9)$$

dimana $R(\Omega)$ adalah hambatan total dan r adalah hambatan spesifik (Ω/cm^2).

2.4.6.1.3. Penurunan Potensial akibat Transfer massa

Penurunan potensial pada polarisasi fuel cell selanjutnya diakibatkan transfer massa. Dalam daerah tersebut potensial turun dengan cepat akibat transfer massa yang terbatas. Singkatnya, reaktan tidak dapat terakumulasi pada elektroda untuk bereaksi karena reaktan mengalir dengan cukup cepat. Dengan demikian katalis mengalami kekurangan reaktan. Kemudian, produk juga mirip seperti reaktan terakumulasi dan keduanya akan mengakibatkan reaksi balik melawan satu sama lain.²² Hasilnya, potensial akan menurun sebagai fungsi dari kepadatan arus. Pada kondisi yang ekstrim, potensial sel dapat turun drastis hingga nol dan sel dikatakan telah mengalami reaksi balik.

Pada kenyataannya, reaksi tidak akan berbalik sebelum potensial melewati $-1,23$ V yang dibutuhkan pada reaksi balik. Tipe alasan untuk sel yang bereaksi balik pada sel yang bertemperatur rendah adalah air yang dikondensasi dalam beberapa aliran gas dihambat transfer massanya. Batasan transfer massa bergantung pada morfologi elektroda (ketebalan, porositas, ukuran pori, hambatan terhadap banjir air, dan lain lain). Hal tersebut sulit dikembangkan dengan model umum seperti untuk transfer muatan dan hambatan ohmik.²²

2.4.6.2. Transfer Massa

Proses transfer terjadi ketika arus melewati *fuel cell*. Ion dan spesi netral yang terlibat dalam reaksi elektrokimia pada anoda atau katoda ditransfer pada permukaan masing-masing elektroda. Kinetika transfer muatan dikontrol oleh reaksi di elektroda dimana kecepatan proses transfer massanya sangat cepat dibandingkan dengan reaksi kimia lainnya.

Pada kasus yang lain, transfer massa mengontrol reaksi dimana kecepatan reaksi kimianya sangat cepat dibanding dengan proses transfer massanya. Terdapat beberapa jenis transfer massa yang memiliki peranan penting dalam dinamika elektrokimia, diantaranya:

1. Migrasi: perpindahan spesi bermuatan dibawah pengaruh penampang bermuatan listrik (gradien potensial listrik).

2. Difusi: perpindahan spesi kimia dibawah pengaruh gradien potensi kimiawi (misalnya konsentrasi).
3. Konveksi: transfer dengan pengadukan atau hidrodinamik

Umumnya, aliran suatu cairan terjadi karena perpindahan panas (konveksi) secara alami (disebabkan oleh gradien kepadatan) dan tenaga konveksi, dan dapat dikarakterisasi dengan aliran yang diam, laminar, dan turbulen.¹²

2.4.6.3. Efisiensi *Fuel Cell* secara Teoritis

Efisiensi PEMFC diterangkan sebagai jumlah energi listrik yang dapat dihasilkan dari sel yang berbahan bakar hidrogen. Untuk suatu *fuel cell*, keluaran energi yang bermanfaat adalah energi listrik yang diproduksi dan energi masukannya adalah entalpi dari hidrogen.¹² Jika mengasumsikan bahwa semua energi bebas Gibbs (ΔG) dapat dikonversi menjadi energi listrik, kemungkinan maksimum secara teoritis efisiensi PEMFC akan mencapai 83 % pada temperatur 25° C (*lower heating value-LHV*).

$$\eta = \frac{\Delta G_f^0}{\Delta H^0} = \frac{237,1 \text{ kJ/mol}}{286 \text{ kJ/mol}} = 83\% \quad (10)$$

Jika kedua besaran tersebut, ΔG dan ΔH dibagi dengan nF , maka efisiensi *fuel cell* secara teoritis dapat diterangkan sebagai rasio dua potensial.

$$\eta = \frac{\Delta G_f^0}{\Delta H^0} = \frac{\frac{-\Delta G_f^0}{nF}}{\frac{-\Delta H^0}{nF}} = \frac{1,23}{1,48} = 83\% (25^\circ C, 1 atm) \quad (11)$$

dimana 1,23 V merupakan potensial sel secara teoritis, dan 1,48 V merupakan potensial penyeimbang terhadap *higher heating value* (HHV) dari hidrogen atau potensial termonetral. Efisiensi secara teoritis terkadang juga diketahui sebagai efisiensi termodinamikanya atau efisiensi maksimum. Dengan demikian terlihat hubungan antara potensial sel awal (*open circuit voltage*) dengan efisiensi secara teoritis berdasarkan persamaan diatas.

Pada kenyataannya, PEMFC tidak dapat menampilkan performa dengan efisiensi maksimum tersebut. Hal tersebut terjadi karena PEMFC memiliki beberapa energi yang hilang dan tidak dapat dikonversi menjadi energi listrik dan akhirnya akan berdampak pada penurunan performanya. Efisiensi konversi energi untuk fuel cell, didefinisikan sebagai efisiensi nyata dari sel yang dapat diturunkan dari pembagian potensial sel yang dihasilkan dengan potensial termonetralnya.¹² Efisiensi fuel cell berdasarkan potensial tersebut dapat ditentukan dengan persamaan (6) dan (7).

$$\eta = \frac{V_{sel}}{1,48} \text{ (pada HHV)} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{V_{sel}}{1,23} \text{ (pada LHV)} \quad (13)$$

2.5. Logam Mulia sebagai Katalis dalam Elektroda

2.5.1. Platinum (Pt)

Platinum merupakan salah satu unsur kimia pada tabel periodik yang mempunyai simbol Pt dan nomor atom 78, memiliki konfigurasi $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^9 6s^1$. Titik lelehnya mencapai 1768,3 °C. Massa atom relatifnya adalah 195,09 g/mol. Struktur kristal mempunyai bentuk kubus bermuka pusat. Memiliki tingkat oksidasi yaitu +2, +3 dan +4.²³

Platinum murni berwarna putih-perak dan tahan terhadap korosi. Sifat katalitik dari platinum digunakan sebagai *catalytic converter*. *Catalytic converter* adalah alat yang berfungsi untuk mengurangi emisi dari suatu pembakaran di dalam mesin ketika pembakaran sempurna tidak terjadi. Adanya gas oksigen dan hidrogen yang dikatalisis oleh platinum akan menyebabkan ledakan.

Karakteristik dari bentuk platinum menyebabkannya menjadi perhiasan dengan harga yang sangat tinggi, bahkan harganya dua kali lipat dari emas. Sifat lain dari platinum adalah inert terhadap bahan kimia, mempunyai karakteristik yang baik pada temperatur tinggi dan mempunyai keadaan elektronik yang stabil. Platinum tidak teroksidasi di udara pada temperatur berapapun, tapi platinum dapat terkorosi oleh sianida, halogen dan sulfur. Logam ini tidak dapat larut dalam asam klorida dan asam nitrat

tetapi dapat larut dalam aqua regia. Platinum juga digunakan sebagai elektroda pada elektrolisis karena sifatnya yang inert dan dapat menghantar listrik.²³

2.5.2. Ruthenium

Ruthenium merupakan salah satu unsur kimia pada tabel periodik yang mempunyai simbol Ru dan nomor atom 44, memiliki konfigurasi $[\text{Kr}] 4d^7 5s^1$. Titik lelehnya mencapai $2334\text{ }^\circ\text{C}$. Massa atom relatifnya adalah $101,07\text{ g/mol}$. Struktur kristal mempunyai bentuk heksagonal. Memiliki tingkat oksidasi yaitu +2, +3, +4, +6 dan +8.²⁴

Ruthenium adalah logam polivalen yang berwarna putih dan dalam susunan berkala terdapat dalam kelompok Platinum, mempunyai empat bentuk kristal modifikasi dan tidak teroksidasi pada temperatur normal. Ruthenium larut dalam alkali jenuh, tidak bereaksi dengan asam tapi dapat bereaksi dengan halogen pada temperatur tinggi dan dapat bereaksi dengan hidroksida. Sedikit ruthenium dapat menambah kekerasan dari platinum dan palladium. Sifat tahan korosi dari titanium dapat bertambah dengan sedikit penambahan ruthenium. Penambahan 0,1 % ruthenium pada titanium dapat membuat titanium menjadi tahan korosi seratus kali lipat dari semula.

Ruthenium merupakan katalis yang serbaguna. Hidrogen sulfida dapat dipisahkan dengan menyalakan suspensi partikel CdS yang mengandung

ruthenium dioksida. Pemisahan hidrogen sulfida umumnya diperlukan oleh industri kilang minyak.²⁴

2.5.2. Kobalt

Kobalt merupakan salah satu logam transisi yang memiliki nomor atom 27, memiliki konfigurasi $[\text{Ar}] 3d^7 4s^2$. Titik lelehnya mencapai $1495\text{ }^\circ\text{C}$. Massa atom relatifnya adalah $58,933\text{ g/mol}$. Struktur kristal mempunyai bentuk heksagonal. Memiliki dua tingkat oksidasi yaitu +2 dan +3. Kobalt adalah logam berwarna abu-abu seperti baja dan bersifat sedikit magnetis.²⁵

Kobalt banyak digunakan sebagai campuran logam (*alloy*) karena sifatnya yang tahan korosi. Industri-industri kimia dan minyak menggunakan kobalt sebagai katalis. Kobalt juga dapat digunakan sebagai pelapis alat-alat elektronik karena sifat kekerasannya dan tahan terhadap oksidasi. Selain itu kobalt juga sering digunakan sebagai elektroda dalam baterai. Salah satu isotop kobalt, yaitu Co-60 merupakan sumber radiasi gamma. Isotop ini sering digunakan dalam dunia kedokteran dan sterilisasi untuk makanan.

2.5.4. Nikel

Nikel merupakan salah satu logam transisi yang memiliki nomor atom 28, dengan konfigurasi $[\text{Ar}] 3d^8 4s^2$. Titik lelehnya mencapai $1455\text{ }^\circ\text{C}$. Massa

atom relatifnya adalah 58,69 g/mol. Struktur kristal mempunyai bentuk heksagonal. Tingkat oksidasi yang umum dari nikel adalah +2, walaupun 0, +1 dan +3 pernah ditemukan. Nikel berwarna putih keperakan ketika di-*polish*, termasuk logam keras dan dapat ditempa. Karena sifat nikel yang tahan oksidasi terhadap udara, maka biasanya nikel digunakan untuk melapisi besi ataupun kuningan, peralatan kimia dan sebagai campuran logam. Nikel merupakan salah satu dari lima unsur ferromagnetik.²⁶

Nikel banyak digunakan dalam industri baja karena sifatnya yang tahan oksidasi. Nikel juga digunakan dalam pembuatan kabel dan peralatan kimia. Baterai yang dapat diisi ulang umumnya mengandung nikel kadmium. Selain itu nikel juga digunakan sebagai katalis untuk hidrogenasi. Nikel menyerap sejumlah hidrogen jika dipisahkan secara halus dan bentuk khusus Ni, sebagai contoh *Raney nickel* digunakan sebagai reduksi katalitik.²⁶

BAB III

ALAT, BAHAN, DAN CARA KERJA

3.1. Alat dan Bahan

3.1.1. Peralatan

Pada penelitian ini telah digunakan beberapa peralatan dalam preparasi elektroda dengan beberapa katalis bimetal, pengukuran, dan pengolahan data. Dalam preparasi elektroda telah digunakan beberapa peralatan, diantaranya; sarung tangan, penjepit, pot sampel untuk tempat katalis, kertas tebal untuk pola, penggaris, gunting, *cutter*, pena/pensil, solatip, *tissue*, aluminium foil, kantong plastik kedap udara untuk tempat sampel dan elektroda hasil *coating*, kertas label, plastik mika, gelas ukur 10 mL, gelas beker 50 mL, spatula, pipet tetes, pipet ukur 5 mL, penghisap (bulb), timbangan (neraca analitik), *ultrasonic blending* (sonikator) untuk menghomogenisasi cairan tinta katalis, *doctor blade* yang diberi plastik mika untuk *coating* katalis, *Hot Plate* yang dioperasikan pada temperatur $\leq 80^{\circ}\text{C}$ untuk dasar papan *coating* dan *Hot Press* yang diatur pada temperatur 120°C dan tekanan 65 bar dan digunakan untuk membuat *membrane electrode assembly* (MEA).

Peralatan yang digunakan untuk pengukuran *single stack proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC) terbagi atas peralatan dalam penyusunan, pengujian, dan pengukuran kinerja. Dalam penyusunan *single stack* PEMFC digunakan beberapa komponen penyusun *single stack* PEMFC, diantaranya; *stacking fuel cell*, *current collector* yang terbuat dari lempengan tembaga sebagai konduktor untuk mengumpulkan arus, *graphite bipolar plate* 25 cm² yang memiliki parit-parit kecil sebagai tempat aliran gas sebagai bahan bakar dari PEMFC, beberapa gasket fiber dan gasket silikon sebagai pembatas antar komponen, dan kertas karbon untuk konduktor antara *bipolar plate* dengan *current collector*.

Dalam pengujian dan pengukuran kinerja dan transfer massa gas hidrogen pada *single stack* PEMFC telah dibuat sistem pengujian dan pengukurannya yang terdiri dari beberapa peralatan. Beberapa komponen yang digunakan untuk sistem tersebut diantaranya; *bar gauge* yang digunakan membaca tekanan sistem *inlet* dan *outlet* yang dilengkapi dengan katup sebagai regulator tekanan dan kecepatan alir gas (*flow rate*), *flowmeter* yang digunakan untuk membaca *flow rate* gas yang masuk dan keluar ke dan dari *single stack* PEMFC, erlenmeyer yang digunakan untuk membuat alat *humidifier* gas reaktan yang akan masuk ke *single stack* PEMFC, humidifier ini dilengkapi dengan pemanas air sebagai alat untuk menaikkan suhu gas reaktan dan termometer.

Dalam pengukuran kinerja *single stack* PEMFC, besaran fisika (beda potensial, arus, dan daya) diukur dengan *Electronic Discharge Meter*, 3300 C Electronic Load Mainframe[®]Prodigit 3311D 60V/ 60A, 300V. Dalam pengukuran ini juga digunakan *termocouple* untuk mengukur temperatur sel *single stack* PEMFC. Besaran fisika dari *single stack* PEMFC juga ditentukan dengan multimeter *portable*. Data yang diperoleh diolah dengan satu unit komputer dengan *operating system*[®]Windows 7 dan piranti[®]Microsoft Excel.

3.1.2. Bahan

Bahan padatan yang digunakan pada penelitian ini adalah katalis Pt 40 %, katalis Pt-Ru (1:1) 60 %, katalis Pt-Ni (1:1) 10 % dan katalis Pt-Co (1:1) 10 % yang merupakan katalis dalam karbon Vulcan XC 72 dan secara komersil telah dibeli dari E-TEK Inc. Larutan yang digunakan adalah larutan asam sulfat pekat p.a., isopropanol p.a., hidrogen peroksida p.a. dan metanol p.a. yang dibeli dari Merck serta larutan Nafion dari Electrochem Inc. Pengenceran pada pembuatan larutan digunakan akuades. Pada pembuatan MEA digunakan kertas karbon *treatment* dengan teflon (*micro porous layer-MPL supported*) yang dibeli dari Toray sebagai elektroda dan membran[®]Nafion 117 yang dibeli dari DuPont sebagai polimer elektrolit. Bahan gas yang digunakan untuk pengujian dan pengukuran kinerja *single stack* PEMFC

adalah gas inert (nitrogen), gas hidrogen (*ultra high purity*), dan gas oksigen (*ultra high purity*).

3.2. Cara Kerja

3.2.1. Preparasi Larutan

3.2.1.1. Larutan Nafion

Larutan Nafion komersil dipersiapkan sebanyak 5 % (berat) karbon yang terkandung dalam katalis.

3.2.1.2. Larutan Isopropanol:air (3:1)

Larutan isopropanol diperoleh secara komersil dari Merck, dan dipreparasi sesuai kebutuhan dalam pengenceran tinta katalis.

3.2.2. Pelapisan (*Coating*) Kertas Karbon *MPL Supported* dengan Katalis Pt/C 40%, Pt- Ru/C 60 %, Pt-Co/C 10 %, dan Pt-Ni/C 10%.

3.2.2.1. Preparasi Tinta katalis

Katalis Pt alloy yang digunakan untuk *membrane electrode assembly* (MEA) pada *single stack* PEMFC adalah sebanyak 0.5 mg/cm². Dengan perbandingan tersebut, sejumlah bubuk katalis dalam karbon dicampur

dengan larutan nafion sebanyak 5 % (berat) dari karbon yang terkandung dalam bubuk katalis.²¹ Pencampuran dilakukan dengan penetes larutan nafion secara perlahan. Pada pencampuran tersebut diusahakan semua permukaan katalis segera tertutup dengan larutan nafion agar katalis tidak terbakar. Campuran diaduk sehingga terbentuk tinta katalis yang homogen. Larutan isopropanol:air (3:1)²¹ juga ditambahkan untuk pengenceran. Untuk memastikan katalis dan karbon benar-benar terdispersi dalam larutan nafion, campuran tersebut dihomogenisasi dengan sonikator. Proses ini dilakukan selama 15 menit dan saat campuran terlihat kering ditambahkan isopropanol:air secukupnya.

3.2.2.2. Pelapisan Kertas Karbon dengan Katalis (*Coating Electrode*)

Pelapisan (*coating*) kertas karbon dilakukan dengan menggunakan *doctor blade* diatas *hot plate* dengan temperatur $\leq 80^{\circ}$ C. *Coating* katalis dengan *doctor blade* diharapkan ketebalannya bisa rata dan dengan ketebalan 10- 100 μm . Sarung tangan digunakan saat *coating* untuk menjaga kebersihan. Kertas karbon *treatment MPL* dengan ukuran 25 cm^2 disiapkan diatas *hot plate*, kemudian tinta katalis dituang dengan spatula secara perlahan. Setiap penuangan, dilakukan pemerataan tinta katalis pada kertas karbon dengan *doctor blade*. Setelah pemerataan, dibiarkan beberapa menit agar tinta katalis kering diatas kertas karbon. Setelah kering, dilakukan

penuangan kembali hingga tinta katalis habis untuk setiap elektrodanya. Kertas karbon yang telah *dicoating* dibungkus dengan aluminium foil dan diletakkan dalam kantong kedap udara serta disimpan di dalam desikator. Kombinasi katalis yang digunakan seperti terlihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Kombinasi variasi katalis

Katoda	Anoda
Pt/C 40 %	Pt/C 40 %
Pt/C 40 %	Pt-Ru/C 60 %
Pt/C 40 %	Pt-Ni/C 10 %
Pt/C 40 %	Pt-Co/C 10 %
Pt-Ru/C 60 %	Pt/C 40 %
Pt-Ni/C 10 %	Pt/C 40 %
Pt-Co/C 10 %	Pt/C 40 %

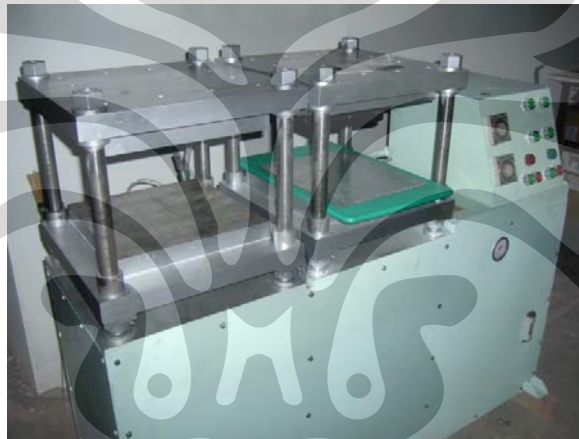
3.2.3. Preparasi *Single Stack* PEMFC

3.2.3.1. *Treatment* untuk mengaktifasi Membran Nafion

Untuk mengaktifasinya, membran nafion direndam dalam larutan peroksida (H_2O_2) 3 % selama 1 jam dengan pemanasan pada temperatur 80°C . Kemudian membran nafion dibilas dalam air untuk melarutkan larutan H_2O_2 yang masih tersisa pada membran. Selanjutnya membran nafion

direndam kembali pada larutan asam sulfat (H_2SO_4) 1 M selama 1 jam dengan pemanasan pada temperatur 60°C . Setelah perendaman selesai, membran dibilas kembali dengan air dan langsung direndam dalam air sampai membran tersebut akan digunakan dalam proses pembuatan *membrane electrode assembly* (MEA). Membran yang telah diaktifasi dibungkus dengan menggunakan aluminium foil.

3.2.3.2. Pembuatan *Membrane Electrode Assembly* (MEA)



Gambar 3.1. Alat Hot Press (buatan lokal, PTM BPPT)

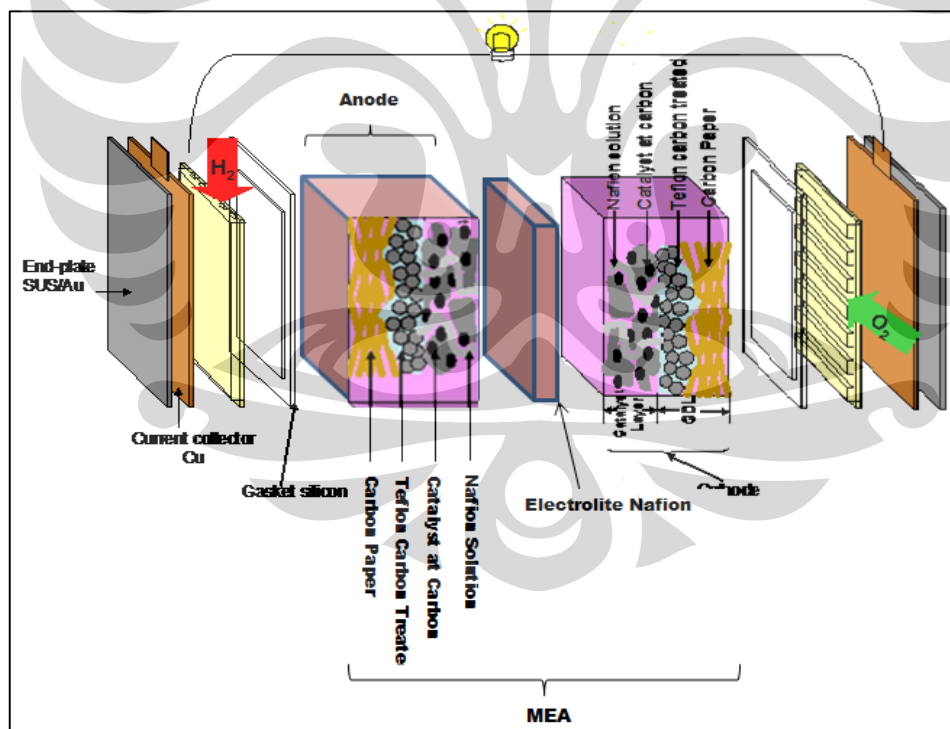
MEA dibuat dengan teknik *pressing* dengan menggunakan alat Hot Press seperti pada Gambar 3.1. Dalam pembuatan MEA, membran elektrolit nafion diapit dengan dua elektroda yang berperan sebagai katoda dan anoda dengan variasi katalis tertentu. Ketiga komponen tersebut disusun diatas plastik mika dan ditutup dengan plastik mika pula. Sebelumnya plastik mika dibersihkan dengan menggunakan metanol. Alat *Hot Press* dinyalakan dan

Universitas Indonesia

dibiarkan hingga pemanas mencapai temperatur 120° C. Tekanan *Hot Press* diatur pada 65 Bar. Setelah temperatur yang diinginkan tercapai, ketiga komponen tersebut ditekan dengan alat *hot press* selama 1 menit sehingga menjadi suatu lapisan tipis.

3.2.3.3. Penyusunan (*Stacking*) *Single Stack* PEMFC

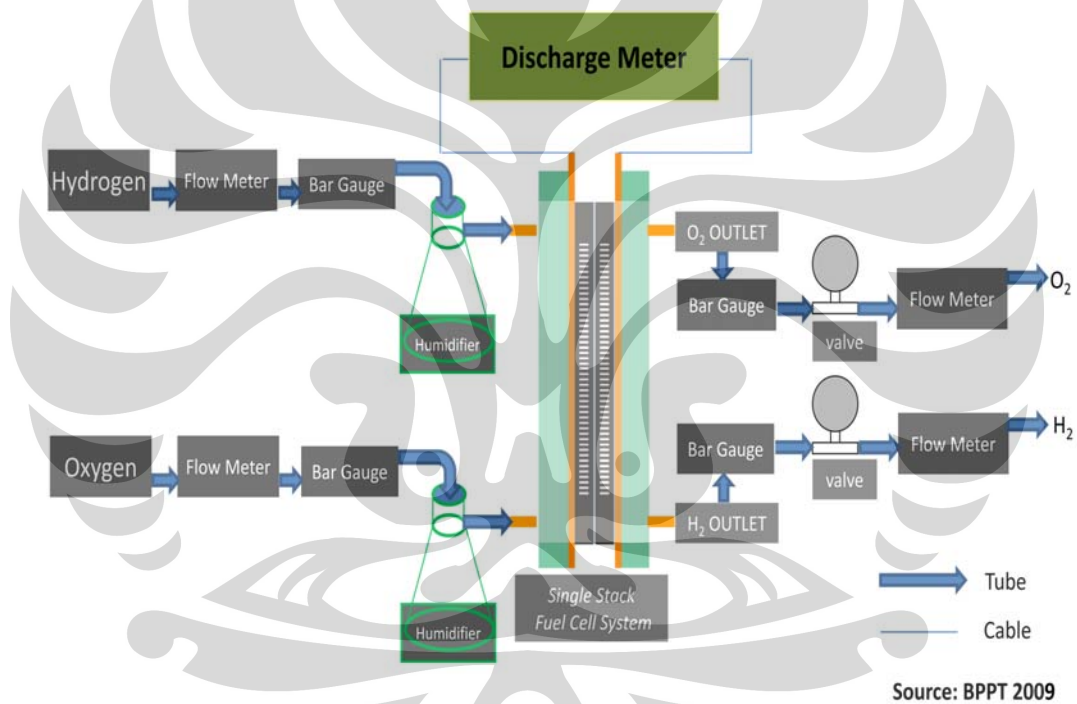
MEA yang diperoleh di lapiasi dengan lapisan silikon sebagai gasket dan dijepit dengan *graphite bipolar plate*, *current collector* dan *single stack* PEMFC sesuai Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Skema *stacking* PEMFC⁶

3.2.4. Pengujian MEA dengan Katalis Pt/C 40%, Pt-Ru/C 60 %, Pt-Co/C 10 % dan Pt-Ni/C 10% dalam *Single Stack* PEMFC.

Single stack PEMFC yang telah dibuat dipasang pada sistem pengujian dan pengukuran yang sebelumnya telah dibuat. Skema pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 3.3. dan sistemnya dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.3. Skema pengujian dan pengukuran *single stack* PEMFC

3.2.4.1. Uji Kebocoran (*Leak-Cross Leak Test*)

Sebelum gas hidrogen dan oksigen dialirkan, *single stack* PEMFC harus diuji kebocoran terlebih dahulu. Uji kebocoran ini terdiri dari uji



Gambar 3.4. Sistem pengujian dan pengukuran *single stack* PEMFC

kebocoran antar kompartemen dan uji kebocoran samping. Untuk pengujian antar kompartemen, gas nitrogen dialirkan pada katup *inlet* hidrogen kemudian katup *inlet* oksigen dan *outlet* hidrogen ditutup, dan uji katup *outlet* oksigen dengan menggunakan busa (*bubbles*). Atau sebaliknya antara hidrogen dan oksigen. Selanjutnya untuk uji kebocoran samping, gas nitrogen

dialirkan pada salah satu katup *inlet* (hidrogen atau oksigen) kemudian semua katup lainnya ditutup. Busa diberikan pada samping sel *single stack* PEMFC sehingga apabila terjadi kebocoran akan terbentuk gelembung.

3.2.4.2. Pengkondisian Kelembaban Membran (*Conditioning*)

Gas hidrogen dan oksigen dialirkan melalui *humidifier* yang diatur pada temperatur $\pm 50^\circ \text{C}$ sebanyak 50 mL/menit selama 3 jam. Kemudian dilakukan *purging* dengan gas nitrogen untuk mendorong kotoran dan *flooding* air yang berlebih pada *gas diffusion layer* (GDL) dalam sistem *single cell* PEMFC.

3.2.5. Pengukuran Kinerja dan Transfer Massa Gas Hidrogen pada *Single Stack* PEMFC

Pengujian dilakukan sesuai dengan variasi katalis yang digunakan pada pembuatan elektroda yang telah dilakukan. Dari pengujian tersebut diperoleh data yang diukur dengan *Electronic Discharge Meter*, 3300 C Electronic Load Mainframe[®] Prodigit 3311D 60V/ 60A, 300V yang dapat dilihat pada Gambar 3.5. Data-data tersebut diantaranya; beda potensial (volt), kuat arus (ampere), dan daya (watt) yang dapat diplot pada suatu grafik polarisasi. Transfer massa gas hidrogen yang masuk (*inlet*) dan yang

keluar (*outlet*) dari sistem *single stack* PEMFC diukur dengan melakukan pembacaan kecepatan alir pada *flow meter* dan tekanan pada *bar gauge* gas *inlet* dan *outlet*.



Gambar 3.5. *Electronic Discharge Meter 3300 C Electronic Load Mainframe*

®Prodigit 3311D 60V/ 60A, 300V

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, pengaruh katalis bimetal pada katoda dan anoda *proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC) diamati pada sistem satu sel fuel cell. Hal tersebut mengakibatkan dalam pengukurannya banyak sekali hal-hal yang dapat menjadi gangguan (*noise*). Untuk mengurangi *noise* tersebut, telah disusun metode pengukuran dengan variabel-variabel yang hanya akan memberikan pengaruh katalis terhadap performa *single stack* PEMFC yang diukur. Pengaruh katalis terhadap performa *single stack* PEMFC yang diamati diperoleh dengan beberapa proses penelitian yang akan dibahas dalam uraian berikut.

4.1. Preparasi Elektroda

4.1.1. Preparasi Tinta Katalis

Katalis pada *fuel cell* memiliki peranan penting dalam mempercepat reaksi redoks yang terjadi dan menentukan performanya. Katalis yang digunakan merupakan katalis heterogen yang berbeda fasa dengan reaktan dalam reaksi. Katalis dalam PEMFC digunakan dalam fasa padat sedangkan reaktannya dalam fasa gas. Untuk menghasilkan katalis yang memiliki

aktivitas yang tinggi, beberapa hal yang harus diperhatikan dalam memilih material untuk katalis adalah sebagai berikut:

1. Konduktifitasnya tinggi
2. Dapat berinteraksi dengan ionomer
3. Memiliki akses kontak dengan reaktan yang luas
4. Stabil saat kontak dengan reaktan, produk, dan elektrolit
5. Reaktifitas terhadap masing-masing gas tinggi
6. Kecepatan reaksi tinggi
7. Potensial reduksi (E^0) lebih positif untuk katalis katoda dan lebih negatif untuk katalis anoda sehingga menghasilkan ΔE yang besar

Untuk memastikan bahwa PEMFC dapat menghasilkan efisiensi yang maksimum, elektroda tempat reaksi terjadi membutuhkan suatu potensial termodinamika yang memungkinkan. Beberapa penelitian, telah ditemukan bahwa platinum dan katalis yang mengandung platinum merupakan material katalis yang paling efektif baik aktifitas maupun stabilitasnya.¹² Telah banyak studi yang mempelajari bagaimana menggunakan platinum agar lebih efektif. Untuk menghasilkan sisi aktif katalis yang maksimum pada fase aktifnya, dibutuhkan dispersi material katalis pada material pendukung yang inert.

Tabel 4.1. Ukuran Partikel Katalis (E-TEK)²⁷

Katalis	Ukuran Partikel (nm)
Pt/C 20%	2,2
Pt/C 40%	2,9
Pt-Ru/C 60 %	2 – 3
Pt-Ni/C 10%	3 – 4
Pt-Co/C 10%	3 – 4

Pada kasus PEMFC yang beroperasi pada temperatur rendah, material pendukung juga membutuhkan karakteristik yang telah dijelaskan diatas. Kebutuhan karakteristik tersebut secara keseluruhan dipenuhi oleh serbuk karbon aktif yang dapat mendukung fase aktif pada material katalis (umumnya Pt).

Pada Tabel 4.1. menunjukkan ukuran partikel untuk setiap katalis yang digunakan pada penelitian ini yang diperoleh dari ETEK Inc. Semakin kecilnya ukuran partikel katalis akan memperbesar luas permukaannya. Katalis Pt-Ru/C memiliki ukuran partikel yang paling kecil yaitu 2 – 3 nm sehingga memiliki luas permukaan yang paling besar. Pt-Co/C dan Pt-Ni/C memiliki ukuran partikel yang paling besar yaitu 3 – 4 nm, sehingga memiliki luas permukaan paling kecil dibandingkan dengan katalis yang lainnya.

Katalis Bimetal yang digunakan untuk *membrane electrode assembly* (MEA) pada *single stack* PEMFC adalah sebanyak 0.5 mg/cm². Dengan

perbandingan tersebut, sejumlah bubuk katalis dalam karbon dicampur dengan larutan nafion sebanyak 5 % (berat) dari karbon yang terkandung dalam bubuk katalis.¹² Penambahan larutan nafion bertujuan untuk merekatkan katalis pada membran dan menambah konduktivitas lapisan katalis karena nafion memiliki gugus sulfat yang dapat menjadi media dalam proses *ion exchange*. Penambahan tersebut dilakukan secara perlahan dan diusahakan segera mungkin semua permukaan katalis tertutup dengan larutan nafion. Hal tersebut bertujuan agar serbuk katalis tidak terbakar. Campuran diaduk sehingga terbentuk tinta katalis yang homogen.

Larutan isopropanol:air (3:1)¹² juga ditambahkan untuk pengenceran. Isopropanol merupakan pelarut organik yang sedikit bersifat polar sehingga baik untuk menjembatani interaksi solvasi antara karbon dan nafion. Penambahan air pada pelarut isopropanol bertujuan agar katalis tidak terdispersi pada lapisan *micro porous layer* (MPL) yang mengandung teflon. Hal tersebut terjadi karena teflon pada MPL akan membentuk lapisan yang bersifat hidrofobik. Untuk memastikan katalis dan karbon benar-benar terdispersi dalam larutan nafion, campuran tersebut dihomogenisasi dengan sonikator.

4.1.2. Pelapisan (*Coating*) Kertas Karbon MPL *Supported* dengan Katalis

Pada prinsipnya pelapisan (*coating*) tinta katalis pada kertas karbon adalah distribusi katalis pada permukaan kertas karbon sebagai elektroda secara merata. Banyak teknik selain *coating* untuk keperluan tersebut, diantaranya metode *brushing*, *sputtering* dan *spraying*. Teknik *coating* dinilai merupakan teknik yang paling mudah dan murah. Pada penelitian ini, teknik *coating* dilakukan dengan proses pemanasan hingga temperatur 80° C. Pemanasan tersebut bertujuan untuk mempercepat penguapan pelarut pada tinta katalis yaitu isopropanol:air. Pemanasan tidak diperkenankan melebihi temperatur 80° C karena pada temperatur diatas temperatur tersebut gugus organik dari nafion akan rusak.

Tantangan dalam pengembangan PEMFC adalah penelitian tentang lapisan katalis karena lapisan tersebut kompleks dan heterogen. Lapisan katalis membutuhkan desain yang dapat memberikan reaksi dengan kecepatan tinggi dan mengurangi jumlah katalis yang dibutuhkan untuk dapat menghasilkan daya yang optimum. Untuk mencapai hal-hal tersebut, terdapat beberapa persyaratan suatu lapisan katalis pada PEMFC: (1) memiliki tiga interfase yang luas, (2) efisien dalam mentransfer proton dan elektron, (3) mudah mentransfer gas reaktan dan produk serta mudah dalam pembuangan air, (4) dapat mendistribusikan arus listrik dari tempat reaksi ke pengumpul arus (*current collector*) secara berkelanjutan.¹²

4.2. Preparasi *Single Stack* PEMFC

4.2.1. *Treatment* untuk mengaktifasi Membran Nafion

Sebelum membran nafion digunakan dalam pembuatan *membrane electrode assembly* (MEA), terlebih dahulu membran harus di *treatment* untuk mengaktifasi kembali gugus-gugus *ion exchange* pada nafion. Hal tersebut dilakukan karena membran nafion terutama gugus-gugus ion exchange di dalamnya dapat mengalami kejenuhan karena adanya sinar ultraviolet.

4.2.2. Pembuatan *Membrane Electrode Assembly*

Membran nafion yang telah diaktifasi, diapit dengan dua kertas karbon yang telah dilapisi oleh katalis sebagai anoda dan katoda. Permukaan kertas karbon yang mengandung katalis kontak secara langsung dengan membran. *Membrane electrode assembly* (MEA) dibuat dengan menekan ketiga komponen tersebut dengan menggunakan alat *hot press*. Prinsipnya, proses ini dilakukan dengan memanaskan membran sehingga membran memuai dan kemudian kertas karbon ditekan pada membran sehingga kertas karbon sebagai elektoda menempel pada membran (elektrolit). Pemanasan dan penekanan ini perlu dilakukan dengan hati-hati karena membran mudah rusak dan bocor. Jika hal tersebut terjadi, akan berakibat fatal terhadap

sistem PEMFC yaitu antara kompartemen hidrogen dan oksigen akan terbuka dan mengakibatkan kontak kedua gas tersebut dan terjadi reaksi eksotermis.

4.2.3. Penyusunan (*Stacking*) *Single Stack* PEMFC

Membrane electrode assembly (MEA) yang telah dibuat, dipasang pada *stacking single stack* PEMFC. Penyusunan ini harus dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari adanya kebocoran, baik kebocoran antar kompartemen atau kebocoran samping. *Stacking single stack* PEMFC dilakukan dengan menyusun komponen-komponen pembentuk PEMFC menjadi suatu sistem sel bahan bakar (*fuel cell*). Sebagai kumpulan elektroda dan elektrolit, MEA diletakkan ditengah sistem kemudian diapit dengan *graphite bipolar plate* yang diikuti dengan lempengan tembaga sebagai *current collector*.

Graphite bipolar plate merupakan komponen PEMFC yang berfungsi untuk mengalirkan gas reaktan ke seluruh sisi aktif elektroda dan mengalirkan elektron ke *current collector*. Reaksi elektrokimia pada PEMFC yang melibatkan transfer elektron mengharuskan *bipolar plate* yang digunakan harus dapat menghantarkan elektron secara efektif (bersifat konduktor). Pada penelitian ini digunakan *bipolar plate* yang terbuat dari grafit yang diperoleh secara komersial dari @fuelcellstore, USA. Grafit merupakan bahan yang

memiliki tingkat konduktifitas yang cukup tinggi sehingga efektif untuk bahan pembuatan *bipolar plate*.

Dalam pemasangan setiap komponen, antar komponen telah dibatasi dengan silikon dan fiber gasket. Pembatasan ini bertujuan untuk menghindari kebocoran dan kontak langsung antara dua elektroda. Semua komponen yang telah disusun dijepit dengan *stacking single stack* PEMFC dan dikencangkan mur serta bautnya. Pengencangan tersebut dilakukan secara bersilang sehingga tidak akan merubah letak dari komponen-komponen yang telah disusun.

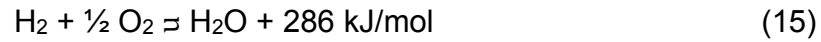
4.3. Uji Kebocoran (*leak-cross leak test*) pada Sistem *Single Stack* PEMFC

Uji kebocoran pada *stacking single stack* PEMFC penting dilakukan terutama kebocoran antar kompartemen antara kompartemen gas Hidrogen dan Oksigen. Kebocoran antar kompartemen dapat menimbulkan reaksi eksotermis antara H₂ dan O₂. Untuk fuel cell yang berbahan bakar hidrogen, reaksi redoks keseluruhan yang terjadi sama dengan reaksi pembakarannya yang merupakan reaksi eksotermis.



Panas atau entalpi reaksi kimia berbeda antara entalpi pembentukan produk dan reaktan. Entalpi pembentukan air adalah – 286 kJ/mol pada temperatur

25° C tanda negatif berarti bahwa reaksi berlangsung secara eksoterm, dan reaksi dapat ditulis sebagai:



Persamaan reaksi tersebut berlaku hanya pada temperatur 25° C yang berarti kedua gas reaktan dan air produk memiliki temperatur tersebut.

Entalpi reaksi pembakaran hidrogen (286 kJ/mol) disebut juga *hydrogen's higher heating value* (HHV) yang berarti bahwa 1 mol hidrogen telah tepat terbakar sempurna dengan 1 mol oksigen dan telah didinginkan sampai temperatur 25° C. jika hidrogen dibakar dengan oksigen yang berlebih nilai entalpinya akan menjadi 242 kJ/mol yang dikenal sebagai *hydrogen's lower heating value* (LHV).¹²

Apabila reaksi tersebut terjadi, reaksi redoks antara kedua gas tersebut tidak akan terjadi dan PEMFC tidak akan menghasilkan arus listrik. Semua reaksi elektrokimia melibatkan transfer muatan (elektron) antara suatu elektroda dengan spesi kimia yang terlibat dalam reaksi. Hal tersebut berbeda dengan reaksi kimia, yang mana pada reaksi kimia, transfer muatan (elektron) terjadi secara langsung diantara spesi-spesi kimia yang terlibat dalam reaksi tanpa membebaskan elektron bebas.²⁸

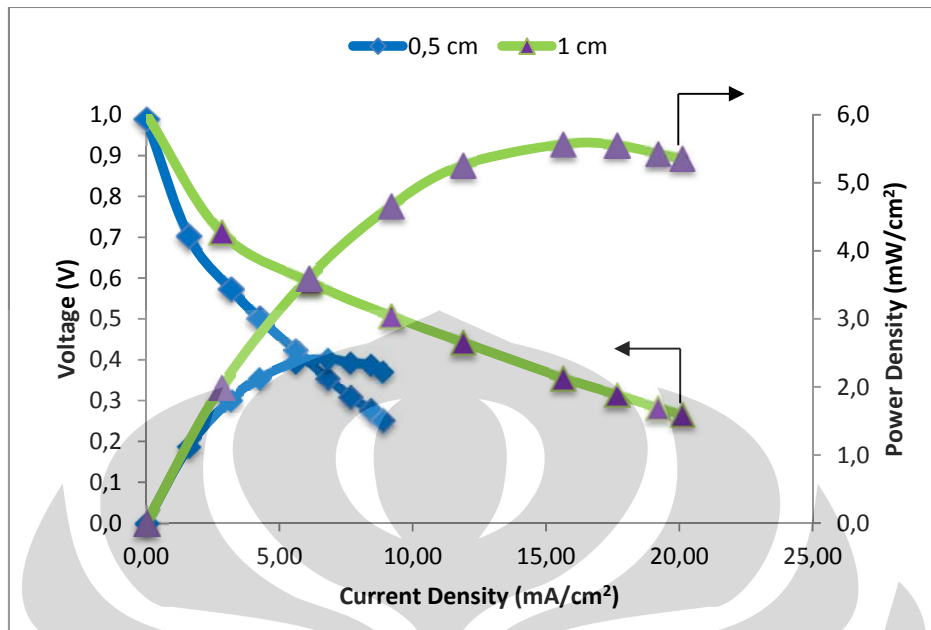
4.4. Kondisi Sistem Operasi Pengukuran *Single Stack* PEMFC

4.4.1. Pengaruh Kondisi Sistem Operasi terhadap Performa *Single Stack* PEMFC

4.4.1.1. Pengaruh Ukuran Kabel dalam Sistem Operasi Pengukuran terhadap Performa *Single Stack* PEMFC

Pengujian serta pengukuran performa dan efisiensi *single stack* PEMFC memiliki banyak hal yang berkontribusi membuat kesalahan atau gangguan. Dalam penelitian ini, akan dipelajari pengaruh diameter atau luas penampang kabel sistem operasi *single stack* PEMFC terhadap performanya. Pengaruh diameter atau luas penampang kabel sistem operasi pengukuran *single stack* PEMFC terhadap performanya terlihat pada kurva polarisasi yang terdapat pada Gambar 4.1.

Single stack PEMFC dengan menggunakan kabel berdiameter besar (0,5 cm) pada sistem operasinya memiliki performa yang lebih baik dibanding dengan menggunakan kabel berdiameter kecil (0,2 cm). Dengan menggunakan kabel besar, *power density* (kepadatan daya) *single stack* PEMFC mencapai 5.62 mW/cm^2 , jauh lebih besar dibanding dengan menggunakan kabel kecil yang hanya mencapai 2.40 mW/cm^2 .



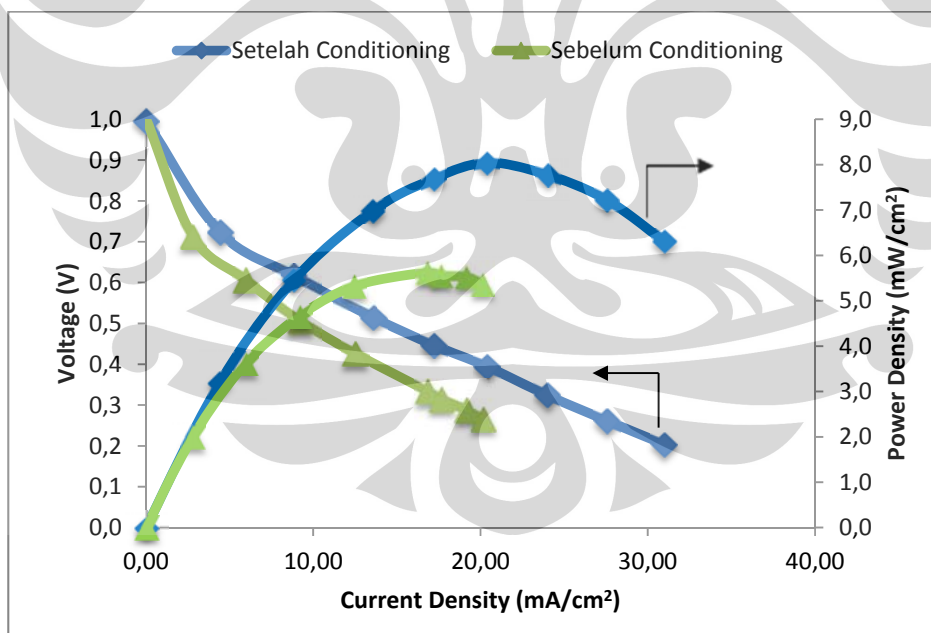
Gambar 4.1. Kurva polarisasi pengaruh diameter kabel ($\Delta = 1\text{ cm}$, $\square = 0,5\text{ cm}$) sistem operasi PEMFC

Dengan demikian ukuran diameter dari kabel yang digunakan dalam sistem operasi *single stack* PEMFC akan mempengaruhi performanya. Sistem operasi dengan kabel berukuran besar akan memberikan arus dan daya yang lebih besar dibandingkan dengan yang menggunakan kabel berukuran kecil. Secara teoritis, hambatan suatu kabel berbanding terbalik dengan luas penampang kabel atau dengan diameter kabel. Dengan demikian, kabel yang berukuran kecil akan memiliki hambatan yang relatif lebih besar dibanding dengan kabel berukuran besar. Hambatan tersebut telah mereduksi arus dan daya dari *single stack* PEMFC sehingga performanya berkurang.

4.4.1.2. Pengaruh *Conditioning* terhadap Performa *Single Stack* PEMFC

Pengaturan keseimbangan air merupakan suatu hal yang penting pada sistem kontrol PEMFC. Dinamika keseimbangan dan pengaturan menjadi satu tantangan besar secara teknik dalam mendesain dan mengoperasikan PEMFC karena berpengaruh langsung terhadap performa dan waktu hidup sistem PEMFC.

Conditioning dapat mempengaruhi performa *single stack* PEMFC. *Conditioning* telah membuat performa *single stack* PEMFC menjadi lebih baik. Pengaruh *conditioning* terhadap performa PEMFC dapat diterangkan dengan kurva polarisasi pada Gambar 4.2.

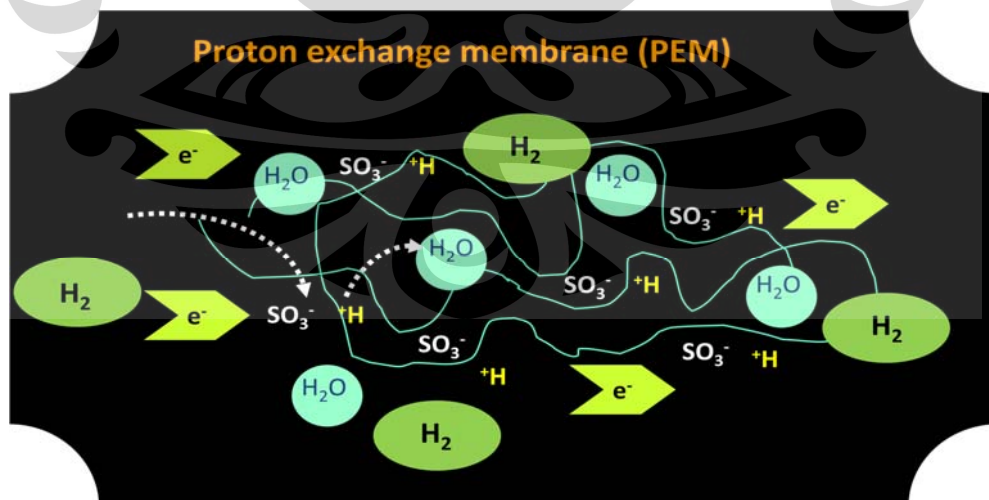


Gambar 4.2. Kurva polarisasi pengaruh *conditioning* (\diamond = sebelum *conditioning*, Δ = setelah *conditioning*) terhadap performa PEMFC

Universitas Indonesia

Single stack PEMFC yang telah melalui proses *conditioning* dapat menghasilkan power density hingga mencapai 8.04 mW/cm^2 sedangkan sebelum *conditioning* performanya hanya mencapai 5.62 mW/cm^2 . Hal tersebut terjadi karena adanya perbedaan kelembaban pada sistem *single stack* PEMFC sebelum dan sesudah *conditioning* terutama kelembaban pada membran.

Pengaturan keseimbangan air dalam membran dan sistem *single stack* PEMFC merupakan suatu hal yang penting yang dapat mempengaruhi performanya. Konduktifitas membran pada PEMFC secara langsung dipengaruhi oleh kandungan air di dalamnya (kelembaban) seperti terlihat pada Gambar 4.3.¹² Penyediaan air dari kelembaban reaktan merupakan hal yang dibutuhkan dan penting pada membran PEMFC karena membran (®Nafion) membutuhkan proses hidrasi untuk performanya dan menjadi tahan lama.



Gambar 4.3. Pengaruh air dalam menentukan konduktifitas membran⁶

Universitas Indonesia

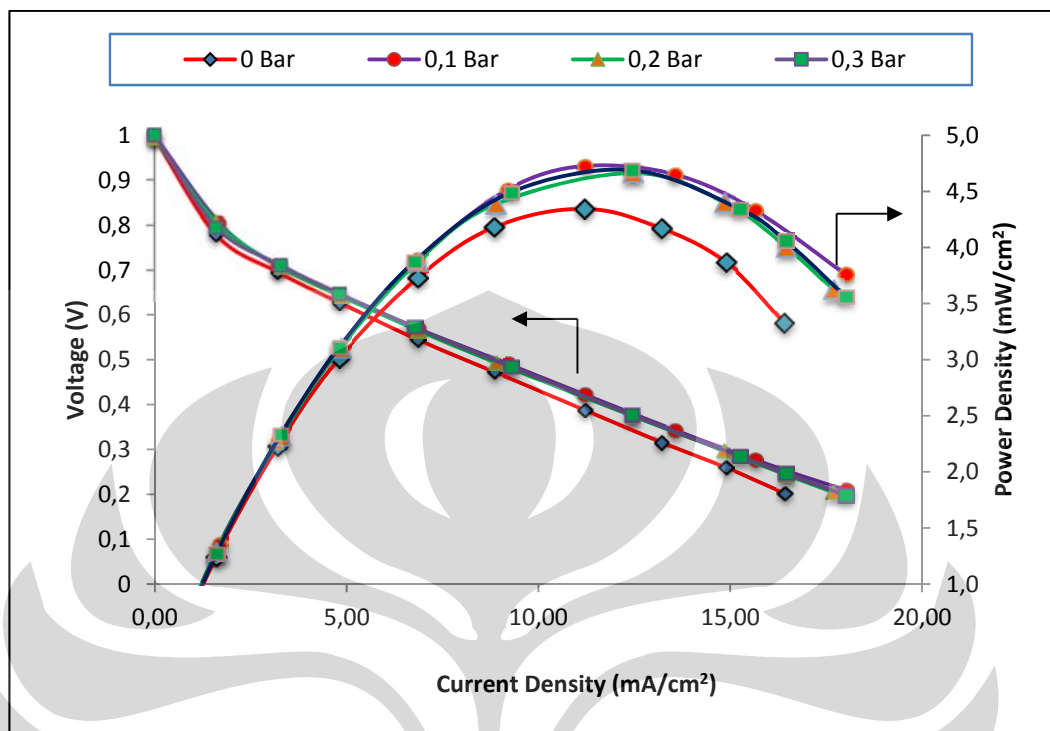
Konduktifitas membran dalam PEMFC secara langsung berhubungan dengan kandungan air yang bergantung pada (1) air yang dibawa oleh gas reaktan yang lembab (2) air yang dihasilkan pada katoda sebagai produk reaksi elektrokimia (3) aliran elektroosmotik dimana air dibawa oleh proton dari anoda ke katoda dan (4) difusi air terbalik dari katoda ke anoda.¹²

Dengan demikian pengelolaan air dalam sistem PEMFC merupakan masalah kompleks yang harus dihadapi.

4.4.2. Penentuan Kondisi Optimum Sistem Operasi Pengukuran *Single Stack* PEMFC

4.4.2.1. Penentuan Tekanan Optimum Sistem Operasi Pengukuran *Single Stack* PEMFC

Banyak hal yang dapat mempengaruhi performa *single stack* PEMFC, salah satunya adalah tekanan. Setiap *stacking* PEMFC memiliki kondisi sistem operasi yang berbeda untuk menghasilkan performa optimumnya. Pada penelitian ini akan dibuktikan bahwa tekanan mempengaruhi performa *single stack* PEMFC serta akan ditentukan tekanan sistem operasi optimumnya. Penentuan tekanan optimal untuk sistem operasi *single stack* PEMFC dilakukan dengan memvariasikan tekanan dari 0 — 0.3 bar.



Gambar 4.4. Kurva polarisasi penentuan tekanan optimum untuk *single stack* PEMFC yang diukur pada $\diamond = 0$ bar, $\circ = 0,1$ bar, $\Delta = 0,2$ bar, $\square = 0,3$ bar untuk H₂ dan O₂

Performa *single stack* PEMFC pada setiap kondisi ditentukan dengan *power density* optimum yang telah dicapai sesuai Gambar 4.4. Berdasarkan data yang diperoleh, Tabel 4.2 yang menyatakan perbandingan tekanan dengan performa *single stack* PEMFC menerangkan bahwa pada tekanan 0.1 bar performa *single stack* PEMFC mencapai 4.73 mW/cm² yaitu performa tertinggi dari tekanan yang lain. Dari tekanan 0 — 0.3 bar, secara berurutan power density yang dicapai adalah 4.35; 4.73; 4.67; 4.69 mW/cm².

Tabel 4.2. Performa *single stack* PEMFC pada berbagai tekanan

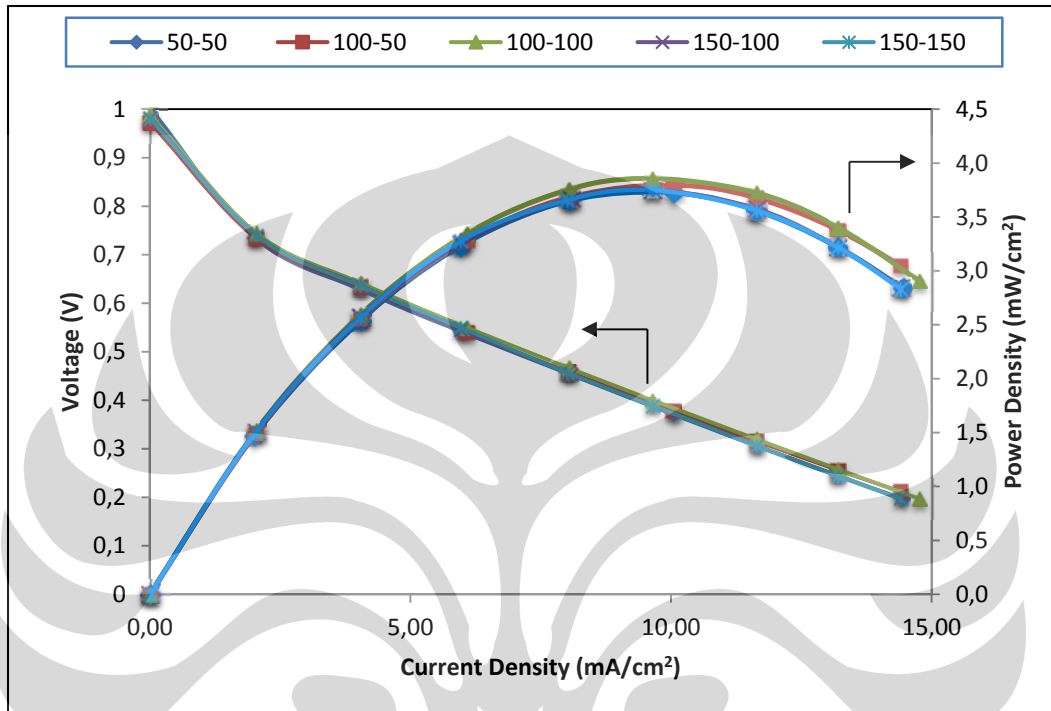
Tekanan Sistem Operasi (Bar)	Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0	0.388	11.200	4.346
0.1	0.422	11.200	4.726
0.2	0.375	12.440	4.665
0.3	0.377	12.440	4.690

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa tekanan sistem operasi *single stack* PEMFC dapat mempengaruhi performanya dan tekanan dibutuhkan dan penting untuk menaikkan performa *single stack* PEMFC walaupun perbedaannya relatif tidak signifikan. Tekanan sistem operasi terbaik untuk *single stack* PEMFC adalah 0.1 bar.

4.4.2.2. Penentuan Kecepatan Alir (*flow rate*) Gas Hidrogen dan Oksigen Optimum Sistem Operasi Pengukuran *Single Stack* PEMFC

Kondisi sistem operasi yang juga dapat mempengaruhi performa *single stack* PEMFC adalah kecepatan alir (*flow rate*) gas reaktan yaitu gas hidrogen dan oksigen. Pada penelitian ini, *flow rate* gas reaktan telah diamati dengan memvariasikan *flow rate* dari 50 mL — 150 mL untuk gas hidrogen dan oksigen. Dari data pengamatan diperoleh performa *single stack* PEMFC

pada setiap variasi *flow rate* yang digambarkan pada suatu kurva polarisasi pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Kurva polarisasi penentuan *flow rate* optimum) untuk *single stack* PEMFC yang diukur pada $\diamond = 50-50$, $\square = 100-50$, $\Delta = 100-100$, $X = 150-100$, $\ast = 150-150$ mL/menit untuk H₂ dan O₂.

Gas hidrogen (anoda) dan oksigen (katoda) sebagai reaktan harus dialirkan kedalam PEMFC. *Single stack* PEMFC membutuhkan asupan yang cukup untuk menghasilkan performa yang optimal seperti terlihat pada Tabel 4.3. *Flow rate* gas hidrogen dan oksigen yang menghasilkan performa *single stack* PEMFC optimal adalah 100-100 mL/menit. Pada *flow rate* tersebut, *power density* mencapai 3.86 mW/cm².

Tabel 4.3. Performa *single stack* PEMFC pada berbagai *flow rate* (0,1 Bar)

Kecepatan Alir Hidrogen-Oksigen (mL/menit)	Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
50-50	0.371	10.040	3.725
100-50	0.378	10.040	3.795
100-100	0.400	9.640	3.856
150-100	0.389	9.640	3.750
150-150	0.389	9.640	3.750

Ketika *flow rate* reaktan cukup untuk bereaksi maka *single stack* PEMFC dapat bekerja optimal menghasilkan performa yang tinggi. Namun, ketika *flow rate* reaktan dibawah jumlah konsumsinya, akan mengakibatkan terjadinya kondisi kekurangan reaktan yang sering menimbulkan potensial sel yang negatif.¹² Pada *flow rate* reaktan yang lebih besar, akan menimbulkan gas reaktan yang berlimpah pada sistem *single stack* PEMFC sedangkan transfer massa gas reaktan terutama gas hidrogen pada membran terbatas. Kondisi seperti ini akan membuat reaksi pada *single stack* PEMFC tidak sempurna dan performanya akan menurun. *Flow rate* yang telah menghasilkan performa tertinggi adalah 100 mL/menit untuk hidrogen dan oksigen.

Kecepatan alir reaktan yang masuk kedalam sistem PEMFC harus sama atau lebih besar dari kecepatan konsumsi reaktan dalam sel. Kondisi

kekurangan reaktan akan merusak performa PEMFC dan sering menghasilkan potensial sel yang negatif. Pada kasus anoda yang kekurangan hidrogen akan terjadi reaksi oksidasi air menjadi oksigen dan pada kasus katoda yang kekurangan oksigen akan terjadi reaksi reduksi proton menjadi hidrogen. Kemudian kehadiran gas oksigen pada elektroda hidrogen dan hidrogen pada elektroda oksigen akan menghasilkan panas pada membran sehingga membran terdegradasi dan berdampak buruk terhadap PEMFC.¹² Kebutuhan reaktan pada katoda dan anoda dapat dihitung berdasarkan hukum Faraday. Pada reaksi redoks, untuk setiap mol oksigen terjadi transfer 4 elektron dan untuk setiap mol hidrogen terjadi transfer 2 elektron, sehingga:

$$\text{H}_2 \text{ yang dibutuhkan} = \frac{1}{2F} \text{ mol/s} \quad (16)$$

$$\text{O}_2 \text{ yang dibutuhkan} = \frac{1}{4F} \text{ mol/s} \quad (17)$$

4.4.2.3. Pengukuran Transfer Massa Hidrogen dan Efisiensi Reaksi *Single Stack* PEMFC pada Kondisi Optimum

Penurunan performa PEMFC yang disebabkan oleh kelimpahan transfer massa yang terjadi pada membran juga telah diamati pada penelitian ini. Performa PEMFC bergantung pada transfer massa gas hidrogen sebagai

bahan bakarnya. Jika beban yang diberikan pada PEMFC bertambah, transfer massa gas hidrogen pun meningkat seperti terlihat pada data di Tabel 4.4. Hal tersebut membuat performanya pun meningkat. Akan tetapi pada beban yang relatif cukup besar, transfer massanya akan berlebihan sedangkan transfer massa hidrogen pada membran terbatas sehingga pada kondisi ini performa dan efisiensinya akan menurun.¹²

Tabel 4.4. Transfer massa hidrogen dan efisiensi reaksi *single stack* PEMFC pada berbagai beban

Beban	Beda Potensial (Volt)	Kuat Arus (Ampere)	Daya (Watt)	Transfer Massa Hidrogen (mol/detik)	Efisiensi (%)
1	0.991	0	0.000	5.24386E-08	0.00
2	0.407	0.190	0.077	4.19509E-07	76.28
3	0.201	0.368	0.074	6.18776E-06	3.86

4.5. Pengukuran Performa dan Efisiensi Katalis Pt/C 40% serta Penentuan Efisiensi Reaksi pada anoda dan katoda *Single Stack* PEMFC

Pengukuran *single stack* PEMFC dengan katalis Pt pada anoda dan katoda menggunakan *electronic discharge meter*, diperoleh data seperti pada Tabel 4.5. Dari data tersebut, dapat disusun suatu kurva polarisasi pada Gambar 4.6. yang dapat menerangkan performa dari PEMFC tersebut.

Performa *single stack* PEMFC yang menggunakan katalis Pt pada anoda dan katoda mencapai optimum dengan menghasilkan daya 3,002 mW/cm².

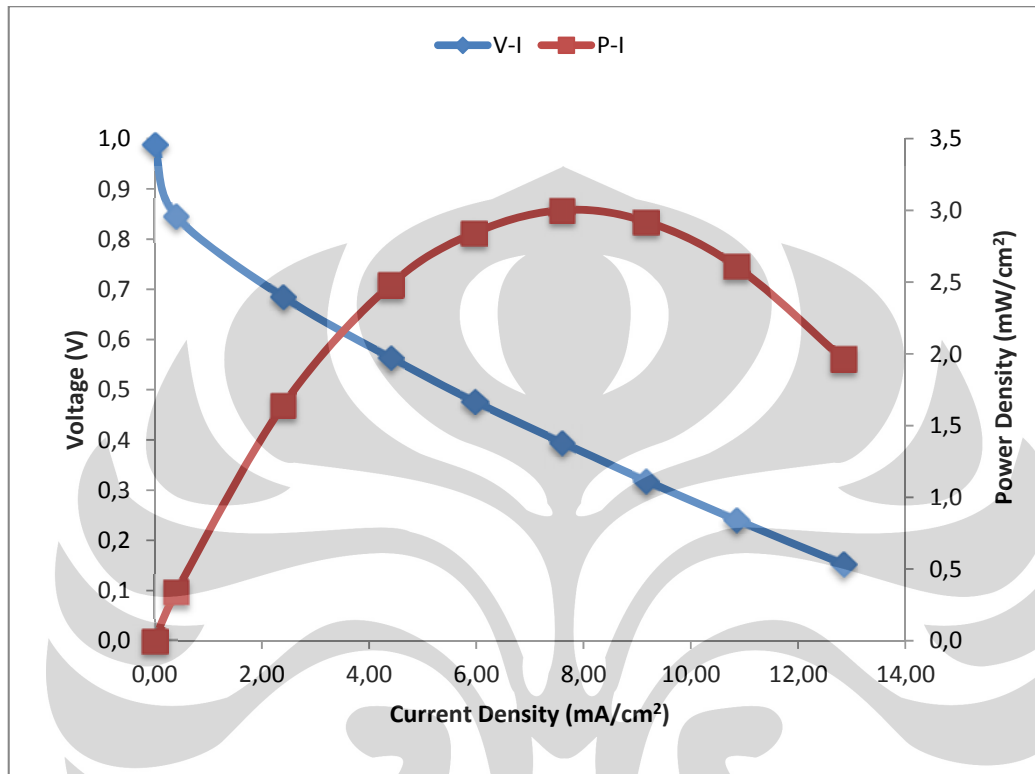
Berdasarkan persamaan (7), efisiensi katalis Pt sebagai material elektroda PEMFC mencapai 80,40%.

Tabel 4.5. Data pengamatan pengukuran *single stack* PEMFC dengan katalis Pt pada anoda dan katoda

Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.989	0.000	0.000
0.846	0.400	0.338
0.685	2.400	1.644
0.564	4.400	2.482
0.477	5.960	2.843
0.395	7.600	3.002
0.319	9.160	2.922
0.241	10.840	2.612
0.153	12.840	1.965

Logam platinum merupakan logam yang paling efektif untuk *single stack* PEMFC karena telah memberikan performa yang terbaik. Hal ini terjadi karena platinum memiliki potensial reduksi yang relatif lebih tinggi dari unsur lainnya sehingga tidak mempengaruhi reaksi redoks yang terjadi antara H₂ dan O₂.¹⁹ Selain itu, logam platinum memiliki orbital d yang memungkinkan logam tersebut dapat berikatan H₂ namun ikatannya lemah sehingga mudah

terputus. Kemudian pada katalis Pt/C, konsentrasi logam Pt lebih banyak dari katalis lainnya.



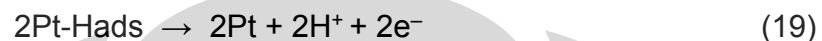
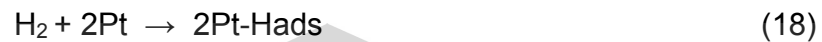
Gambar 4.6. Kurva polarisasi performa *single stack* PEMFC dengan katalis Pt (\diamond = V-I, \square = P-I)

Efisiensi Reaksi *single stack* PEMFC pada performa optimum tersebut mencapai 76,28 %. Nilai efisiensi tersebut cukup tinggi untuk suatu tipe *fuel cell* karena secara teoritis performa maksimal *fuel cell* hanya dapat mencapai 83 %.

Kepadatan pertukaran arus dalam reaksi pada suatu kristal Pt dapat mencapai 10 —30 A/cm². Tingginya besaran tersebut dapat diimplikasikan pada pembebanan yang besar dengan potensial kesetimbangan yang ada

Universitas Indonesia

secara teoritis. Mekanisme oksidasi H₂ pada Logam Pt dengan elektrolit asam merupakan proses disosiasi dan adsorpsi H₂ yang memiliki beberapa langkah. Reaksi-reaksi tersebut terjadi secara spontan dengan transfer elektron yang mudah (Bai et al., 1987).¹⁹



Aktivitas katalisis intrinsik yang tinggi diberikan untuk oksidasi H₂ pada permukaan Pt ketika direaksikan dengan H₂ murni. (Atanassova et al., 2001).¹⁹ Katalis Platinum (Pt) efektif digunakan pada anoda PEMFC. Aktivitas katalisis Pt pada anoda jauh lebih tinggi dibanding pada katoda. Reaksi elektrokimia yang terjadi pada anoda yaitu oksidasi gas hidrogen



pada permukaan logam seperti Pt sangat mudah terjadi (Markovic et al., 1997a).¹⁹

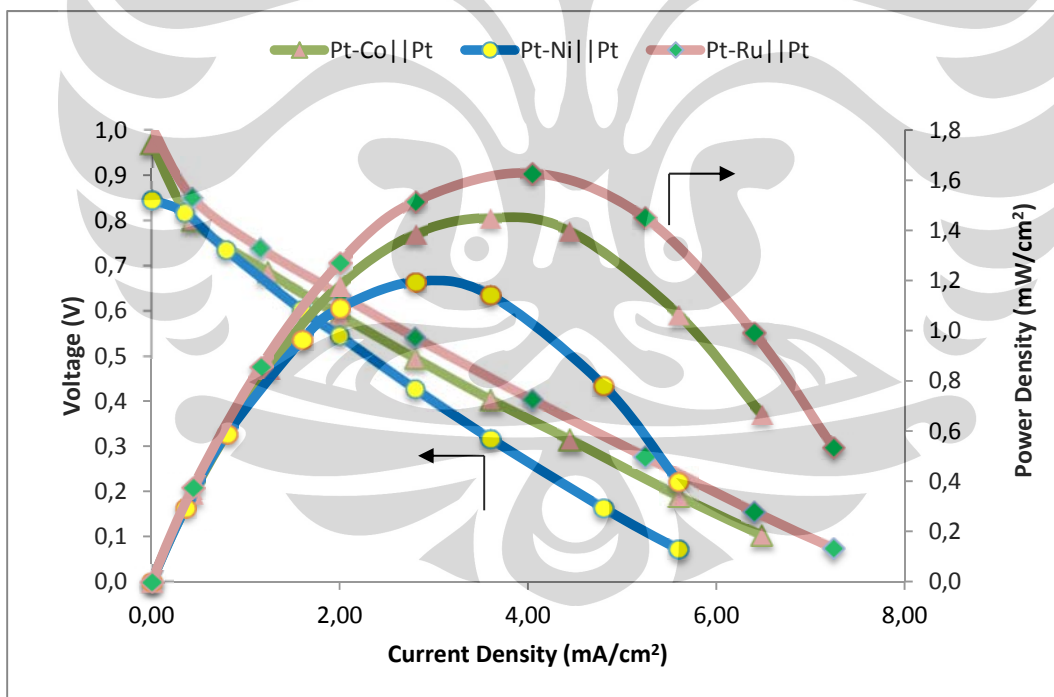
4.6. Penentuan Performa dan Efisiensi Variasi Katalis Bimetal Berbasis Karbon pada Anoda *Single Stack* PEMFC

Katalis yang digunakan untuk PEMFC merupakan komponen terpenting untuk reaksi reduksi dan oksidasinya. Katalis yang paling efektif untuk PEMFC adalah platinum. Namun, penggunaan platinum membutuhkan biaya yang besar dan juga jenis katalis ini sangat sensitif terhadap

keberadaan gas karbon monoksida (CO) dan gas hidrogen sulfida (H₂S).

Logam mulia lain pun memiliki aktivitas yang tinggi terutama untuk mengoksidasi H₂, selain itu pada elektrolit yang bersifat asam logam mulia tersebut juga memiliki kestabilan yang tinggi terhadap korosi. Pada penelitian ini telah dipelajari penggunaan katalis bimetal seperti platinum-kobalt (Pt-Co), platinum-nikel (Pt-Ni), dan platinum-ruthenium (Pt-Ru) sebagai elektrokatalis pada PEMFC.

Pada anoda *single stack* PEMFC, kurva polarisasi telah diamati dengan variasi katalis bimetal sebagai katalis pada anoda dan katalis Pt pada katoda.



Gambar 4.7. Kurva polarisasi performa *single stack* PEMFC dengan variasi katalis (Δ = Pt-Co, \circ = Pt-Ni, \diamond = Pt-Ru) pada anoda

Universitas Indonesia

Dari data yang telah diperoleh, dapat dibuat suatu kurva polarisasi pada Gambar 4.7. Kurva polarisasi diatas menerangkan bahwa performa *single stack* PEMFC yang menggunakan variasi katalis pada anoda secara berurutan adalah sebagai berikut Pt-Ru(1:1)/C 60% > Pt-Co(1:1)/C 10% > Pt-Ni(1:1)/C 10% (1.6281 > 1.4508 > 1.1956 mW/cm²). Dari data tersebut, terlihat bahwa katalis Pt-Ru/C menghasilkan performa yang paling tinggi. Efisiensi katalis yang digunakan sebagai material anoda PEMFC dapat ditentukan dengan persamaan (7) sehingga diperoleh hasil seperti terlihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Efisiensi katalis pada anoda PEMFC

Elektrokatalis	Potensial Sel (Volt)	Efisiensi Katalis (%)
Pt-Co	0.971	78,94
Pt-Ni	0.845	68,70
Pt-Ru	1.008	81,95

Apabila dibandingkan dengan katalis Pt/C 40%, efisiensi katalis Pt-Ru(1:1)/C 60 % lebih tinggi dibanding katalis Pt/C 40%. Ditinjau dari perbandingan konsentrasi logam Pt pada kedua katalis tersebut, efisiensi katalis Pt-Ru (1:1)/C 60 % lebih besar dibanding katalis Pt/C 40%. Perbandingan konsentrasi logam Pt pada katalis Pt-Ru(1:1)/C 60% dan katalis Pt/C 40% adalah sekitar 1:1. Dengan demikian, dapat diasumsikan bahwa katalis Pt-Ru yang memiliki konsentrasi logam Pt yang sama dengan

katalis Pt/C 40% dapat menghasilkan efisiensi mencapai 81,95% lebih besar dibanding efisiensi katalis Pt/C 40% (80,40%).

Walaupun gas hidrogen murni merupakan pilihan ideal untuk bahan bakar pada PEMFC. Namun secara ekonomis, sumber gas Hidrogen murni sangat tidak ideal. Kemudian sebagian besar sumber gas hidrogen saat ini berasal dari proses katalitik suatu hidrokarbon. Gas hidrogen diproduksi dengan penguapan (*steam reforming*) atau oksidasi bahan bakar hidrokarbon seperti *gasoline*, diesel, metana, dan alkohol yang mengandung CO (1–3%) dan banyak mengandung CO₂(19–25%) serta nitrogen (25%).¹⁹ Gas nitrogen dapat mengencerkan gas hidrogen dan gas CO beserta CO₂ dapat meracuni katalis Pt murni. Akibatnya gas-gas tersebut dapat mendegradasi performa anoda pada PEMFC.

Pada golongan katalis bimetal, katalis Pt-Ru/C pada anoda telah menghasilkan performa yang terbaik. Polarisasi pada anoda dapat mengalami kehilangan beda potensial. Hal tersebut terjadi karena PEMFC teracuni oleh gas CO. Pada PEMFC gas CO dapat berikatan kuat dengan platinum membentuk suatu kluster dan akhirnya akan menghambat reaksi oksidasi hidrogen.²⁹ Berbagai jenis katalis bimetal baik biner ataupun terner³⁰⁻³⁶ telah diuji dan hasilnya menerangkan bahwa aktivitas katalis tersebut dalam mengoksidasi hidrogen dipengaruhi oleh keberadaan gas CO. Suatu aktivitas katalitik dari partikel biner Pt-Ru pada reaksi redoks di PEMFC telah diamati³⁷. Pengamatan tersebut mengindikasikan bahwa ruthenium telah

mengurangi kuat ikatan Pt-CO³⁸ dan hal tersebut akan menghasilkan potensial untuk mengaktivasi air untuk membentuk OH yang dapat mengoksidasi gas CO³⁹.

Telah diketahui bahwa CO dapat berikatan kuat dengan Pt sehingga campuran H₂-CO dapat mengurangi proses adsorpsi dan oksidasi H₂.

Walaupun oksidasi elektrokimia CO,



secara termodinamika dapat terjadi, pada kenyataannya dibutuhkan overpotensial yang tinggi pada permukaan logam Pt murni sebelum reaksi oksidasi terjadi. Dengan katalis Pt, oksidasi CO tidak teramati sampai potensialnya mencapai 0.50 V pada temperatur 80°C. Padahal, potensial anoda yang dibutuhkan untuk proses tersebut hanya (0 — 0.1 V). Reaksi yang terjadi pada anoda PEMFC dengan keberadaan CO adalah seperti pada persamaan (22) dan (23).



dari reaksi tersebut terlihat bahwa katalis Pt tidak mampu menjadi media reaksi oksidasi H₂ karena dihalangi oleh CO.

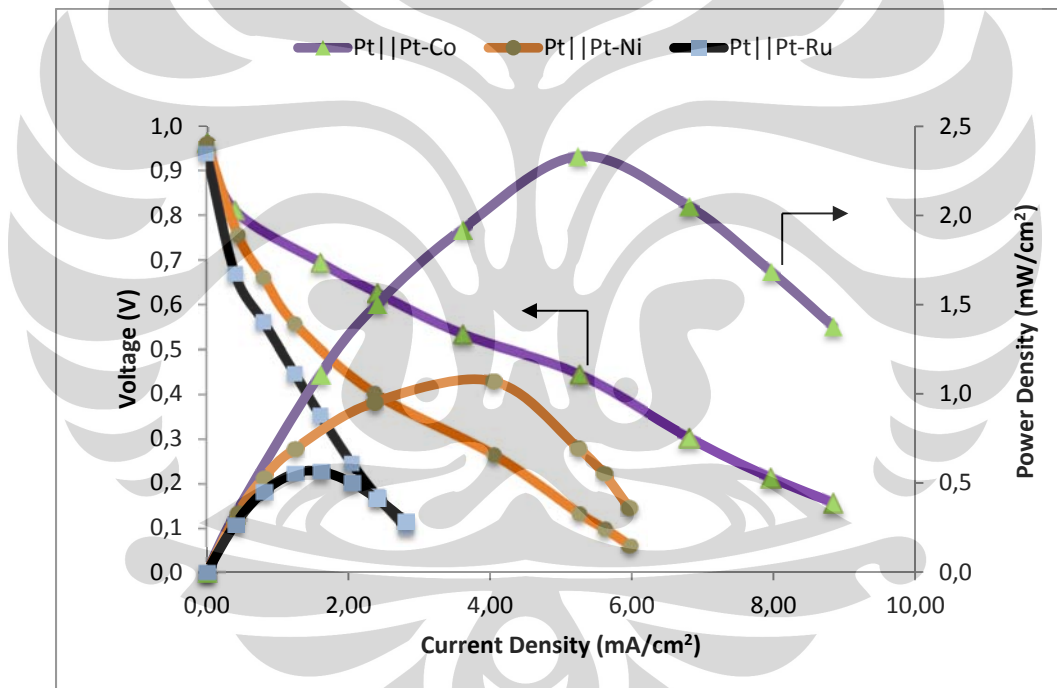
Sebagian besar penelitian telah menggunakan katalis Pt-Ru dengan ratio atomik 1:1. Efek ratio Pt-RU terhadap toleransi CO telah diteliti dengan sampel Pt-Ru *bulk* oleh Gasteiger et al. (1995), Iwase dan Kawatsu (1995), Oetjen et al. (1996). Mereka memperoleh bahwa katalis Pt-Ru dengan ratio atomik 1:1 memperlihatkan toleransi CO yang cukup signifikan.

Katalis Pt-Ru (1:1) dalam karbon disimpulkan merupakan kandidat terbaik untuk oksidasi hidrogen secara elektrokimia pada PEMFC dan teridentifikasi sebagai katalis yang memiliki toleransi terhadap gas CO dan memungkinkan untuk digunakan pada anoda PEMFC⁴⁰⁻⁴⁷. Pt-Ru dengan rasio atomik 1:1 telah dilaporkan sebagai katalis Pt-Ru yang memiliki toleransi gas CO tertinggi⁴²⁻⁴⁴.

4.7. Penentuan Performa dan Efisiensi Variasi Katalis Bimetal Berbasis Karbon pada Katoda *Single Stack* PEMFC

Pada katoda, katalis bimetal sebagai elektrokatalis yang mereduksi oksigen telah mempengaruhi performa dari PEMFC terutama *single stack* PEMFC. Penelitian ini telah dilakukan dengan memvariasikan katalis bimetal pada katoda dan menggunakan katalis Pt pada anoda. Dari data yang diperoleh, dapat dijelaskan bahwa setiap katalis bimetal memiliki performa yang berbeda-beda.

Secara berurutan, performa *single stack* PEMFC yang menggunakan variasi katalis pada katoda adalah sebagai berikut; Pt-Co/C > Pt-Ni/C > Pt-Ru/C ($2.3318 > 1.0706 > 0.5648 \text{ mW/cm}^2$) seperti terlihat pada Gambar 4.8. Performa katalis Pt-Co/C merupakan salah satu katalis bimetal untuk katoda yang menghasilkan performa terbaik (2.3318 mW/cm^2) dari katalis bimetal lainnya. Hal ini diindikasikan karena daya tahan katalis Pt-Co/C pada operasi PEMFC cukup tinggi. Hal tersebut juga telah ditentukan dengan membandingkan performanya dengan platinum⁴⁸.



Gambar 4.8. Kurva polarisasi performa *single stack* PEMFC dengan variasi katalis pada katoda (Δ = Pt-Co, \circ = Pt-Ni, \square = Pt-Ru)

Dari Tabel 4.7. Apabila dibandingkan dengan katalis Pt/C 40%, efisiensi katalis Pt-Co(1:1)/C 10 % lebih rendah dibanding katalis Pt/C 40%. Hal tersebut terjadi karena konsentrasi logam Pt pada katalis Pt-Co/C lebih kecil dibanding pada katalis Pt/C. Namun, jika dibandingkan terhadap konsentrasi logam Pt pada kedua katalis tersebut, efisiensi katalis Pt-Co(1:1)/C 10 % lebih besar dibanding katalis Pt/C 40%. Perbandingan konsentrasi logam Pt pada katalis Pt-Co(1:1)/C 10% dan katalis Pt/C 40% adalah 1:5. Dengan demikian, dapat diasumsikan bahwa katalis Pt-Co yang memiliki konsentrasi logam Pt yang sama dengan katalis Pt/C 40% dapat menghasilkan efisiensi mencapai 391,45% yang jauh lebih besar dibanding efisiensi katalis Pt/C 40% (80,40%).

Tabel 4.7. Efisiensi katalis pada katoda PEMFC

Elektrokatalis	Potensial Sel (Volt)	Efisiensi Katalis (%)
Pt-Co	0.963	78.29
Pt-Ni	0.961	78.13
Pt-Ru	0.939	76.34

Reaksi katoda berbeda dengan reaksi pada anoda, reaksi pada katoda tidak membutuhkan katalis spesifik untuk menghasilkan suatu performa yang baik pada sebagian besar aplikasi PEMFC. Walaupun ketika dioperasikan dengan udara yang mengandung komponen lain (N₂, Ar, CO₂), reaksi reduksi pada katoda tidak memerlukan katalis spesifik karena komponen-komponen tersebut hanya berlaku sebagai pelarut gas reaktan (oksigen). Sama halnya

dengan anoda, performa maksimal reaksi pada katoda ditemukan dengan reaktan yang murni. Namun, untuk sebagian besar aplikasi, udara merupakan oksidator yang cukup dan dapat digunakan.

Suatu reaksi reduksi oksigen dalam media air telah dikendalikan dengan nilai kemungkinan reaksi.¹⁹ Nilai tersebut dapat ditentukan secara termodinamika dari nilai potensial standar reaksi yang terjadi. Potensial standar reaksi secara termodinamika pada reaksi tersebut jelaskan pada persamaan (24), (25), dan (26).



Reduksi gas oksigen dengan 4 elektron merupakan reaksi yang paling menarik untuk dikatalisasi. Hal ini terjadi karena sel pada reaksi tersebut dapat menghasilkan potensial sel yang tertinggi untuk H_2/O_2 *fuel cell*.

Walaupun pada reaksi ini ditemukan bahwa reaksi sulit terjadi pada potensial yang rendah. Pada potensial kesetimbangan dalam elektrolit asam, dibutuhkan permukaan logam yang sangat stabil (kecuali Au, yang tidak aktif pada reaksi reduksi oksigen dalam keadaan asam).¹⁹

Pada elektrolit yang bersifat asam, logam mulia seperti Pt, Pd, dan Rh dan logam campurannya telah diteliti sebagai pilihan katalis untuk reaksi

reduksi oksigen. Walaupun, katalis yang terbaik dari katalis tersebut adalah Pt, katalis jenis ini 106 kali lebih tidak aktif dibanding untuk oksidasi hidrogen¹⁹. Hal tersebut dapat menyebabkan tingginya peristiwa overpotensial dan membatasi aktivitas katalitik untuk efisiensi *fuel cell*.

4.8. Pengukuran Transfer Massa Hidrogen dan Efisiensi Reaksi *Single Stack* PEMFC dengan Variasi Katalis pada Anoda dan Katoda

Transfer massa hidrogen yang terjadi pada sistem PEMFC ditentukan dengan menggunakan persamaan (27), kemudian entalpi reaksi ditentukan dengan persamaan (28) berdasarkan jumlah mol hidrogen yang telah ditransfer. Dengan membandingkan daya yang dihasilkan oleh PEMFC dengan entalpi reaksi diperoleh efisiensi PEMFC yang diturunkan pada persamaan (10).

$$\text{Transfer massa Hidrogen (mol/s)} = \text{mol H}_2 \text{ inlet/s} - \text{mol H}_2 \text{ outlet/s} \quad (27)$$

$$\Delta H \text{ (J/s)} = \Delta H_{\text{reaksi}} \text{ (J/mol)} \times \text{Transfer Massa Hidrogen (mol/s)} \quad (28)$$

$$P \text{ (J/s)} = V \times I \quad (29)$$

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{\Delta G_f^0}{\Delta H^0} = \frac{P}{\Delta H^0} \times 100 \% \quad (10)$$

Tabel 4.8. Transfer Massa Hidrogen dan Efisiensi Reaksi PEMFC dengan Variasi Katalis pada Anoda dan Katoda

Elektrokatalis	Beda Potensial (Volt)	Kuat Arus (A)	Daya (W)	Transfer Massa Hidrogen (mol/detik)	Efisiensi (%)
Pt Pt	0.395	0.190	0.075	4.20E-07	76.28
Variasi pada Anoda					
Pt-Co Pt	0.403	0.090	0.036	5.24E-07	28.62
Pt-Ni Pt	0.427	0.070	0.030	4.20E-07	29.49
Pt-Ru Pt	0.403	0.101	0.041	3.15E-07	53.54
Variasi pada Katoda					
Pt Pt-Co	0.445	0.131	0.058	4.20E-07	57.51
Pt Pt-Ni	0.265	0.101	0.027	4.20E-07	26.40
Pt Pt-Ru	0.353	0.040	0.014	2.10E-07	27.86

Logam Pt merupakan jenis logam mulia yang memiliki aktivitas katalitik yang paling tinggi baik performa maupun efisiensinya. Hal tersebut terjadi karena logam Pt memiliki potensial reduksi yang relatif lebih tinggi dari unsur lainnya sehingga tidak mempengaruhi reaksi redoks yang terjadi antara H_2 dan O_2 , dan relatif stabil.¹⁹ Selain itu, logam platinum memiliki orbital d yang memungkinkan logam tersebut dapat berikatan H_2 namun ikatannya lemah sehingga mudah terputus. Dengan demikian, aktivitas suatu katalis cenderung lebih ditentukan oleh kandungan logam Pt yang terkandung pada katalis tersebut.

Single stack PEMFC yang menggunakan katalis Pt/C 40% memiliki efisiensi reaksi yang lebih besar dibanding dengan katalis lainnya yang mencapai 76,28%. Katalis bimetal yang terbaik pada anoda dan katoda

Universitas Indonesia

terlihat pada Tabel 4.8. berturut-turut Pt-Ru(1:1)/C 60% dan Pt-Co(1:1)/C 10% menghasilkan efisiensi reaksi masing-masing 53,54% dan 57,51%.

Performa suatu mesin penghasil energi berkisar antara 15%—30% bergantung dengan teknologi yang diaplikasikan pada mesin tersebut.¹⁹

PEMFC sebagai suatu mesin penghasil energi memiliki efisiensi optimum 83%, dan rata-rata teknologi tersebut memiliki efisiensi 40%—70%.¹²

Single stack PEMFC yang menggunakan katalis logam bimetal tersebut memiliki efisiensi yang relatif cukup besar (53,54% dan 57,51%) baik dibanding dengan teknologi *fuel cell* yang lain maupun dibanding dengan teknologi mesin penghasil energi yang lain. Dengan demikian, teknologi PEMFC dengan menggunakan material logam bimetal sebagai elektrokatalisnya dapat diaplikasikan sebagai teknologi penghasil energi masa depan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi optimum sistem operasi *single stack* PEMFC dengan *loading* 0,5 mg/cm² katalis Pt berbasis karbon adalah sebagai berikut:
 - Kabel berdiameter besar, diatas 1,0 cm dengan performa 0,356 V; 15,64 mA/cm², dan 5,568 mW/cm² lebih besar 2,3 kali lipat dibandingkan dengan 0,5 cm.
 - Setelah *conditioning*, dengan performa 0,395 V; 20,36 mA/cm², dan 8,042 mW/cm² lebih besar 1,43 kali lipat dibandingkan dengan sebelum *conditioning*.
 - Tekanan 0,1 bar dan flow rate 100 mL/menit untuk kedua reaktan, dengan performa 0,40 V; 9,64 mA/cm², dan 3,856 mW/cm².
2. Telah dibuktikan bahwa penurunan potensial sel setelah *current density* maksimum dipengaruhi oleh *load* dan konduktifitas proton yang terbatas.
3. Katalis anoda yang paling optimal terlihat pada performa katalis Pt-Ru(1:1)/C 60 % pada V = 0,403 volt; I/A = 4,04 mA/cm², dan P/A = 1,628

mW/cm². Selanjutnya, katalis katoda yang paling optimal terlihat pada performa katalis Pt-Co(1:1)/C 10 % pada $V = 0,445$ V; $I/A = 5,24$ mA/cm², dan $P/A = 2,332$ mW/cm².

4. Efisiensi yang dihitung berdasarkan energi bebas Gibbs (η_G) dan beda potensial sel (η_E) dihasilkan bahwa Pt-Ru(1:1)/C 10% dan Pt-Co(1:1)/C 10% masing-masing adalah $\eta_G = 53,54\%$, $\eta_E = 81,95\%$ dan $\eta_G = 57,51\%$, $\eta_E = 78,29\%$.
5. Apabila dibandingkan berdasarkan konsentrasi logam Pt dalam katalis, katalis Pt-Ru(1:1) 60% dan Pt-Co(1:1) 10% memiliki performa dengan efisiensi yang lebih besar (81,95% dan 391,45%) dari katalis Pt/C 40% (80,40%).

5.2. Saran

1. Melakukan karakterisasi *ex-situ* elektrokimia untuk menambah validasi data yang diperoleh.
2. Menganalisis impedance sistem operasi PEMFC untuk mengetahui *faradic current* pada sistem tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

1. <http://www.kompas.com> [Selasa, 15 Juli 2008]
2. <http://www.bppt.go.id> [Selasa, 29 Juli 2008]
3. Rezky, (25 Juni 2008), Kenaikan Tarif Listrik Akibat Krisis Energi. 21 Nopember 2009.
(<http://www.kabarindonesia.com/berita.php?pil=10&id=Kenaikan+Tarif+Listrik+Akibat+Krisis+Energi&dn=20080625173746>).
4. Handbook of Fuel Cell: Fundamental, Technology and Applications; John Wiley and Sons: Chichester, 2003.
5. D. S. Falcao, C. M. Rangel, C. Pinho, and A. M. F. R. Pinto. 2009. Water Transport through a Proton-Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell Operating near Ambient Conditions: Experimental and Modeling Studies. *Energy & Fuels*, 23, 397–402.
6. Listiani Dewi, Eniya. 2008. A Key of Good MEA Preparation Methods and Single Stack Proton Exchange Membrane Fuel Cell Test Using Hydrogen as Fuel. *Procc. Sriwijaya International Seminar on Energy Science and Technology*, FC08, 42.

7. Seminar dan Kongres Nasional I Konsorsium Fuel Cell Indonesia (KFCI). **2008**.
http://www.iptek.net.id/ind/jurnal/jurnal_idx.php?doc=VI.IIB.02.htm
8. Aurelia, Inezia. **2005**. *Studi Modifikasi Glassy Carbon dengan Teknik Elektrodeposisi Iridium Oksida untuk Aplikasi sebagai Elektroda Sensor Arsen (III)*. Depok : Departemen Kimia, FMIPA-UI.
9. Asthanty, Arie. **2004**. *Studi Pembuatan Sensor Hidroksilamina dari Elektroda Grafit yang dimodifikasi dengan Film Tembaga-Kobalt Heksasianoferat*. Depok : Departemen Kimia, FMIPA-UI.
10. Wang, Joseph. **2000**. *Analytical Electrochemistry*, 2nd edition. USA: A John Willey&Sons, Inc.
11. Day, R.A. Jr., A.L. Underwood. **1986**. *Analisa Kimia Kuantitatif*. Edisi kelima. Jakarta: Penerbit Erlangga.
12. Xiao-Zi Yuan, Haijiang Wang and Jiujun Zhang (Ed). **2008**. *PEM fuel cell Electrocatalysts and Catalyst Layers, Fundamentals and Applications*. Springer-Verlag London Limited., 1, 1—79.
13. Anderson, Melony. **1999**. *Commercialization of Vehicular Fuel Cells*. Washington Internships for Students of Engineering. Summer.
14. Martin Winter and Ralph J. Brodd. **2004**. "What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?", *Chem. Rev.* 104, 4245-4269.

15. Wibowo, widajanti. **2005**. Handbook Katalis Heterogen dan Reaksi Katalis. Depok: Departemen Kimia FMIPA UI.
16. <http://www.nevron.com/gallery/FullGalleries/diagram/science/images/PEMFC.png>
17. www.plasticstechnology.com.jpg
18. www.cfdrc.com.gif
19. Hoogers, Gregor. **2002**. *Fuel Cell Technology Hand Book*. CRC Press. Boca Raton London New York, Wasington DC.
20. James Larminie and Andrew Dicks. **2003**. *Fuel Cell Systems Explained Second Edition*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 1—5, 1—118.
21. Wei Xing and Jiujun Zhang (Ed). **2008**. *PEM fuel cell Electrocatalysts and Catalyst Layers, Fundamentals and Applications*. Springer-Verlag London Limited. 22, 1003—1033.
22. Jens Oluf Jensen, Qingfeng Li, and Aline Leon (Ed). **2008**. *Hydrogen Technology, Mobile and Portable Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 5. 152—184.
23. Cotton, F. Albert and Wilkinson, Geoffrey. **1989**. *Kimia Anorganik Dasar*. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI Press).
24. 499—561
24. Cotton, F. Albert and Wilkinson, Geoffrey. **1989**. *Kimia Anorganik Dasar*. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI Press).
24. 500—501.

25. Cotton, F. Albert and Wilkinson, Geoffrey. **1989**. Kimia Anorganik Dasar. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI Press).
24. 467—472.
26. Cotton, F. Albert and Wilkinson, Geoffrey. **1989**. Kimia Anorganik Dasar. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI Press).
24. 472—477.
27. www.etek-inc.com
28. O'Hayre, Ryan, et al., ed. **2006**. Fuel Cell Fundamentals. USA: John Wiley & Sons Inc.
29. H. P.; Christner, L. G.; Kush, A. K. *J. Electrochem. Soc.* **1987**, *134*, 3021.
30. Schmidt, T. J.; Noeske, M.; Gasteiger, H. A.; Behm, R. J.; Britz, P.; Boönnemann, H. *J. Electrochem. Soc.* **1998**, *145*, 925.
31. Schmidt, T. J.; Gasteiger, H. A.; Staöb, G. D.; Urban, P. M.; Kolb, D. M.; Behm, R. J. *J. Electrochem. Soc.* **1999**, *146*, 1296.
32. Reetz, M. T.; Lopez, M.; Gruöner, W.; Vogel, W.; Mahlendorf, F. *J. Phys. Chem. B* **2003**, *107*, 7414
33. Grgur, B. N.; Markovic, N. M.; Ross, P. N. *J. Electrochem. Soc.* **1999**, *146*, 1613.
34. Schmidt, T. J.; Gasteiger, H. A.; Behm, R. J. *J. New Mater. Electrochem. Syst.* **1999**, *2*, 27.
35. Goetz, M.; Wendt, H. *J. Appl. Electrochem.* **2001**, *31* (7), 811.
36. Roth, C.; Goetz, M.; Fuess, H. *J. Appl. Electrochem.* **2001**, *31* (7), 793.

37. Gasteiger, H. A.; Markovic, N. M.; Ross, P. N., Jr.; Cairns, E. J. *J. Phys. Chem.* **1994**, *98* (2), 617.
38. Brankovic, S. R.; Marinkovic, N. S.; Wang, J. X.; Adz'ic, R. R. *J. Electroanal. Chem.* **2002**, *532*, 57.
39. Lu, C. et.al. *J. Phys. Chem. B* **2002**, *106*, 9581
40. Dhar, (11) Gastiger, H. A.; Markovic, N.; Ross, P. N., Jr. *J. Phys. Chem.* **1995**, *99*, 16757.
41. Gastiger, H. A.; Markovic, N.; Ross, P. N., Jr. *J. Phys. Chem.* **1995**, *99*, 8290.
42. Gastiger, H. A.; Markovic, N.; Ross, P. N., Jr.; Cairns, E. J. *J. Phys. Chem.* **1994**, *98*, 617.
43. Ianniello, R.; Schmidt, V. M.; Stimming, U.; Stumper, J.; Wallau A. *Electrochim. Acta* **1994**, *39*, 1863.
44. Schmidt, V. M.; Ianniello, R.; Oetjen, H.-F.; Reger, H.; Stimming, U.; Trila, F. *Electrochem. Soc. Proc.* **1995**, *95-23*, 1.
45. Oetjen, H.-F.; Schmidt, V. M.; Stimming, U.; Trila, F. *J. Electrochem. Soc.* **1996**, *143*, 3838.
46. Frelink, T.; Visscher, W.; Cox, A. P.; van Veen, J. A. R. *Ber. Bunsen-Ges. Phys. Chem.* **1996**, *100*, 599.
47. Watanabe, M.; Motoo, S. *J. Electroanal. Chem.* **1975**, *60*, 267.
48. Yu, P.; Pemberton, M.; Plasse, P. PtCo/C cathode catalyst for improved durability in PEMFCs. *J. Power Sources* **2005**, *144*, 11-20.

DAFTAR PUBLIKASI HASIL PENELITIAN

1. Nahdi, Anis; Wibowo, Widajanti; Listiani Dewi, Eniya. Determination of Optimum Condition and Mass Transfer Hydrogen for Single Stack Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell: Supported Pt/C as Electrocatalysis. *Proceedings of 2nd International Conferences on Fuel Cell and Hydrogen Technology (2ndCFCHT) 2009*, PF-10. 193-199. ISBN 978-602-95555-1-6.
2. Nahdi, Anis; Wibowo, Widajanti; Listiani Dewi, Eniya. Pt-Alloy Nanoparticles Effect on Performance and Efficiency of Single Stack Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell. *Proceedings of 2nd International Conferences on Advanced Materials and Practical Nanotechnology (2ndICAMPN) 2009*. 79—84.

PROFIL MAHASISWA

Nama : Anis Nahdi
Tempat/tanggal Lahir : Serang, 19 November 1987
Jenis kelamin : Laki-laki
Agama : Islam
Tinggi badan : 167 cm
Berat badan : 49 Kg
Alamat : Jalan Manyar Nomor 21 Kavling Blok H RT.
011/006 Ciwaduk Cilegon Banten 42415
E-mail: anistarmuslims@yahoo.co.id
anis.nahdi@ui.edu
Visi : Menjadi manusia yang bermanfaat bagi umat.
Motto : Iman, Ilmu, Amal, dan Taqwa

PUBLIKASI DAN PENELITIAN

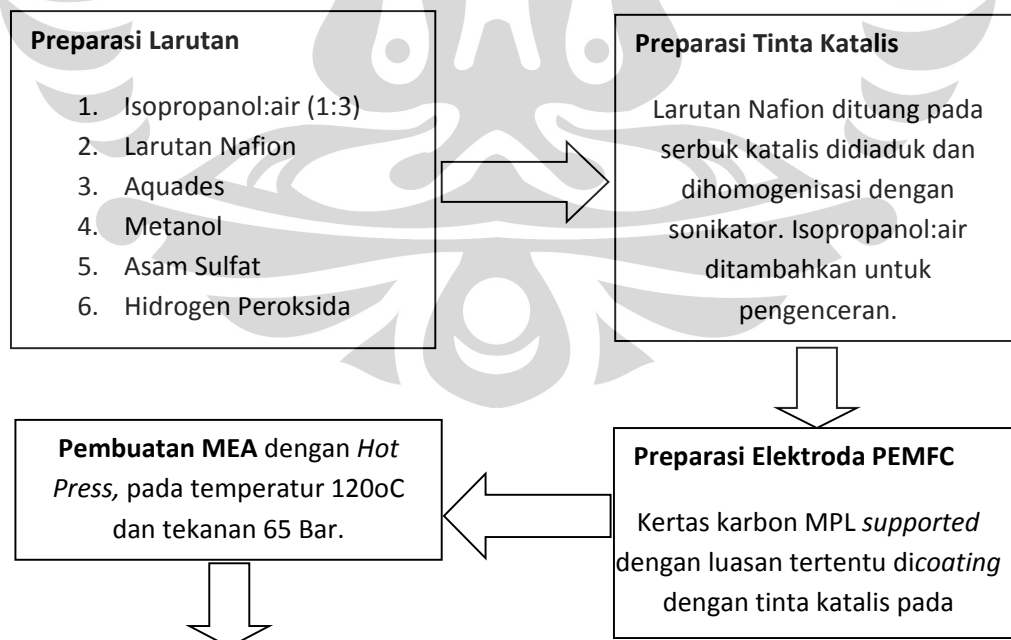
1. Validasi Metode Analisis Konsentrasi dan Kadar Besi dalam Asam Sulfat Laboratorium *Quality Assurance* PT Asahimas Chemical Tahun 2009.
2. Determination of Optimum Condition and Mass Transfer Hydrogen for Single Stack Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell: Supported Pt/C as Electrocatalysis. Tahun 2009.
3. Pt-Alloy Nanoparticles Effect on Performance and Efficiency of Single Stack Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell. Tahun 2009.

LAMPIRAN

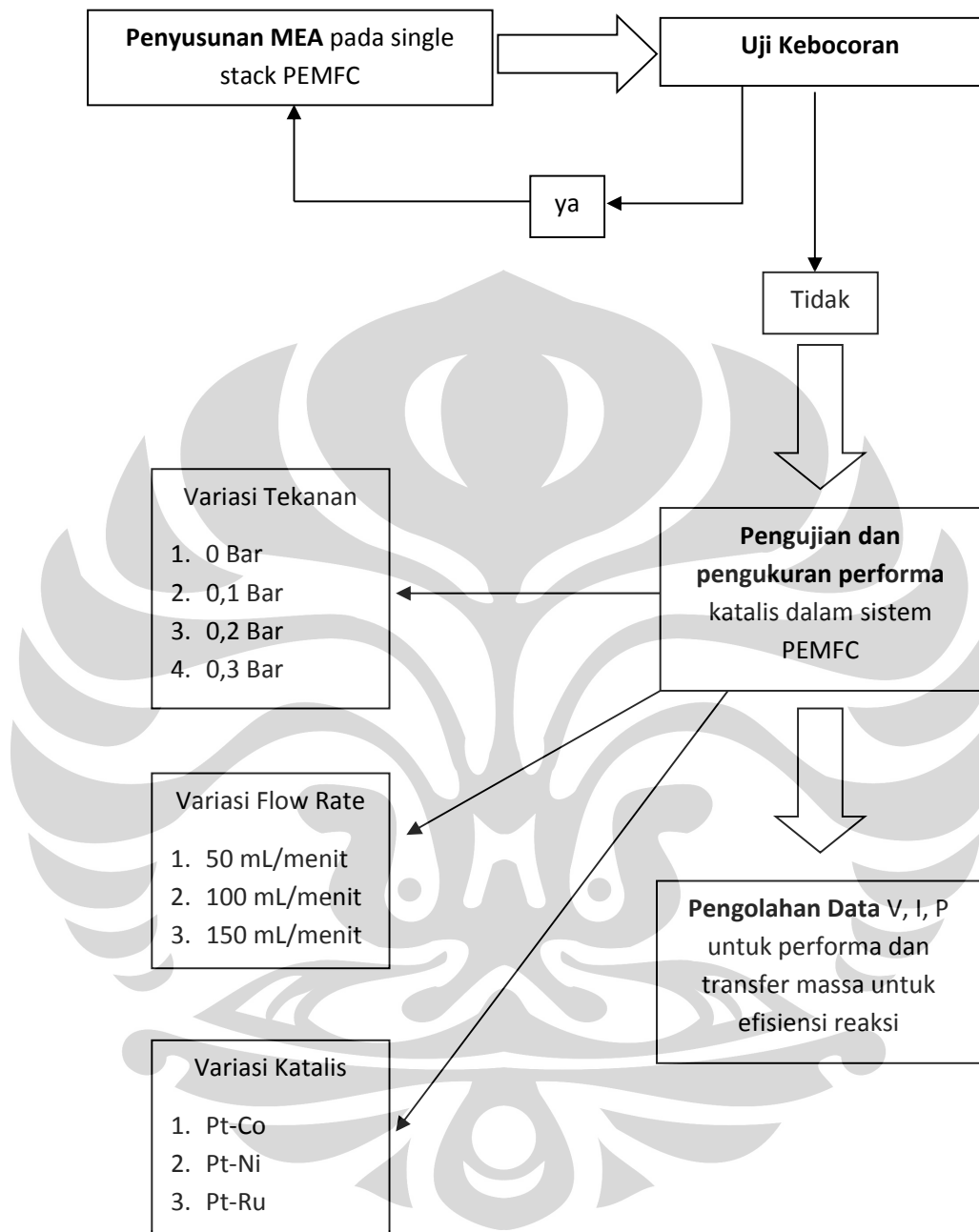
Lampiran 1. Penggunaan katalis bimetal berbasis karbon dan larutan nafion

Bahan (gram)	Jumlah Elektroda				
	1	2	3	4	5
• Pt/C 40 %	0.033	0.067	0.100	0.134	0.167
Larutan Nafion 5wt%	0.402	0.804	1.206	1.607	2.009
• Pt-Ru/C 60 %	0.022	0.045	0.067	0.089	0.112
Larutan Nafion 5wt%	0.179	0.357	0.536	0.714	0.893
• Pt-Ni/C 10 %	0.134	0.268	0.402	0.536	0.670
Larutan Nafion 5wt%	2.411	4.822	7.233	9.644	12.056
• Pt-Co/C 10 %	0.134	0.268	0.402	0.536	0.670
Larutan Nafion 5wt%	2.411	4.822	7.233	9.644	12.056

Lampiran 2. Desain penelitian

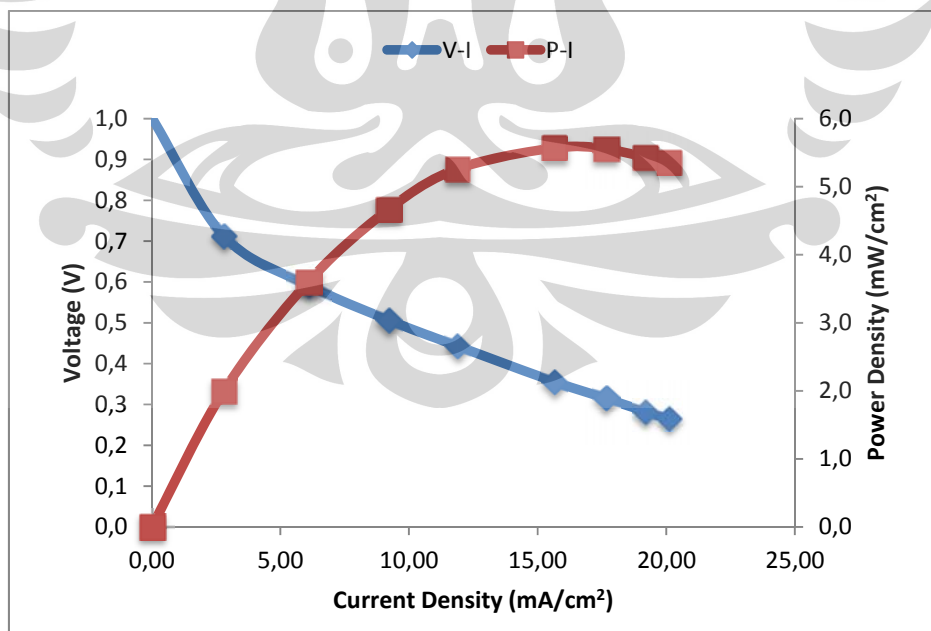


Universitas Indonesia



Lampiran 3. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan kabel besar untuk sistem operasinya

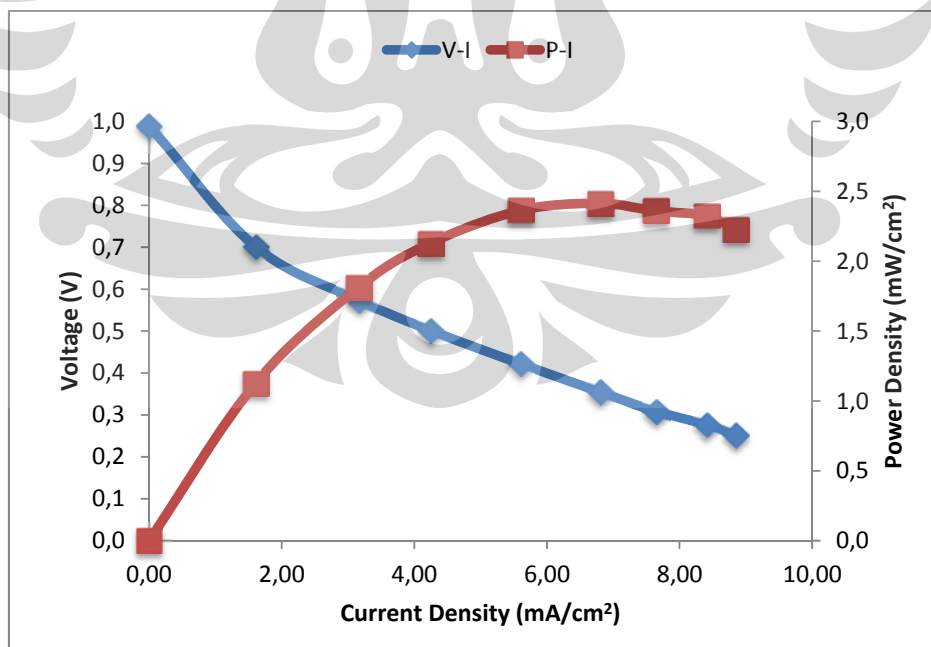
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
1.003	0.000	0.000
0.713	2.800	1.996
0.592	6.080	3.599
0.507	9.200	4.664
0.443	11.880	5.263
0.356	15.640	5.568
0.315	17.640	5.557
0.283	19.200	5.434
0.267	20.080	5.361



Universitas Indonesia

Lampiran 4. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan kabel kecil untuk sistem operasinya

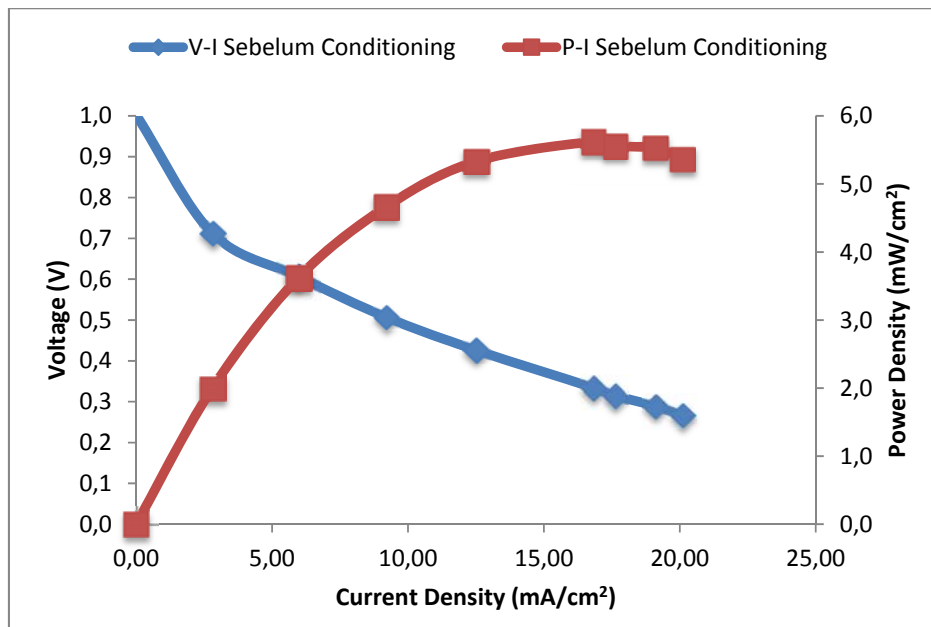
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.990	0.000	0.000
0.702	1.600	1.123
0.574	3.160	1.814
0.502	4.240	2.128
0.422	5.600	2.363
0.355	6.800	2.414
0.309	7.640	2.361
0.277	8.400	2.327
0.252	8.840	2.228



Universitas Indonesia

Lampiran 5. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC sebelum *conditioning*

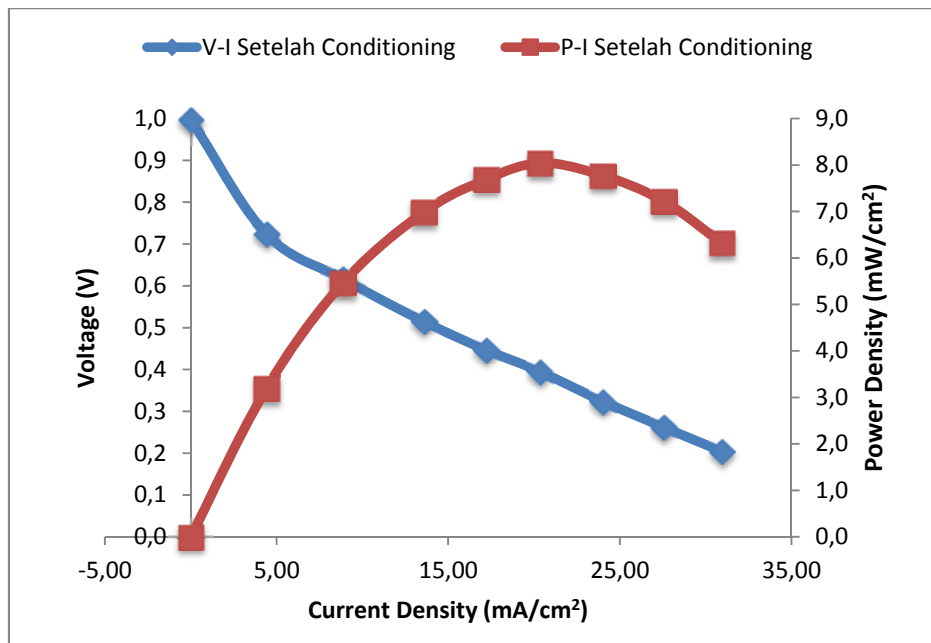
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
1.003	0.000	0.000
0.713	2.800	1.996
0.607	5.960	3.618
0.507	9.200	4.664
0.427	12.480	5.329
0.334	16.840	5.625
0.315	17.640	5.557
0.289	19.120	5.526
0.267	20.080	5.361



Universitas Indonesia

Lampiran 6. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC setelah *conditioning*

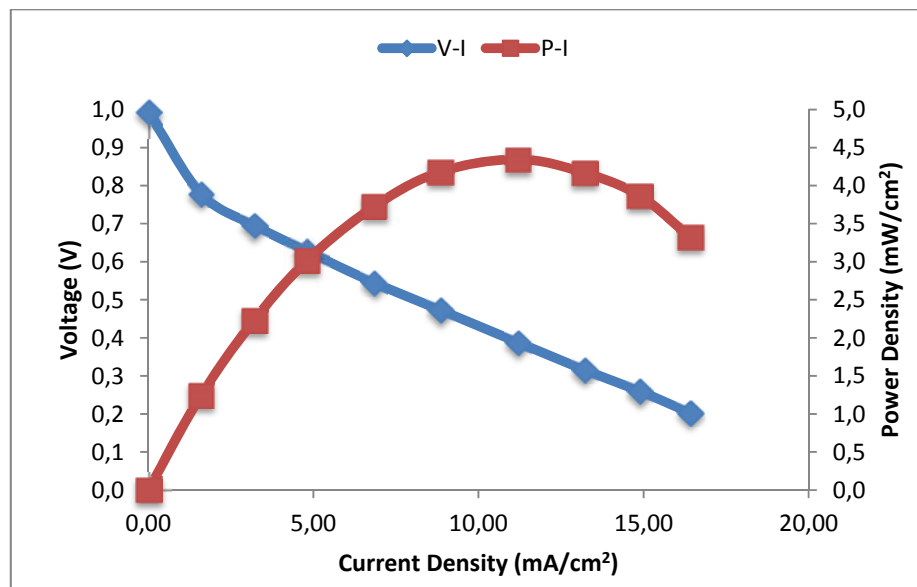
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.997	0.000	0.000
0.724	4.400	3.186
0.617	8.840	5.454
0.515	13.560	6.983
0.447	17.200	7.688
0.395	20.360	8.042
0.324	24.000	7.776
0.262	27.560	7.221
0.204	30.960	6.316



Universitas Indonesia

Lampiran 7. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada tekanan 0 Bar

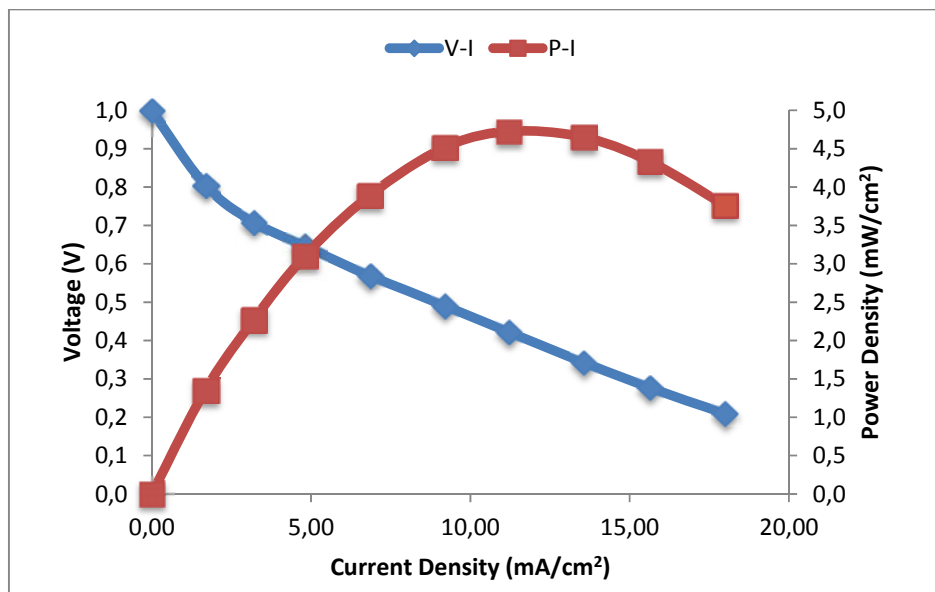
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.993	0.000	0.000
0.779	1.600	1.246
0.696	3.200	2.227
0.628	4.800	3.014
0.545	6.840	3.728
0.473	8.840	4.181
0.388	11.200	4.346
0.316	13.200	4.171
0.260	14.880	3.869
0.203	16.400	3.329



Universitas Indonesia

Lampiran 8. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada tekanan 0.1 Bar

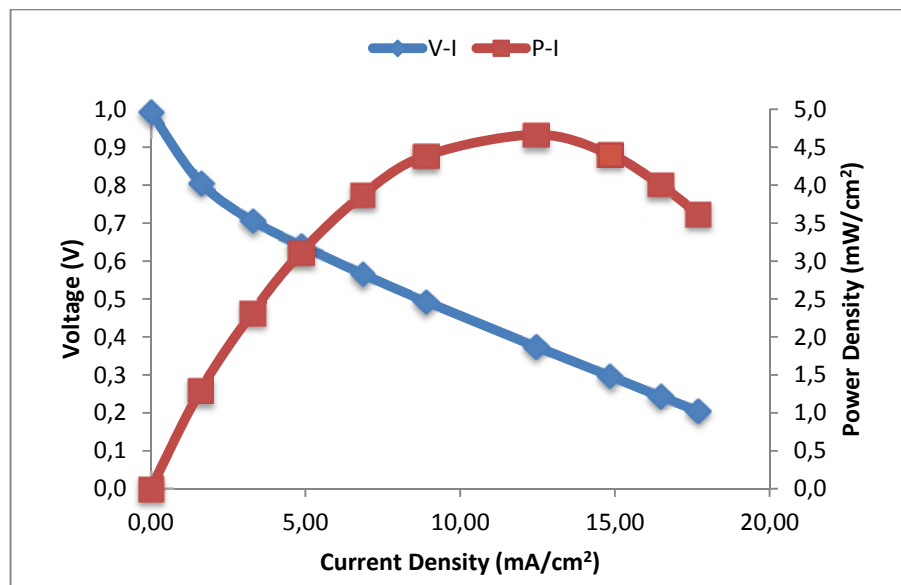
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.999	0.000	0.000
0.805	1.680	1.352
0.709	3.200	2.269
0.646	4.800	3.101
0.569	6.840	3.892
0.491	9.200	4.517
0.422	11.200	4.726
0.343	13.560	4.651
0.277	15.640	4.332
0.209	18.000	3.762



Universitas Indonesia

Lampiran 9. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada tekanan 0.2 Bar

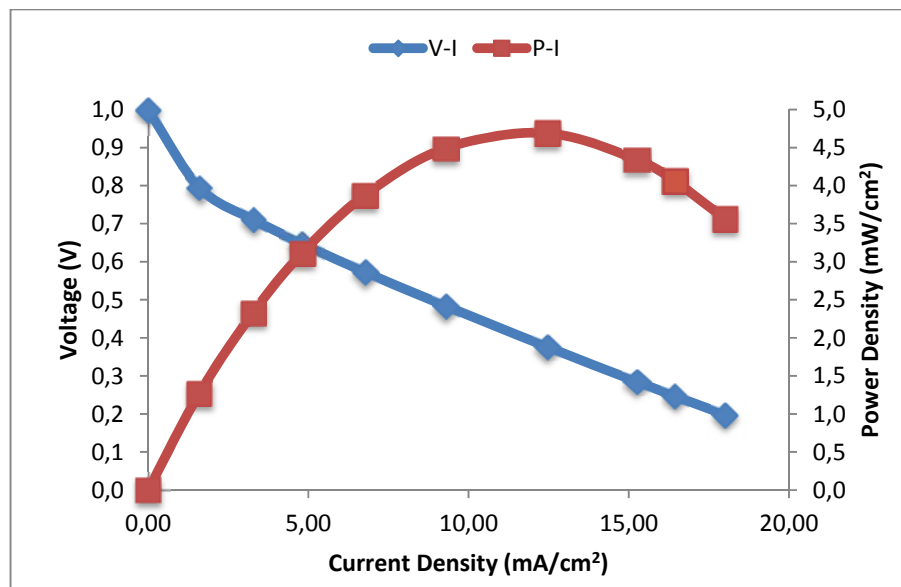
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.993	0.000	0.000
0.807	1.600	1.291
0.707	3.280	2.319
0.642	4.840	3.107
0.566	6.840	3.871
0.494	8.880	4.387
0.375	12.440	4.665
0.297	14.840	4.407
0.244	16.440	4.011
0.205	17.680	3.624



Universitas Indonesia

Lampiran 10. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada tekanan 0.3 Bar

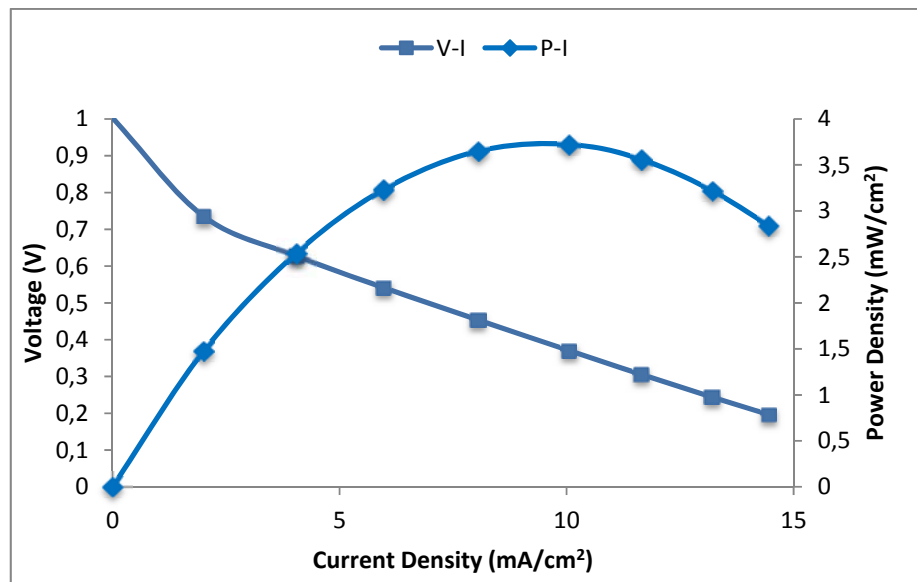
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
1.000	0.000	0.000
0.795	1.600	1.272
0.711	3.280	2.332
0.648	4.800	3.110
0.573	6.760	3.873
0.484	9.280	4.492
0.377	12.440	4.690
0.285	15.240	4.343
0.247	16.440	4.061
0.198	18.000	3.564



Universitas Indonesia

Lampiran 11. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada kecepatan alir gas hidrogen dan oksigen 50-50 mL/Menit

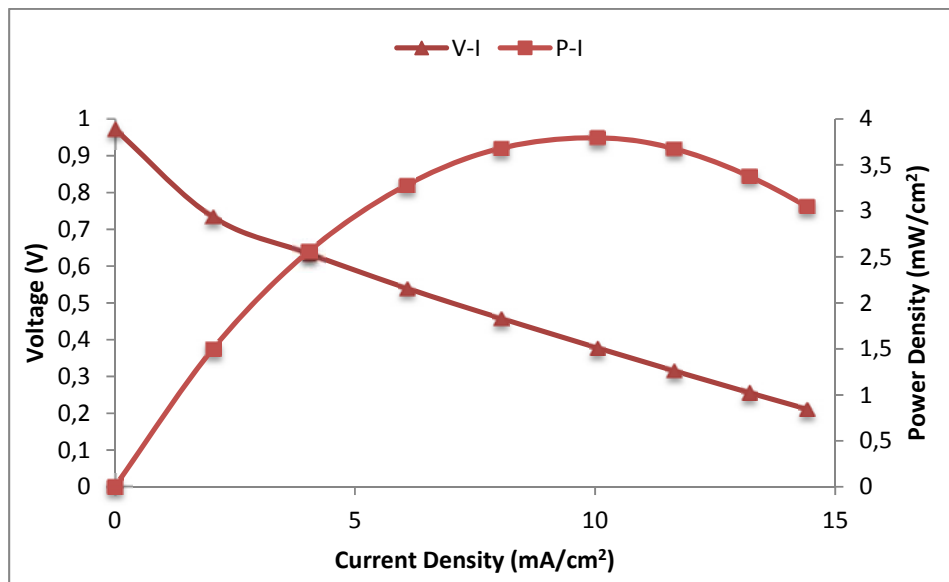
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
1.003	0.000	0.000
0.736	2.000	1.472
0.628	4.040	2.537
0.542	5.960	3.230
0.454	8.040	3.650
0.371	10.040	3.725
0.306	11.640	3.562
0.244	13.200	3.221
0.197	14.440	2.845



Universitas Indonesia

Lampiran 12. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada kecepatan alir gas hidrogen dan oksigen 100-50 mL/Menit

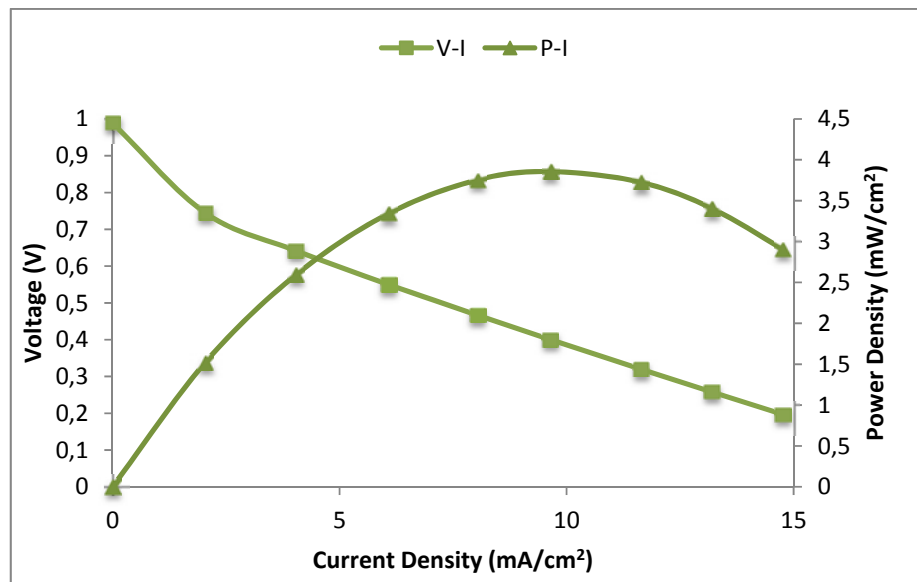
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.973	0.000	0.000
0.734	2.040	1.497
0.634	4.040	2.561
0.540	6.080	3.283
0.458	8.040	3.682
0.378	10.040	3.795
0.316	11.640	3.678
0.256	13.200	3.379
0.212	14.400	3.053



Universitas Indonesia

Lampiran 13. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada kecepatan alir gas hidrogen dan oksigen 100-100 mL/Menit

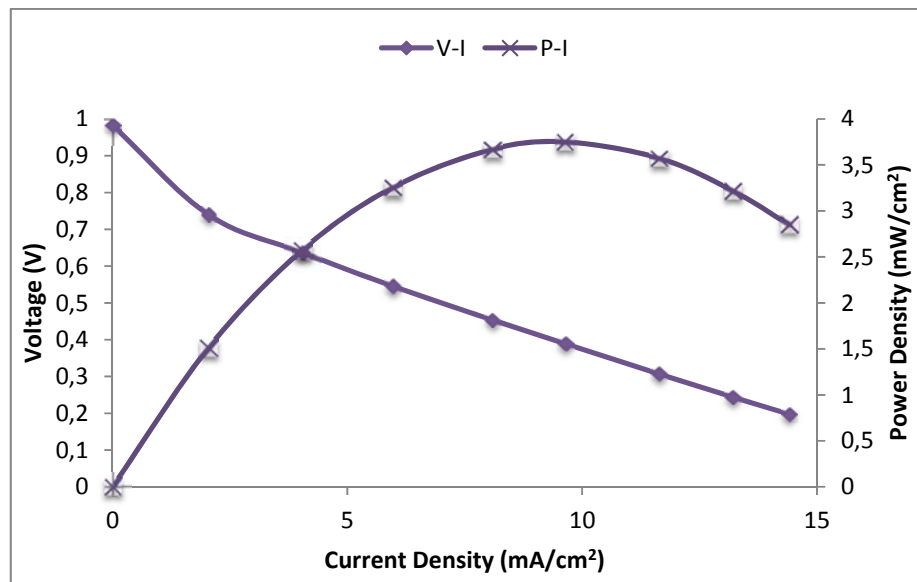
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.989	0.000	0.000
0.745	2.040	1.520
0.642	4.040	2.594
0.550	6.080	3.344
0.467	8.040	3.755
0.400	9.640	3.856
0.320	11.640	3.725
0.258	13.200	3.406
0.197	14.760	2.908



Universitas Indonesia

Lampiran 14. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada kecepatan alir gas hidrogen dan oksigen 150-100 mL/Menit

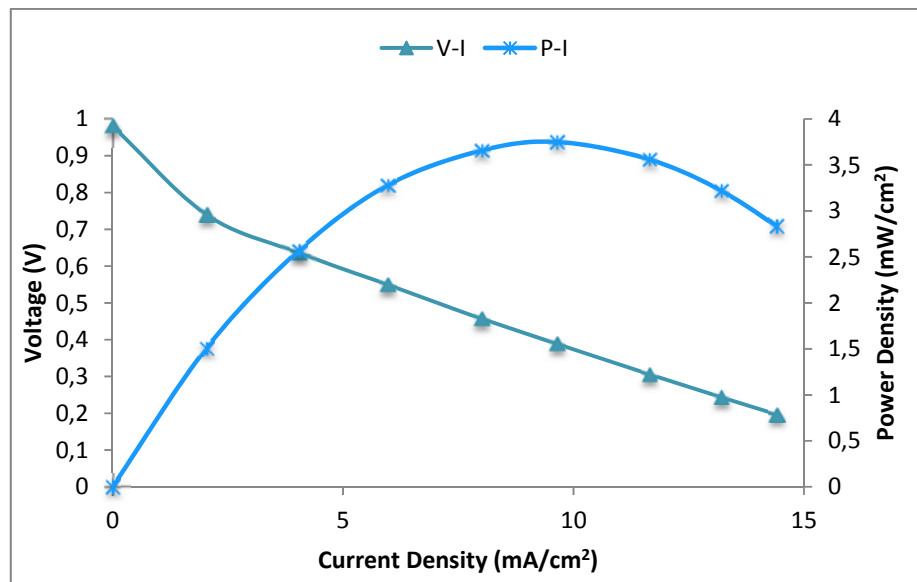
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.983	0.000	0.000
0.740	2.040	1.510
0.637	4.040	2.573
0.546	5.960	3.254
0.454	8.080	3.668
0.389	9.640	3.750
0.307	11.640	3.573
0.244	13.200	3.221
0.198	14.400	2.851



Universitas Indonesia

Lampiran 15. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC pada kecepatan alir gas hidrogen dan oksigen 150-150 mL/Menit

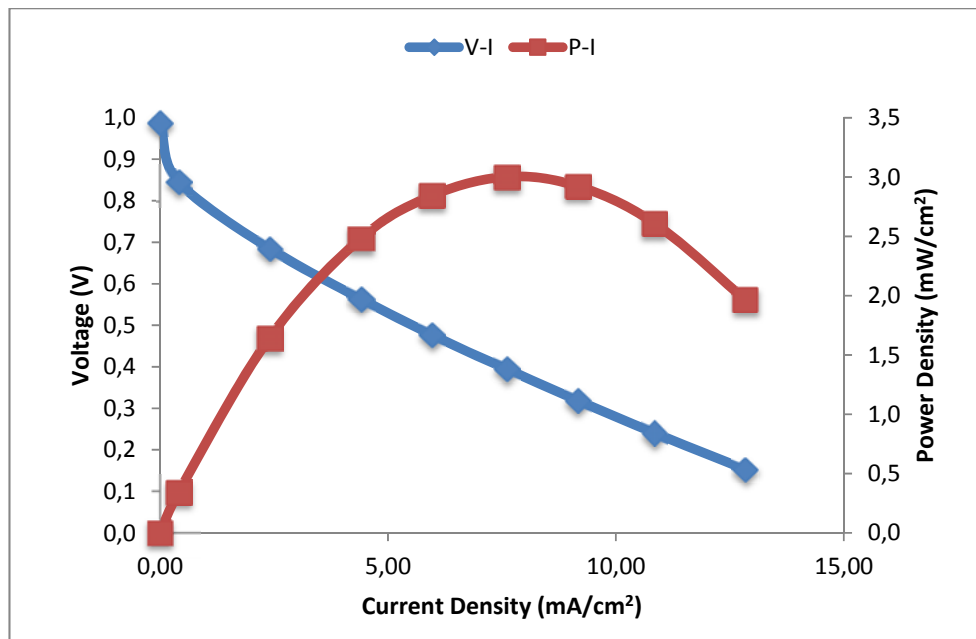
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.981	0.000	0.000
0.740	2.040	1.510
0.636	4.040	2.569
0.550	5.960	3.278
0.457	8.000	3.656
0.389	9.640	3.750
0.306	11.640	3.562
0.244	13.200	3.221
0.197	14.400	2.837



Universitas Indonesia

Lampiran 16. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt pada anoda dan katoda

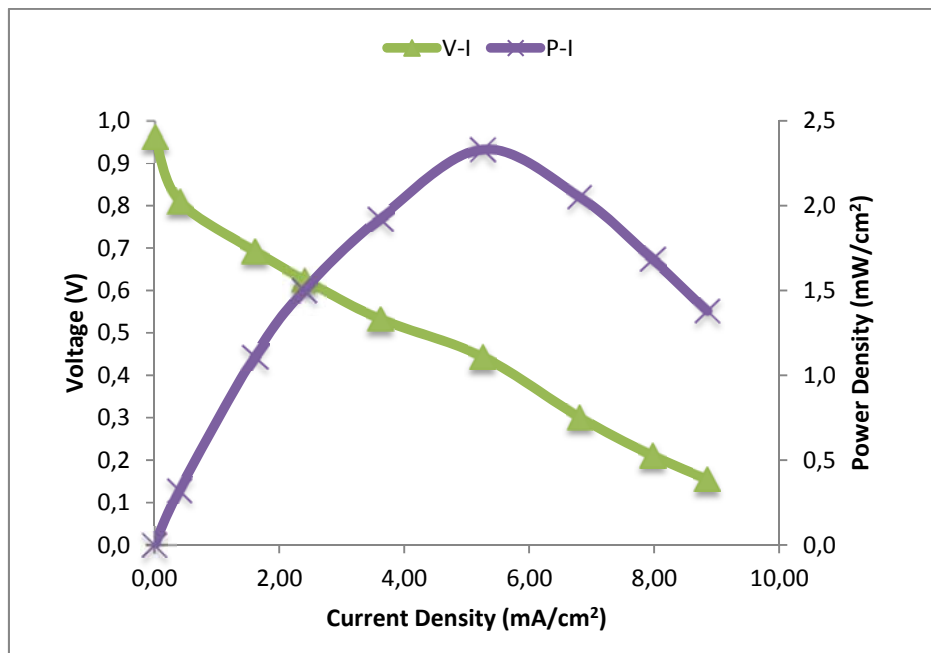
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.989	0.000	0.000
0.846	0.400	0.338
0.685	2.400	1.644
0.564	4.400	2.482
0.477	5.960	2.843
0.395	7.600	3.002
0.319	9.160	2.922
0.241	10.840	2.612
0.153	12.840	1.965



Universitas Indonesia

Lampiran 17. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt pada anoda dan Pt-Co pada katoda

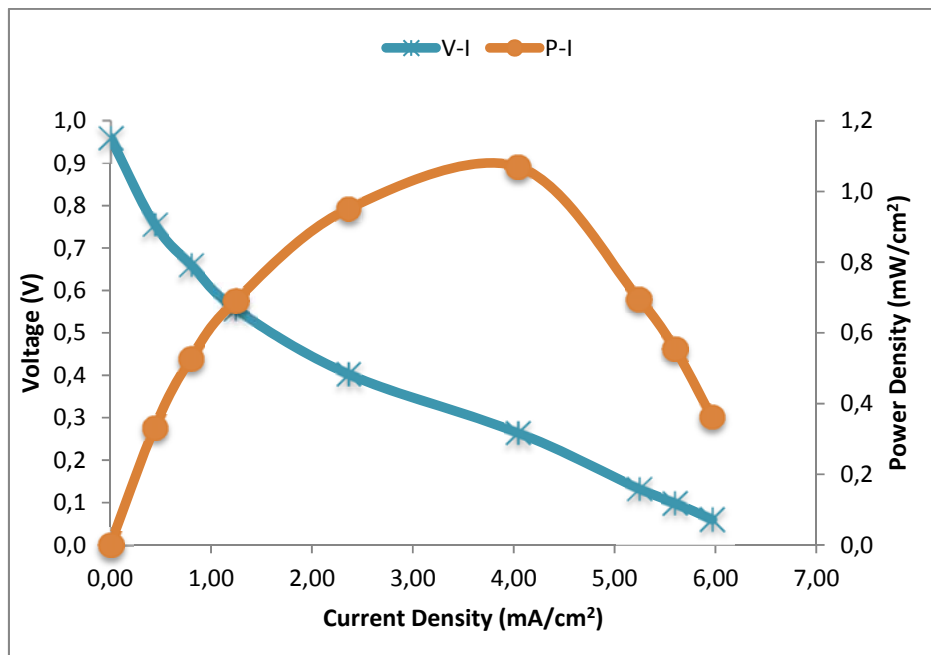
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.963	0.000	0.000
0.811	0.400	0.324
0.694	1.600	1.110
0.626	2.400	1.502
0.534	3.600	1.922
0.445	5.240	2.332
0.302	6.800	2.054
0.212	7.960	1.688
0.156	8.840	1.379



Universitas Indonesia

Lampiran 18. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt pada anoda dan Pt-Ni pada katoda

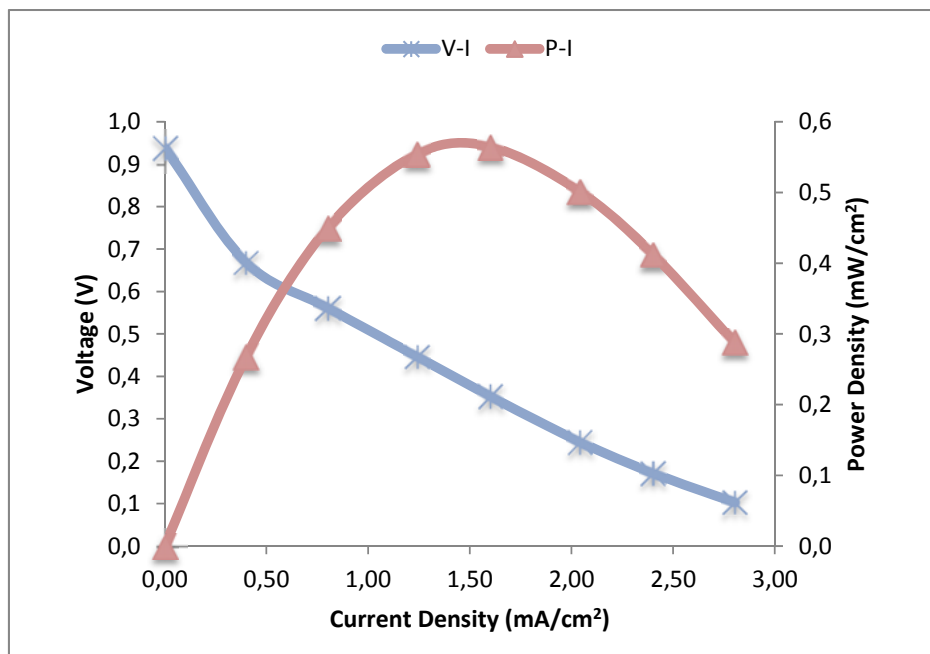
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.961	0.000	0.000
0.756	0.440	0.333
0.661	0.800	0.529
0.557	1.240	0.691
0.403	2.360	0.951
0.265	4.040	1.071
0.133	5.240	0.697
0.099	5.600	0.554
0.061	5.960	0.364



Universitas Indonesia

Lampiran 19. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt pada anoda dan Pt-Ru pada katoda

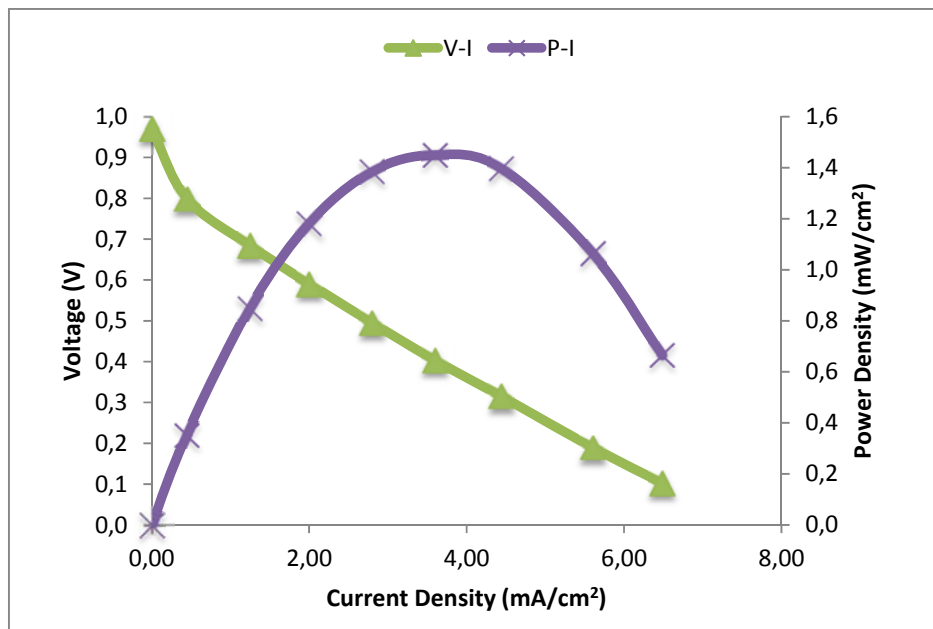
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.939	0.000	0.000
0.669	0.400	0.268
0.562	0.800	0.450
0.447	1.240	0.554
0.353	1.600	0.565
0.246	2.040	0.502
0.172	2.400	0.413
0.103	2.800	0.288



Universitas Indonesia

Lampiran 20. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt-Co pada anoda dan Pt pada katoda

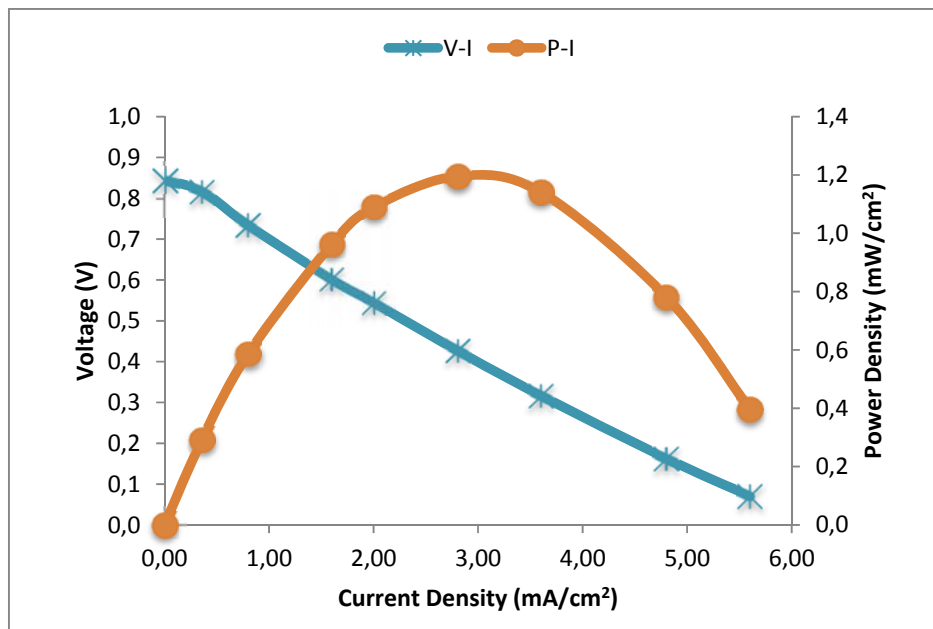
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.971	0.000	0.000
0.800	0.440	0.352
0.685	1.240	0.849
0.591	2.000	1.182
0.495	2.800	1.386
0.403	3.600	1.451
0.315	4.440	1.399
0.190	5.600	1.064
0.103	6.480	0.667



Universitas Indonesia

Lampiran 21. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt-Ni pada anoda dan Pt pada katoda

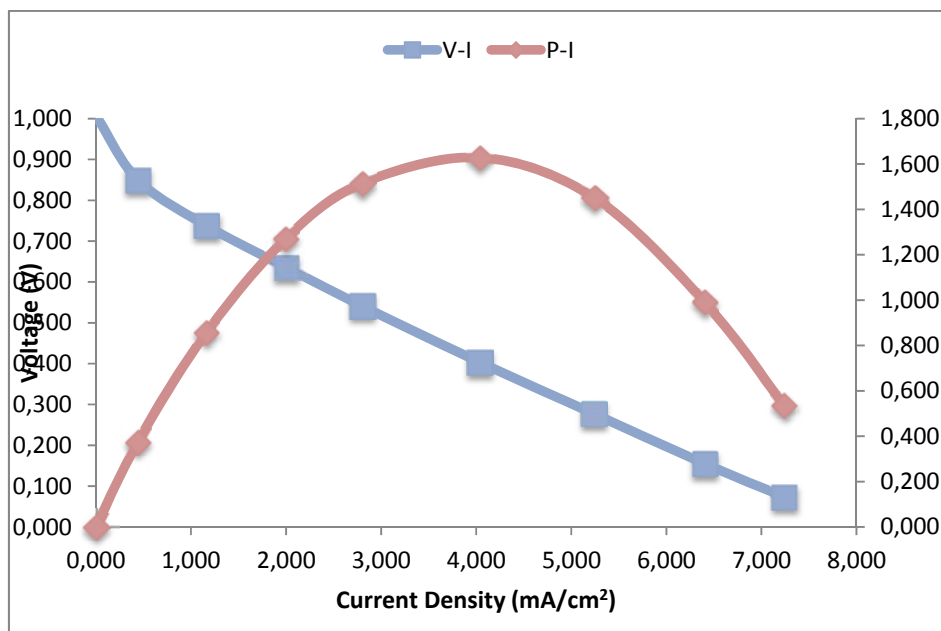
Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
0.845	0.000	0.000
0.817	0.360	0.294
0.734	0.800	0.587
0.602	1.600	0.963
0.545	2.000	1.090
0.427	2.800	1.196
0.317	3.600	1.141
0.163	4.800	0.782
0.071	5.600	0.398



Universitas Indonesia

Lampiran 22. Data pengamatan dan kurva polarisasi PEMFC dengan katalis Pt-Ru pada anoda dan Pt pada katoda

Beda Potensial (Volt)	Kepadatan Arus (mA/cm ²)	Kepadatan Daya (mW/cm ²)
1.008	0.000	0.000
0.850	0.440	0.374
0.738	1.160	0.856
0.636	2.000	1.272
0.541	2.800	1.515
0.403	4.040	1.628
0.277	5.240	1.451
0.155	6.400	0.992
0.074	7.240	0.536



Universitas Indonesia

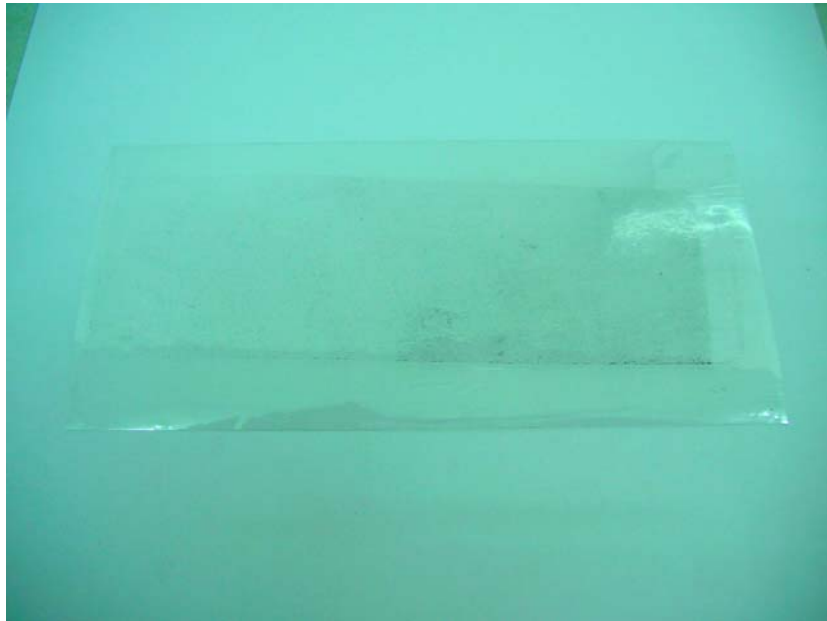
Lampiran 23. Gambar bahan-bahan yang digunakan



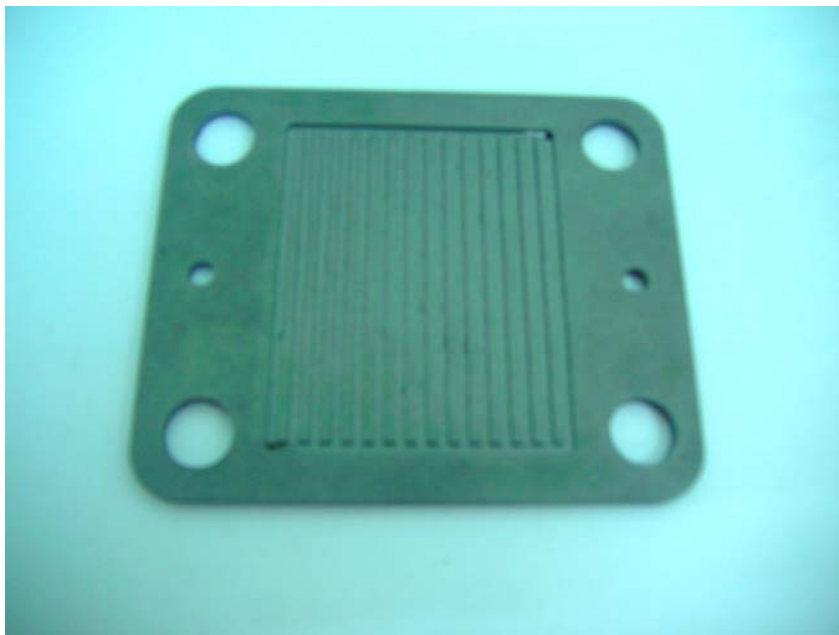
Katalis yang diperoleh secara komersil dari Etek Inc.

Kertas karbon yang siap untuk *dicoating*

Universitas Indonesia

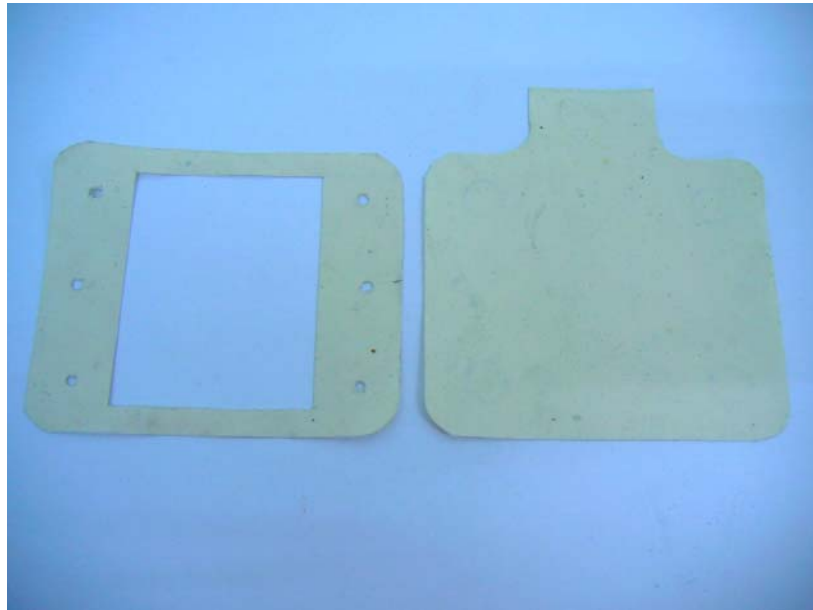


Polimer elektrolit membran Nafion yang diperoleh secara komersil dari DuPon.

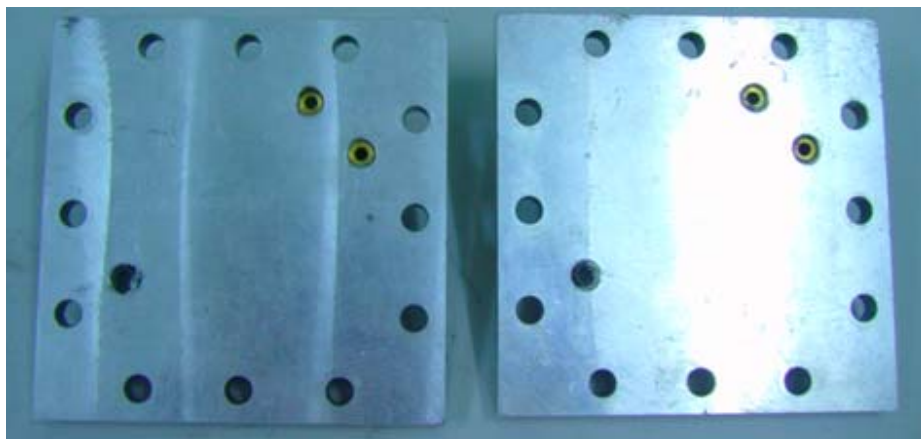


Graphite Bipolar Plate

Universitas Indonesia

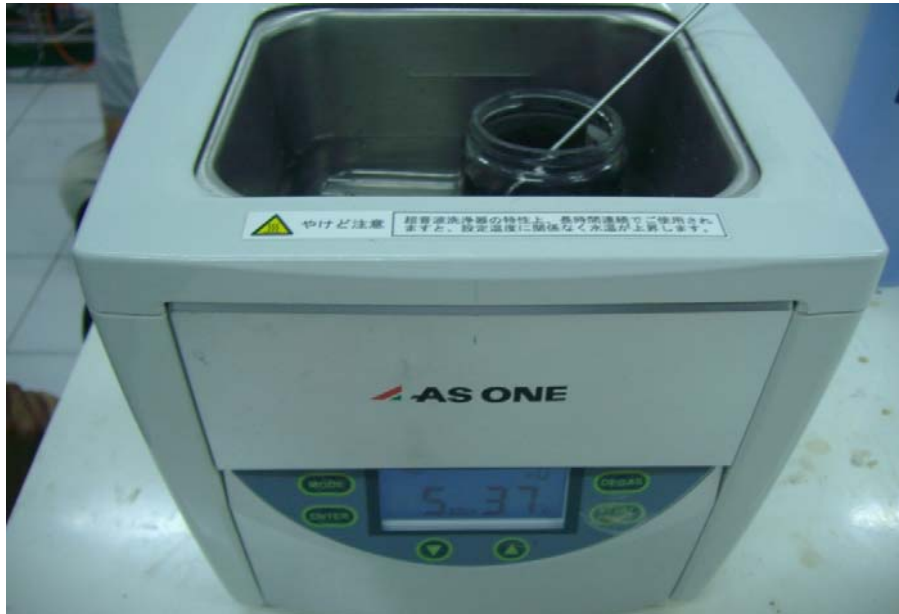


Fiber dan Silikon Gasket

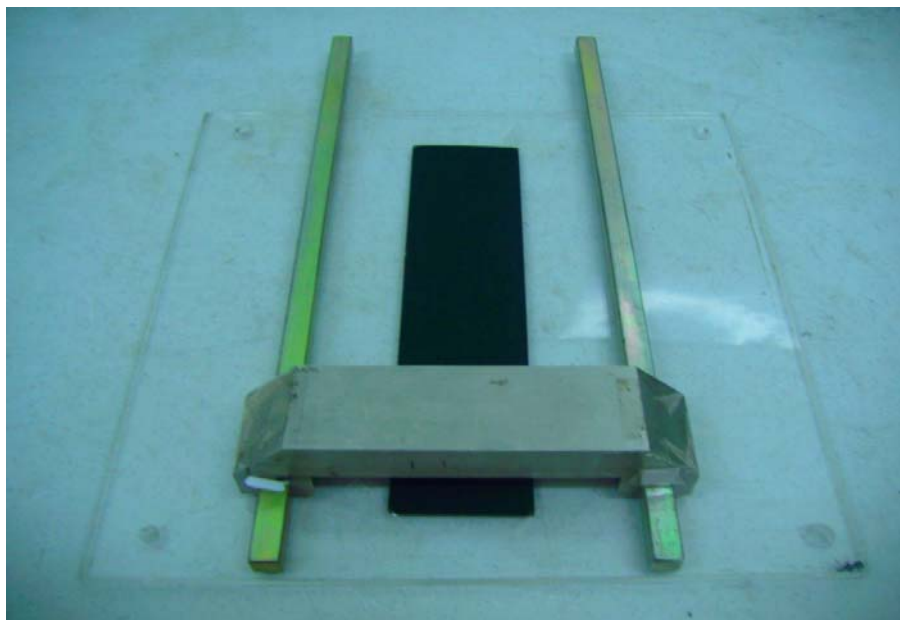


Stacking PEMFC

Lampiran 24. Gambar alat-alat yang digunakan



Sonikator



Alat Coating

Universitas Indonesia



Doctor Blade



Hot Plate

Universitas Indonesia



Hot Press

Lampiran 25. Gambar Sistem Pengujian dan pengukuran



Single stack PEMFC

Universitas Indonesia



Electronic Discharge Meter



Sistem pengujian dan pengukuran *single stack* PEMFC

Universitas Indonesia



Humidifier



Pressure Guage dan Katup



Flow Meter



Tabung penyimpanan gas reaktan

Universitas Indonesia

Lampiran 26. Publikasi Hasil Penelitian

Universitas Indonesia

