

**SIMULASI PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL
CELL (PEMFC) SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK
PERUMAHAN**

SKRIPSI

Oleh

Dhanar Dwi Kuncoro
04 03 03 028 4



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

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

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

SIMULASI PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK PERUMAHAN

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

Depok, Juni 2008

Dhanar Dwi Kuncoro

NPM 0403030284

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul:

SIMULASI PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK PERUMAHAN

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian skripsi.

Depok, Juni 2008

Dosen Pembimbing

Dr.Ir.Rudy Setiabudy.

NIP. 131 402 966

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena dengan berkat, rahmat dan bimbingan-Nya, penulis dapat menyelesaikan makalah skripsi yang berjudul “Simulasi Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Sebagai Pembangkit Listrik Perumahan”.

Skripsi ini juga tidak dapat berjalan dengan lancar tanpa dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr.Ir.Rudy Setiabudy, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan saran, bimbingan, pengarahan, dan masukan yang sangat membantu penulis untuk menyelesaikan makalah skripsi ini.
2. Bapak, ibu dan kakak saya yang telah memberikan dukungan baik secara moral maupun materiil.
3. Teman-teman jurusan Teknik Elektro angkatan 2003 yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian makalah skripsi ini.

Depok, Juni 2008

Penulis

ABSTRAK

Dhanar Dwi Kuncoro
NPM 04 03 03 0284
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
Dr.Ir.Rudy Setiabudy

SIMULASI PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK PERUMAHAN

ABSTRAK

Saat ini, Teknologi bahan bakar sel (*fuel cell*) telah berkembang dan diimplentasikan. Teknologi baru ini dapat memberikan daya listrik untuk perumahan, komersial dan pelanggan industri. Karena nilai efisiensi konversinya yang tinggi, kemudahan bahan bakar yang didapat, fleksibilitas untuk mengkombinasikan panas dan pembangkitnya, ramah lingkungan karena emisi gas buang yang rendah maka bahan bakar sel telah menjadi teknologi maju yang memiliki berbagai aplikasi pembangkit listrik yang variatif

Tiap jenis fuel cell memiliki segmentasi pasar tersendiri sesuai karakter yang dimilikinya. Hal ini berdasarkan berdaya yang mampu dihasilkan, konstruksi desain, kecepatan daya yang dihasilkan (start-up) dan suhu operasionalnya. Pada umumnya jenis fuel yang beroperasi pada suhu rendah (AFC, PEMFC) telah digunakan sumber energi listrik pada peralatan portabel, perumahan dan aplikasi transportasi. Sedangkan pada *carbonate* dan SOFC yang beroperasi temperatur tinggi banyak digunakan pada pembangkit yang cukup besar yang stasioner (10-50 MW).

Jenis bahan bakar sel yang paling matang dan berpotensi untuk pembangkit listrik perumahan (gedung) ialah Proton Exchange Membrane (PEM). Proses teknologinya baik dengan bahan bakar fosil atau nonfosil tetap masih mahal, meski demikian teknologi ini telah banyak digunakan dan terus berkembang.

Pada skripsi ini, karakteristik PEM disimulasikan menggunakan MATLAB versi 7.04. Program dirancang untuk melakukan simulasi pengiriman daya dengan berbagai variasi (3KW, 5KW dan 8KW) ke beban perumahan. Dan Hasil simulasi ini akan dianalisis karakteristiknya seperti penggunaan gas metan dan hidrogen, polarisasi, panas dan air yang dihasilkan, efisiensi dan daya yang dihasilkan dalam kondisi temperatur dan suhu yang berbeda-beda.

Kata kunci : Proton Exchange Membrane (PEM), bahan bakar sel, Fuel cell, Pembangkit Listrik, Perumahan, Simulasi, Matlab.

ABSTRACT

Dhanar Dwi Kuncoro
NPM 0403030284
Departemen Teknik Elektro

Counsellor
Dr. Ir. Rudy Setiabudy

SIMULATION OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) AS RESIDENTIAL ELECTRICAL POWER GENERATION

ABSTRACT

Nowadays, Fuel Cell Technology has become largely developed and implemented. This new technology is suitable for producing electrical power for residential, commercial, and industrial customers. Because of high fuel conversion efficiency, fuel flexibility, combined heat and power generation flexibility, friendly siting characteristics, negligible environmental emissions and lower carbon dioxide emissions, fuel cells are considered at the top of the desirable technologies for a broad spectrum of power generation applications.

Each of the various fuel cell types can be configured in a system focusing on the market segments that match its characteristics most favorably. Because of their lightweight construction, compactness, and quick start-up potential, the low-temperature fuel cells are being considered for portable, residential power, and transportation applications (AFC, PEMFC). Whereas, the higher temperature carbonate and solid oxide fuel cells which offer simpler and higher efficiency plants are focusing on the stationary power generation applications in the near term and large (10–50MW) power plants in the long range.

The most mature and potential candidate for residential and stationary applications among types of fuel cell is the Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell. The processing this technology either from fossil or non-fossil resources itself still expensive, however, it is becoming largely known and developed.

In this bachelor's thesis, characteristic PEMFC is simulated using MATLAB 7.04 version. The program is designed to deliver in many option power (3KW, 5KW and 8 KW) to residential load. its characteristic such as methane and hydrogen consumption, polarization, heat and water production, efficiency and output power on different temperature and pressure.

Keywords: Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), Residential, Electrical, Power Generation, Simulation, Matlab.

DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
DAFTAR SINGKATAN	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
I. LATAR BELAKANG	1
II. PERUMUSAN MASALAH	2
III. TUJUAN PENELITIAN	2
IV. BATASAN MASALAH	2
V. METODOLOGI PENELITIAN	2
VI. SISTEMATIKA PENULISAN	3
BAB II	4
DASAR TEORI FUEL CELL	4
2.1 KRISIS ENERGI DUNIA	4
2.2 KARAKTERISTIK UMUM FUEL CELL (SEL BAHAN BAKAR)	5
2.2.1 Komponen Utama Sistem Fuel Cell	7
2.2.2 Cara Kerja <i>Fuel Cell</i>	9
2.2.3 Karakteristik Umum Performa Fuel Cell	10
2.3 JENIS-JENIS FUEL CELL	13
2.3.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell	14
2.3.2 Alkaline Fuel Cell	19

2.3.3 Phosphoric Acid Fuel Cell	20
2.3.4 Carbonate Fuel Cell	21
2.3.5 Solid Oxide Fuel Cell	21
2.4 SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK PADA FUEL CELL	22
2.4.1 Penerapan Pembangkit Listrik PEMFC Untuk Perumahan.	23
2.4.2 Perbandingan Investasi Antara Pembangkit Listrik Di Indonesia Dengan Pembangkit listrik Fuel Cell	27
2.4.2 Biaya Pembangkitan	29
BAB III	31
PERANCANGAN PROGRAM SIMULASI PEMFC	31
3.1 ASUMSI RANCANGAN SIMULASI	31
3.2 PERSAMAAN ELEKTROKIMIA DALAM SIMULASI	32
3.2.1 Persamaan Nernst Untuk Tegangan Reversibel Fuel Cell	32
3.2.2 Persamaan Butler-Volmer	35
3.2.3 Ohmic Losses	36
3.2.4 Mass-Transport Losses	36
3.2.5 Tegangan, arus dan daya yang keluar	36
3.2.6 Efisiensi	37
3.2.7 Produksi air	37
3.2.8 Panas yang dihasilkan	37
3.2.9 Penggunaan Hidrogen dan Metane	37
3.3 PERANCANGAN ALGORITMA SIMULASI KARAKTERISTIK PEMFC	38
3.3.1 Diagram Alir program	39
3.3.2 Pembuatan Graphic User Interface	41
3.3.3 Mensimulasikan Program	45
BAB IV	46
ANALISIS HASIL SIMULASI	46
4.1 ANALISIS KURVA PENGGUNAAN GAS METAN DAN HIDROGEN	47
4.2 ANALISIS KURVA POLARISASI	53
4.3 ANALISIS KURVA DAYA	55

4.4 ANALISIS KURVA EFISIENSI	57
4.5 ANALISIS KURVA KALOR DAN AIR YANG DIHASILKAN	58
BAB V KESIMPULAN	61
DAFTAR ACUAN	62
DAFTAR PUSTAKA	63



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skema sederhana dan kerja <i>fuel cell</i>	8
Gambar 2.2 Proses reaksi kimia yang terjadi pada berbagai jenis <i>fuel cell</i>	9
Gambar 2. 3 Grafik hubungan tegangan ideal dengan temperatur	10
Gambar 2. 4 Kurva polarisasi <i>fuel cell</i>	11
Gambar 2.5 Segmentasi generator fuel cell yang ada dipasaran (2001)	13
Gambar 2.6 Skematik PEFC	14
Gambar 2.7 Membrane Electrode Assembly (MEA)	16
Gambar 2.8 <i>Stack PEM</i>	16
Gambar 2.10 Perbandingan perbedaan tekanan oksigen (O ₂) terhadap kinerja PEM	17
Gambar 2.11.Sistem Pembangkit Listrik Fuel Cell	22
Gambar 2.12 Bagan alur dari pembangkit listrik PEMFC	25
Gambar 2.13 Contoh model sistem pembangkit listrik perumahan yang disatukan dengan sistem listrik konvensional	26
Gambar 2.14 Contoh model Tabung gas hidrogen dengan tekanan maksimum 5000 psi dan kapasitas 12.8 Kg	26
Gambar 3.1 Diagram alir simulasi PEMFC.	40
Gambar 3.2 Tampilan awal	41
Gambar 3.3 GUI Simulasi PEMFC	42
Gambar 3.4 property inspector.	43
Gambar 3.5 M-file editor.	43

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Jenis dan efek dari tiap bahan bakar kepada fuel cell	6
Tabel 2.2 Persamaan tegangan Nernst	10
Tabel 2.3 Tegangan ideal tiap jenis fuel sebagai fungsi temperatur ditiap jenis <i>fuel cell</i>	11
Tabel 2. 4 Biaya Investasi, Biaya Tetap dan Tak Tetap Operasi dan Perawatan, Biaya Bahan Bakar, dan Umur Teknis (<i>life time</i>) pembangkit listrik di Indonesia	28
Tabel 2.5 Tabel investasi Fuel cell	28
Tabel 3.1 Nilai konstanta data hasil penelitian dan asumsi	38
Tabel 4.1 Rata-rata penggunaan gas metan dan hidrogen untuk mencapai daya 3,5 KW serta 5,5 KW	47
Tabel 4.2 Hasil pendekatan perhitungan penggunaan gas hidrogen dalam 1 bulan	47
Tabel 4.3 Hasil perhitungan biaya variabel (<i>variable cost</i>) pembangkit listrik PEMFC	47
Tabel 4.4 Penghitungan faktor kapasitas dengan sampel beban pada rumah tangga dengan daya 1300 VA (R1)	47
Tabel 4.5 Hasil perhitungan biaya tetap (<i>fix cost</i>) pembangkit listrik PEMFC	48
Tabel 4.6 Hasil perhitungan total biaya pembangkitan listrik PEMFC	48
Tabel 4.7 Biaya pengeluaran gas hidrogen untuk produksi listrik PEMFC pada rumah tangga dalam 1 bulan	48
Tabel 4.8 Hasil pendekatan perhitungan air yang dihasilkan PEMFC	60

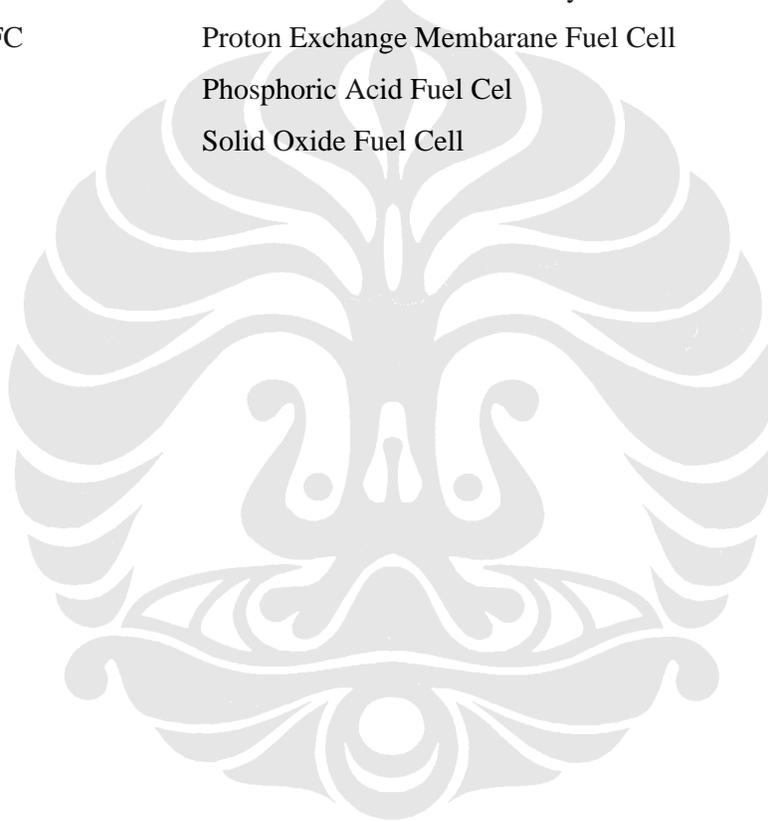
DAFTAR LAMPIRAN

		Halaman
Lampiran 1	Kurva hasil simulasi	64
Lampiran 2	Program Matlab	88



DAFTAR SINGKATAN

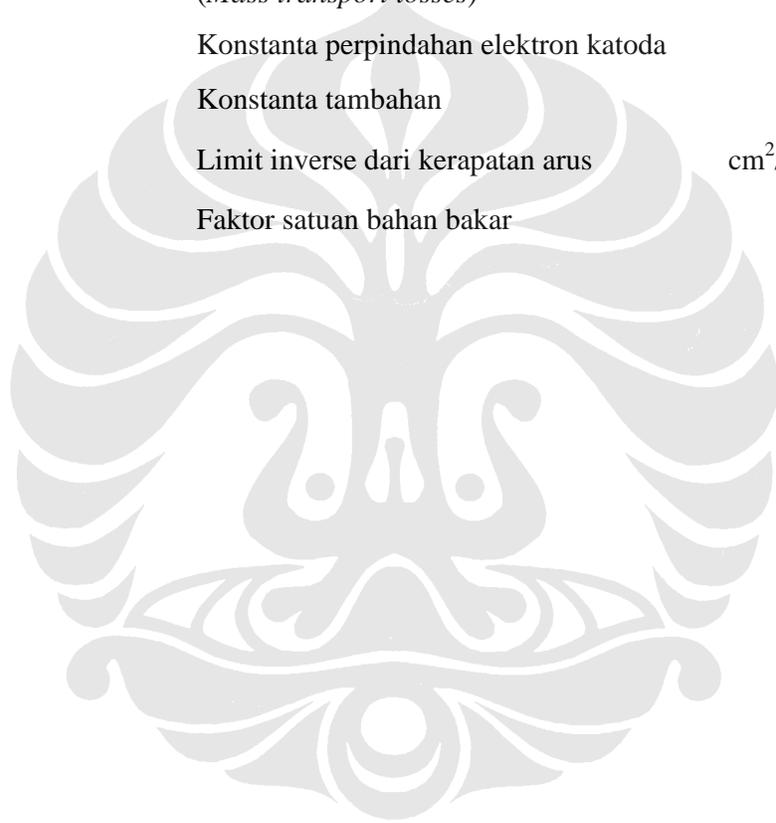
AFC	Alkaline Fuel Cell
CFC	Carbonate Fuel Cell
HHV	Higher Heating Value
LHV	Lower Heating Value
MEA	Membrane Electrode Assembly
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell



DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Dimensi
A	Luas area fuel cell yang aktif	cm ²
b	Konstanta kemiringan tafel	
E	Tegangan keluaran reversibel	V
E _{nernst}	Tegangan nernst	V
E ^o	Tegangan ideal (1 atm, 25°C)	V
F	Konstanta Faraday (96,485)	C/mol
G	Energi bebas Gibbs	J
$\Delta(g_f)$	Perubahan energi bebas Gibbs	J
H	Entalpi	
HHV	Higher Heating Value (1,48)	V
i	Kerapatan arus	mA/cm ²
i ₀	Pertukaran kerapatan arus	mA/cm ²
I	Arus yang keluar dari fuel cell	A
K	Konstanta yang digunakan pada Mass transport loss	
K _{hyd}	Konstanta penggunaan hidrogen	
n	Jumlah fuel cell	
P _{H2}	Tekanan parsial hidrogen	atm
P _{O2}	Tekanan parsial oksigen	atm
P _{air}	Tekanan udara	atm
P _{FC}	Daya keluaran dari fuel cell	W
P	Tekanan	atm
Q _{cell}	Panas yang dihasilkan fuel cell	W
R _{internal}	Hambatan	Ω cm ²
R	Konstanta gas (8,1345)	J/mol/K
S	Entropi	
T	Temperatur	K
T _c	Temperatur	C

V	Volume	cm^3
V_{FC}	Tegangan akhir fuel cell	V
V_{Act}	Tegangan aktivasi (disaat <i>activation polarization</i>)	V
V_{Ohmic}	Tegangan Ohmic (disaat <i>Ohmic polarization</i>)	V
V_{Mt}	Tegangan akibat perpindahan (<i>Mass transport losses</i>)	V
α	Konstanta perpindahan elektron katoda	
α_1	Konstanta tambahan	
β	Limit inverse dari kerapatan arus	cm^2/A
μ_f	Faktor satuan bahan bakar	



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Energi merupakan suatu kebutuhan dasar dari kehidupan masyarakat modern. Karena tanpanya, masyarakat akan sulit melakukan kegiatan. Akan tetapi krisis energi kini menjadi suatu permasalahan yang penting didunia, termasuk Indonesia. Hal ini dikarenakan semakin berkurangnya cadangan energi dunia yang sebagian besar berasal dari bahan fosil seperti: minyak bumi, batubara dan gas bumi. Dalam hal ini juga termasuk energi listrik yang juga mengalami krisis karena sebagian besar pembangkit listrik di Indonesia masih menggunakan sumber energi yang tak terbaharukan (bahan fosil).

Beberapa alternatif energi yang telah banyak di aplikasikan misalnya ; photovoltaic, angin, biomasa, dan sebagainya terbukti mempunyai prospek yang bagus, namun demikian masih perlu ditingkatkan efisiensi dan energi yang dapat dihasilkan. Demikian pula halnya energi nuklir, meskipun dapat menghasilkan energi yang tinggi dan telah banyak ahlinya yang mampu mengontrol reaksinya, namun belum ada satu pun negara maju di dunia yang tidak dipusingkan oleh masalah penyimpanan limbahnya dan efek radiasinya yang berkepanjangan.

Penggunaan teknologi sel bahan bakar (*fuel cells*) merupakan jembatan dari permasalahan diatas yang merupakan teknologi energi terbarukan yang bersih, aman dan mempunyai kerapatan serta efisiensi energi yang tinggi. Pembangkit listrik berbasis Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) sangatlah memungkinkan sebagai salah satu sumber penyuplai daya di daerah perumahan. Ada 2 jenis pembangkit yang mungkin dibuat berdasarkan faktor jaringan yaitu pembangkit mandiri dan parallel.

Dari beberapa jenis sel bahan bakar yang ada, Proton Exchange Membrane (PEM) merupakan jenis sel bahan bakar yang cocok untuk aplikasi pembangkit listrik yang mandiri perumahan dan penggunaan yang stationer. Karena bekerja pada suhu rendah , tingginya daya yang dihasilkan , hasilnya cepat dan efisien.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Penggunaan PEMFC sebagai pembangkit listrik di kawasan perumahan dan gedung kini semakin meningkat di beberapa maju. Kinerja PEMFC begitu juga *fuel cell* jenis lain selain dipengaruhi oleh jenis bahan elektrolit, sel, elektroda dan perangkat pembentuk lainnya, juga sangat dipengaruhi oleh pengaturan suhu dan tekanan yang ada pada sistem.

Pada skripsi ini akan dilakukan simulasi karakteristik pembangkit listrik perumahan yang berbasis PEMFC dan pengaruh tekanan serta suhu terhadap karakteristik pembangkit ini dengan menggunakan *software* MATLAB versi 7.04.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari skripsi ini ini adalah untuk menganalisis karakteristik kerja dari simulasi pembangkit listrik perumahan berbasis PEMFC terhadap pengaruh suhu dan tekanan. Dan untuk mendapatkan harga listrik yang dapat dihasilkan oleh PEMFC.

1.4 BATASAN MASALAH

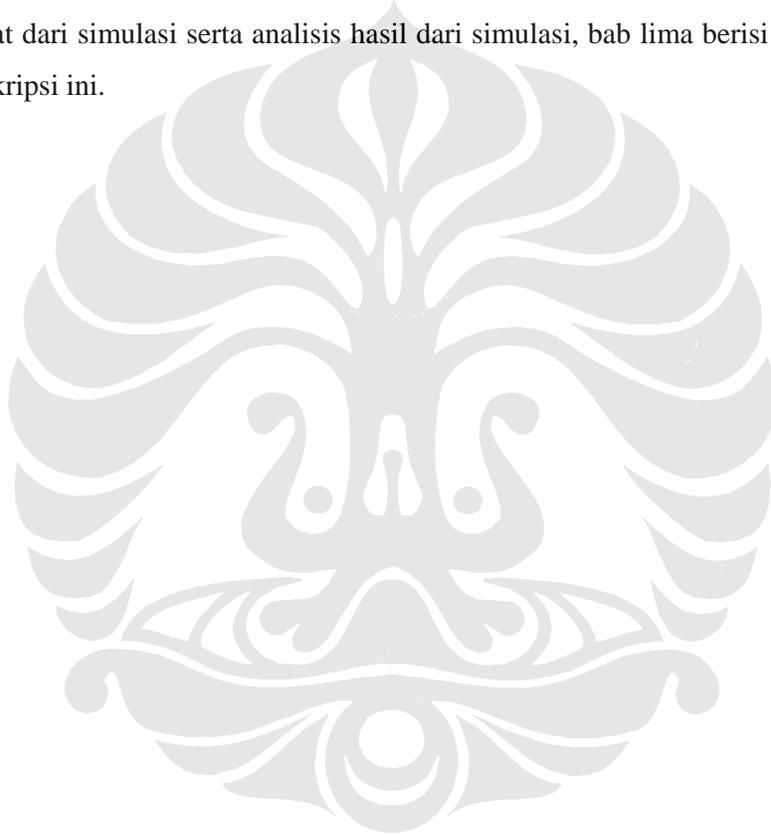
Pembahasan pada skripsi ini dibatasi pada simulasi untuk pembangkit listrik mandiri jenis PEMFC untuk perumahan, pengaturan suhu (60°C - 80°C) dan tekanan udara sistem (1 atm-3 atm) yang merata pada sistem, kapasitas daya (3 kW dan 5 kW).

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian yang pada skripsi ini dilakukan melalui studi literatur, perancangan pembuatan pemrograman, GUI (*Graphical User Interfaces*) dan analisis hasil simulasi

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Bab satu merupakan pengantar untuk bab-bab berikutnya, dimana dibahas mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penelitian, bab dua membahas mengenai teori dasar dari fuel cell secara umum, karakteristik kerjanya dan jenis-jenisnya khususnya PEMFC, aplikasi PEMFC sebagai pembangkit, perbandingan investasinya dengan pembangkit konvensional bab ketiga perancangan simulasi pembangkit listrik PEMFC untuk perumahan, bab empat membahas hasil yang didapat dari simulasi serta analisis hasil dari simulasi, bab lima berisi kesimpulan dari skripsi ini.



BAB II

DASAR TEORI FUEL CELL

2.1 KRISIS ENERGI DUNIA

Dunia telah mengalami krisis energi yang sangat besar pada satu sisi, sementara disisi lain kebutuhan akan energi yang ramah lingkungan juga mutlak dibutuhkan. Diantara kebutuhan energi yang mendasar dalam masyarakat yang berteknologi ialah energi listrik. Selama ini energi listrik didunia banyak menggunakan sumber energi atau bahan bakar yang tak terbarukan seperti batubara, minyak bumi dan gas alam, yang cadangannya didunia semakin menipis. Belum lagi ditambah dengan meningkatnya harga minyak dunia yang kini telah melampaui \$ 130 per barrel, oleh karenanya dibutuhkan energi alternatif yang sebanding atau bahkan lebih baik, seperti telah diaplikasikan di beberapa negara maju. Pembangkit listrik bertenaga nuklir kini di negara maju telah berkembang akan tetapi sayangnya hingga hari ini nuklir merupakan energi yang paling berbahaya dan tinggi resikonya bukannya hanya untuk negara tersebut tapi juga ancaman bagi seluruh mahluk hidup di dunia.

Para peneliti terus berupaya menemukan dan mengembangkan energi alternatif yang memiliki efisiensi tinggi, ramah lingkungan serta memiliki respon yang tinggi pula. Dari sekian alternatif energi yang telah muncul, maka PEMFC (Proton Exchange Membrane fuel cell) ialah salah satu solusi terbaik sebagai pembangkit listrik alternatif.

Sebagai tambahan, menurut penelitian yang telah dilakukan di Badan Pengkajian Dan Penerapan Teknologi (BPPT) tentang PEMFC dengan kapasitas 500 Watt pada tahun 2003. Didapatkan hasil bahwa dengan menggunakan pembebanan mendekati 500 Watt, harga listrik/kWh-nya adalah Rp.18.805,92/kWh. Dengan menggunakan pembebanan rata-rata 248 Watt, harga listrik/kWhnya adalah Rp.20.322,54/ kWh. Meski memiliki kekurangan dengan harga listrik yang tinggi dibanding listrik yang dijual PLN saat ini, karena ini riset awal di Indonesia, tetapi ini membuktikan bahwa potensi perkembangan PEMFC di Indonesia masih besar.

2.2 KARAKTERISTIK UMUM FUEL CELL (SEL BAHAN BAKAR)

Fuel cell ialah alat konversi elektrokimia yang berfungsi mengubah energi kimia *fuel* (bahan bakar) secara kontinu menjadi energi listrik. *Fuel cell* memiliki persamaan dengan baterai yaitu proses yang terjadi elektrokimia dan sama-sama menghasilkan listrik arus searah (DC), tetapi pada pembangkit listrik *fuel cell* biasanya akan ditambahkan inverter agar menjadi arus bolak-balik (AC) sehingga dapat disesuaikan dengan sistem listrik yang telah ada. Tetapi *fuel cell* tetap memiliki perbedaan mendasar dengan baterai.

Perbedaan mendasar antara *fuel cell* dan baterai ialah sifat kontinuitas dari energi yang diberikan. Pada *fuel cell* sumber energi biasanya diberikan secara kontinu dari sumber diluar sistem contoh hidrogen dan oksigen. Sedangkan pada baterai, bahan bakarnya sudah berpadu jadi satu kesatuan, jika energinya habis maka perlu di ganti atau diisi kembali (*recharged*) [4].

Keunggulan *fuel cell* dibandingkan dengan pembangkit listrik jenis lain karena beberapa hal antara lain: dapat menggunakan bahan bakar dari selain bahan bakar fosil / bahan bakar lebih variatif (gas metan, etanol dan lain-lain), konversi energi yang lebih sempurna (efisien tinggi, panas buangan dapat digunakan kembali), ramah lingkungan (Emisi rendah, tidak berisik, hasil buangan tidak berbahaya contoh air), dapat ditempatkan dimana saja sesuai kebutuhan, ukuran yang fleksibel, cukup tahan lama dengan tingkat kehandalan tinggi (selama bahan bakar diberikan) dan digunakan untuk banyak aplikasi (peralatan elektronika, kendaraan, antariksa, pembangkit listrik besar) [2].

Sementara ini kekurangannya belum ada harga standar dipasaran, belum banyak industri yang menggunakannya dan infrastruktur yang belum maksimal mendukung [2].

Pada *fuel cell* yang ada ialah reaksi elektrokimia dari bahan bakar (hidrogen) dan oksidan (oksigen) tanpa ada reaksi konvensional pembakaran. Tiap unit *fuel cell* terdiri atas bahan elektrolit yang diapit antara anoda dan katoda (2 elektroda). Kebanyakan bahan bakar yang dipakai ialah hidrogen baik yang berasal dari bahan bakar fosil atau tidak. Sedangkan oksidan yang dipakai berasal dari udara bebas yaitu oksigen.

Elektrolit yang berguna sebagai penghantar internal ion dapat berupa ion positif / kation atau negatif / anion. Kerjanya ditentukan oleh pengaturan temperatur. Kini fuel yang dahulu dibuat telah berkembang menjadi beberapa jenis seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Pembagian tipenya berdasarkan reaksi elektrokimia elektroda, ion yang dipindahkan dan pengaturan suhu.

Ada polymer eletrolyte / Proton Exchange membrane (PEM) dan phosphoric acid fuel cell (PAFC) yang menggunakan ion H^+ (cation) untuk dipindahkan dari anoda ke katoda yang menghasilkan air. Sementara alkaline (AFC), Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) dan Solid oxide fuel cell (SOFC) menggunakan ion negatif (anion) dari katoda ke anoda yang menghasilkan buangan berupa air pada elektorda anoda. Pengaturan suhu pada cell secara langsung mengatur hasil karaktersitik kinerja

Seluruh reaksi fuel cell membutuhkan hidrogen akan tetapi hidrogen murni yang ada biasanya diambil dari pengolahan bahan lain, yang diolah pada bagian reformer (alat pengkorversi) [2].

Tiap jenis gas memberikan efek tersendiri pada performa tiap jenis fuel cell . semua itu tergantung dari jenisnya terkadang ada yang berfungsi sebagai bahan bakar tetapi yang lain memberikan efek buruk yaitu membuat gas lembab atau lambat reaksinya, bahkan menjadikan cair dan menimbulkan gas racun. Hal dapat dilihat pada tabel 2.1

Fuel Constituents	PEM	AFC	PAFC	Carbonate	SOFC
H_2	Fuel	Fuel	Fuel	Fuel	Fuel
CO	Poison	Poison	Poison (>0.5%)	Fuel	Fuel
CH_4	Diluent	Diluent	Diluent	Fuel ^a	Fuel ^a
CO_2	Diluent	Poison	Diluent	Diluent	Diluent
N_2	Diluent	Diluent	Diluent	Diluent	Diluent
S as (H_2S & COS)	Poison	Poison	Poison (>50 ppm)	Poison	Poison
NH_3	Poison	Inert	Poison	Fuel	No Information

^a A fuel in the internal reforming fuel cells and diluent in non-internal reforming cells.

Tabel 2.1 Jenis dan efek dari tiap bahan bakar kepada fuel cell [2]

Hidrogen murni yang didapat biasanya berasal dari proses konversi dari bahan lain. Proses konversi ini secara umum ialah proses endotermik dan membutuhkan katalis. Reformer (alat pengubah) merupakan tempat terjadinya

proses secara luas dari bahan bakar hidrokarbon menjadi hidrogen. Reaksi ini membutuhkan uap dan panas, yang juga dibutuhkan pada produk reaksi fuel cell.

Reformer biasanya bekerja pada suhu / temperatur yang sangat tinggi dan lebih tinggi dari fuel cell. Sebagai contoh, perubahan metan menjadi hidrogen membutuhkan 800⁰C. perbedaan pengoperasian temperatur pada tiap jenis fuel cell menyebabkan variasi yang signifikan pada konfigurasi pembangkit listrik untuk mengakomodasi fuel cell processor.

Penggunaan kinerja temperatur yang rendah seperti pada PEMFC dan AFC membutuhkan sumber energi temperatur yang yang lebih besar untuk menyokong pembangkit uap dan reformer. Pada PAFC yang menggunakan temperatur sedang, dapat menggunakan panas buangan pembangkitnya untuk digunakan kembali pada bagian reformer, tetapi masih membutuhkan temperatur yang lebih tinggi untuk bagian itu.

Sedangkan pada jenis penggunaan temperatur yang tinggi yaitu pada Solid oxide fuel cell (SOFC) dan Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) dioperasikan dekat atau dibawah suhu fuel processing dan dipindahkan panas tersebut dari fuel cell menuju reformer keuntungan ini digunakan untuk melibatkan fungsi reformer kedalam fuel cell, maka bentuk/desain internal reformer telah menghasilkan bentuk yang lebih sederhana yang signifikan dalam desain keseimbangan peralatan pembangkit atau *balance of plant* (BOP) dan dapat meningkatkan efisiensi sistem [1].

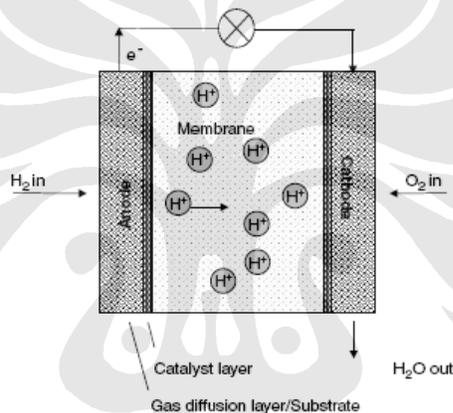
2.2.1 Komponen Utama Sistem Fuel Cell

Ada beberapa komponen dasar yang menyusun sistem fuel cell, sekurang – kurangnya terbagi menjadi 4 bagian yaitu [4] :

1. **Anoda** (*fuel electrode*) yaitu komponen yang menjadi tempat untuk bertemunya bahan bakar (fuel) dengan elektrolit, sehingga ia menjadi katalisator dalam reaksi reduksi bahan bakar dan kemudian mengalirkan elektron dari reaksi tersebut menuju rangkaian diluar (eksternal sirkuit/beban).
2. **Katoda** (*oxygen electrode*) yaitu komponen yang menjadi tempat untuk bertemunya oksigen dengan elektrolit, sehingga ia menjadi katalisator dalam reaksi oksidasi oksigen dan kemudian mengalirkan elektron dari rangkaian

diluar kembali kedalam *fuel cell* dalam hal ini katoda yang akhirnya menghasilkan air dan panas.

3. **Elektrolit** yaitu bahan (cairan, gas, padat) yang berfungsi mengalirkan ion yang berasal dari bahan bakar di anoda menuju katoda, jika ada elektron yang mengalir melalui elektrolit maka akan terjadi short circuit. Sebagai tambahan agar praktis, peranan gas yang berfungsi sebagai pemisah biasanya disediakan sekaligus oleh sistem elektrolit. Gas yang ada biasanya diatur kapasitasnya dengan tekanan yang disesuaikan.
4. **Katalis** yaitu material atau bahan khusus untuk mempercepat proses reaksi kimiawi atau reduksi-oksidasi. Pada PEMFC biasanya digunakan bahan dari platina.



Gambar 2.1 Skema sederhana dan kerja *fuel cell* [1]

Tiap individu *fuel cell* dihubungkan secara seri yang membentuk tumpukan (*stack*) *fuel cell*, yang biasa disebut dengan *fuel cel stack*, untuk menghasilkan arus searah bertegangan tinggi. Tumpukan/ *fuel cel stack* ini berhubungan dengan variabel arus-tegangan sumber daya listrik yang berarti dapat menentukan daya yang dihasilkan. Tegangan keluaran *fuel cell* menurun karena adanya impedansi internal. Impedansi ini secara perlahan dalam waktu yang lama meningkatkan kerusakan tegangan. Oleh karenanya tepat jika subsistem elektronika daya dibutuhkan untuk tujuan umum yaitu mendapatkan efiseinsi yang besar dengan biaya murah.

2.2.2 Cara Kerja Fuel Cell

Cara kerja dari *fuel cell* dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.2 dimana terdapat 2 karbon elektroda yang dicelupkan dalam cairan/gas elektrolit yang terpisah satu sama lain. Bahan bakar, dalam hal ini hidrogen, akan dialirkan kepermukaan anoda dengan tekanan gas tertentu sesuai kebutuhan. Dan secara bersamaan oksigen yang berasal dari udara bebas, dialirkan kepermukaan elektroda yang lain (katoda). Saat elektroda dihubungkan dengan beban dari luar, maka proses yang terjadi sebagai berikut [6] :

1. Hidrogen (H_2) yang menyetuh permukaan anoda akan beraksi secara kimiawi (reduksi), menghasilkan ion hidrogen (H^+) dan ion elektron (e^-). Sedangkan di katoda terjadi reaksi kimia (oksidasi) dimana oksigen (O_2) diubah menjadi ion.
2. Ion hidrogen (H^+) akan bergerak dari permukaan fuel elektroda (anoda) menuju katoda melalui elektrolit (cairan/gas).
3. Sedangkan ion elektron (e^-) di anoda bergerak melalui kawat yang dihubungkan dengan beban/circuit diluar yang akhirnya menuju elektoda yang sama dituju ion hidrogen (H^+) yaitu katoda.
4. Oksigen, ion hidrogen dan elektron mengalami reaksi kimia dengan oksigen elektroda maka pada permukaannya akan menghasilkan air (H_2O) dan panas sebagai efek dari reaksi tersebut.

Berikut rangkuman proses kimiawi yang ada dan gambar perbandingan dari beberapa jenis *fuel cell* :

Jenis Fuel Cell	Reaksi Pada Anoda	Ion yang pindah Melalui elektrolit	Reaksi Pada Katoda	Suhu (°C) proses
PEM	$H_2 \rightarrow 2e^- + 2H^+$	$H^+ \rightarrow$	$2H^+ + 1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$	60-80
AFC	$2e^- + 2H_2O \leftarrow H_2 + 2(OH)^-$	$\leftarrow OH^-$	$2(OH)^- \leftarrow H_2O + 1/2 O_2 + 2e^-$	<120
PAFC	$H_2 \rightarrow 2e^- + 2H^+$	$H^+ \rightarrow$	$2H^+ + 1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$	200
CARBONATE	$2e^- + H_2O + CO_2 \leftarrow H_2 + CO_3^{2-}$	$\leftarrow CO_3^{2-}$	$CO_3^{2-} \leftarrow 1/2 O_2 + CO_2 + 2e^-$	650
SOFC	$2e^- + H_2O \leftarrow H_2 + O^{2-}$	$\leftarrow O^{2-}$	$O^{2-} \leftarrow 1/2 O_2 + 2e^-$	800-1000

Gambar 2.2 Proses reaksi kimia yang terjadi pada berbagai jenis *fuel cell* [2]

MF0996

2.2.3 Karakteristik Umum Performa Fuel Cell

Performa *fuel cell* yang dimaksud kinerja dari fuel cell untuk menghasilkan tegangan dan proses yang mempengaruhinya. Ada dua kondisi yang dapat dilihat dari sisi ideal dan kenyataan. Secara teori pada kondisi ideal (tergantung oleh suhu dan tekanan yang dibutuhkan oleh tiap jenis fuel cell) maka setiap Hidrogen (H_2) atau oksigen (O_2) dalam hal ini bahan bakar mampu menghasilkan tegangan sebesar 1.22 V dc.

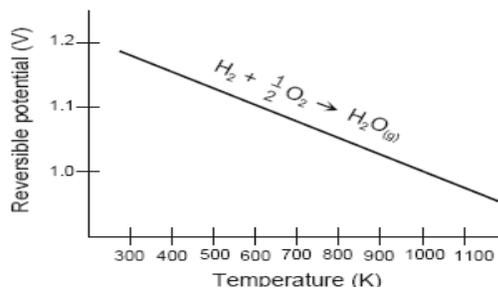
Tegangan ideal ini biasa disebut dengan tegangan Nernst (*Nernst potensial*) yaitu tegangan yang dihasilkan oleh *fuel cell* saat *open circuit* (antara 2 elektorda) pada saat kondisi temperatur dan tekanan yang ideal [1].

Cell Reactions ^a	Nernst Equation
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	$E = E^\circ + (RT/2F) \ln [P_{H_2} / P_{H_2O}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2}]$
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_2(c) \rightarrow H_2O + CO_2(s)$	$E = E^\circ + (RT/2F) \ln [P_{H_2} / P_{H_2O} (P_{CO_2}(a))] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2} (P_{CO_2}(c))]$
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	$E = E^\circ + (RT/2F) \ln [P_{CO} / P_{CO_2}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2}]$
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$	$E = E^\circ + (RT/8F) \ln [P_{CH_4} / P_{H_2O}^2 P_{CO_2}] + (RT/8F) \ln [P_{O_2}^2]$

(a) - anode P - gas pressure
(c) - cathode R - universal gas constant
E - equilibrium potential T - temperature (absolute)

Tabel 2.2 Persamaan tegangan Nernst [1]

Tegangan ini dipengaruhi oleh temperatur yang ada karena proses kimiawi yang ada. Karena Jumlah produksi fuel cell yaitu listrik dan air akan sangat dipengaruhi oleh meningkatnya temperatur yang ada.

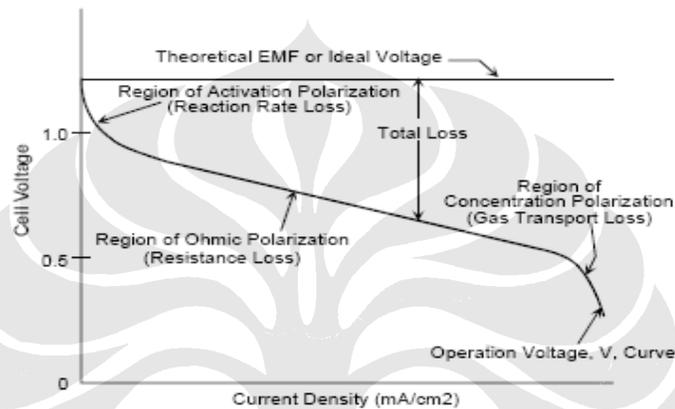


Gambar 2. 3 Grafik hubungan tegangan ideal dengan temperatur [1]

Temperature	25°C (298K)	80°C (353K)	100°C (273K)	205°C (478K)	650°C (923K)	800°C (1073K)	1100°C (1373K)
Cell Type		PEFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	SOFC
Ideal Voltage	1.18	1.17		1.14	1.03		0.91

Tabel 2.3 Tegangan ideal tiap jenis fuel sebagai fungsi temperatur ditiap jenis *fuel cell* [1]

Sedangkan pada kenyataannya *fuel cell* menghasilkan kurang dari kondisi ideal tersebut dan berkurang dengan meningkatnya beban (kerapatan arus). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2. 4.



Gambar 2. 4 Kurva polarisasi *fuel cell* [1]

Gambar 2.4 menjelaskan bahwa semakin besar beban yang dibutuhkan maka akan terjadi penurunan tegangan dari daerah potensial equilibrium (tegangan ideal). Hal ini karena adanya rugi-rugi (irreversible losses) dari proses yang terjadi, baik proses kimia maupun mekanis.

Rugi-rugi ini biasa disebut polarisasi (*polarization*) atau *overvoltage* dibagi menjadi 3 jenis / daerah yaitu [1] :

1. *Kinetic Region / activation polarization/ activation losses* ialah daerah yang merepresentasikan energi yang hilang saat terjadi reaksi pada elektroda. Karena kebanyakan reaksi kimia selalu melibatkan energi hambatan (*energy barrier*) yaitu energi yang harus dilampaui untuk melakukan reaksi. Tegangan yang terjadi sebesar 50-100 mV. Rumusannya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha.n.F} \ln \frac{i}{i_0} \quad (2.1)$$

Dimana: η_{act} = polarisasi aktivitas (*activation polarization*) ,mV

- α = koefisien perpindahan elektron
- n = jumlah elektron
- T = Temperatur (K)
- R = konstanta gas (8.1345 J/K mol)
- f = konstanta faraday (96,487 J/volt-gram)
- i = kerapatan arus, mA/Cm²
- i_o = perubahan kerapatan arus, mA/Cm²

Polarisasi aktivitas terkait dengan tiap elektroda yang sehingga total polarisasi aktivitas menjadi $\eta_{act(cell)} = \eta_{act(anoda)} + \eta_{act(katoda)}$ (2.2)

2. *Resistance Region / ohmic polarization* ialah daerah yang merepresentasikan jumlah total energi yang hilang karena hambatan aliran elektron pada elektrolit dan pada material elektroda. Rumusnya sebagai berikut : $\eta_{ohm} = iR$ (2.3)

Dimana η_{ohm} = Polarisasi hambatan (*Ohmic polarization*), mV

i = kerapatan arus, mA/Cm²

R = total hambatan cell, $\Omega \cdot \text{Cm}^2$

3. *Mass transport losses* atau *concentration polarization* yaitu daerah yang merepresentasikan energi yang hilang karena adanya proses perpindahan massa atau proses difusi. Pada kenyataannya arus akan mengalami batas (i_L) akibat proses difusi ini. Rumusnya sebagai berikut :

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (2.4)$$

Dimana η_{conc} = Polarisasi konsentrasi (*Concentration polarization*), mV

i_L = batas (limit) kerapatan arus , mA/Cm²

Concentration polarization ada pada tiap elektroda, oleh karenanya total besarnya didapat dengan menjumlahkan yaitu :

$$\eta_{conc(cell)} = \eta_{conc(anoda)} + \eta_{conc(katoda)} \quad (2.5)$$

Pada praktiknya seluruh daerah polarisasi *fuel cell* tersebut akan bekerja baik antara 0.5 sampai 0.9 V dc dimana kerapatan arus antara 100 mA/Cm²

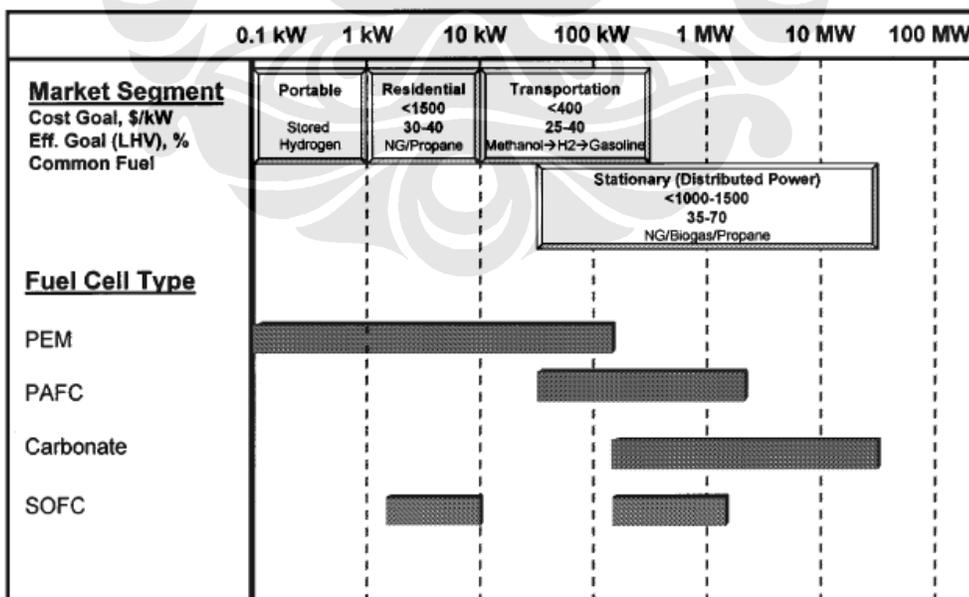
sampai 400 mA/Cm² tiap daerah sel. Sehingga didapatkan tegangan akhir fuel cell berasal dari pengurangan tegangan Nernst dengan polarisasi ini.

Kinerja ini dapat ditingkatkan dengan meningkatkan temperature tiap sel dan tekanan yang ada. Hal ini berlaku untuk semua jenis fuel cell, termasuk PEMFC, hanya peningkatan temperature dan tekanan mengalami kendala dari material dan perangkat keras yang ada. Karena material dan perangkat keras ini memiliki karakteristik tersendiri yang berbeda-beda dan batasan suhu serta tekanan.

2.3 JENIS-JENIS FUEL CELL

Tiap jenis fuel cell memiliki segmentasi pasar tersendiri sesuai karakter yang dimilikinya. Hal ini berdasarkan berdaya yang mampu dihasilkan, konstruksi desain, kecepatan daya yang dihasilkan (start-up) dan suhu yang dihasilkan.

Pada umumnya jenis fuel yang beroperasi pada suhu rendah telah digunakan sumber energi listrik pada peralatan portabel (laptop), perumahan dan aplikasi transportasi. Sedangkan pada carbonate dan SOFC yang beroperasi temperatur tinggi banyak digunakan pada pembangkit yang cukup besar yang stasiooner (10-50 MW). Untuk lebih jelasnya generator fuel cell yang telah berkembang dan yang ada dipasaran bisa diperhatikan sebagai berikut :

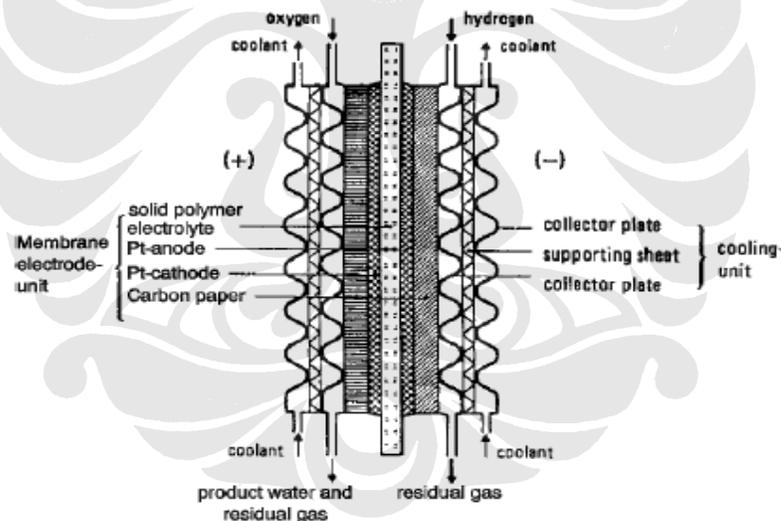


Gambar 2.5 Segmentasi generator fuel cell yang ada dipasaran (2001) [2]

Pada hakikatnya seluruh fuel cell memiliki cara kerja dan karakteristik yang hampir sama. Yang membedakan ialah struktur bahan pembentuknya, bahan bakar yang dapat digunakan, suhu operasional, dan aplikasinya yang dapat digunakan untuk spesifikasi tertentu serta besar daya yang dapat dihasilkan. Semua jenis fuel cell memiliki kelebihan dan kekurangan yang akan dijelaskan secara umum dan lebih spesifiknya pada jenis PEM.

2.3.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Disebut dengan Proton Exchange Membrane (PEM), karena ia menggunakan proton sebagai konduktor melewati membran dari bahan polimer yang berfungsi sebagai elektrolit dari anoda ke katoda. Oleh karenanya ia juga biasa disebut Polimer Elektrolit Fuel Cell (PEFC). Dan Platina digunakan sebagai katalisator yang melapisi 2 elektroda [1].



Gambar 2.6 Skematik PEFC [1]

Bekerja pada suhu rendah (60°C - 80°C) menggunakan hidrogen murni dalam bentuk gas masih sebagai sumber bahan bakar (*fuel*) yang akan dialirkan ke anoda dengan tekanan yang konstan. Hidrogen yang menyebar di anoda akan dibantu katalisator, dari bahan platina, untuk melepaskan elektron menuju sirkuit eksternal (beban diluar sistem) dan ion positif hydrogen (proton) yang akan dialirkan menuju katoda.

Proton (H^+) yang dipindahkan ke katoda tersebut melalui membran penghantar proton yang hanya membolehkan ion proton saja untuk lewat dan menyaring electron. Sebab jika ada elektron yang lewat elektrolit (membran penghantar proton) maka akan terjadi kerusakan akibat *short circuit*. Dan hal inilah yang sering terjadi pada teknologi *fuel cell* terdahulu.



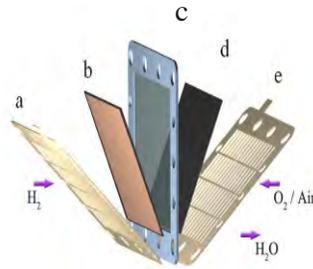
Elektron yang dihasilkan tersebut berasal dari tiap 1 mole hidrogen, dan memiliki energi sebesar -2 FE Joules. Reaksi ini akan terus berlangsung (kontinyu) menghasilkan energi listrik selama suplai hidrogen ada.

Bahan bakar yang digunakan ialah hidrogen murni, oleh karenanya dibutuhkan alat yang dapat mengkonversi bensin, solar, gas alam atau metanol menjadi hidrogen yang dipakai pada stack fuel cell, alat ini biasa disebut reformer.

Reformer bekerja pada temperatur yang cukup tinggi $800^{\circ}C$ - $900^{\circ}C$ untuk jenis reformer bensin dan berbeda-beda untuk tiap bahan. Selain hidrogen murni dihasilkan juga gas CO yang berbahaya baik untuk lingkungan beigtu pula untuk kinerja PEM. Oleh karenanya dibutuhkan pengaturan agar gas CO yang dihasilkan dibawah nilai beracun yaitu 50 ppm pada tiap stack.

Metanol merupakan bahan terbaik karena dapat menghasilkan hidrogen lebih baik, gas CO yang rendah dan proses yang lebih mudah ketimbang yang berasal dari bensin dan solar. Pada demonstrasi mobil yang telah dilakukan beberapa perusahaan besar antara lain: Toyota, Honda dan Ford terbukti penggunaan metanol atau hidrogen murni langsung lebih baik dibandingkan bahan bakar lain.

Struktur PEMFC biasa disebut dengan *Membrane Electrode Assembly* (MEA), ia dibentuk dari anoda, katoda serta membran yang ada diantaranya. Berikut ialah gambaranya:



Gambar 2.7 Membrane Electrode Assembly (MEA) [12]

Gambar 2.7 terdiri dari 5 elemen yang berbeda-beda, bagian **a** dan **e** masing-masing menunjukkan piringan (*plate*) anoda dan katoda yang terbuat dari logam fungsinya seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Bagian **b** dan **d** ialah *diffusion layer* yang terbuat dari karbon dengan sedikit kombinasi dari platina fungsinya untuk katalisator pada reaksi kimia di anoda dan katoda, serta proses difusi. Dan bagian **c** ialah membran bagian tengah yang dikenal dengan *rubber gasket* berfungsi menyaring gas proton saja yang dapat melewatinya.

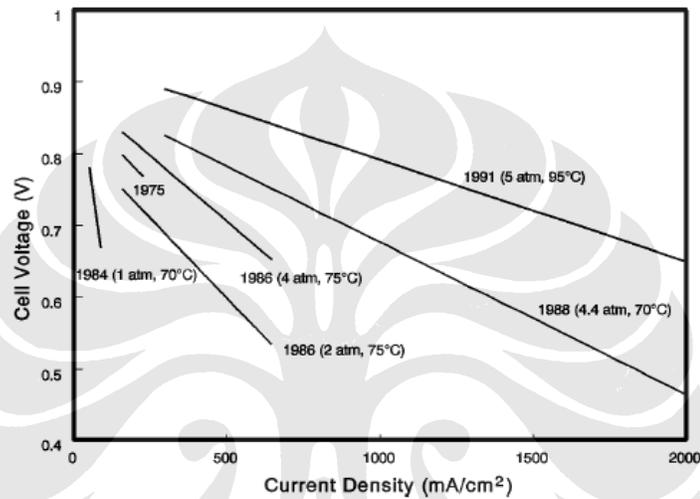
Dengan demikian MEA dapat mempengaruhi kinerja PEM. Karena semakin baik MEA dapat mempercepat proses katalis sehingga waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik semakin cepat. Kini banyak modifikasi yang telah dilakukan untuk mengefisiensikan MEA terutama platinum yang harganya mahal. Selain itu penggunaan *polytetrafluoroethylene* dan sulfur membuat MEA lebih tahan akan kerugian dari reaksi kimia [12].

Kumpulan MEA disatukan dalam bentuk tumpukan (*stack*), yang jumlahnya proposional, tergantung daya yang diinginkan dan kemampuan bahan. Semakin banyak tumpukannya maka semakin besar tegangan yang dihasilkan, 1 jenis cell dapat menghasilkan kurang dari 1 volt, begitu pula daya yang dihasilkan. Untuk itu perlu perhitungan keseimbangan antara daya yang ingin dihasilkan, dana, ukuran dan bahan yang digunakan.

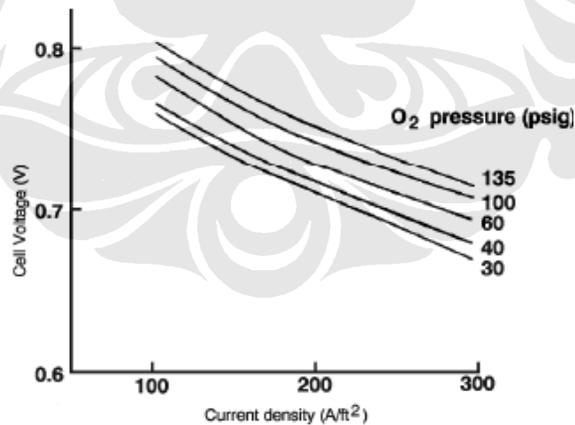


Gambar 2.8 Stack PEM [6]

Sedangkan Faktor yang sangat berpengaruh pada kinerja MEA untuk dapat beroperasi lama ialah suhu (temperatur) ,tekanan gas, desain dan kompresi MEA. Pada gambar dibawah ini terlihat bahwa suhu dan tekanan sangatlah mempengaruhi besar tegangan dan arus yang dihasilkan PEM. Saat tekanan dan suhu ditingkatkan maka hasil tegangan dan arus yang dihasilkan semakin besar hal ini karena turunnya nilai resistansi pada daerah polarisasi, sehingga meningkatkan nilai tegangan dan arus yang keluar dari PEM [1].



Gambar 2.9 Studi pengaruh suhu dan tekanan pada kinerja PEM [1]



Gambar 2.10 Perbandingan perbedaan tekanan oksigen (O₂) terhadap kinerja PEM [1]

Tantangan yang muncul pada pengembangan PEMFC antara lain terkait dengan harganya cukup mahal dibandingkan dengan fuel cell lain karena penggunaan bahan platina yang lebih mahal dari emas, bahan polimer yang merupakan hidrokarbon sehingga usianya tidak lama sebab pengaruh proses

oksidasi yang ada pada PEMFC. Meski demikian telah dikembangkan bahan-bahan yang lebih tepat dan bertahan lama seperti penggunaan asam *perfluorosulfonic* sebagai membran, yang berguna mengurangi waktu katalis sehingga proses kerja lebih cepat dan berarti memperlama usia PEM (> 40.000 jam) yang sekaligus juga untuk memenuhi efisiensi tegangan tinggi.

Tantangan berikutnya ialah masalah suhu yang rendah sehingga ia tidak dapat membuat reformer internal yaitu pengkoversian didalam PEM, sehingga dibutuhkan eksternal reformer. Selain itu sulit dikombinasikan dengan pembangkit jenis lain yang telah ada. Hal ini berbeda dengan dengan fuel cell yang berkerja pada suhu tinggi (SOFC) yang dapat dikombinasikan dengan pembangkit lain (PLTGU) karena uap keluarannya yang bersuhu dan bertekanan tinggi.

Kemudian masalah pengaturan air (pembuangan). Hal karena pemberian tekanan yang berlebih/kurang berakibat membuat membran kering sehingga terjadi difusi yang berkebalikan arah yaitu dari katoda menuju anoda, akibatnya air ikut masuk kedalam sistem (banjir) sehingga menimbulkan kerusakan. Oleh karenanya pengaturan tekanan dan seluruh sistem mutlak diperhatikan.

Kelebihan PEM jika dibandingkan dengan fuel cell jenis yaitu suhu operasionalnya yang rendah, yang berarti waktu untuk menghasilkan (start-up) energi dapat dilakukan dengan cepat dibandingkan. perangkat bahan yang dibuat merupakan nonmetallic dan isolasi yang dibutuhkan tidak terlalu besar.

Selain itu karena suhu operasionalnya terendah diantara fuel cell yang lain maka fuel paling cocok dan banyak digunakan untuk peralatan elektronik (laptop,PDA) , kendaraan bermotor dan juga dapat sebagai sumber pembangkit listrik skala kecil seperti pembangkit listrik untuk perumahan dan gedung.

PEMFC untuk pertama kali ditemukan oleh Thomas Grubb dan Leonard Niedrach di General Electric pada tahun 1960 dan digunakan untuk aplikasi pada pesawat luar angkasa milik NASA yaitu Gemini dan apollo. Hal ini karena PEMFC dapat digunakan sebagai sumber energi listrik untuk misi luar angkasa dalam jangka waktu yang panjang, sedangkan baterai yang sebelumnya biasa digunakan untuk penyimpan energi hanya digunakan untuk misi luar angkasa

yang singkat. Selain itu karena keluaran dari PEMFC berupa air, dapat di gunakan untuk awak pesawat luar angkasa.

Pada Peralatan *portabel* PEMFC berfungsi sebagai sumber baterai untuk durasi yang sangat lama dan hingga kini masih dikembangkan. Namun harga yang ada masih terlalu tinggi. sedangkan untuk aplikasi pada kendaraan telah banyak digunakan oleh beberapa merek dagang kendaraan bermotor di banyak negara maju seperti AS, Jepang, negara-negara Eropa, bahkan Cina juga telah menggunakannya untuk kendaraan umum seperti bus.

Sebagai pembangkit listrik PEMFC telah diaplikasikan untuk perumahan (3-7kW) dan gedung (50kW), selain itu berfungsi sebagai penghasil sumber air panas. Gas alam dan gas propana (sejenis gas metan) merupakan jenis yang banyak dipakai untuk aplikasi ini. Riset yang telah dilakukan DOE (Department of Energy) A.S telah membuktikan penggunaan PEMFC sebagai aplikasi untuk sumber energi listrik dan air panas pada gedung dengan capai efisiensi > 35% dan dengan biaya pembangunan lebih kecil dari \$1500/Kw [1].

2.3.2 Alkaline Fuel Cell

AFC merupakan salah satu sejenis fuel cell awal dan menggunakan KOH sebagai elektrolit. Temperatur yang dihasilkan tergantung oleh konsentrasi KOH, jika temperatur yang ada mencapai $<120^{\circ}\text{C}$ maka konsentrasi KOH yang ada 35-50%. Reaktan AFC hanya dibatasi dari jenis hidrogen murni dan oksigen atau karbondioksida murni (udara bebas).

AFC memberikan performa yang baik dalam penggunaan hidrogen dan oksigen dibandingkan jenis fuel cell yang lain. Bahkan NASA pernah menggunakannya dalam pesawat luar angkasanya sebelum diganti dengan PEMFC. Seperti PEMFC, AFC juga menghasilkan racun yaitu karbon monoksida (CO). selain itu adanya gas CO_2 memberikan reaksi yang buruk karena dapat beraksi dengan elektrolit yang ada sehingga mengubah kebentuk lain, akibatnya elektrolit yang ada berkurang.

AFC dipercaya tidak memiliki efek kerugian yang besar untuk aplikasi komersial, karena penggunaan hidrogen murni yang efektif dan penggunaan udara yang bebas yang sedikit. Tetapi masih perlu pengembangan teknologi dan desain

penyimpanan hidrogen yang tepat, karena AFC lebih banyak digunakan pada aplikasi portabel [2].

2.3.3 Phosphoric Acid Fuel Cell

PAFC, menggunakan asam fosfor sebagai elektrolit yang bekerja pada suhu sekitar 200°C dan mampu untuk dioperasikan pada udara lembam, serta menggunakan CO_2 dan uap hidrogen sebagai bahan bakar. Ia tidak dapat menggunakan gas CO tetapi tidak seperti PEM dan AFC yang terganggu dengan adanya gas CO, PAFC dapat tetap bekerja meski dengan performa yang minimal.

Ada kesamaan PAFC dengan PEMFC yaitu penggunaan katalis dari bahan metal (platina) yang mahal pada kedua 2 elektrodanya. Panas yang dihasilkan dari proses yang ada bersuhu cukup tinggi untuk memanaskan air dan meningkatkan tekanan uap pada sistem tetapi tidak cukup melakukan *cogeneration*. PAFC dengan suhu tinggi ini tidak dapat menyokong kinerja reformer (pengkonversian) bahan bakar umum seperti gas alam. Oleh karenanya dibutuhkan eksternal reformer yang beroperasi pada suhu yang tinggi yang mampu mengubah ikatan bahan bakar hidrokarbon menjadi hidrogen murni. Yang artinya mempengaruhi efisiensi sistem secara keseluruhan.

PAFC pertama kali diperkenalkan ke pasaran sebagai generator pada tahun 1992. ukuran yang ada telah mencapai 200kW yang berfungsi sebagai pembangkit listrik yang tetap (stasioner) dan untuk aplikasi pemanas. Efisiensi yang dari perubahan gas alam ke energi listrik sebesar 37% dan mencapai 87% secara keseluruhan. Lebih dari 200 unit telah digunakan dari pembangkit jenis ini yang menyebar ke 15 negara di 4 benua. Salah satu unitnya telah bekerja untuk 49000 jam di Jepang, yang artinya telah melebihi dari 3 kali dari target capaian waktu yang diinginkan pasar.

Dengan demikian PAFC memiliki keterbatasan yang perlu diperbaiki yaitu pada masalah manajemen panas yang terbuang, masih bergantungnya dengan bahan katalisator yang mahal dan adanya proses efisiensi konversi elektro yang cukup telah merangsang fuel cell dengan suhu yang tinggi [2].

2.3.4 Carbonate Fuel Cell

Pada fuel cell ini elektronit yang digunakan ialah perpaduan dari jenis alkaline dan carbonates CFC. Pada CFC yang pindah dielektrolit bukan ion positif (hidrogen) tetapi elektron, operasi kerjanya pada temperatur yang cukup tinggi yaitu 500°C - 650°C . Bahan metal yang mahal pada elektroda seperti pada PEMFC tidak digunakan tetapi yang digunakan ialah bahan yang berasal dari nikel dan reaksi juga cukup cepat. Keunggulan lainnya ia dapat menggunakan gas CO sebagai bahan bakar, serta efisiensinya yang lebih tinggi dibandingkan yang fuel cell lain yang menggunakan CO_2 . Karena suhu yang tinggi ia dapat menggunakan reformer internal baik bahan bakar yang berbentuk cairan maupun gas, serta ia dapat dikombinasikan dengan generator jenis lain seperti PLTGU.

Sementara korosi pada cell menjadi salah kekurangannya, solusi perbaikan telah dilakukan yaitu dengan menambah campuran stainless steel, akan tetapi ini menjadikannya fuel cell terberat (massa yang besar) dibandingkan jenis lain. oleh karenanya dibutuhkan bahan yang lebih tepat.

Pembangkit listrik komersial telah dibuat dan masih dikembangkan dari tipe ini dengan kapasitas ribuan kilowatts sampai multimegawatt. Contohnya pembangkit listrik CFC antara lain : 1.8 MW di santa Clara, CA dan 1 MW di Kawagoe, Jepang. Dengan instalasi seharga 1250-1500 \$/kW dan harga listrik yang dapat dijual sekitar 5 sen-7 sen kWh tergantung dari harga dasar bahan bakar yang digunakan dan beberapa parameter lain [2].

2.3.5 Solid Oxide Fuel Cell

Elektrolit yang digunakan dalam fuel cell ini ialah bahan *solid nonporous ceramic* antara lain : $\text{Y}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$. Operasinya pada suhu tertinggi jika dibandingkan dengan fuel cell lain yaitu 800°C - 1000°C , yang berarti cukup untuk adanya internal reformer. Elektroda yang ada juga berasal dari keramik .

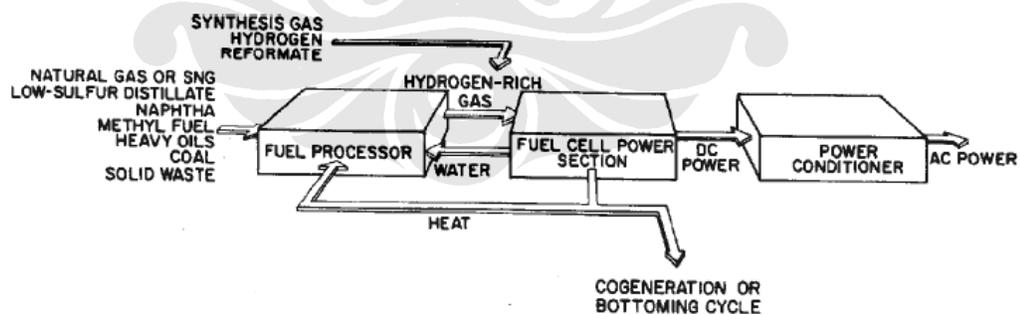
Sama dengan CFC gas CO dapat digunakan sebagai bahan bakar. Begitu pula temperatur yang dihasilkan sama-sama tinggi, meski dapat mempercepat rekasi kimia tetapi dengan bahan yang ada dapat mempercepat terjadinya korosi. Namun demikian telah dikembangkan prototype jenis planar keramik yang lebih tahan terhadap panas dan tekanan mekanik serta memiliki manajemen

perlindungan. Selain itu kini telah dikembangkan agar SOFC dapat beroperasi dengan suhu lebih rendah yaitu 600°C - 800°C sehingga korosi yang ada lebih rendah, ini juga membuat konsekuensi harus adanya elektroda sebagai katalis dan elektrolit yang ada agar lebih stabil kinerjanya.

SOFC dapat menghasilkan pembangkit listrik stasioner dengan kapasitas ratusan Kilowatt- atau lebih tinggi lagi (puluhan Megawatt). karena suhunya yang sangat tinggi ini, ia dapat dikombinasikan (*hybrid*) dengan generator lain agar daya yang dicapai maksimum seperti PLTGU. Keuntungan lainnya sesuai penelitian di Solid State Energi Conversion Alliance (SECA) ialah dalam biaya instalasi, karena hanya dibutuhkan kurang dari \$ 400/kW bahkan lebih murah dari aplikasi fuel cell pada transportasi [2].

2.4 SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK PADA FUEL CELL

Fuel cell mampu menghasilkan energi listrik, meksi demikian ia sebagai pembangkit listrik tidak dapat berdiri sendiri tanpa perangkat lain yang mendukungnya. Secara sederhana sistem yang ada pada pembangkit listrik berbasis fuel cell dapat dibagi menjadi beberapa susbsistem yaitu *fuel cell power section* , *fuel processor*, *power conditioner* dan *cogeneration* atau *bottoming cycle*, untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar 3.1,dengan penjelasan sebagai berikut:



Gambar 2.11.Sistem Pembangkit Listrik Fuel Cell [1]

1. **Fuel cell power section** yaitu bagian yang memiliki 1 atau lebih tumpukan (*stack*) fuel cell,yang tiap tumpukan terdiri dari banyak fuel cells. Dan biasanya tiap fuel cell ini dihubungkan seri untuk memproduksi ribuan

tegangan DC (arus searah) . Pada bagian inilah terjadi konversi dari energi kimia menjadi energi listrik.

2. **Fuel cell processor** yaitu bagian yang mengatur masuknya bahan bakar (Fuel) ke power section. Bagian ini, bekerja pada suhu tinggi antara 400-900⁰C tergantung jenis bahan bakar yang akan digunakan. dapat diatur dengan sistem control yang sederhana sampai ke bentuk yang kompleks. Dan pada bagian inilah diproduksi hidrogen, yang berasal berbagai macam bahan bakar seperti gas alam, batubara, bahan bakar metil dan lain-lain. Jenisnya dapat dibagi 2 berdasarkan lokasinya yaitu *internal processor* dan *eksternal processor*. Internal processor yaitu proses konversi yang menyatu / terletak didalam sistem fuel cell power section, hal ini ditemui pada bagian fuel cell dengan temperatur operasional yang tinggi (CFC, SOFC), sedangkan eksternal processor yaitu reformer yang terpisah dengan *fuel cell* power section, hal ini ditemui pada fuel cell yang beroperasi dengan temperatur rendah (PEMFC).
3. **Power conditioner** yaitu bagian yang mengubah keluaran dari power section menjadi jenis daya dan kualitas yang dibutuhkan oleh pengguna. Pada bagian ini dapat dirancang dari proses pengaturan tegangan yang sederhana hingga bentuk yang canggih(kompleks) yang pada umumnya yaitu konverter DC/DC dan inverter untuk pengubah dari bentuk DC ke bentuk AC.
4. **Cogeneration** atau **bottoming cycle** ialah bagian yang mengelola keluaran dari *power section* berupa uap panas, air panas dan lain-lain, agar dapat di daur ulang atau digunakan kembali ke sistem atau dikombinasikan dengan sistem pembangkit lain [1].

2.4.1 Penerapan Pembangkit Listrik PEMFC Untuk Perumahan.

Pembangkit listrik PEMFC untuk kawasan perumahan, gedung komersial kian banyak dikembangkan. Konsep pembangkit listrik perumahan ini menggunakan konfigurasi jaringan listrik untuk skala kecil (*micro-grid*) yang berbeda dari jaringan konvensional , sebagai solusi dari pembangkit mini tersebut.

Penggunaan PEMFC sebagai pembangkit di karenakan beberapa hal, diantaranya : tidak adanya suara bising yang mengganggu, usia penggunaan yang

kini cukup lama (tahan lama) , biaya perawatan yang relatif murah, efisiensi energi listrik yang cukup tinggi (30-80%) , tidak ada polusi dan disain yang mudah diatur. Jika dibandingkan dengan fuel cell lain PEMFC lebih cocok untuk sebagai pembangkit listrik skala kecil seperti perumahan dan gedung, hal ini karena suhu bekerjanya yang tidak terlalu tinggi sehingga nyaman untuk lingkungan dan pembuangan air panasnya yang dapat dimanfaatkan.

Pada umumnya daya yang dihasilkan antara 1 sampai 5 kW. Selain itu keuntungan yang bisa dapat dengan menggunakan pembangkit dan jaringan listrik sistem ini ialah berkurangnya rugi yang biasa dialami pada generator, transmisi dan distribusi pada jaringan listrik sistem konvensional.

Secara teknik hambatan yang ada pada pembangkit PEMFC untuk perumahan lebih sedikit ketimbang pada kendaraan. Akan tetapi, hambatan utama dari pembangkit ini pada pembiayaan awal dan usia penggunaan.

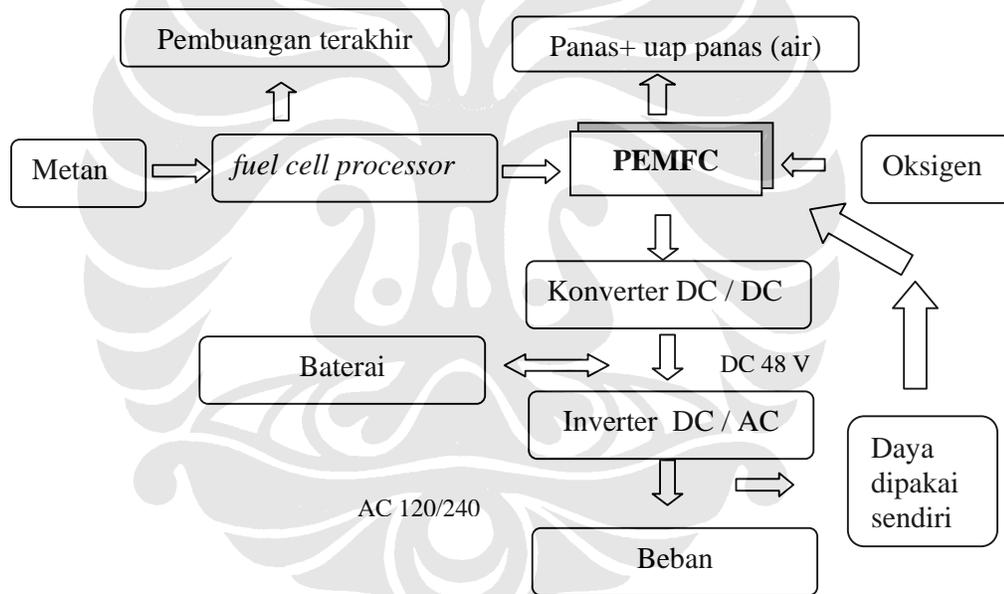
Pada bagian ini akan dijelaskan desain sistem dan teori pembangkit PEMFC pada sistem jaringan mandiri untuk menyediakan daya sebesar 5 kW ke beban di perumahan. *Cogeneration* yaitu air panas (kalor) juga menjadi bahan pertimbangan dalam proses perancangan pembangkit ini.

Tantangan lain yang sering muncul, ketika sistem ini telah berjalan ialah kemampuannya dalam merespon beban yang cepat berubah dan kontinuitas suplai daya yang diberikan. Untuk itu Pembangkit ini dihubungkan baterai yang dapat menyimpan energi listrik di luar waktu beban puncak, untuk menyuplai daya saat beban puncak yang melebihi kapasitas pembangkit. Fungsi baterai ini juga sebagai proteksi, untuk menghindari adanya daya reaktif yang masuk kedalam pembangkit PEMFC dan adanya transient, untuk sistem yang terhubung dengan jaringan listrik konvensional, saat permulaan dijalankannya (*start-up*) sistem HVAC (tegangan tinggi AC) . Sebagai contoh : jika beban puncak melebihi kapasitas dari pembangkit PEMFC dan baterai, maka sistem kontrol akan mematikan beban dasar sebagai prioritas. Sedangkan masalah pada beban untuk PEMFC yang mandiri tanpa terhubung dengan sistem konvensional antara lain masalah harmonik, tegangan dan pengaturan frekuensi.

Saat pembangkit PEMFC dihubungkan dengan beban maka *power conditioner* mutlak diperlukan, untuk mengubah tegangan yang dihasilkan di *Fuel*

cell power section (PEMFC). Karena di dalamnya terdapat konverter DC-DC untuk mengubah hasil tegangan keluaran dari *fuel cell* sebesar 50 sampai 100 Volt DC menjadi sebesar 48 Volt DC pada saluran DC. Saluran DC tersebut secara paralel terhubung dengan baterai (12V) dan inverter DC/AC. Inverter itu akan terhubung dengan trafo untuk menaikkan tegangan menjadi 120V atau 240V.

Untuk mencapai beban dengan besar 5 kW maka *fuel cell* dibuat agar hasil yang dapat diproduksi sebesar 5,5kW, untuk mengantisipasi hilangnya daya pada konverter DC/DC, inverter dan trafo sebesar 0,5 kW. Tiap unit *fuel cell* mampu menghasilkan tegangan sebesar 0.5 – 0.9 Volt DC, maka untuk memperoleh tegangan yang tinggi semua unit *fuel cell* dihubungkan seri. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar 2.12 berikut [2]:



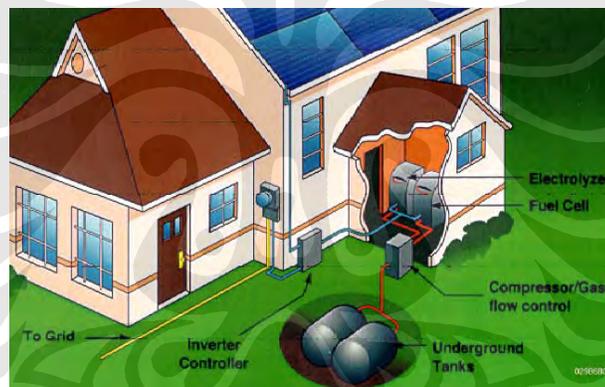
Gambar 2.12 Bagan alur dari pembangkit listrik PEMFC [2]

Pada bagian *fuel cell processor* atau *reformer* yaitu bagian yang berguna menghasilkan hidrogen murni (H₂) untuk bahan bakar PEMFC (*fuel cell power section*) di gambar 2.12 diatas terlihat masukannya berasal komponen kimia yang mengandung metana. Kandungan metana terbaik dan paling banyak digunakan ialah yang berasal dari gas alam, karena memiliki rasio yang tinggi (4:1) dibanding dari metanol dan minyak bumi. Selain juga itu karena keluarannya memiliki efek rumah kaca yang paling kecil.

Pada gambar 2.13 terlihat gambaran rumah masa depan dengan sistem listrik yang telah distribusikan oleh pembangkit listrik konvensional dan pembangkit listrik mandiri (perumahan). Pembangkit ini dapat digunakan bukan hanya 1 rumah tapi juga beberapa rumah bergantung kapasitas pembangkit dan penggunaan daya yang ada pada tiap rumah.

Biaya investasinya dapat mencapai \$1000/KWH-\$1500/KWH (tidak termasuk tempat penyimpanan). Tempat penyimpanannya dapat berupa tabung yang berisi gas hidrogen murni, artinya tidak perlu reformer. Jenis hidrogen yang ada dipasaran bermacam-macam ada yang berbentuk cair, gas dan salju (busa)[2].

Dalam model ini tabung yang digunakan ialah tabung gas, jumlah tabung dan besar kapasitas tabung gas hidrogen tergantung dengan kapasitas daya pembangkit, waktu (lama) dipergunakan, tekanan yang dibutuhkan, ruangan penyimpanan yang aman dan lain-lain.



Gambar 2.13 Contoh model sistem pembangkit listrik perumahan yang disatukan dengan sistem listrik konvensional [1]



Gambar 2.14 Contoh model Tabung gas hidrogen dengan tekanan maksimum 5000 psi dan kapasitas 12.8 Kg [10]

2.4.2 Perbandingan Investasi Antara Pembangkit Listrik Di Indonesia Dengan Pembangkit listrik Fuel Cell

Pada saat ini dan dimasa mendatang Indonesia menginstalasi berbagai jenis pembangkit listrik dengan kapasitas, produksi, efisiensi, waktu umur, lamanya beroperasi dan jenis bahan bakar. Hal ini tergantung dari jenis teknologi pembangkit listrik yang dipilih. Jenis teknologi pembangkit listrik akan berpengaruh terhadap harga pembangkit listrik (biaya investasi), biaya operasi dan perawatan, dan biaya pengeluaran bahan bakar yang selanjutnya akan mempengaruhi terhadap besarnya biaya pembangkitan.

Dalam melaksanakan perencanaan energi, khususnya perencanaan kelistrikan di Indonesia, dipergunakan **model Markal (Market Allocation)**, yaitu suatu model yang mengatur penyediaan energi untuk memenuhi kebutuhan energi. suatu model optimasi dalam perencanaan penyediaan energi. Model inimerupakan program linier, dan menggunakan perangkat lunak GAMS sebagai matrix generator.

Untuk menghitung biaya pembangkitan pada model Markal diberikan masukan atau input data berupa potensi sumber energi, biaya investasi, biaya operasi dan perawatan tetap (Fixom), biaya operasi dan perawatan variabel (Varom), biaya bahan bakar, biaya transmisi dan distribusi, transmisi dan distribusi, faktor kapasitas umur teknis (*life time*), suku bunga diskonto (*discount rate*), dan lamanya pembangunan. Lama konstruksi, jadwal pembiayaan dan besar suku bunga selama konstruksi akan memberikan penambahan biaya pada biaya investasi yang disebut bunga selama konstruksi (IDC). Besarnya biaya investasi biaya, IDC, biaya tetap operasi dan perawatan, biaya tak tetap operasi dan perawatan, biaya bahan bakar, biaya pengangkutan bahan bakar dan umur teknis (*life time*) untuk berbagai jenis pembangkit listrik yang ada di Indonesia ditunjukkan pada Tabel 2.4 [5].

Jenis Pembangkit Listrik	Class (MW)	EPC (\$/KW)	IDC (\$/KW)	Total (\$/KW)	Fuel Cost (cents/kWh)	Fixed O&M (\$/KWH)	Var O&M (\$/MWh)
Jawa Nuklir	900	1500	435	1935	0.5	2	2
PLTU-FGD	600	990	228	1218	1.22	2	1
Combined Cycle	750	500	100	600	2.18	0.67	2
Gas Turbin Pump Storage	150	280	28	308	5.02	1	2.5
Geothermal	250	580	174	754	*)	0.55	-
	60	950	133	1083	2.2	2.5	0.03
Kalimantan CC86	66	823.31	162.69	986	2.1	1.2	2
G50	50	413.6	58.4	470	6.02	1.6	3
C-50	65	1078	322	1400	1.28	2	1.8
CC1H	132	1008	192	1200	2.03	1.6	2
CL1H	100	924	276	1200	1.28	2.1	2.2
Sumatra GT	100	294	56	350	5.7	0.6	3
C-1H	100	1008	192	1200	1.12	2.6	2
CC	135	735	140	875	2.13	1.2	2
C-4H	400	800.8	239.2	1040	1.06	2	2
CC4H	400	630	120	750	2.03	2	1.8
Sulawesi GT-50	50	413	58.4	470	6.02	0.89	3
C1H	100	1008	192	1200	1.21	2.2	1.8
Diesel	10	1000	200	1200	4.2	1.2	2.4
LNG	132	735	140	875	3.07	1.2	2

Sumber: Input model MARKAL

Tabel 2. 4 Biaya Investasi, Biaya Tetap dan Tak Tetap Operasi dan Perawatan, Biaya Bahan Bakar, dan Umur Teknis (*life time*) pembangkit listrik di Indonesia [5]

Sedangkan biaya investasi pembangkit listrik sesungguhnya fuel cell beragam tapi secara umum untuk instalasi didapatkan antara \$1000-\$1500/kW.

Application	Price Point for Commercial Viability
Transportation	\$50 per kW
Distributed Residential	\$300 to \$500 per kW
Distributed Commercial	\$1200 to \$3000 per kW
Stationary Grid Connected	\$1000 to \$1500 per kW
Portable/Micro	\$5,000 to \$10,000 per kW

Tabel 2.5 Tabel investasi Fuel cell [1]

Harga tersebut tidaklah baku tapi dapat menjadi acuan karena berdasarkan riset yang telah dilakukan DOE (Department of Energy) A.S. contohnya pada PEMFC harga sangat dipengaruhi oleh sistemnya (stack, komprosor, regulator, controller dan penyimpanan bahan bakar) dengan tingkat efisiensi yang berbeda-beda. Dan hasil yang dapat diproduksi oleh sebuah pembangkit listrik fuel cell berkapasitas MegaWatt rata-rata dapat dijual dengan harga 5-7 sen kWh

tergantung dari harga bahan dasar yang digunakan tidak termasuk instalasi [1 dan 2].

Kebanyakan jenis bahan bakar (fuel) yang digunakan pembangkit listrik fuel cell ialah hidrogen (bahan yang mengandung hidrogen), dipasar harganya bergantung pada jenis tabung serta kualitas yang ada, contoh pada pasaran Eropa hidrogen dijual dengan harga \$ 2,2/kg.

Dengan dapat dibandingkan antara kedua jenis data diatas (menurut riset BPPT dengan metode MARKAL dan riset oleh DOE A.S). Riset ini menunjukkan bahwa investasi pembangkit listrik yang telah ada di Indonesia (tidak termasuk nuklir) masih lebih murah ketimbang dengan *fuel cell* terutama di pulau jawa.

Dari segi harga jual, kini harga TDL (tarif dasar listrik) masih jauh lebih murah yaitu Rp 560/KWH (subsidi) dan Rp 1.380/KWH (nonsubsidi), dibanding harga jual listrik komersial fuel cell PEM bisa mencapai Rp 8.280/KWH (dengan asumsi \$ 1 = Rp 9200) [1].

Akan tetapi riset BPPT (2005) tersebut kurang memperhatikan pertimbangan tingginya harga minyak bumi, barang tambang (batubara) yang kini telah jauh melambung jauh. Oleh karenanya pembangkit listrik fuel cell dapat menjadi salah satu alternatif pengembangan kedepan.

2.4.2 Biaya Pembangkitan

Komponen biaya pembangkitan terdiri atas empat komponen, yaitu:

- a. Biaya modal atau biaya kapasitas (\$1000-\$1500/kw)
- b. Biaya operasi dan perawatan yang bersifat tetap
- c. Biaya bahan bakar (harga hidrogen \$ 2,2/ kg)
- d. Biaya operasi non bahan bakar yang bersifat variabel

Dari empat komponen tersebut, (a) dan (b) adalah biaya tetap (*fixed cost*) yang nilainya tidak tergantung pada besar kecilnya energi listrik yang diproduksi /terjual, sementara (c) dan (d) merupakan biaya variabel (*variable cost*) yang nilainya tergantung pada besar kecilnya energi listrik yang diproduksi/terjual. Selaras dengan sifat biayanya, biaya pembangkitan akan dibagi menjadi dua, yaitu biaya tetap (disebut juga biaya kapasitas, *capacity cost*) dan biaya variabel (disebut juga biaya energi, *energy cost*). Satuan biaya kapasitas yang digunakan

adalah rupiah per tahun dan rupiah per kwh. Kemudian, satuan biaya energi yang digunakan adalah rupiah per tahun dan rupiah per kwh.

Biaya Kapasitas total yang dihasilkan telah memperhitungkan imbal hasil atas investasi yang dilakukan (*Return on investment, ROI*) yang dihitung dengan cara :

$$\text{Biaya Kapasitas (Rp./kw/thn)} = \frac{(\text{replacement cost per kw} \times \text{Kapasitas Terpasang})}{\{1 - (1 + \text{ROI})^{-n} / \text{ROI}\}} \quad (2.7)$$

Pada prinsipnya nilai dari *replacement cost* PEMFC dari kapasitas yang terpasang. Nilai investasi juga ditentukan berdasarkan *replacement cost* menggunakan standard internasional setelah melakukan sejumlah penyesuaian, demikian juga persentasi biaya tetap operasi dan perawatan (*fixed OM*) ditetapkan menggunakan standard internasional. Selanjutnya, biaya kapasitas per kw per tahun dalam satuan mata uang dolar dihitung setelah memperhitungkan imbal hasil investasi (*return on investment, ROI*) sebesar 12 % per tahun. Angka ini diambil sekitar 3-5 % diatas BI rate (15 %). Sedangkan usia PEMFC dapat beroperasi 40.000- 49.000 jam (5 tahun) [1].

BAB III

PERANCANGAN PROGRAM SIMULASI PEMFC

Tujuan dari bab ini untuk memaparkan proses perancangan program simulasi karakteristik *stack* PEMFC dalam bentuk yang sederhana berdasarkan persamaan elektro dan kimia. Model simulasi ini dirancang untuk menghasilkan 3 jenis daya yang berbeda yaitu 3 KW, 5 KW dan 8 KW. Untuk memprediksi penggunaan bahan bakar yaitu metan dan hidrogen, air dan panas yang dihasilkan serta daya dan efisiensi dari PEMFC saat memberikan daya ke beban di perumahan dan membandingkannya dengan variasi daya serta kondisi yang berbeda-beda. Pemodelan ini juga menjelaskan sifat elektrokimia dari PEMFC. Proses pengerjaannya menggunakan *software* MATLAB 7.04.

3.1 ASUMSI RANCANGAN SIMULASI

Secara teori, model berdasarkan atas mekanime yang ada dan kebutuhan pengetahuan konstanta model antara lain seperti tahan membran, koefisien transfer. Model juga mempertimbangkan penggunaan hidrogen dari reformer dan penggunaan udara (oksigen) untuk oksidasi. Asumsi utamanya sebagai berikut:

1. Untuk setiap pembangkit PEMFC memiliki area aktif dalam tiap sebesar sel 100 cm^2 (standar pasar) dan jumlah unit sel dalam tumpukan (*stack*) dalam tiap jenis pembangkit yaitu 64 buah untuk kapasitas daya 3 KW, 100 buah untuk kapasitas daya 5KW dan 152 untuk kapasitas daya 8 KW.
2. Model dalam 1 dimensi (bentuk grafik).
3. Temperatur diasumsikan sama pada tiap sel dan besarnya $60^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$.
4. Membran diasumsikan dalam keadaan lembab dan mampu menghantarkan proton dengan baik.
5. Permukaan elektroda memiliki sifat yang menyerap dan bentuknya seragam.
6. Pada anoda jika ada tegangan berlebih akan diabaikan.
7. Tekanan udara awal dianggap seragam (tekanan udara hidrogen sama dengan tekanan oksigen) dengan batas antara 1 sampai 3 atm.

3.2 PERSAMAAN ELEKTROKIMIA DALAM SIMULASI

Kinerja dari fuel cell dipengaruhi oleh beberapa variabel yaitu temperatur, tekanan, gas, komposisi satuan reaktan dan faktor lain (kemurnian dan umur sel). Tegangan keluaran fuel cell dapat di definisikan dengan persamaan [1] :

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{Act} - V_{Ohmic} - V_{Mt} \quad (3.1)$$

Dimana:

- V_{FC} = tegangan keluaran FC, V
- E_{Nernst} = tegangan Nernst /tegangan *open circuit*, V
- V_{Act} = tegangan aktivitasi (disaat *activation polarization*), V
- V_{Ohmic} = tegangan Ohmic (disaat *Ohmic polarization*), V
- V_{Mt} = tegangan akibat perpindahan (*Mass transport losses*), V

3.2.1 Persamaan Nernst Untuk Tegangan Reversibel Fuel Cell

Tegangan reversibel dari cell (E_{Nernst}) ialah tegangan dari sel yang dihasilkan dalam keadaan *open circuit* yang seimbang aliran panasnya. Persamaan ini berhubungan dengan tekanan dan konsentrasi reaktans (hidrogen dan oksigen) yang mengakibatkan adanya energi yang hilang [1 dan 2].

$$E_{Nernst} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}} \right) \quad (3.2)$$

setiap proses reaksi kimia secara langsung bertujuan untuk meminimalkan adanya energi yang hilang dan nilai negatif pada seimbangan [6]. Energi yang hilang itu biasa disebut energi bebas gibbs (*gibbs free energy*), yang didefinisikan dengan persamaan berikut :

$$G = H - TS \quad (3.3)$$

Dimana:

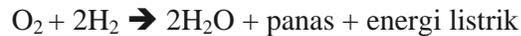
- G = energi bebas Gibbs (*Gibbs free energy*)
- H = entalpi
- T = Temperatur (K)
- S = entrophy

Dari persamaan diatas, terlihat jelas bahwa energi bebas gibbs merupakan fungsi dari tekanan dan suhu. Maksimum energi yang fuel cell dapat hasilkan

ialah sama dengan melakukan perubahan energi bebas Gibbs. Energi yang dilepaskan ini punya manfaat untuk kinerja PEMFC. Perubahan ini didapat dengan membuat selisih energi bebas Gibbs dari produksi (yang dihasilkan) dan reaktan, dengan persamaan sebagai berikut [6] :

$$\Delta(g_f) = (g_f)_{products} - (g_f)_{reaktan} \quad (3.4)$$

Dengan persamaan rekasi kimia :



Maka dari persamaan (3.4) kita dapat menghasilkan perubahan dalam energi bebas gibbs dan persamaannya berikut :

$$\Delta(g_f) = (g_f)_{H_2O} - (g_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(g_f)_{O_2} \quad (3.5)$$

Persamaan 3.5 mengasumsikan bahwa rekasi kimia dalam fuel cell ialah reversibel dan bahwa semua energi bebas gibbs diubah menjadi energi elektro. Perubahan energi ini sama dengan energi yang diproduksi (dihasilkan), oleh karenanya :

$$\Delta(g_f) = -2FE \quad E = -\frac{\Delta(g_f)}{2F} \quad (3.6)$$

Sehingga persamaan ini memberikan tegangan *open cicruit reversibel* dari *fuel cell* hidrogen dan bernilai 1.167 Volt pada suhu 100⁰C . untuk kondisi volume dianggap /diatur tetap (isothermal) dan prosesnya reversibel, turunan dari energi bebas gibbs, sebagai berikut :

$$d(g_r) = VdP \quad (3.7)$$

Dalam keadaan gas ideal:

$$PV = nRT \quad (3.8)$$

menukar V pada pers.3.7 , maka di dapatkan (dalam satuan mol,n=1)

$$d(g_r) = RT \frac{dP}{P} \quad (3.9)$$

Saat persamaan 3.9 diintegalkan dengan nilai jarak antara 1 dan 2 kita dapatkan :

$$\Delta(g_f) = (g_f^1) - (g_f^0) = RT \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (3.10)$$

Fungsi Gibbs (g_f) ini, berhubungan dengan temperatur, dihitung dengan referensi udara tetap yaitu 1 atm. Maka didapatkan:

$$g_f(T_k, P_i) = (g_f^0) + RT \ln(P_i) \quad (3.11)$$

Menggunakan persamaan 3.11 dan 3.5 maka didapatkan:

$$\begin{aligned} \Delta(g_f) &= (g_f)_{H_2O} - (g_f)_{H_2} - \Delta(g_f)_{O_2} \\ &= (g_f^0_{H_2O} + RT \ln(P_{H_2O})) - 1(g_f^0_{H_2} + RT \ln(P_{H_2})) - \frac{1}{2}(g_f^0_{O_2} + RT \ln(P_{O_2})) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Misalkan:

$$\begin{aligned} g_f^0 &= g_f^0_{H_2O} - g_f^0_{H_2} - \frac{1}{2} g_f^0_{O_2}, \text{ pada persamaan 3.12 didapatkan:} \\ \Delta(g_f) &= (g_f^0) + RT \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}(P_{O_2})^{0.5}}\right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Menggunakan persamaan 3.13 maka didapatlah, formulasi berikut:

$$E_{Nernst} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}(P_{O_2})^{0.5}}\right) \quad (3.14)$$

Persamaan 3.14 disebut dengan persamaan Nernst atau tegangan reversibel dari fuel cell yang dipengaruhi temperatur dan tekanan reaktan yaitu hidrogen dan oksigen serta air sebagai buangan proses ini. Dan prosedur untuk menghitung tekanan yang terpisah melibatkan pemeriksaan 3 perbedaan fenomena perpindahan di elektroda yaitu [3]:

- Antara saluran aliran gas dan poros elektroda
- Antara gas phase di elektroda dan sejumlah lapisan air yang mungkin menutupi sisi katalis.
- Antara lapisan air dan permukaan katalis.

Efektifitas tekanan parsial disetiap permukaan dihitung dan nilainya dimanfaatkan untuk mencari tekanan parsial di bagian lain. Untuk mencari tekanan partial pada elektroda dicari dengan persamaan berikut [3]:

$$P_{H_2O} = 10^{-X} \quad (3.15)$$

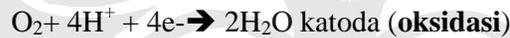
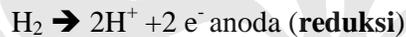
$$X = -2.1974 + 0.02953T_c - 9.1837 \times 10^{-5}T_c^2 + 1.4454 \times 10^{-7}T_c^3 \quad (3.16)$$

$$P_{O_2} = \frac{P_{udara}}{\exp\left(4.192 \frac{i}{T^{1.334}}\right)} - P_{H_2O} \quad (3.17)$$

$$P_{H_2} = \frac{0.5P_{udara}}{\exp\left(1.653 \frac{i}{T^{1.334}}\right)} - P_{H_2O} \quad (3.18)$$

3.2.2 Persamaan Butler-Volmer

Reaksi elektrokimia yang berlangsung di permukaan elektrolit dan elektroda menyebabkan perpindahan elektron melalui beban (*load*) dan proton melalui elektrolit. Dalam perpindahan ini, hambatan mulai muncul dan kekuatan dari hambatan ini menentukan kecepatan reaksi. Reaksi elektrokimia yang muncul di permukaan ialah proses reduksi dan oksidasi :



Dalam kesetimbangan, standar proses reduksi dan oksidasi menghasilkan nilai yang sama dan perubahan arus dihasilkan oleh 2 reaksi ini. Kerapatan arus dinyatakan dengan $I \text{ A/cm}^2$ yaitu arus yang keluar menuju beban dan dapat dinyatakan dengan persamaan Butler Volmer [3]:

$$i = i_o \left[\exp\left(-\frac{2\alpha FV_{Act}}{RT}\right) - \exp\left(\frac{2(1-\alpha)FV_{Act}}{RT}\right) \right] \quad (3.19)$$

Perubahan kerapatan arus I_o ini tergantung dari temperatur dan konsentrasi dari proses reduksi dan oksidasi yang dapat diwakilkan dengan α (alfa), yang nilainya didapatkan berdasarkan eksperimen antara 0.1-0.5 [3]. Baik reaksi reduksi dan oksidasi muncul di elektroda meskipun jika salah satunya ada yang lebih dominan. Pada kondisi kesetimbangan, dimana keduanya memiliki nilai yang sama, elektron yang dihasilkan akan sama dengan nilai elektron yang digunakan. Untuk PEMFC, selama V_{Act} bernilai negatif, eksponensial kedua pada persamaan ini dapat diabaikan, oleh karenanya kita dapat mendapat nilai V_{Act} dari persamaan 3.18 [1] yaitu:

$$V_{Act} = -b \ln\left(\frac{i}{i_o}\right) \quad (3.20)$$

Dimana:

$$b = 2,3 \frac{RT}{2\alpha F} \quad (3.21)$$

3.2.3 Ohmic Losses

Ohmic losses ialah tegangan yang hilang akibat adanya hambatan ketika proton berpindah tempat, dapat dinyatakan sebagai berikut [1]:

$$V_{ohmic} = -iR_{internal} \quad (3.22)$$

nilai dari R internal memiliki besar yaitu 0.191 sampai 0.275 [3]. Hambatan membran berkurang sebanding dengan berkurangnya ketebalan. Menurut percobaan dari Xuezhong Du [3] didapatkan bahwa pada membran komersial dipasaran bahwa didapatkan spesifikasi sebagai berikut $V_{FC} = 0,55$ V dan $i = 1A/cm^2$.

3.2.4 Mass-Transport Losses

Loses konsentrasi ini muncul bertujuan untuk mengurangi konsentrasi dari oksigen dan hidrogen di daerah elektroda saat beroperasi. Perubahan jumlah konsentrasi ini menyebabkan sedikit berkurangnya tekanan partial, akibatnya terjadi open circuit dari fuel cell. Kerugian secara jelas terbesar terjadi saat hidrogen dikirim dari reformer, akibatnya tidak bisa memrespon beban puncak dengan cepat. Kerugian mass transport dipengaruhi oleh kondisi operasi (temperatur cell, tekanan gas, dan lain-lain), bentuk MEA, desain cell dan dapat diekspresikan dengan persamaan berikut [1]:

$$V_{Mt} = \alpha_1 i^K \ln(1-\beta i) \quad (3.23)$$

3.2.5 Tegangan, arus dan daya yang keluar

Tegangan yang keluar dari fuel cell ialah dengan menjumlahkan semua rugi yang ada, polarisasi, dengan tegangan open circuit Nernst reversibel sebagai berikut [6]:

$$V_{FC} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}} \right) - b \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) - iR_{internal} + \alpha_1 i^K \ln(1-\beta i) \quad (3.24)$$

Konstanta rumusan diatas bisa dilihat pada tabel 3.1. Arus keluaran digambarkan dari fuel cell secara proporsional langsung menuju nilai penggunaan bahan bakar dan diberikan dengan persamaan berikut [1]:

$$I = K_{Hyd} 2F \quad (3.25)$$

keluaran daya tersedia dari unit n fuel cell dalam KW dan diberikan dalam persamaan berikut [1]:

$$P_{FC} = \frac{(V_{FC}in)}{A} \quad (3.26)$$

3.2.6 Efisiensi

Efisiensi berdasarkan persamaan [3]:

$$Efisiensi = \frac{(\mu_f V_{FC} 100)}{HHV} \quad (3.27)$$

dimana selama produksi air berbentuk embun, HHV (Higher Heating Value = 1.48V) digunakan pada persamaan diatas.

3.2.7 Produksi air

Produksi air dalam kg/jam dapat dihitung dengan persamaan berikut[3]:

$$\text{Produksi air (liter/jam)} = \frac{((\text{Mol. Massa dari air}) \cdot (\text{Daya}))}{3600V_{FC}F} \quad (3.28)$$

3.2.8 Panas yang dihasilkan

Total panas yang dihasilkan pembangkit yaitu Q_{cell} (W) untuk tiap n unit tumpukan fuel cell adalah berbeda antara total daya yang dihasilkan saat pada kondisi ideal (tidak rugi-rugi) dan daya yang dihasilkan saat kenyataan (operasi) karena ada rugi-rugi. Dan dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [3]:

$$Q_{cell} = nI (HHV - V_{FC}) \quad (3.29)$$

3.2.9 Penggunaan Hidrogen dan Metan

Nilai dari penggunaan hidrogen tiap cells dalam satuan Kg/s, dihitung dengan persamaan [3]:

$$H_{2usage} = \frac{(1,05 \times 10^{-8} P_{FC})}{V_{FC}} \quad (3.30)$$

Dari persamaan ini kita dapat bahwa untuk tiap mole dari metane. Didapat 2.02 mole hidrogen sebagai keluaran [3]:

$$Methane_{usage} = \frac{(H_{2usage})}{2,02} \quad (3.31)$$

Konstanta	Data 1	Data 2
i_o	$10^{-6,912} A/cm^2$	$10^{-6,613} A/cm^2$
r	$0,191\Omega/cm^2$	$0,246\Omega/cm^2$
α	0,5	0,5
α_1	0,085	0,112
K	1,1	2
b	$0,06V/doc$	$0,06V/doc$
β	$1,148cm^2/A$	$1,146cm^2/A$
μ_f	0,8014	0,8014

Tabel 3.1 Nilai konstanta data hasil penelitian dan asumsi [3]

3.3 PERANCANGAN ALGORITMA SIMULASI KARAKTERISTIK PEMFC

Untuk memudahkan pembuatan algoritma pemograman pada simulasi ini, maka akan lebih mudah jika menggunakan diagram alur sebagai prioritas awal. Kemudian membuat GUI (*Graphical User Interfaces*) beserta pemograman agar hasilnya dapat langsung diuji dan diamati selama proses pengerjaannya. Selain itu, pengguna selain pembuat program akan lebih mudah menggunakan program ini jika digunakan tampilan yang menyenangkan, pilihan data dan keterangan penggunaan (*user friendly*).

Pemograman ini menggunakan MATLAB yang telah banyak digunakan oleh para mahasiswa sampai peneliti karena sistem yang sangat mendukung untuk melakukan simulasi dan penelitian. Dalam sistem *Matrix Laboratory* (MATLAB) tersedia berbagai macam bahasa pemrograman, fungsi matematika, variasi grafik,

aplikasi program dengan tampilan (*interface*), tersedia pula variasi program optimasi untuk berbagai cabang keilmuan lain seperti logika fuzzy, sistem kendali, telekomunikasi dan lain-lain yang dapat memecahkan berbagai macam masalah di tiap bagian tersebut. Dan pada simulasi ini digunakan 2 sistem dalam matlab tersebut yaitu M-file editor (sistem untuk melakukan pemrograman) dan GUIDE (sistem untuk membuat GUI). Lalu keduanya dipadukan sehingga menjadi program simulasi seperti yang diharapkan.

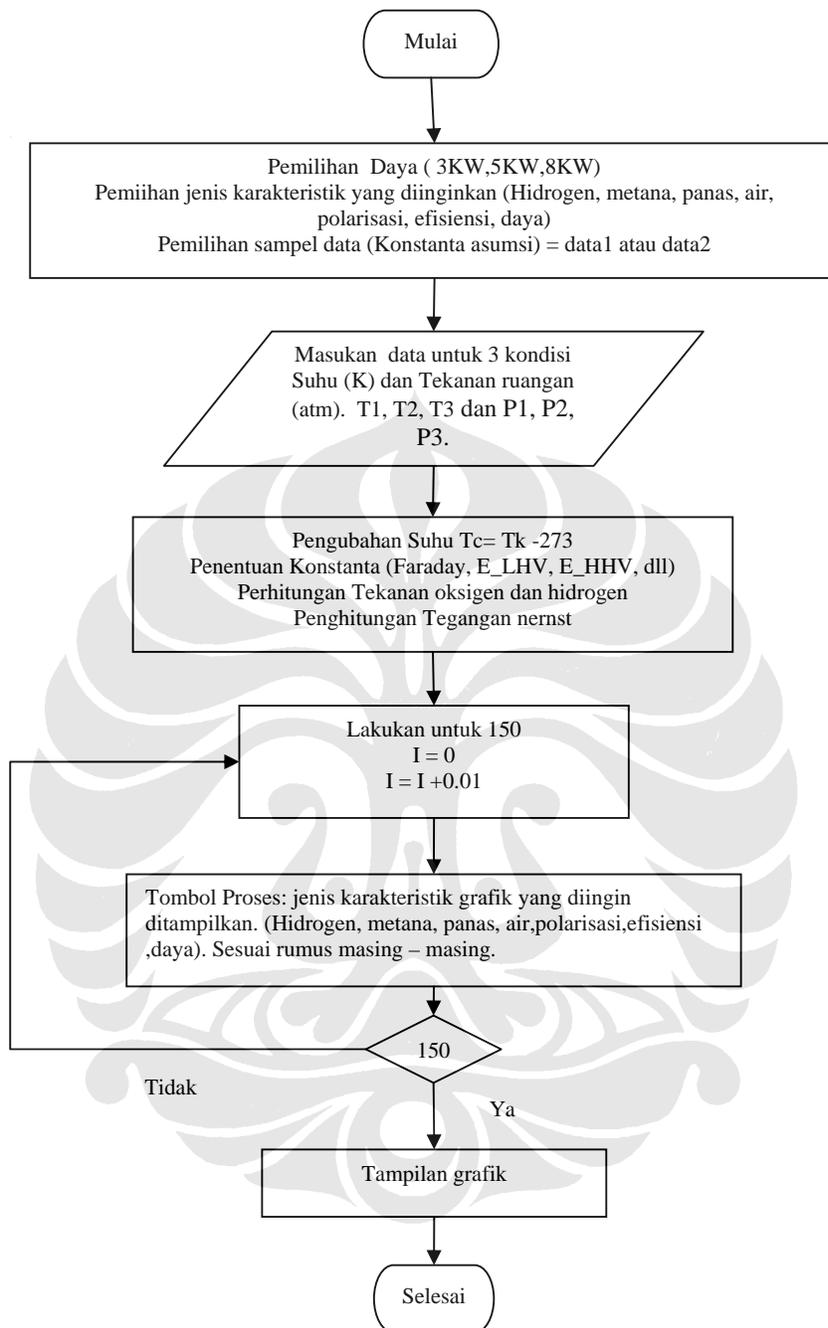
3.3.1 Diagram Alir program

Diagram alir yang dibuat secara sederhana berdasarkan urutan alur pemrograman yang akan dibuat, mulai dari masukan data, proses pengolahan dan hasil berupa grafik.

Proses memasukan data diawali dari 3 pemilihan yaitu besar daya yang diinginkan (3KW, 5KW atau 8 KW), jenis karakteristik yang ingin ditampilkan (Hidrogen, metana, panas, air, polarisasi, efisiensi, daya) dan pilihan sampel data yang diambil dari riset dan asumsi (data1 dan data 2). Kemudian memasukan 3 data suhu dalam kelvin yang akan diubah menjadi celcius dan pasangannya 3 data tekanan (atm).

Pada proses pengolahan data digunakan berbagai konstanta yang telah ada (konstanta faraday dan lain-lain) dengan rumusan untuk melakukan perhitungan mencari nilai tegangan Nernst dan tegangan pada polarisasi dengan data yang dimasukan dilakukan looping untuk 150 data arus sehingga didapat nilai tegangan serta penghitungan karakteristik yang ingin ditampilkan sebanyak 150 kali berupa angka untuk tiap inputan.

Kemudian ditampilkan angka-angka yang didapat dalam bentuk grafik (plot), untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram alir simulasi PEMFC.

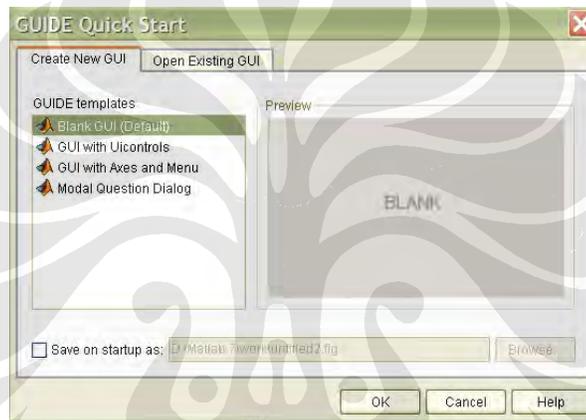
Secara urutan teknis pemrograman ini menggunakan kode (aturan) yang telah disediakan di MATLAB, yang semuanya lengkap terdapat pada MATLAB HELP (F1).

3.3.2 Pembuatan Graphic User Interface

Pembuatan GUI (*Graphical User Interfaces*) di MATLAB bertujuan untuk memudahkan pengguna dalam menjalankan simulasi yang akan dibuat, tanpa harus mengetahui algoritma dan pembuatan kode serta alur berpikir seperti seorang programmer. Hasilnya pun dapat langsung didapatkan sehingga dapat di analisis.

Langkah awal untuk membuat GUI pada MATLAB ialah membuat perintah berupa tulisan (*command*) pada bagian *command window* dengan menulis perintah:

```
>> guide
```



Gambar 3.2 Tampilan awal

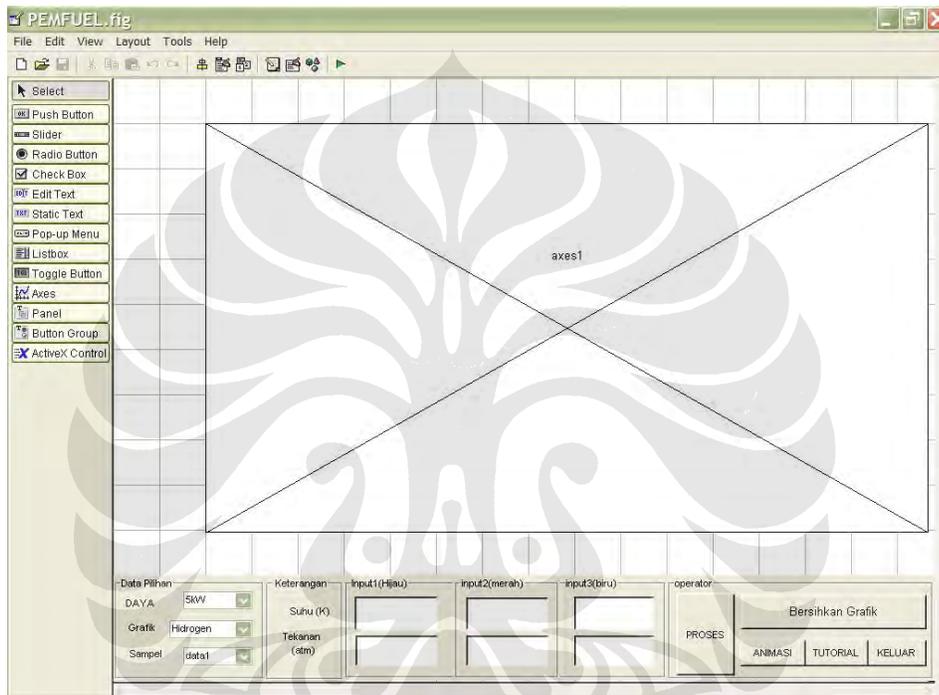
Maka akan muncul tampilan seperti gambar 3.2, langkah selanjutnya membuat GUI dari awal yaitu memilih Blank GUI, atau jika sudah dibuat bisa diambil dari file yang sudah ada (*Open Existing GUI*). Kemudian dibuat sesuai kebutuhan.

Pada simulasi ini dibuat 3 masukan nilai (3 input) dari variasi 2 masukan data yaitu suhu dengan satuan kelvin (T_1, T_2, T_3) dan tekanan dalam satuan atmosfir (P_1, P_2, P_3) yang akan diolah sesuai jenis karakteristik yang diinginkan.

Ada 7 jenis karakteristik grafik yang ingin dicapai dan diamati sehingga dapat dianalisis hasilnya yaitu karakteristik metan, hidrogen, produksi air, panas, efisiensi, polarisasi dan penghitungan daya. Kesemuanya akan diolah dengan rumusan matematis elektrokimia seperti yang dijelaskan dibagian sebelumnya dan

disesuaikan dengan masukan data (input) serta 2 parameter lain yaitu jenis kapasitas daya yang ingin diamati dan data sampel yang diinginkan.

Ada 3 jenis kapasitas daya yang dapat diamati yaitu PEMFC dengan kapasitas 3 KW, 5KW dan 8KW. Sedangkan data sampel yang dapat digunakan ada 2 jenis seperti yang tersedia pada tabel 3.1. Data sampel merupakan jenis konstanta yang didapat penelitian dan asumsi untuk membantu perhitungan rumus yang terdapat tiap karakteristik.



Gambar 3.3 GUI Simulasi PEMFC

GUI yang dirancang seperti pada gambar 3.3 dengan 3 data pilihan yaitu jenis daya, grafik karakteristik yang diinginkan dan sampel data yang semuanya menggunakan *pop-up menu* yang diambil dari *component plate* (Bagian menu disamping kiri dari gambar 3.3). Inputan yang berupa suhu dan tekanan dibuat 3 jenis dari edit text dan disatukan dalam satu *plate* (bagian). Sedangkan dibagian (*plate*) operator terdapat 5 tombol (Button) yaitu tombol bersihkan grafik, tombol proses, tombol tutorial, tombol animasi dan tombol keluar. Untuk hasil (output) yang dicapai berupa grafik yang membandingkan 3 inputan yang berbeda digunakan *axes*, grafik yang ditampilkan cukup 1 grafik saja agar terlihat jelas dan

besar akan tetapi keluarannya 3 jenis grafik sesuai inputan dengan 3 jenis warna berbeda hijau, merah dan biru.



Gambar 3.4 property inspector.

Seluruh bagian dalam GUI tersebut diatur pada masing-masing bagian *property inspector*. Fungsinya untuk mengatur berbagai karkater yang diinginkan seperti pengaturan warna, tulisan, nama fungsi (tag) dan lain-lain yang akan disinkronisasi dengan pemrograman pada M-file.

3.3.2 Pembuatan program M-file

Proses ini ialah bagian terakhir dari perancangan simulasi karakteristik PEMFC, dimana program yang dibuat juga akan disesuaikan dengan GUI yang diinginkan. Proses ini dikerjakan pada *M-file editor* yang telah disediakan oleh MATLAB seperti pada gambar 3.4.

Dibutuhkan pemahaman tentang teknik *coding* pemogram dalam hal ini, untuk dapat memadukan rumusan yang telah ada serta tampilan yang telah dibuat. Rumusan yang digunakan disesuaikan dengan karaktersitik yang ingin ditampilkan pada grafik keluaran.



Gambar 3.5 M-file editor.

Secara urutan teknis pemrograman ini menggunakan kode (aturan) yang telah disediakan di MATLAB, yang semuanya lengkap terdapat pada MATLAB HELP (F1). Secara umum program ini memiliki urutan langkah sebagai berikut:

1. Penggunaan konstanta umum yang digunakan dalam persamaan yang membantu perhitungan karakteristik dari PEMFC seperti konstanta faraday.
2. Pengaturan temperatur pada *stack* PEMFC dan tekanan gas reaktan (hidrogen dan oksigen).
3. Pengaturan konstanta model seperti koefisien untuk menghitung keluaran tegangan dari PEMFC.
4. Menentukan Tegangan saturasi dari air dan tekanan sebagian dari gas hidrogen dan oksigen yang digunakan dalam persamaan Nernst (3.15-3.18) untuk spesifik temperatur dan tekanan dari gas reaktan.
5. Penghitungan polarisasi untuk mendapatkan 3 daerah yaitu *activation polarization*, *Ohmic polarization*, *Mass transport region (losses)* dengan menggunakan persamaan 3.20-3.23.
6. Penghitungan tegangan Nernst atau tegangan open circuit menggunakan tekanan parsial dengan persamaan 3.14.
7. Penghitungan tegangan keluar menggunakan persamaan 3.24 dan dibuat grafik dengan kerapatan arus untuk berbagai variasi temperatur dan tekanan dari gas reaktan.
8. Penghitungan dari penggunaan metan dengan persamaan 3.31 dan dibuat grafik dengan kebutuhan daya, untuk berbagai variasi temperatur dan tekanan dari gas reaktan.
9. Penghitungan dari penggunaan hidrogen dengan persamaan 3.30 dan dibuat grafik dengan kebutuhan daya, untuk berbagai variasi temperatur dan tekanan dari gas reaktan.
10. Penghitungan dari air yang dihasilkan dengan persamaan 3.28 dan dibuat grafik dengan kebutuhan daya, untuk berbagai variasi temperatur dan tekanan dari gas reaktan.

11. Penghitungan dari panas yang dihasilkan dengan persamaan 3.29 dan dibuat grafik dengan kebutuhan daya, untuk berbagai variasi temperatur dan tekanan dari gas reaktan.
12. Penghitungan dari daya yang dihasilkan dengan persamaan 3.26 dan dibuat grafik dengan kerapatan arus untuk berbagai temperatur dan tekanan dari gas reaktan.
13. Penghitungan dari efisiensi yang dihasilkan dengan persamaan 3.27 dan dibuat grafik dengan kerapatan arus untuk berbagai temperatur dan tekanan dari gas reaktan.

3.3.3 Mensimulasikan Program

Untuk mensimulasikan program karakteristik PEMFC ini tentu perlu diketahui cara kerja dari alat sebenarnya, maka untuk memudahkan pengguna program ini menyediakan visualisasi secara animasi cara kerja singkat dari PEMFC sebagai pembangkit dengan format SWF (Sock Wave Flash). Semuanya dapat dilakukan dengan menekan tombol 'animasi'. Pada bagian tombol 'tutorial' dirancang agar pengguna dapat mengetahui cara penggunaan yang baik dan rumusan serta konsep yang lebih mendalam sebab di lengkapi dengan file skripisi dalam format HTML.

Sebelum memasukan data, terdapat pilihan 3 jenis daya, 7 jenis karakterstik grafik dan 2 jenis sampel data yang akan disimulasikan. Sedangkan inputan data dapat dibuat variatif dengan jangkauan nilai yang telah disesuaikan dengan karakteristik kinerja PEMFC , yaitu tekanan dan temperatur. Tekanan gas pada hal ini tekanan parsial dari gas reaktan dianggap sama baik hidrogen dan oksigen yaitu antara 1-3 atm. Dan untuk temperatur dibatasi antara 333-353 ⁰K atau 60⁰C-80 ⁰C.

Setelah 3 inputan tersebut dimasukan datanya maka langkah selanjutnya menekan tombol *proses* yang berfungsi untuk melakukan perhitungan dan membuat grafik dari 3 inputan tersebut dengan hasil (ouput) 3 grafik.

Untuk melakukan simulasi kembali harus menekan tombol *bersihkan grafik* yang fungsinya membuat grafik bersih kembali dengan skala baru, karena tiap jenis, inputan dan karakteristik yang berbeda membuat skala grafik yang berbeda-beda. Sedangkan untuk keluar dari program tersedia tombol *keluar*.

BAB IV

ANALISIS HASIL SIMULASI

Simulasi ini bertujuan menghasilkan kurva karakteristik dari PEMFC yang berjumlah 7 jenis yaitu kurva penggunaan gas metan, kurva penggunaan gas hidrogen, kurva polarisasi, kurva pembuangan air, kurva pembuangan / panas yang dihasilkan, kurva daya yang dihasilkan dan kurva efisiensi pembangkit listrik PEMFC. Dan kemudian menganalisis tiap kurva tersebut serta membandingkannya pada dengan variasi kondisi yang telah dirancang. Selain itu juga harga listrik yang dapat dihasilkan oleh PEMFC sebagai perbandingan dengan tarif dasar listrik yang ada di Indonesia.

Pada simulasi ini digunakan sampel data 1, dengan membandingkan 2 kondisi daya yang dihasilkan yaitu 3 KW dan 5 KW. Tiap jenis simulasi pembangkit dengan daya yang berbeda ini dipengaruhi oleh tekanan gas dan suhu dalam pembangkit PEMFC, maka untuk mengetahui hubungan keduanya diambil 2 kondisi yaitu:

1. Suhu dijaga konstan (isotermik), dengan variasi tekanan.
2. Tekanan dijaga konstan (isobarik), dengan variasi suhu.

Suhu yang diijinkan agar kinerja pembangkit listrik PEMFC dapat bekerja dengan baik ialah 333^0K - 353^0K atau 60^0C - 80^0C . Sedangkan tekanan yang diberikan antara 1-3 atm (*Atmosphere*).

Pada kondisi konstan diambil nilai minimum dan nilai maksimum yaitu 333^0K dan 353^0K untuk suhu, 1 atm dan 3 atm untuk tekanan. Sedangkan untuk tiap kurva terdapat kondisi variatif dengan tiga nilai inputan dari jangkauan yang diberikan, yaitu 333^0K , 343^0K , 353^0K untuk suhu dan 1,2,3 atm untuk tekanan. Hijau sebagai hasil dari inputan pertama, merah sebagai hasil dari inputan kedua dan biru sebagai hasil inputan ketiga. Hasil dari seluruh simulasi ini dapat dilihat pada bagian lampiran.

4.1 ANALISIS KURVA PENGGUNAAN GAS METAN DAN HIDROGEN

Jenis gas	Tekanan (atm)	N (Mol/sec)	Suhu (Kelvin)	Konsumsi (gram/jam)	Daya Maksimum (Watt)
Metan	3	0,016	353	115,2	3500
Metan	3	0,025	353	180	5500
Hidrogen	3	0,0325	353	234	3500
Hidrogen	3	0,0525	353	378	5500

Tabel 4.1 Rata-rata penggunaan gas metan dan hidrogen untuk mencapai daya 3,5 KW serta 5,5 KW

No	Kapasitas daya	Konsumsi gas Hidrogen (g/jam)	Lamanya waktu untuk menghabiskan 1 tabung hidrogen ukuran 12,8 Kg
1	3	234	50 jam (2 hari)
2	5	378	30 jam (1,25 hari)

Tabel 4.2 Hasil pendekatan perhitungan penggunaan gas hidrogen dalam 1 bulan

No	Kapasitas Daya (KW)	Jumlah Tabung Hidrogen (12,8 kg) /bulan	Pengeluaran /bulan	Harga listrik Rp / kwh (Variabel Cost)
1	3	15	Rp 3.886.080	Rp 1.799 / kwh
2	5	24	Rp 6.217.728	Rp 1.727 / kwh

Tabel 4.3 Hasil perhitungan biaya variabel (*variable cost*) pembangkit listrik PEMFC
 Harga hidrogen \$ 2,2 /kg [11] atau Rp20.240 (asumsi \$1 = Rp 9200), artinya harga untuk 1 tabung dengan ukuran 12,8 kg sebesar Rp 259.072

No	Sampel Bulan pada tahun 2008	Jumlah pemakaian LWBP (kwh)	Asumsi Pf	Faktor kapasitas	Faktor kapasitas (capacity factor) rata-rata
1	Januari	260	0.9	0,31	0.28 (28%)
2	Februari	219	0.9	0,25	
3	Juli	243	0.9	0,28	

Tabel 4.4 Penghitungan faktor kapasitas dengan sampel beban pada rumah tangga dengan daya 1300 VA (R1)

Jumlah energi terpakai dalam 1 tahun pada rumah tangga diasumsikan sebesar $3 \times 24 \times 30 \times 12 \times 0,28 = 7257,6 \text{ kwh}$ untuk PEMFC 3 KW dan

$5 \times 24 \times 30 \times 12 \times 0,28 = 12096$ kwh untuk PEMFC 5 KW. Maka didapatkan biaya tetap (*fix cost*) pembangkitan dari hasil pembagian total harga kapasitas (Rp/tahun) dengan asumsi jumlah energi terpakai pada rumah tangga dalam 1 tahun, rinciannya sebagai berikut :

Investasi (US\$/KW)	Umur Thn	FIXED O/M (% thd INV)	CAPACITY US\$/KW/Thn	COST Rp/kW/thn	TOTAL		Harga listrik (FIX COST) Rp/KWH
					Kapasitas Terpasang (kW)	Rp/thn	Rp/KWH
1500	5	10	597.47	5,496,755	3	16,490,264	2,272.14
1500	5	10	597.47	5,496,755	5	27,483,773	2,272.14

Tabel 4.5 Hasil perhitungan biaya tetap (*fix cost*) pembangkit listrik PEMFC

No	Kapasitas daya	Harga listrik produksi PEMFC (Rp/kwh) = Variabel cost + (fix cost X capacity factor)
1	3	4,071.14
2	5	3,999.14

Tabel 4.6 Hasil perhitungan total biaya pembangkitan listrik PEMFC

Pendekatan penggunaan tabung gas hidrogen yang sesuai dengan karakteristik kebutuhan listrik rumah tangga, dapat diperhitungkan dengan bantuan faktor kapasitas kebutuhan listrik rumah tangga. Sesuai dengan sampel yang dipergunakan, maka besar faktor kapasitas rumah tangga yang ada yaitu 0,28.

No	Kapasitas Daya (KW)	Faktor Kapasitas (CF)	Jumlah kebutuhan tabung hidrogen untuk rumah tangga / bulan (CF x Jumlah tabung maksimal dalam 1 bulan)	Pengeluaran biaya tabung gas hidrogen berukuran 12,8 kg untuk perumahan/bulan
1	3	0,28	4 - 5 tabung / bulan	Rp 1,036,288-Rp1,295,360
2	5	0,28	6 - 7 tabung / bulan	Rp 1,554,432-Rp1,813,504

Tabel 4.7 Biaya pengeluaran gas hidrogen untuk produksi listrik PEMFC pada rumah tangga dalam 1 bulan

Kurva penggunaan metan dan hidrogen saling berkaitan karena penggunaan gas hidrogen yang berfungsi sebagai bahan bakar pada pembangkit

listrik PEMFC berasal dari gas metan. Gas metan tersebut diolah pada bagian reformer untuk menghasilkan gas hidrogen, sehingga dapat melakukan produksi listrik seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

Pada lampiran terlihat bahwa pada hasil kurva penggunaan gas metan dan kurva penggunaan hidrogen terlihat untuk daya 3,5 KW memang dicapai seluruhnya ialah 3,5 KW hal ini bertujuan untuk mengatasi rugi atau hilangnya energi yang terjadi pada proses perubahan bentuk energi. Karena pada pembangkit PEMFC hasilnya ialah tegangan DC, maka pada umumnya diberikan alat tambahan konverter DC/DC, inverter DC/AC dan trafo agar dapat digunakan dengan sistem listrik konvensional yang telah ada pada perumahan. Dan hilangnya energi tersebut sebesar 0,5 KW. Begitu pula dengan bagian daya dengan 5 KW dihasilkan daya sekitar 5,5 KW yang bertujuan sama, agar daya yang sampai ke pengguna mencapai daya yang maksimum yaitu 3 KW dan 5 KW. Hal ini berlaku untuk seluruh daya yang ada pada simulasi ini.

Untuk mengetahui besarnya penggunaan gas metan pada PEMFC maka perlu diketahui besar kebutuhan hidrogen yang dibutuhkan agar dapat menghasilkan daya yang diinginkan, hal ini berdasarkan persamaan 3.30 dan 3.31. Dari persamaan tersebut terlihat bahwa daya PEMFC berbanding lurus dengan konsumsi hidrogen, sedangkan hidrogen yang berasal dari gas metan juga berbanding lurus dengan gas metan.

Pada hasil simulasi kurva penggunaan gas metan dan hidrogen, saat suhu dijaga konstan yaitu dengan suhu 333°K (60°C) dan 353°K (80°C) dengan variasi tekanan udara ruangan 1 atm (inputan pertama), 2 atm (inputan kedua) dan 3 atm (inputan ketiga). Hasilnya secara berurut berwarna hijau, merah dan biru, terlihat jelas bahwa untuk menghasilkan daya 3 KW maka dibutuhkan gas metan sebesar 0.016 mol/sec dan gas hidrogen sebesar 0.0325 mol/sec. Sedangkan pada daya yang lebih besar yaitu 5 KW didapatkan pada hasil simulasi, ternyata dibutuhkan gas metan dan gas hidrogen yang lebih besar yaitu 0.026 mol/sec dan 0.0525 mol/sec.

Besar penggunaan gas metan dan hidrogen yang dibutuhkan antara 2 jenis pembangkit ini mendekati perbandingan 3:5. Hal ini membuktikan adanya perbandingan lurus (linier) antara penggunaan gas metan dan hidrogen sebagai

sumber bahan bakar dengan daya yang dihasilkan yaitu 3000W : 5000W atau 3:5 artinya semakin besar daya yang ingin dihasilkan maka dibutuhkan penggunaan gas hidrogen yang lebih besar, salah satunya dari gas metan.

Pada tabel dan kurva penggunaan gas metan dan hidrogen baik untuk 3KW atau 5KW saat suhu dijaga konstan (isotermik), hubungan antara bahan bakar (metan dan hidrogen) dengan daya terbukti linier yaitu saat penggunaan gas metan dari 0 - 0.016 mol/sec (kapasitas 3 KW) dan dari 0 - 0,0325 mol/sec (kapasitas 5 KW) ; serta saat penggunaan gas hidrogen dari 0 - 0,026mol/sec (kapasitas 3 KW) dan 0 - 0,0525 mol/sec (kapasitas 5 KW). Jika nilai yang ada lebih dari batasan tersebut maka terlihat terjadi penurunan daya secara signifikan yaitu menurunnya grafik menuju daya minimum (0 watt).

Hal ini menunjukkan adanya sifat polarisasi (*mass transport losses*) yang membatasi kemampuan tegangan yang akan dihasilkan oleh sistem sehingga setelah mencapai daya maksimum sistem, sistem PEMFC tidak dapat dipaksakan dengan memberikan bahan bakar berlebih karena dapat menyebabkan ketidakseimbangan sistem, akibatnya terjadi proses difusi yang salah (berbalik arah). Resiko terburuk pembangkit dapat rusak, karena air (sebagai buangan sistem) dapat masuk ke sistem PEMFC. Oleh karenanya perlu dibatasi sesuai karakteristik bahan dan desain yang telah dirancang (MEA).

Terlihat pada kondisi ini meningkatnya tekanan dapat meningkatkan daya yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan adanya peningkatan fungsi energi Nernst yang berbanding lurus dengan tekanan sistem, akibatnya tegangan keluaran dari PEMFC (V_{FC}) mengalami peningkatan. Dan inilah yang mempengaruhi daya yang keluar menjadi berbeda-beda, sebab daya berbanding lurus dengan tegangan atau dapat disimpulkan daya berbanding lurus dengan tekanan.

Selain hal tersebut jika diamati pada pengolahan dan hasil kurva simulasi tersebut, pada saat kondisi 2 kondisi suhu dijaga konstan (isotermik) yang berbeda yaitu 333⁰ K dan 353⁰ K, terdapat perbedaan kondisi. Saat suhu isotermik yang digunakan 353⁰K maka terlihat nilai yang dicapai 3 inputan tekanan (1,2 dan 3 atm) menghasilkan nilai daya yang lebih kecil jika dibandingkan saat isotermik 333⁰K. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh energi bebas gibbs (energi yang dibebaskan atau energi yang dapat dimanfaatkan) yang merupakan fungsi dari

suhu dan tekanan. Dimana penurunan suhu dapat meningkatkan energi bebas gibbs yang ada (4.3).

Sedangkan pada saat tekanan dijaga konstan (isobarik) pada kurva penggunaan metan dan hidrogen baik 3kw atau 5kw, terdapat kecenderungan bahwa semakin besar suhu yang diberikan ada pada sistem, maka daya yang dihasilkan semakin besar. Kondisi ini terjadi karena pengaruh karena meningkatnya tegangan keluaran (V_{FC}) yang sebanding dengan daya yang dihasilkan. Sementara tegangan keluaran (V_{FC}) didapat dari selisih tegangan nernst dengan seluruh tegangan polarisasi. Karena tegangan nernst dipengaruhi suhu saja saat tekanan konstan, dan ia berbanding lurus dengan suhu. Dengan demikian didapatkan pada kondisi tersebut bahwa suhu juga berbanding lurus dengan daya yang ada.

Dengan perbandingan tersebut akan lebih mudah mengetahui penggunaan bahan bakar (metan / hidrogen murni) dengan nilai yang sama tetapi dalam kondisi yang berbeda, untuk mendapatkan pendekatan riil hasil daya yang maksimal dengan simulasi ini.

Pada tabel 4.1 terlihat daya maksimum sebesar 3500 Watt membutuhkan gas metan sebesar 115,2 gram/jam dengan tekanan sistem 3 atm dan suhu 353°K , atau dibutuhkan gas hidrogen sebesar 234 gram/jam dengan kondisi yang sama. Sedangkan untuk menghasilkan daya maksimum sebesar 5500 Watt dibutuhkan gas metan sebesar 180 gram/jam dengan tekanan sistem 3 atm dan suhu 353°K , atau dibutuhkan gas hidrogen sebesar 378 gram/jam dengan kondisi yang sama. Dengan perolehan ini, jika yang digunakan sebagai bahan bakar hidrogen, maka dapat dilakukan pendekatan jumlah kebutuhan tabung hidrogen murni yang ada dipasaran dan cocok untuk wilayah perumahan. Salah satunya standard yang ada yaitu tabung gas hidrogen murni berkapasitas 12,8 Kg dengan tekanan maksimum 5000 psi (340,23 atm) [11].

Jumlah waktu PEMFC bekerja atau jumlah tabung dapat diprediksikan dengan perolehan tersebut, selain itu harga listrik per KWH juga dapat diprediksi. Dengan harga gas hidrogen di pasaran sebesar \$ 2,2 /kg atau Rp20.240 (asumsi \$1 = Rp 9200), artinya harga untuk 1 tabung dengan ukuran 12,8 kg sebesar Rp 259.072. Sehingga jika ingin menghasilkan daya maksimum 3500 watt (pada jenis

PEMFC 3 KW) waktu yang dibutuhkan untuk 1 tabung (12,8 kg) kerja maksimal sekitar 50 jam (sekitar 2 hari). Dan dapat menghasilkan daya maksimal 5500 watt (pada jenis PEMFC 5 KW) dengan lama kerja maksimal sekitar 30 jam (1,25 hari).

Pendekatan perhitungan dapat dibuat dalam 1 bulan jika PEMFC ini dijadikan sumber listrik satu-satunya pada daerah perumahan (dipergunakan beberapa rumah) tanpa hibrid dengan sistem listrik konvensional yang telah ada. Dengan asumsi jumlah penggunaan daya sama tiap bulan yaitu waktu penggunaan 24 jam / hari dan 1 bulan = 30 hari.

Perhitungan biaya pembangkit pada umumnya melalui 2 proses yaitu perhitungan biaya variabel (biaya energi) yaitu dari tabel 4.2 dan 4.3. Serta biaya tetap yaitu dari rumusan 2.6 dan hasilnya pada tabel 4.5. Selain itu untuk mendapatkan nilai pendekatan dari penggunaan energi listrik rumah tangga maka digunakan nilai faktor kapasitas yaitu hasil pembagian nilai energi yang digunakan dengan daya terpasang dengan satuan kwh dan asumsi faktor daya rumah tangga (PF) sebesar 0,9.

Tabel 4.6 menunjukkan biaya pembangkitan total yaitu jumlah biaya variabel dan biaya tetap dari PEMFC mencapai Rp 4,071.14 / kwh untuk kapasitas 3 KW dan Rp 3,999.14 / kwh untuk kapasitas 5 KW.

Perkiraan produksi listrik (tabel 4.7) pada rumah tangga dapat diperhitungkan bahwa kebutuhan tabung hidrogen sebanyak 4-5 tabung atau Rp 1,036,288-Rp1,295,360 tiap bulan untuk kapasitas 3 KW dan 6-7 tabung atau Rp 1,554,432-Rp1,813,504 tiap bulan untuk kapasitas 5 kw.

Jika dibandingkan dengan harga listrik yang telah ada di Indonesia yakin harga TDL (tarif dasar listrik) masih jauh lebih murah yaitu Rp 560/KWH (subsidi) dan Rp 1.380/KWH (nonsubsidi). Akan tetapi dengan harga ini tidak tetap, karena jika harga proses produksi pembangkit listrik masih menggunakan bahan bakar fosil maka harganya dapat terus melambung, sementara kecenderungan harga hidrogen dunia terus turun. Selain itu sumber gas hidrogen bisa didapat dari banyak sumber salah satunya gas metan, yang dapat diperoleh dari sampah atau kotoran manusia. Dengan demikian di masa depan, harga listrik

yang dihasilkan oleh PEMFC dapat ditekan karena bahan bakarnya yang lebih murah.

4.2 ANALISIS KURVA POLARISASI

Bentuk kurva polarisasi yang dihasilkan menghasilkan 3 bagian / daerah, seperti yang dijelaskan sebelumnya yaitu *activation losses*, *ohmic losses*, dan *mass transport losses*.

Pada kurva karakteristik polarisasi ini tidak terpengaruh oleh berapa besarnya daya yang diberikan (3KW atau 5 KW) akan tetapi oleh suhu dan tekanan yang ada, serta jenis sampel data yang diberikan. Karena sampel data yang dibuat sama (konstanta jenis bahan sama) maka sifat polarisasi yang dihasilkan akan sama.

Konstanta jenis bahan yang digunakan dalam simulasi ini berdasarkan penelitian, serta jenis karakteristik bahan (MEA) yang telah ada dipasaran.

Pada kurva hasil simulasi ini yang perlu diperhatikan ialah hubungan antara tegangan keluaran (V_{FC}) dan kerapatan arus yang dihasilkan. Serta pengaruhnya saat diberikan suhu konstan dengan variasi tekanan dan saat diberikan tekanan konstan dengan variasi suhu.

Pada keempat kurva untuk dua kondisi yang ada secara umum terlihat bahwa untuk bentuknya nonlinier untuk daerah *activation losses* ($0-0.2 \text{ A/cm}^2$) dan *mass transport losses* ($1.1-1.3 \text{ A/cm}^2$) sedangkan untuk daerah *ohmic losses* ($0.2 - 1.1 \text{ A/cm}^2$) bentuknya linier.

Saat kondisi suhu konstan dengan variasi tekanan, terlihat bahwa jika tekanan gas yang diberikan semakin besar maka tegangan keluaran (V_{fc}) yang dihasilkan semakin besar. Hal ini dapat terlihat jelas saat tekanan udara yang diberikan 1 atm (hijau) tegangan keluaran PEMFC yang didapat lebih kecil dari tekanan udara 2 atm (merah) dan 3 atm (biru) dengan kerapatan arus yang sama.

Hal ini dikarenakan tegangan keluaran yang ada didapat dari selisih tegangan antara 2 elektroda (Nernst) dengan jumlah dari 3 tegangan polarisasi yang konstan (*activation losses*, *ohmic losses*, dan *mass transport losses*). Dan karena tegangan Nernst dipengaruhi oleh tekanan sistem (tekanan dan tegangan berbanding lurus) maka secara tidak langsung tegangan yang dihasilkan berbanding lurus dengan tekanan yang diberikan.

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{Act} - V_{Ohmic} - V_{Mt}$$

Pada 2 kondisi suhu dijaga konstan (isotermik) yang berbeda yaitu 333⁰ K dan 353⁰ K, terdapat perbedaan hasil polarisasi. Saat suhu isotermik yang digunakan 333⁰K maka terlihat nilai yang dicapai 3 inputan tekanan (1,2 dan 3 atm) menghasilkan nilai daya yang besar jika dibandingkan saat isotermik 333⁰K. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh energi bebas gibbs (energi yang berhasil diubah dari energi kimia ke energi listrik) yang merupakan fungsi dari suhu dan tekanan. Di mana penurunan suhu dapat meningkatkan energi bebas gibbs yang ada.

Perbedaan lain juga tampak pada 2 kondisi isotermik yaitu kecepatan reaksi elektrokimia yang dipengaruhi oleh suhu, saat suhu lebih tinggi maka reaksi yang ada lebih cepat menghasilkan kerapatan arus dan tegangan begitu juga sebaliknya. Hal ini terlihat jelas pada daerah terakhir (*mass transport losses*), dimana tegangan yang dihasilkan mencapai nilai terendah ($V_{FC} = 0$) saat isotermisnya 333⁰K dan tidak pada saat 353⁰K.

Pada tekanan konstan (isobarik) dengan variasi suhu, terlihat bahwa suhu yang terkecil (333⁰K) yang berwarna hijau mencapai nilai tegangan keluaran terkecil jika dibandingkan suhu yang lebih besar yaitu 343⁰K yang berwarna merah dan 353⁰K yang berwarna biru. Namun saat tekanan di perbesar dari 1 atm menjadi 3 atm tampak perbedaan suhu yang ada tidak begitu signifikan berbeda seperti kondisi sebelumnya. Hal yang sama ini juga diakibatkan oleh pengaruh tegangan Nernst dan energi bebas gibbs.

Dengan demikian untuk mendapatkan tegangan keluaran pembangkit listrik PEMFC yang optimum dapat dilakukan dengan memperbesar tegangan nernst (reversibel) dan memperkecil rugi-rugi akibat reaksi (polarisasi) yaitu tegangan aktivitasi (disaat *activation losses*), tegangan Ohmic (disaat *Ohmic polarization*), tegangan akibat perpindahan (*Mass transport losses*).

Untuk memperbesar tegangan nernst dapat dilakukan beberapa, untuk kondisi isotermik maka dengan memperbesar tekanan udara yang ada dan menjaga suhu terendah, sedangkan untuk kondisi isobarik dengan memperbesar suhu yang ada dan menjaga tekanan sistem terendah.

Sedangkan untuk membuat rugi-rugi saat polarisasi menjadi rendah dapat dilakukan dengan menggunakan bahan katalis yang lebih baik sehingga mempermudah proses difusi dan merendahkan energi barrier yang ada pada elektroda maupun katalisator, dengan kata lain perbaikan desain MEA (*Membrane Electrode Assembly*) atau struktur PEMFC sehingga dapat mengurangi rugi-rugi tersebut dan tegangan keluaran menjadi lebih besar.

4.3 ANALISIS KURVA DAYA

Pada kurva daya juga dilihat dari 2 kondisi yang berbeda seperti kurva karakteristik sebelumnya. Pada kurva daya yang dilihat hubungan antara daya dengan kerapatan arus yang ada, ternyata terlihat bahwa dari jangkauan 0-1 A/cm² didapatkan bahwa garis yang terbentuk mendekati bentuk linier yang dikarenakan perbandingan lurus antara daya dengan arus, setelah itu secara gradual mengalami penurunan menuju nol.

Penurunan grafik secara gradual di nilai 1A/cm² tersebut menggambarkan ada pengaruh dari karakteristik polarisasi PEMFC yaitu daerah *mass transport losses* yang membatasi proses difusi dari PEMFC. Dengan demikian pada kurva hasil simulasi daya tersebut, nilai daya terbesar yang dapat dicapai ialah saat arus yang ada mencapai 1 A/cm².

Pada pembangkit dengan kapasitas 5 KW diketahui bahwa dengan luas area membran sebesar 100 cm² maka didapatkan arus totalnya 100 A (I_{total}) dan dengan tegangan sebesar 0,55 serta ada 100 sel yang dihubungkan seri maka didapatkan tegangan total sebesar 55 V (V_{total}). Maka didapatlah nilai pada stack PEMFC nilai daya total sebesar 5,5KW (P_{total}) yang akan dikirim ke DC/DC konverter, inverter dan trafo lalu masuk kesistem listrik perumahan sebesar 5 KW.

Begitu pula daya dengan kapasitas 3 KW yang dengan luas membran yang sama 100 cm² (jenisnya sama) didapatkan arus totalnya 100 A dan tegangan keluaran 0.55V yang sama tiap selnya, karena dihubung seri sebanyak 64 buah didapatkan tegangan total mencapai 35,2V. Maka didapatkanlah daya keluarannya sebesar 3.5KW. Dan 0,5 MW akan menjadi energi yang hilang dalam proses penghantaran dan perubahan energi ke sistem listrik yang ada.

Pada kurva daya, saat suhu konstan dengan variasi tekanan terlihat bahwa dari dua jenis pembangkit dengan daya berbeda terdapat perbedaan dalam tiap

pembangkit karena faktor tekanan udara yang berbeda-beda. Karena hal ini, meski dengan nilai kerapatan arus yang sama yaitu $1\text{A}/\text{cm}^2$, keluaran daya dalam tiap pembangkit (3KW dan 5KW) akan semakin besar sebanding dengan meningkatnya tekanan udara yang diberikan. Terlihat perbedaannya yaitu warna hijau (1atm) , merah (2atm) dan biru (3 atm) terutama saat mencapai daya puncak. Hal ini semakin jelas pada kurva suhu konstan 353^0K dimana antara tekanan gas 1 atm dengan tekanan gas 2 atm dan 3 atm terdapat perbedaan yang sangat signifikan, hasil ini menunjukkan daya yang didapat akan optimum dengan tekanan gas yang optimum.

Hal ini karena daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan arus dan tegangan keluaran, sedangkan tegangan keluaran dari PEMFC juga berbanding lurus dengan tekanan gas yang ada. Sehingga secara tidak langsung daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan tekanan udara yang ada.

Sedangkan perbedaan 2 kondisi isotermik tersebut ialah pada batasan suhu yang lebih rendah (333^0K) didapatkan hasil daya yang lebih maksimum dibandingkan pada suhu yang lebih tinggi (353^0K) yang dikarenakan energi bebas gibbs yang bekerja baik pada suhu yang lebih rendah. Perbedaan lainnya ialah proses kecepatan reaksi yang berbeda dimana terlihat bahwa pada suhu isotermik 353^0K proses perhitungannya ketika memasuki daerah *mass transport losses* tidak sampai nol, sedangkan pada suhu isotermik 333^0K proses hasil dayanya sampai turun ke nol dengan jumlah looping (proses perhitungan) yang sama. Hal ini membuktikan bahwa semakin tingginya temperatur dapat mempercepat reaksi kimia-elektro sehingga mempercepat hasil (memperbaiki katalisator) akan tetapi proses ini memakan energi lebih sehingga mengurangi hasil daya maksimal yang dapat.

Pada kondisi tekanan konstan (isobarik) dengan variasi suhu, terlihat pula untuk mencapai daya optimum maka kerapatan arusnya $1\text{A}/\text{cm}^2$, hubungan antara daya dengan kerapatan arus terlihat bahwa dari 0- $1\text{A}/\text{cm}^2$ atau dari 0 - 3,5KW dan 0-5,5 KW cenderung linier karena hubungan daya dan arus yang berbanding lurus, setelah itu secara bertahap menurun menuju nol karena batas hambatan bahan yang ada (sifat polarisasi).

Pada kondisi ini terlihat bahwa suhu yang semakin besar membuat daya yang dicapai semakin besar. Kondisi ini terjadi karena pengaruh karena meningkatnya tegangan keluaran (V_{FC}) yang sebanding dengan daya yang dihasilkan. Sementara tegangan keluaran (V_{FC}) didapat dari selisih tegangan nernst dengan seluruh tegangan polarisasi. Karena tegangan nernst dipengaruhi suhu saja saat tekanan konstan, dan ia berbanding lurus dengan suhu. Dengan demikian didapatkan pada kondisi tersebut bahwa suhu juga berbanding lurus dengan daya yang ada.

4.4 ANALISIS KURVA EFISIENSI

Dalam hasil kurva efisiensi terlihat bahwa berapa pun nilai daya suatu pembangkit listrik PEMFC yang sejenis karakteristik, spesifikasi dan desainnya akan menghasilkan efisiensi yang sama atau dengan kata lain tidak bergantung terhadap besarnya kapasitas daya yang dapat dihasilkan oleh pembangkit.

Pada hasil simulasi kurva daya terlihat bahwa daya optimum dicapai saat kerapatan arus sebesar 1 A/cm^2 . Mengacu pada hal ini, maka pada hasil simulasi kurva efisiensi untuk melihat efisiensi optimum mengacu pula pada hal yang sama yaitu kerapatan arus sebesar 1 A/cm^2 . Efisiensi yang ada juga mengacu pada nilai tegangan saat yang suhu tertinggi yang diberikan berupa konstanta dari hasil riset atau E_{HHV} (Higher Heating Value) sebesar 1,48 volt. Dan besar rata – rata nilai dicapai efisiensi dapat dicapai ialah 30%.

Saat kondisi suhu konstan dengan variasi tekanan terlihat bahwa efisiensi yang optimum dicapai saat suhu konstan minimum (333^0K) yaitu sebesar 32%. Nilai efisiensi yang ada memiliki ragam bergantung pula pada variasi kondisi tekanan yang ada. Semakin besar tekanan yang diberikan maka semakin besar pula efisiensi yang ada. Pada saat suhu konstan sebesar 353^0K terlihat jelas perbedaan hasil efisiensi yang didapat 2 atm (merah) menghasilkan efisiensi sebesar 29% dan 3 atm (biru) menghasilkan 30% dengan efisiensi saat tekanan udara diberikan 1 atm yaitu 27%.

Hal ini karena berdasarkan persamaan 3.27 dimana efisiensi berbanding lurus dengan tegangan keluaran yang ada pada PEMFC, sedangkan tegangan berbanding lurus dengan tekanan. Sehingga secara tidak langsung efisiensi pembangkit PEMFC berbanding lurus dengan tekanan yang diberikan. Perbedaan

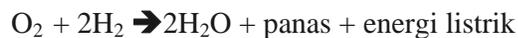
2 kondisi isotermik juga tampak pada pada bagian hasil akhir karena pengaruh *mass transport losses* hasil efisiensi yang ada 0%, selain itu juga kondisi ini membuktikan kecepatan reaksi yang ada dipengaruhi oleh suhu. Semakin besar suhu isotermik maka semakin cepat reaksi meski demikian hasil effisiensinya lebih rendah karena daya yang dihasilkan lebih kecil.

Pada kondisi tekanan konstan dengan variasi suhu maka diperoleh bahwa efisiensi terbesar saat tekanan konstan terbesar (1 atm) dan suhu (353⁰K) yaitu 40%. Pada kondisi ini nilai efisiensi ini juga terpengaruh oleh variasi suhu, semakin besar suhu maka semakin besar efisiensi yang dihasilkan. Hal ini karena pengaruh meningkatnya tegangan keluaran (V_{FC}) yang sebanding dengan daya yang dihasilkan (efisiensi) dan karena tegangan keluaran juga dipengaruhi suhu saat tekanan konstan, dan ia berbanding lurus dengan suhu. Dengan demikian didapatkan pada kondisi tersebut bahwa suhu juga berbanding lurus dengan efisiensi yang ada.

Tetapi tidak seperti saat kondisi isotermik dimana suhu mempengaruhi kecepatan reaksi, pada kondisi isobarik tekanan tidak memberikan pengaruh sama sekali terhadap kecepatan reaksi tetapi justru nilai efisiensi itu sendiri.

4.5 ANALISIS KURVA KALOR DAN AIR YANG DIHASILKAN

Hasil dari proses PEMFC selain energi listrik ialah energi panas (kalor) dan air (H₂O). Perubahan bentuk dari energi ke energi yang lain memang sulit dibuat sempurna selalu akan ada bentuk energi lain yang terbentuk, seperti pada pembangkit listrik PEMFC yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Ternyata tidak sempurna yang diharapkan dimana seluruh energi kimia diubah menjadi listrik, karena ada sebagian yang berubah menjadi energi panas (kalor). Sedangkan air merupakan hasil dari reaksi kimia yang ada.



Pada kurva hasil simulasi energi panas yang dihasilkan terlihat bahwa, pada bagian PEMFC berkapasitas 3 KW didapatkan kalor buangan dari 0 - 55 W dan yang berkapasitas 5 KW didapatkan kalor buangan dari 0 - 90 W semua grafik cenderung berhubungan linier dengan daya yang dihasilkan.

Bentuk hubungan garis linier dapat dilihat dengan meningkatnya daya listrik dihasilkan meningkatkan pula energi panas yang timbul pada pembangkit listrik PEMFC. Hal ini dikarenakan perubahan energi dari energi kimia ke listrik yang tidak sempurna.

Sesuai persamaan 3.29, dimana energi panas yang dihasilkan berbanding lurus dengan arus, jumlah sel dan selisih tegangan HHV (Higher Heating Value= 1.48 V) dengan tegangan keluaran (V_{fc}).

$$Q_{cell} = nI(HHV - V_{FC})$$

Dengan demikian panas buangan sangatlah dipengaruhi oleh arus, selain itu karena terkait pula dengan tegangan pada PEMFC maka kalor juga dipengaruhi oleh polarisasi (sifat bahan), faktor tekanan dan suhu.

Sesuai dengan acuan daya dan efisiensi maka saat daya yang dicapai optimum, pada PEMFC berkapasitas 3 KW didapatkan hilangnya energi yang berubah jadi kalor sebesar 55 Watt sedangkan yang berkapasitas 5 KW energi kalor yang ada sebesar 90 Watt.

Pengaruh polarisasi terlihat ketika setelah daya maksimum dicapai, terjadi penurunan nilai daya secara bertahap menuju nol ketika melewati batas *mass transport losses* ($Q > 55$ KW untuk yang berkapasitas 3 KW dan $Q > 90$ KW untuk yang berkapasitas 5 KW), Hal ini ditunjukkan dengan membesarnya kalor rugi yang ada (semakin kekanan) membuat penurunan daya yang signifikan tajam.

Sementara faktor tekanan dan suhu pada umumnya sama dengan analisis sebelumnya baik pada kondisi isotermik maupun isobarik, karena adanya nilai tegangan keluaran yang dipengaruhi oleh tekanan dan suhu termasuk tahanan polarisasi yang terjadi.

Pada kurva hasil simulasi air yang dihasilkan, terlihat hubungan antara daya yang dihasilkan oleh PEMFC (watt) dengan jumlah air yang dihasilkan (galon / jam). Baik pada PEMFC berkapasitas 3 KW dan 5 KW dihasilkan hubungan grafik yang mendekati linier sebelum memasuki daerah *mass transport losses*. Hal ini terlihat antara 0 - 0,325 liter /jam (3 KW) dan 0 - 0,5 liter /jam (5 KW) hubungan antara daya yang dihasilkan dengan produksi air ialah linier,

No.	Kapasitas daya (KW)	Jumlah yang diproduksi (liter/jam)	Jumlah air dalam 1 hari (liter)
1	3	0,325	7,8
2	5	0,5	12

Tabel 4.8 Hasil pendekatan perhitungan air yang dihasilkan PEMFC

Hubungan linier tersebut sesuai dengan rumusan 3.26 dimana air yang dihasilkan berbanding lurus dengan daya yang dihasilkan, karena daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan tegangan keluaran maka pengaruh isotermis dan isobarik pun sama dengan analisis daya yaitu dipengaruhi sekali oleh tekanan dan suhu yang ada.

Yang menarik ialah masalah pengaturan air dimana jumlah air yang dapat diproduksi cukup besar sekitar 0,325 liter / jam atau 7,8 liter tiap jamnya untuk kapasitas daya 3 KW dan 0,5 liter / jam atau 12 liter tiap jamnya untuk kapasitas daya 5 KW. Oleh karenanya pengaturan air (manajemen pembuangan air) mutlak diperlukan dan terkadang menjadi masalah untuk PEMFC jika pengaturan pembuangannya tidak baik. Hal ini disebabkan oleh proses difusi yang berlawanan arah, dimana proses pembuangan air yang ada seharusnya keluar sistem justru menuju sistem, akibatnya PEMFC yang berisi gas akan kebanjiran air sehingga bukan hanya menghentikan proses menghasilkan energi listrik tapi juga pembangkit PEMFC rusak.

Hal ini dapat dibuktikan dengan hasil simulasi dimana setelah daerah *mass transport losses*, air di produksi akan bertambah semakin banyak serta tak terkendali sementara daya dihasilkan secara signifikan mengalami penurunan.

Pada sisi lain salah satu kelebihan PEMFC tampak hasil buangnya yang ramah lingkungan, dari tabel 4.8 terlihat bahwa hasil buangan berupa air memiliki potensi besar sebagai sumber air baru bagi orang disekitar pembangkit, selain dari alam. Tentu dengan catatan higienis dan tidak tercampur dengan zat kimia yang berbahaya.

BAB V

KESIMPULAN

1. Untuk memperoleh daya maksimum sebesar 3500 Watt dibutuhkan gas hidrogen sebesar 234 gram/jam. Sedangkan untuk menghasilkan daya maksimum sebesar 5500 Watt dibutuhkan gas hidrogen sebesar 378 gram/jam dengan kondisi yang paling baik saat tekanan sistem 3 atm dan suhu 353⁰K.
2. Pendekatan harga listrik (biaya pembangkitan) yang dapat dicapai PEMFC sebesar Rp 4,071.14/KWH untuk kapasitas 3 KW dan Rp 3,999.14/KWH untuk kapasitas 5 KW (pada harga pasar hidrogen \$ 2,2 / kg dan asumsi \$1 = Rp 9200). Harga tersebut kini masih mahal jika dibandingkan dengan pembangkit listrik berbahan bakar fosil.
3. Dengan asumsi yang ada pada kebutuhan listrik rumah tangga, maka dibutuhkan minimal 4-5 tabung hidrogen / bulan (standar 12.8 kg, 5000 psi) atau Rp 1,036,288 – Rp 1,295,360 untuk kapasitas PEMFC 3 KW dan 6 - 7 tabung hidrogen/bulan atau Rp 1,554,432 – Rp 1,813,504 untuk kapasitas PEMFC 5 KW .
4. Efisiensi PEMFC yang dicapai tidak bergantung besarnya kapasitas daya, tapi ditentukan oleh jenis desain PEMFC, dengan nilai efisiensi rata-rata pada simulasi sebesar 30 %.
5. Energi panas (kalor) yang dibuang pada berbagai beban baik kondisi isotermik dan isothermal mencapai 55 watt untuk kapasitas PEMFC 3 KW dan 90 watt untuk kapasitas PEMFC 5 KW.
6. Air yang dihasilkan oleh PEMFC cukup besar yaitu 0,325 liter/jam untuk kapasitas 3 KW dan 0,5 liter/jam untuk kapasitas 5 KW. Oleh karenanya diperlukan pengaturan (kontrol) agar air yang dihasilkan tidak merusak PEMFC (banjir).

DAFTAR ACUAN

- [1] U.S Department of energy, *Fuel Cell Handbok* (EG&G Services Parsons, Inc., 2000).
- [2] M Farooque, Hans C.M., “*Fuel cell- The clean and efficient power generators*,” *IEEE* (12 Desember, 2001), hal.1819-1829.
- [3] Kashyap, V.Avadhanam “*Pem Fuel Cell Power Plant simulation using matlab*” Thesis, University of South Alabama, 2004.
- [4] David Linden, *Handbook Of Batteries And Fuel Cell* (New York: McGraw-Hill, 1990).
- [5] Muh. Abdul Wahid, “Perbandingan Biaya Pembangkitan Pembangkit Listrik di Indonesia”, BPPT (2005) . Diakses 20 Juni 2007.
http://www.geocities.com/markal_bppt/publish/slistrk/slwahid.pdf
- [6] Hoogers, “*Fuel Cell Technology Handbook*,” (Boca Raton: CRC press, 2002).
- [7] D. Georgakis, et al., “*Modeling an Control of A Small Scale Grid-Connected PEM Fuel Cell System.*”, *IEEE* (Mei, 2005), hal 1614-1620.
- [8] P.Buasri, et al., “*An Electrical Circuit Model For A Proton Echange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*“. *IEEE* (Juni, 2006), hal 1-6 .
- [9] Charles Mantell, *Batteries And Energy Systems* (New York: McGraw-Hill, 1983).
- [10] F. David Doty.2004, “A Realistic look at Hydrogen Price Projections”, Doty Scientific ,Inc Columbia, SC. Diakses 20 Juni 2008.
http://www.dotynmr.com/PDF/Doty_H2Price.pdf
- [11] Rosnor Energo, “Hydrogen Production”.Diakses tanggal 20 Juni 2008.
<http://www.rosnor.com/index.php/en/content/download/1246/5380/file/Hydrogen%20study%20ENG.pdf>
- [12] P.J.H Winglear, et al., “*Dynamic Characteristics of PEM Fuel Cell*”. *IEEE* (Mei,2005), hal 1635-1641.

DAFTAR PUSTAKA

- Appleby, A. J. "Fuel Cell Technology: Status And Future Prospects." (London: Elsevier Science Ltd., 1996).
- Buasri, et al., "An Electrical Circuit Model For A Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)". *IEEE* (Juni, 2006), hal 1-6.
- D.Audring, G. Balzer, O. Schmitt and A. Wildenhain, "Impact On Power System By Fuel Cells Supplying Residential Buildings.", *IEEE Porto Pwer Tech Conference* (10-13 September, 2001), hal 1-6.
- Kashyap, V.Avadhanam, "Pem Fuel Cell Power Plant simulation using matlab" Thesis, University of South Alabama, 2004.
- M Farooque, Haru M.C., "Fuel cell- The clean and efficient power generators," *IEEE* (12 Desember, 2001), hal.1819-1829.
- U.S Departmen of of energy, *Fuel Cell Handbok* (EG&G Services Parsons, Inc., 2000).
- Wingelaar P, Duarte J., Hendrix M, "Dyanmic Charateistics of PEM Fuel Cell". *IEEE* (Juni, 2006) , hal 1-6.

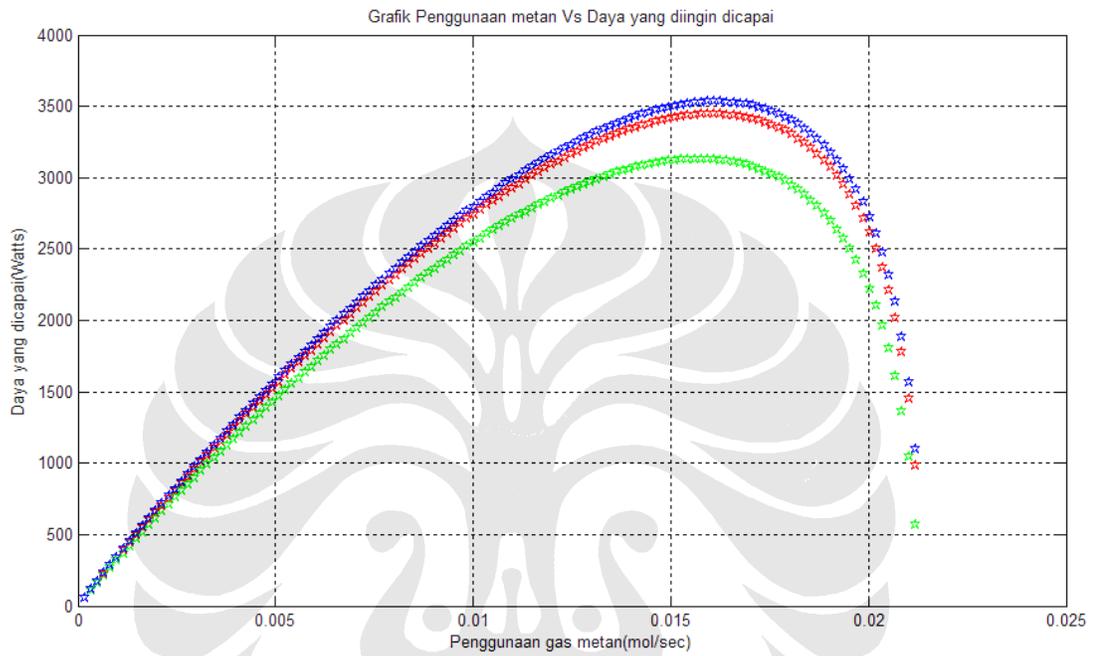
LAMPIRAN

Metan

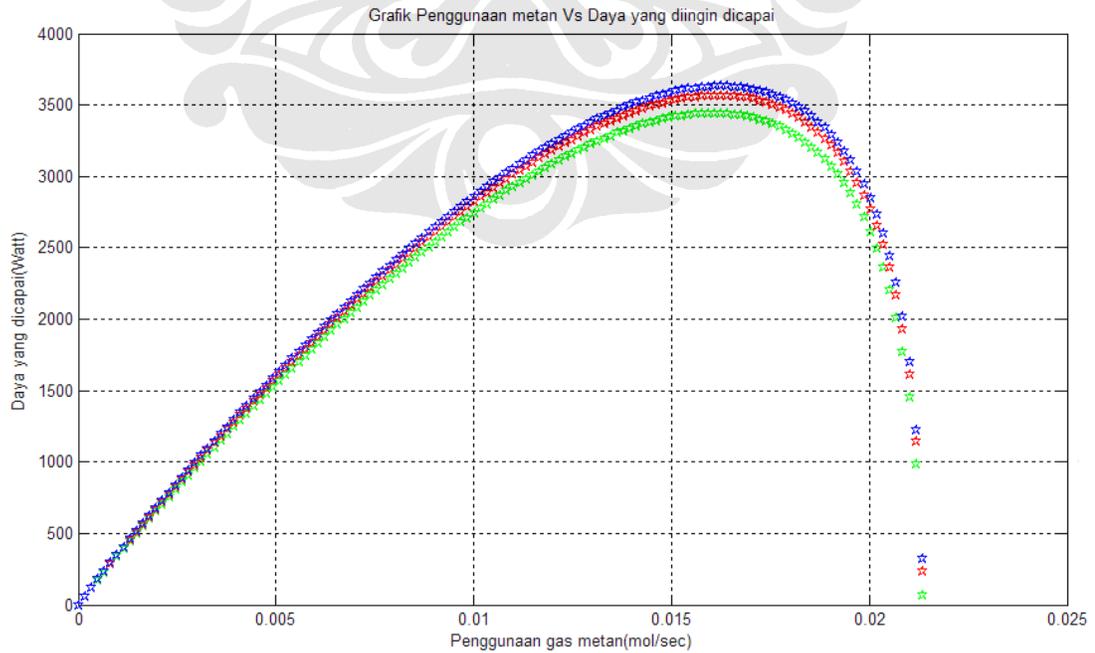
a. Suhu konstan dan variasi tekanan

P = 3kw

353⁰K

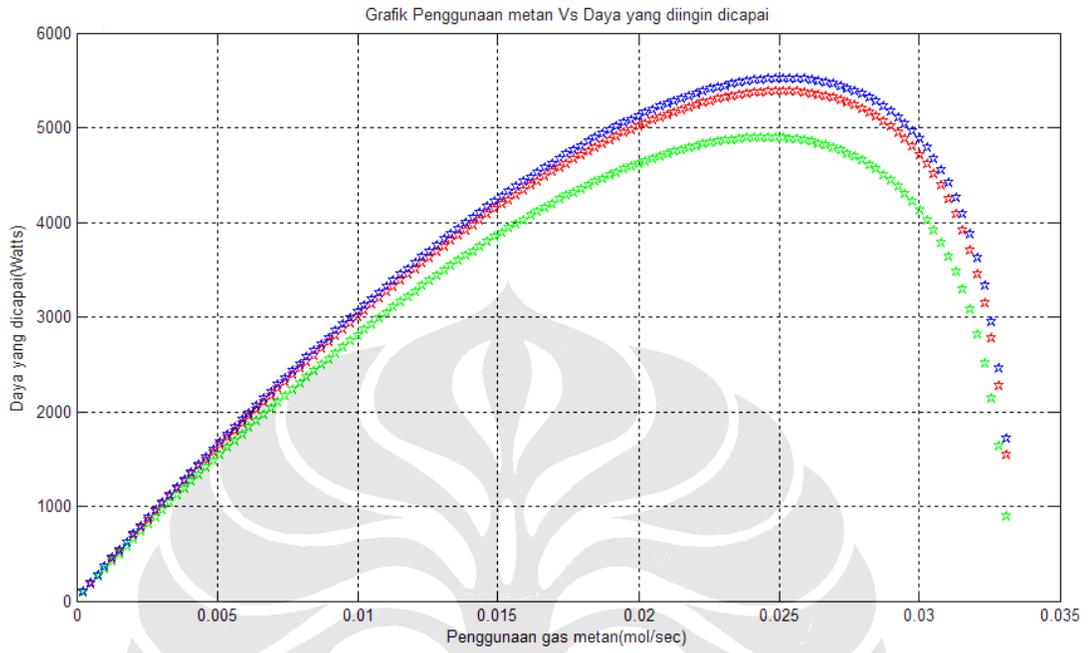


333⁰K

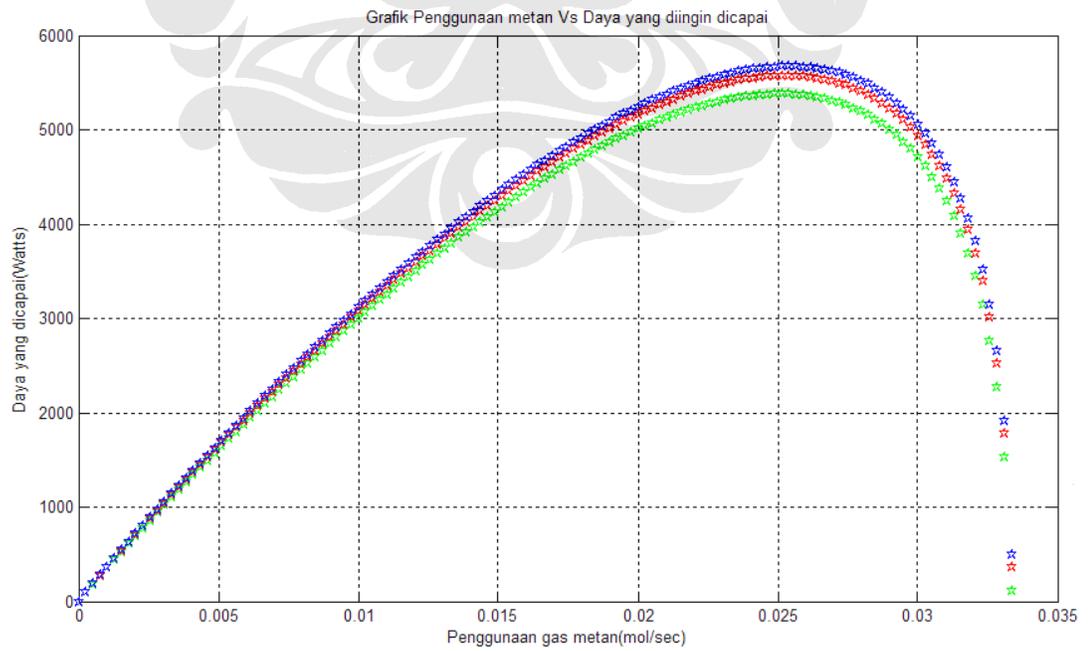


$P = 5\text{kw}$

353^0K



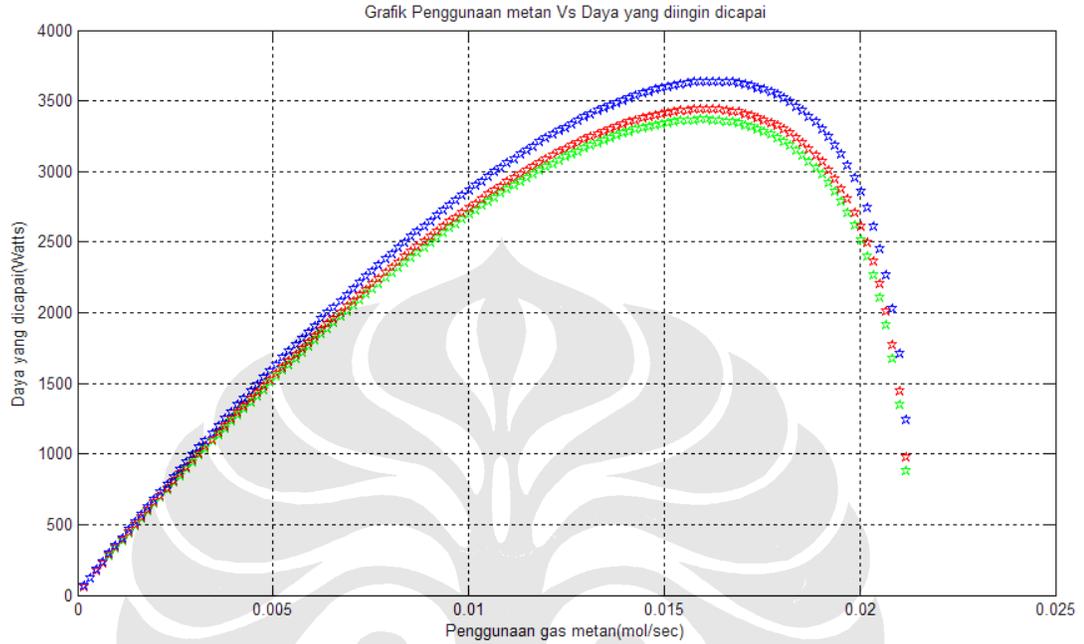
333^0K



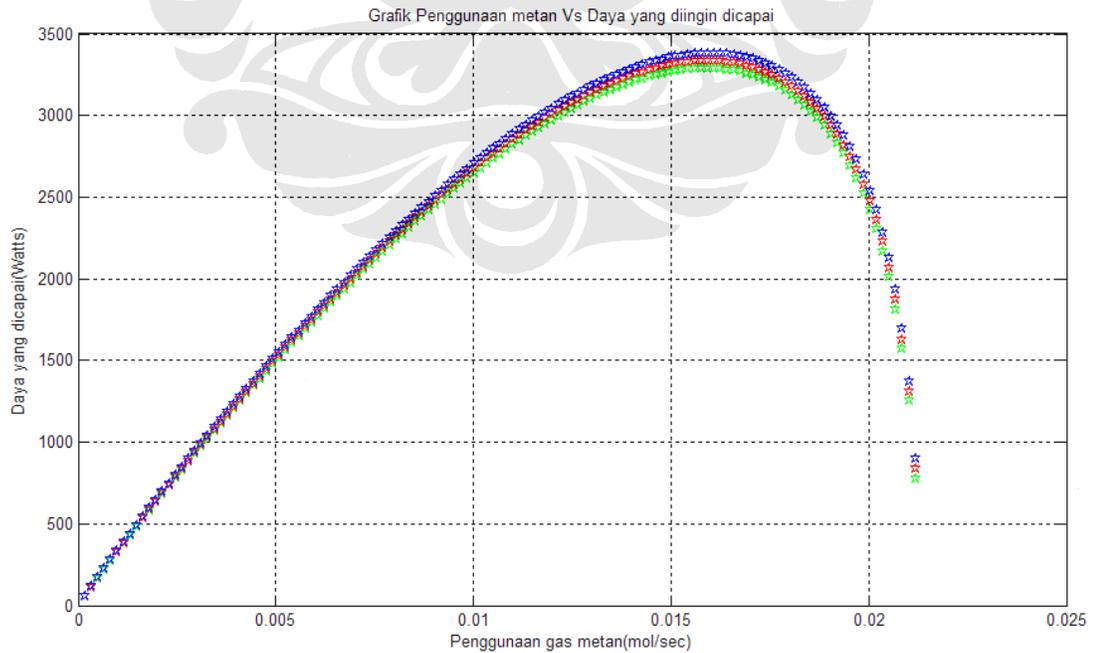
b. Tekanan konstan dan variasi suhu

P = 3kw

1 atm

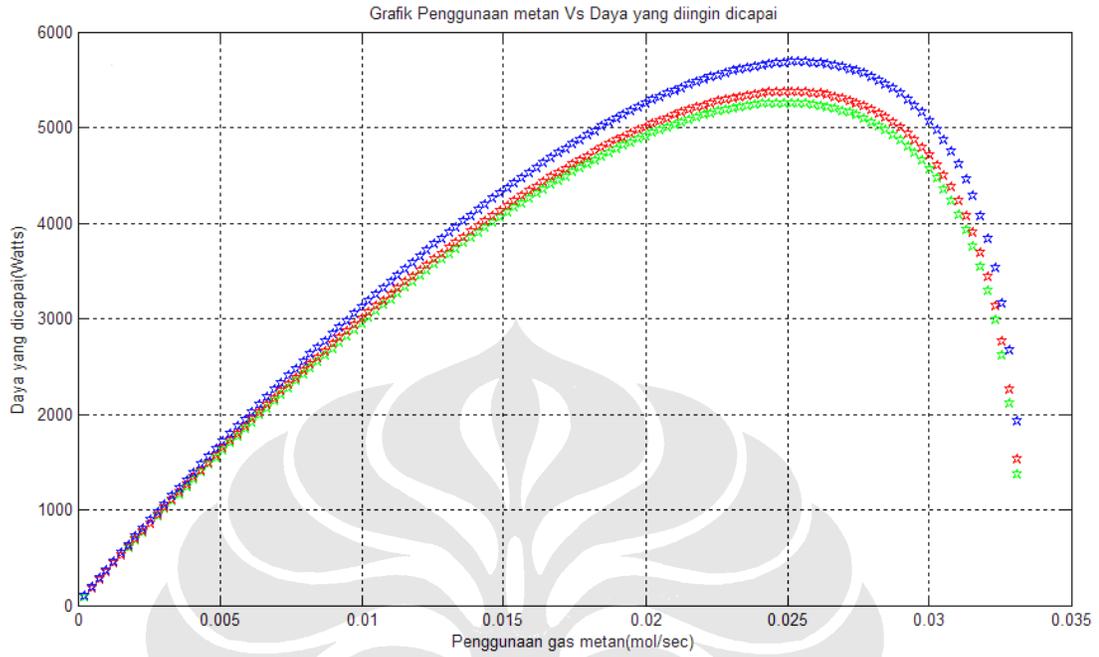


3 atm

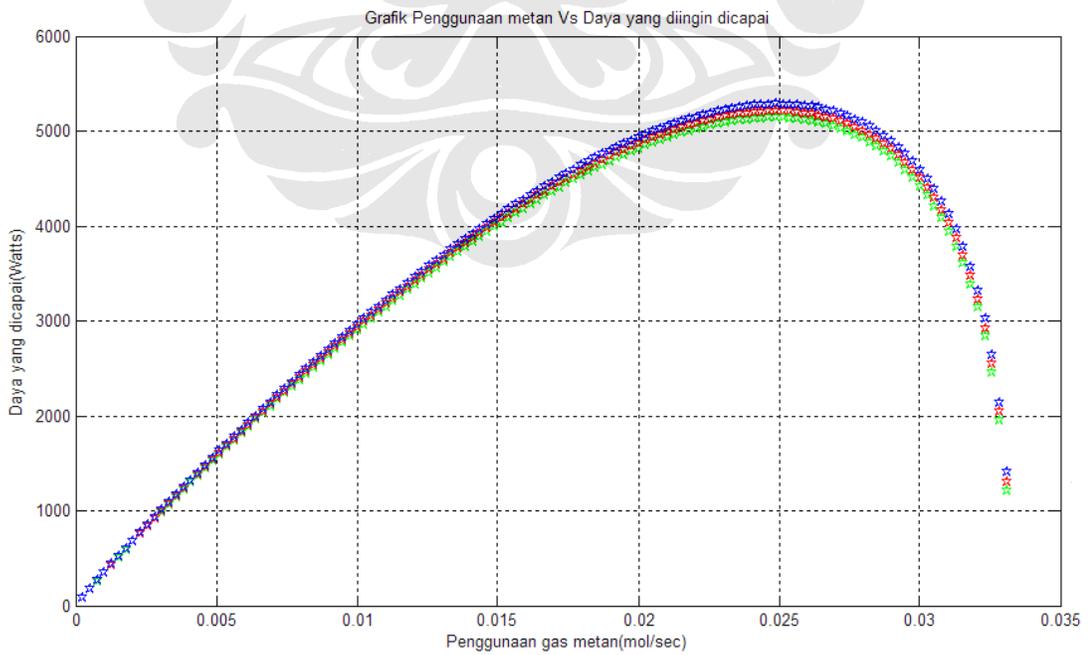


P = 5kw

1 atm



3 atm

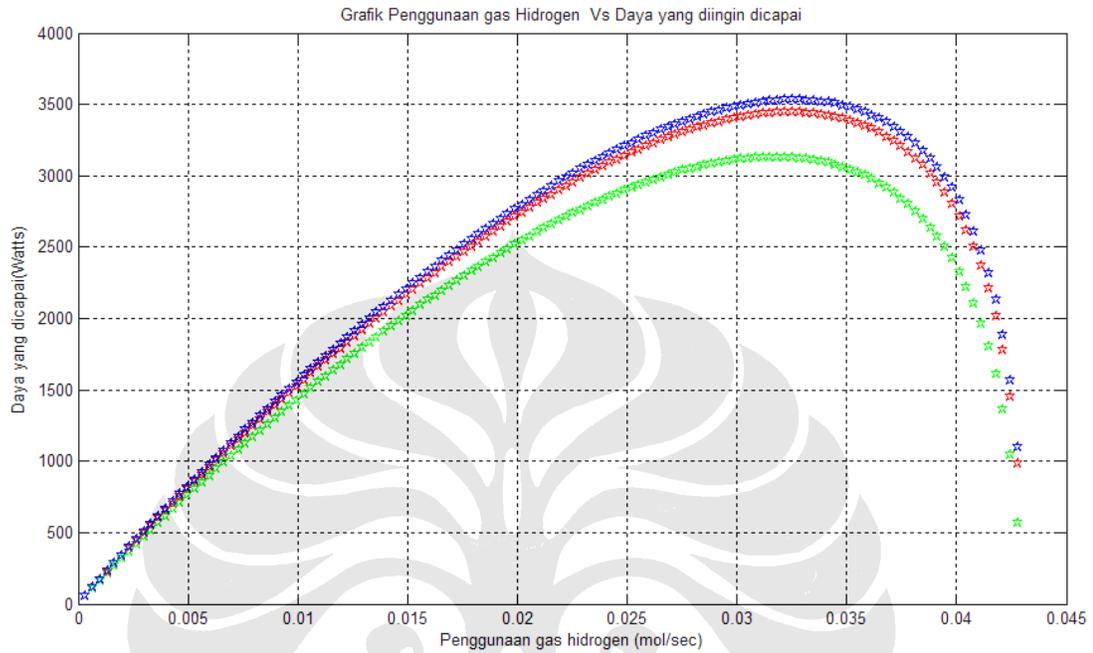


Hidrogen

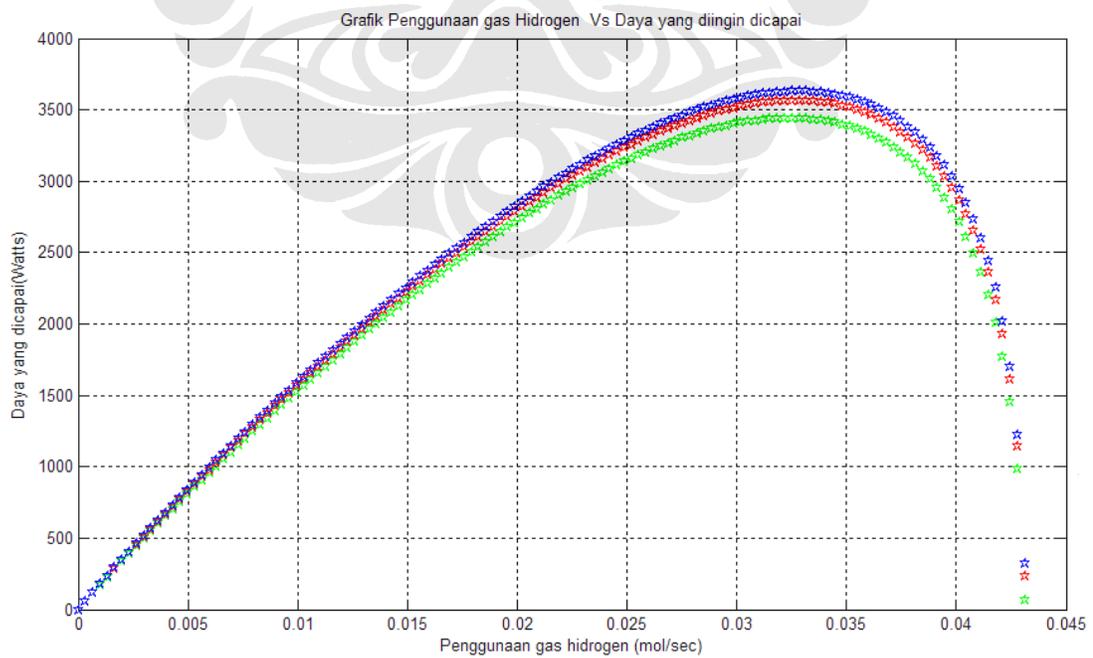
a. Suhu konstan dan variasi tekanan

$P = 3\text{kw}$

353^0K

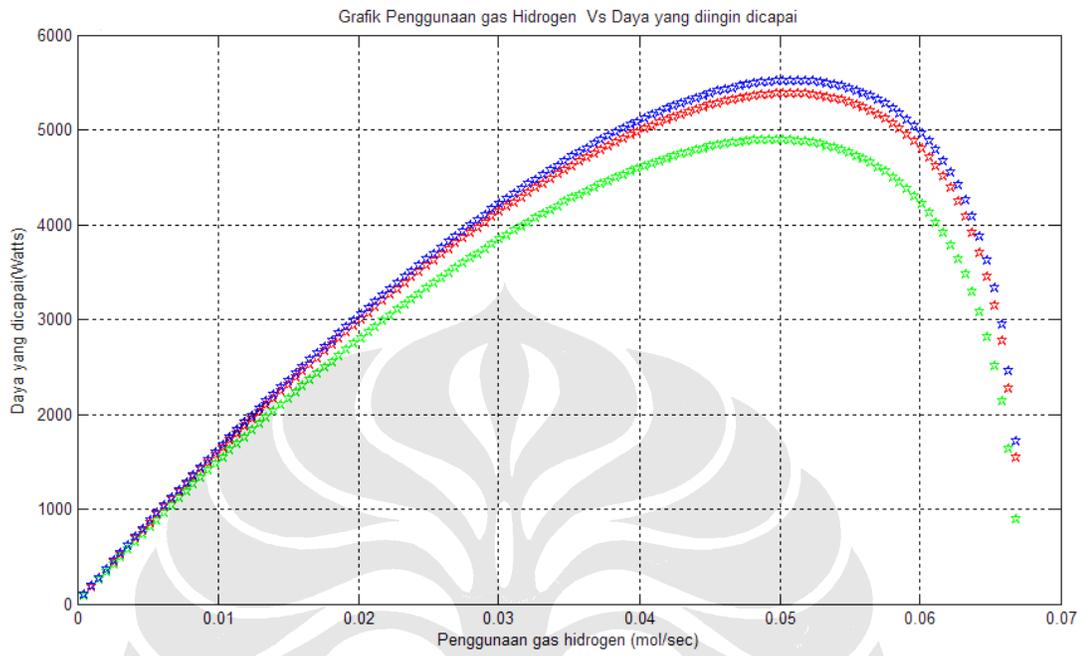


333^0K

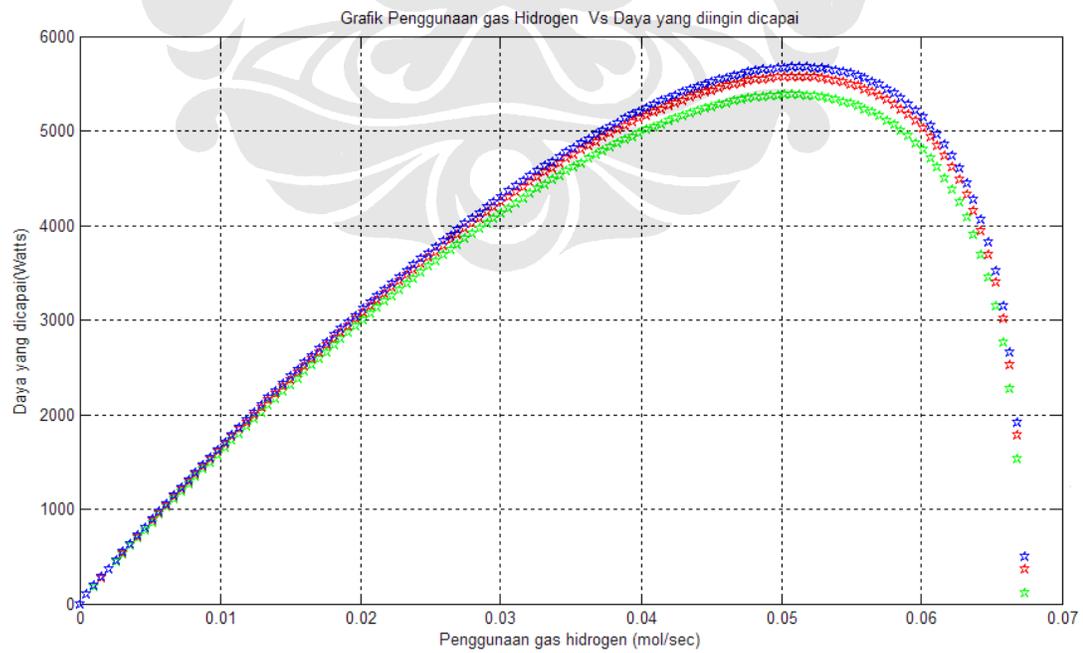


$P = 5\text{kw}$

353^0K



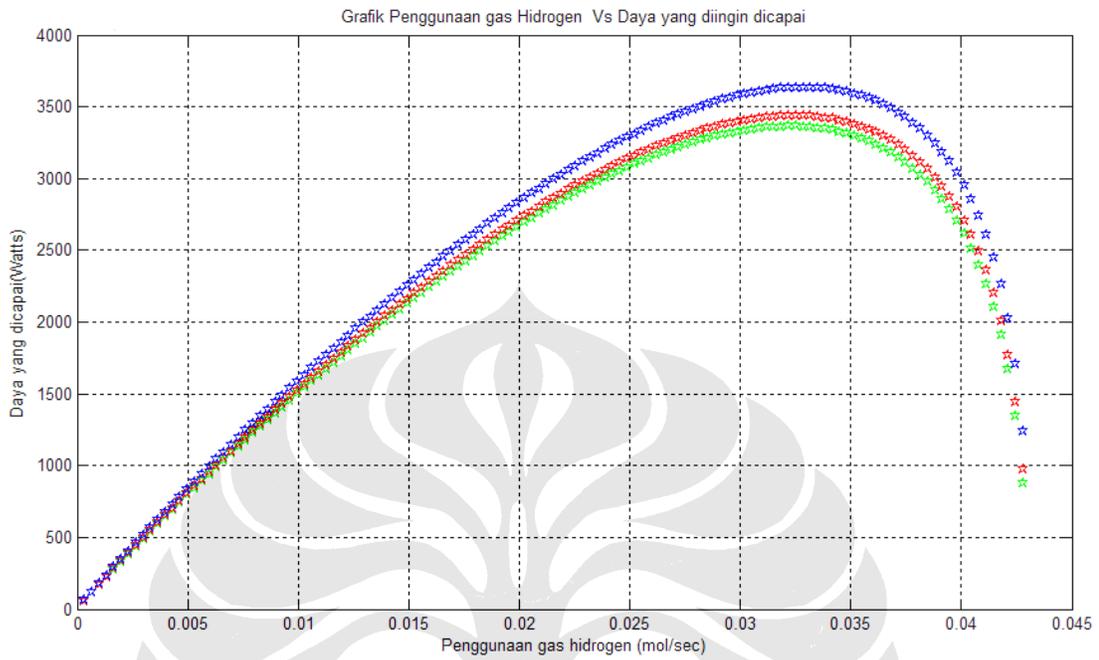
333^0K



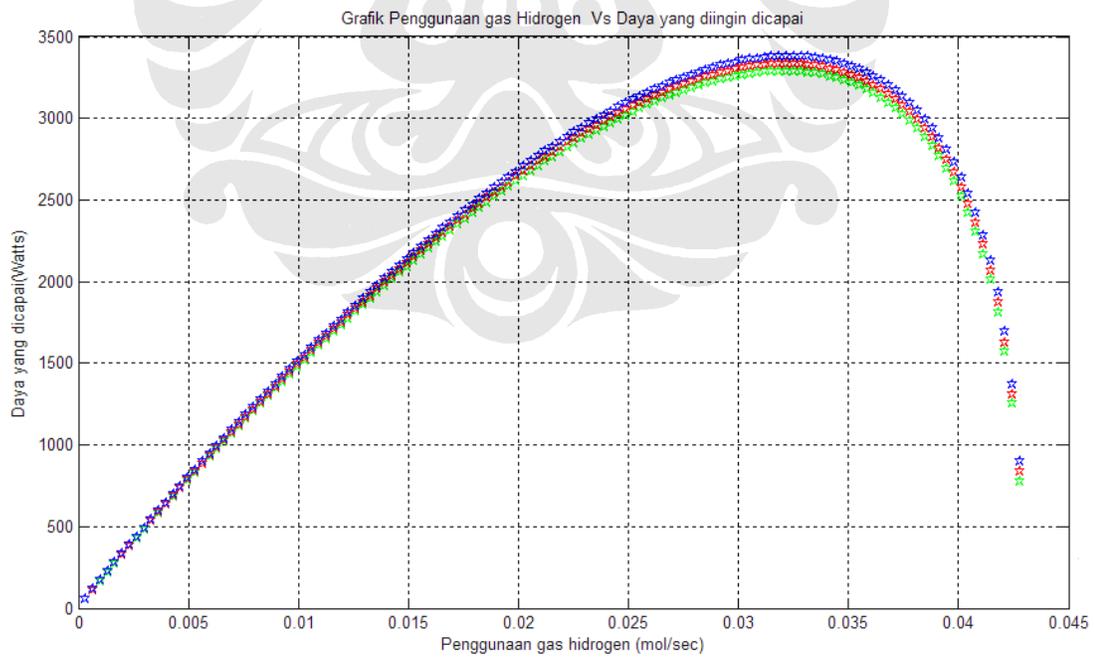
b. Tekanan konstan dan variasi suhu

$P = 3\text{kw}$

1 atm

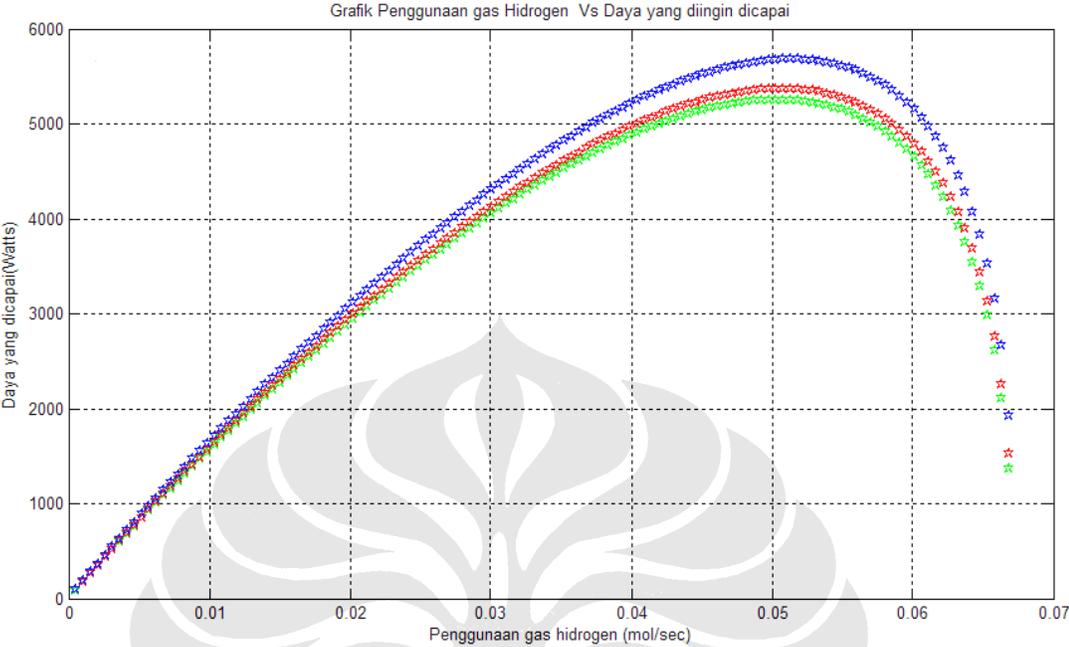


3 atm

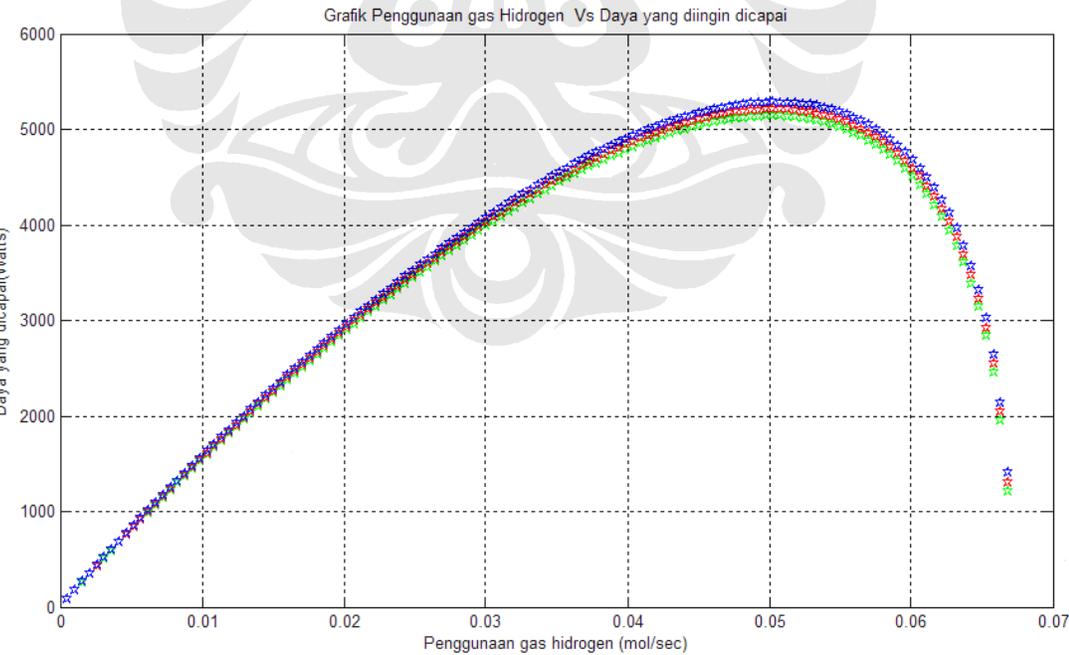


P = 5kw

1 atm



3 atm



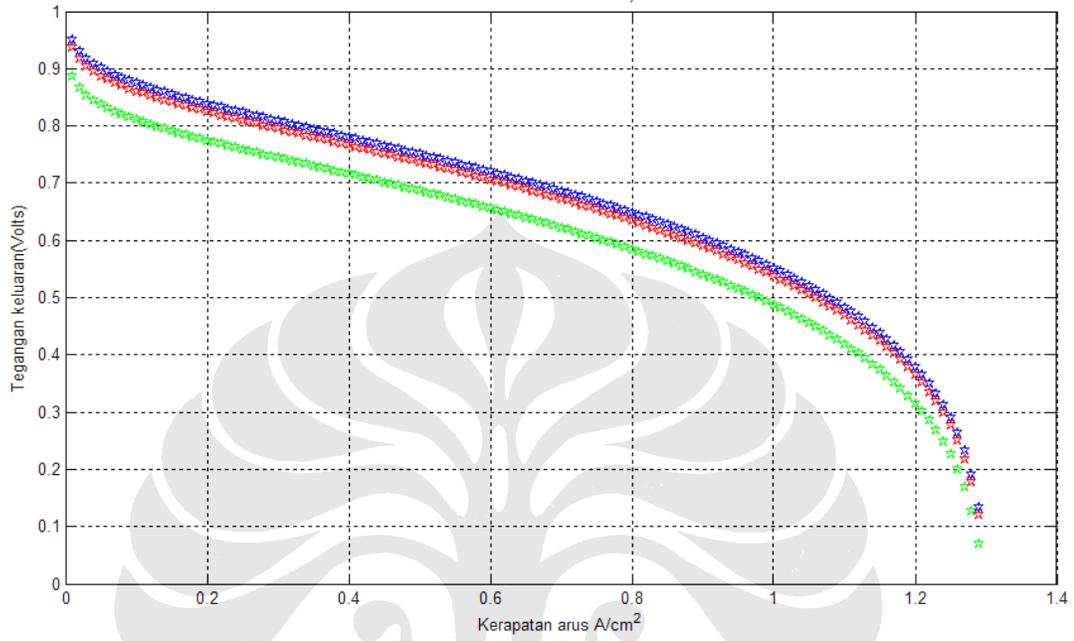
Polarisasi

a. Suhu konstan dan variasi tekanan

P = 3kw dan P=5kw

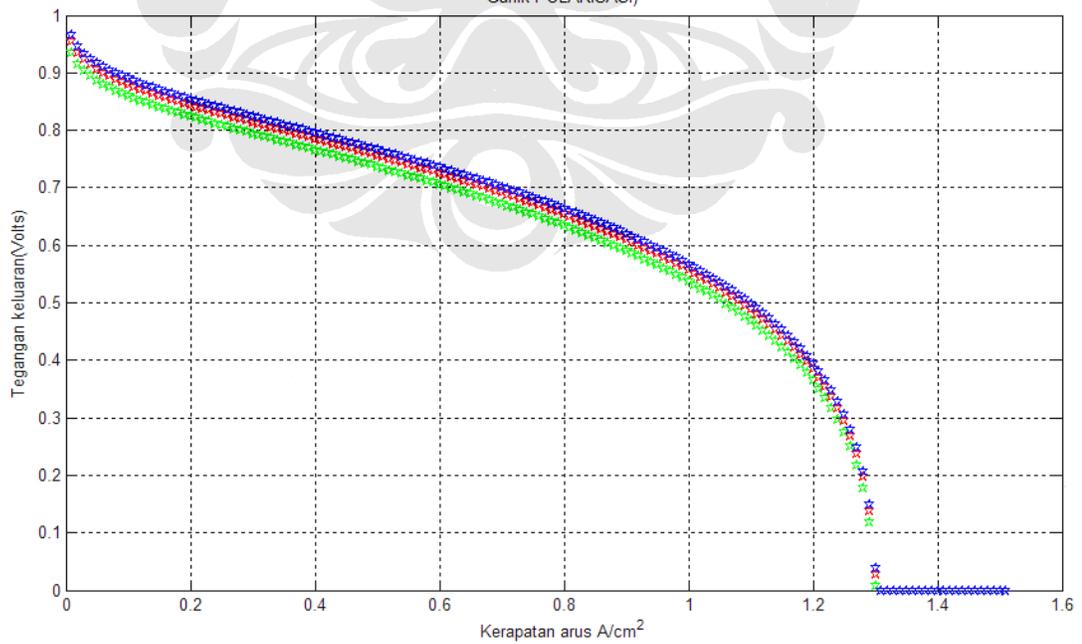
353⁰K

Garfik POLARISASI)



333⁰K

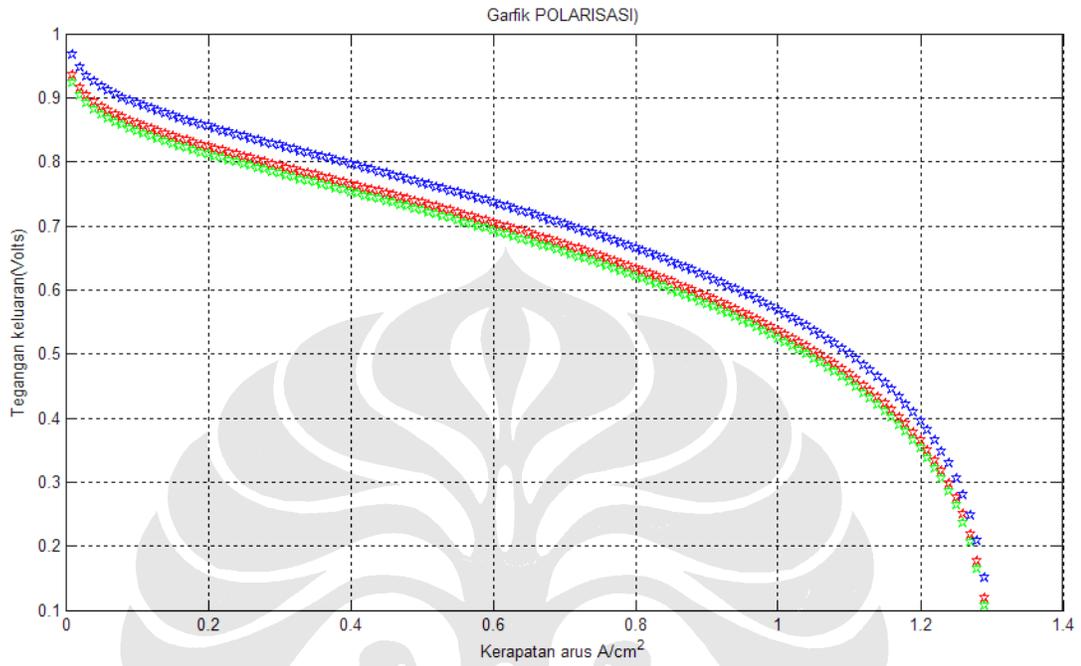
Garfik POLARISASI)



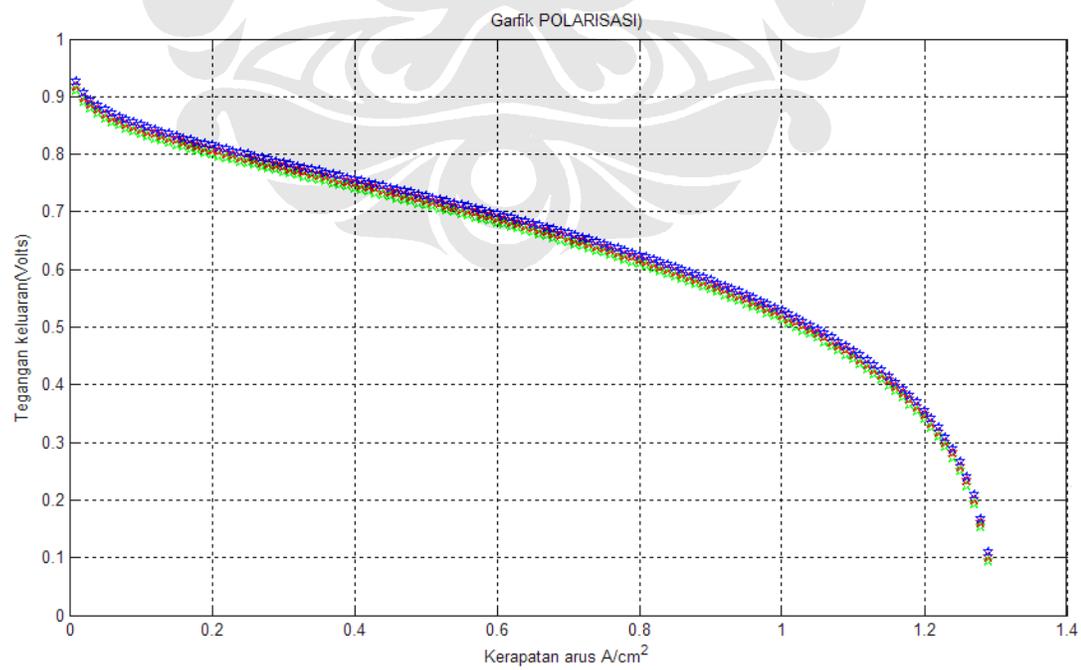
b. Tekanan konstan dan variasi suhu

P = 3kw dan P=5kw

1 atm



3 atm

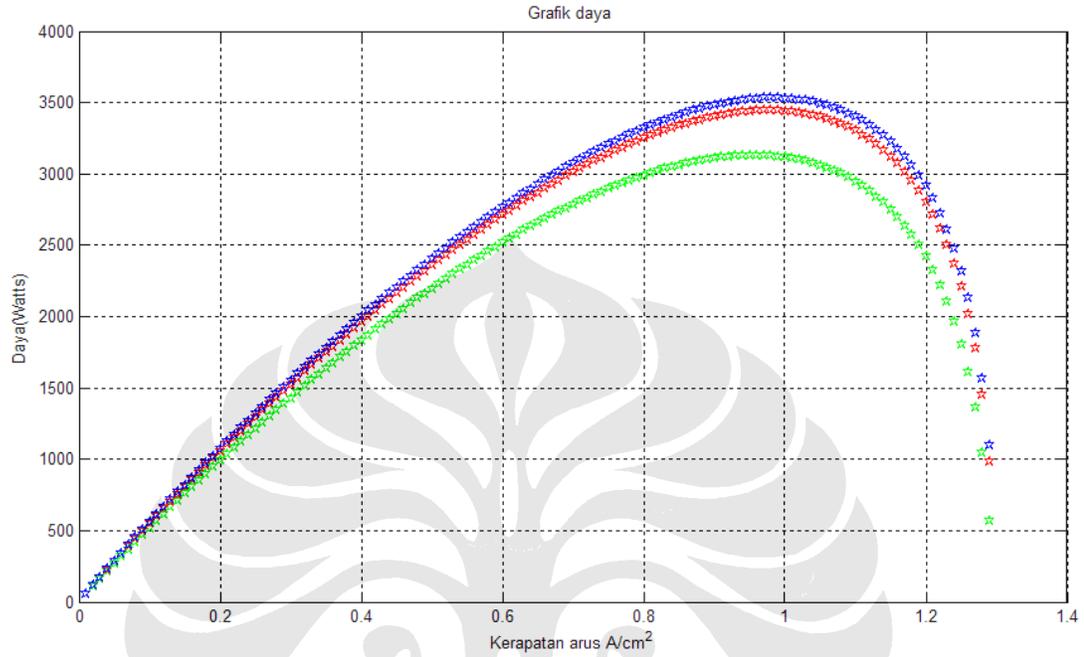


Daya

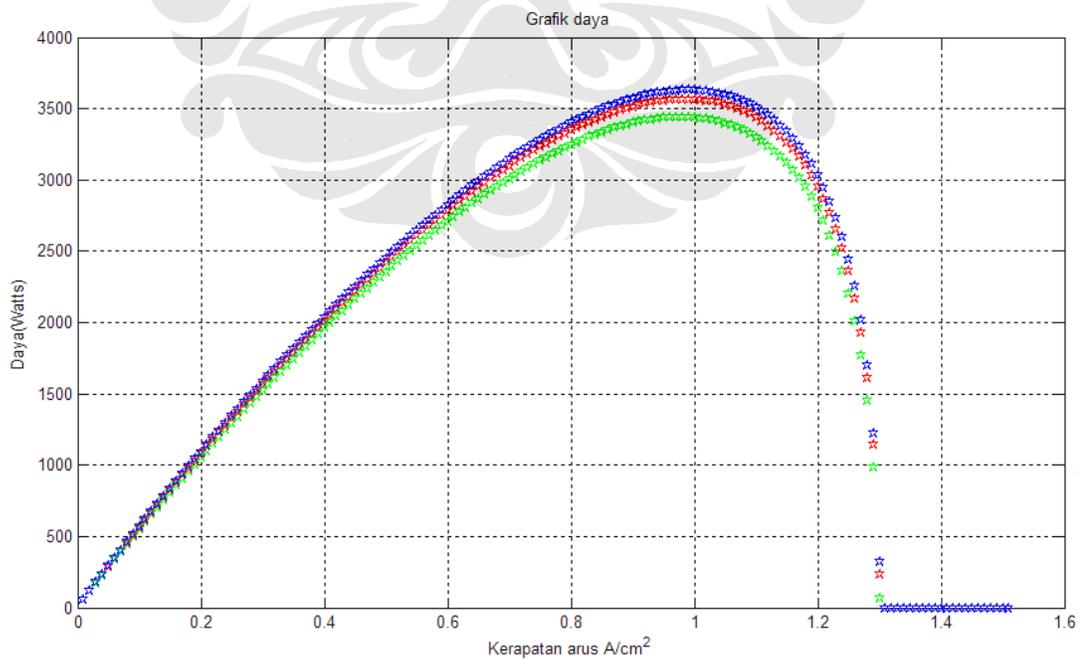
a. Suhu konstan dan variasi tekanan

$P = 3\text{kw}$

353^0K

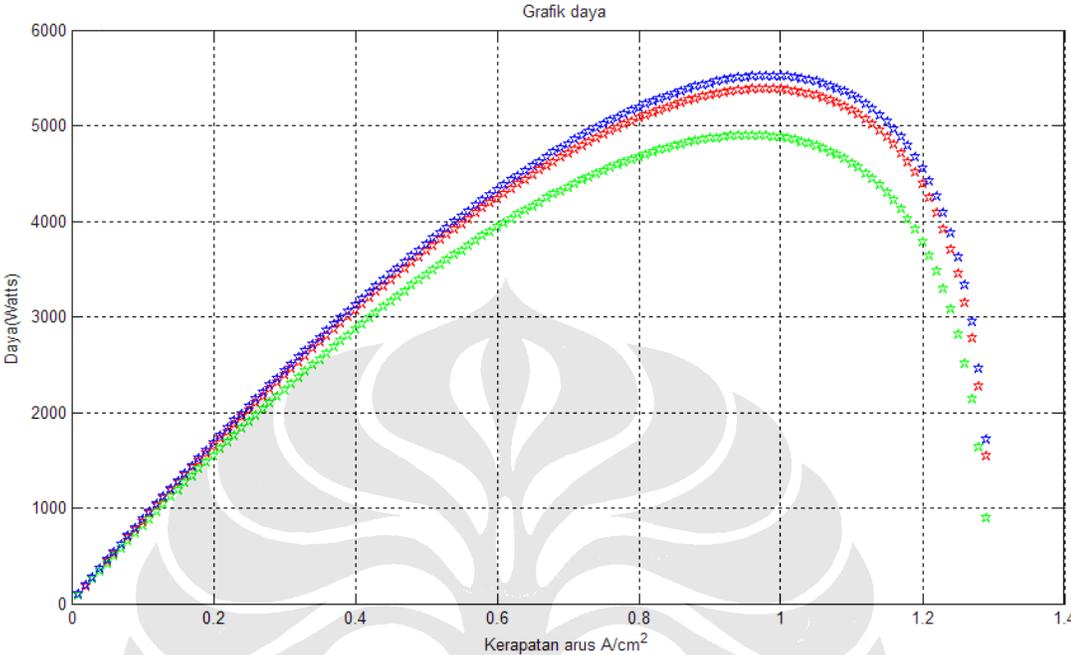


333^0K

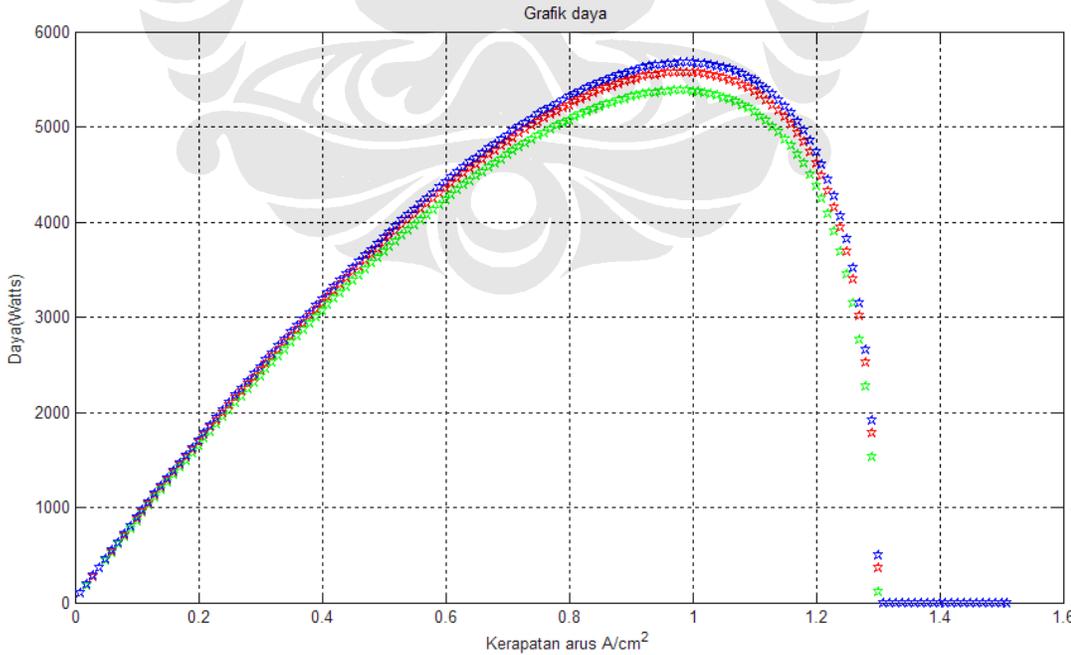


P = 5kw

353⁰K



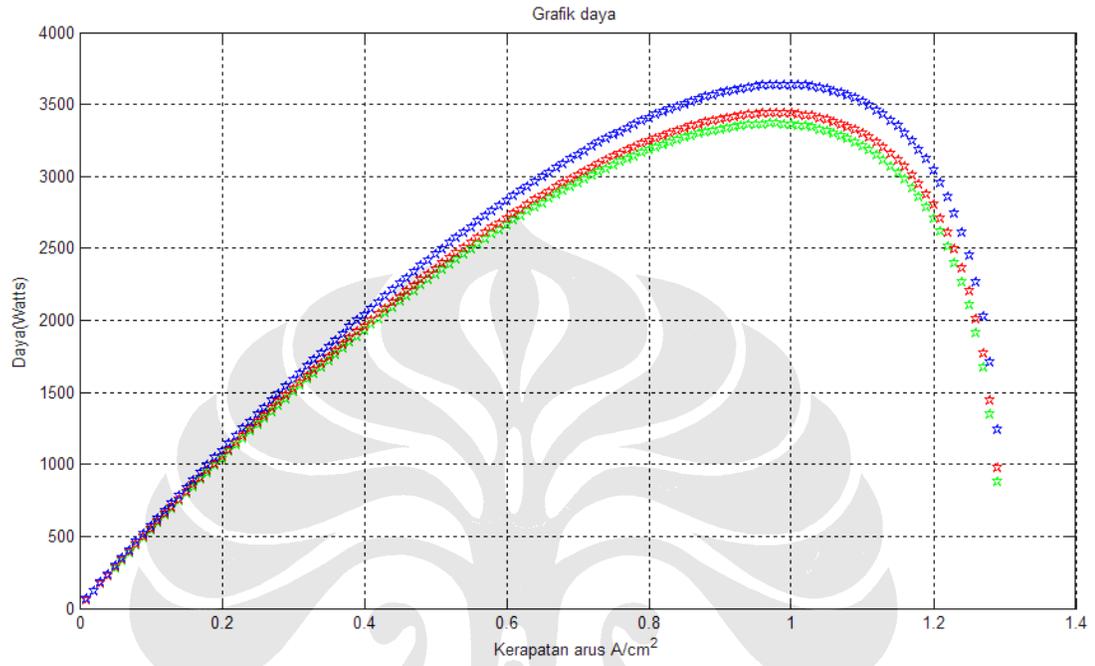
333⁰K



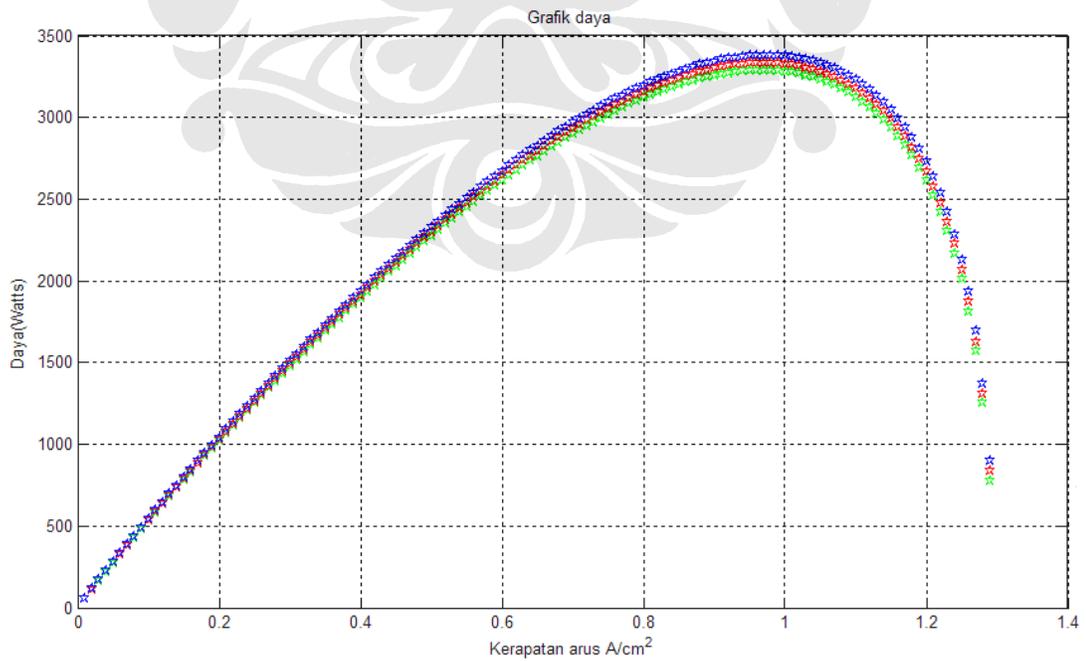
b. Tekanan konstan dan variasi suhu

P = 3kw

1 atm

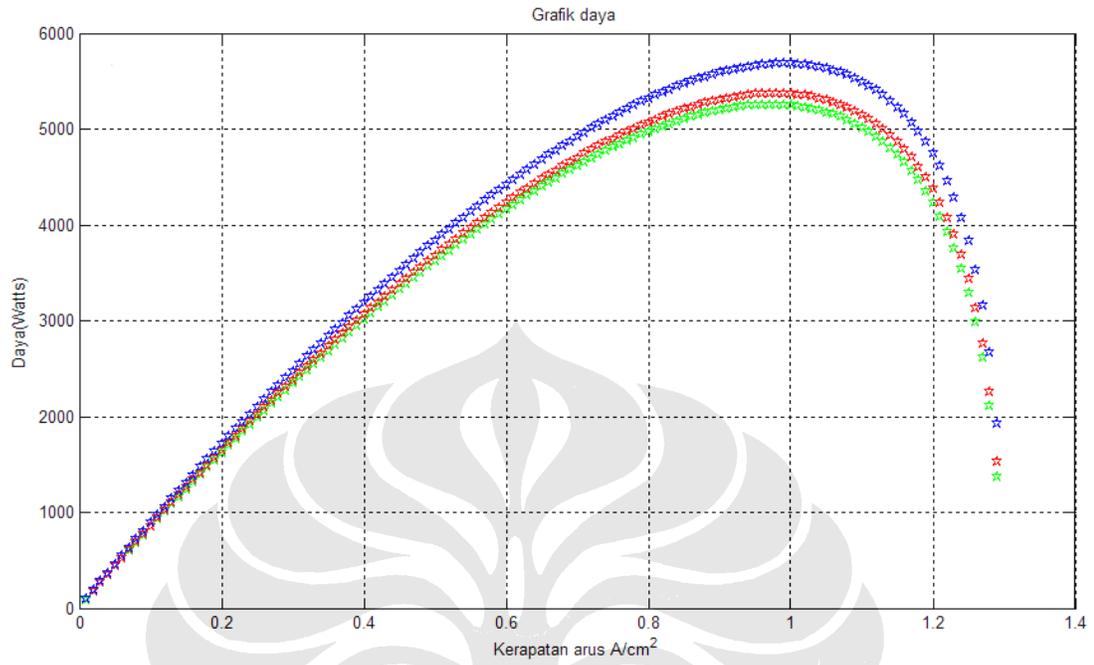


3 atm

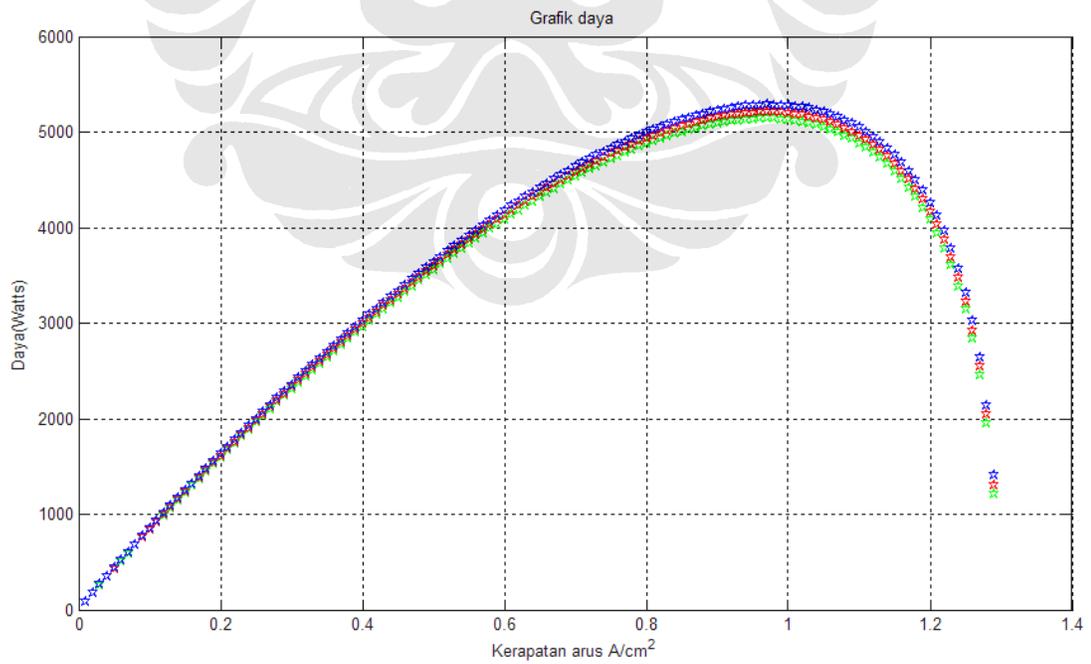


P = 5kw

1 atm



3 atm

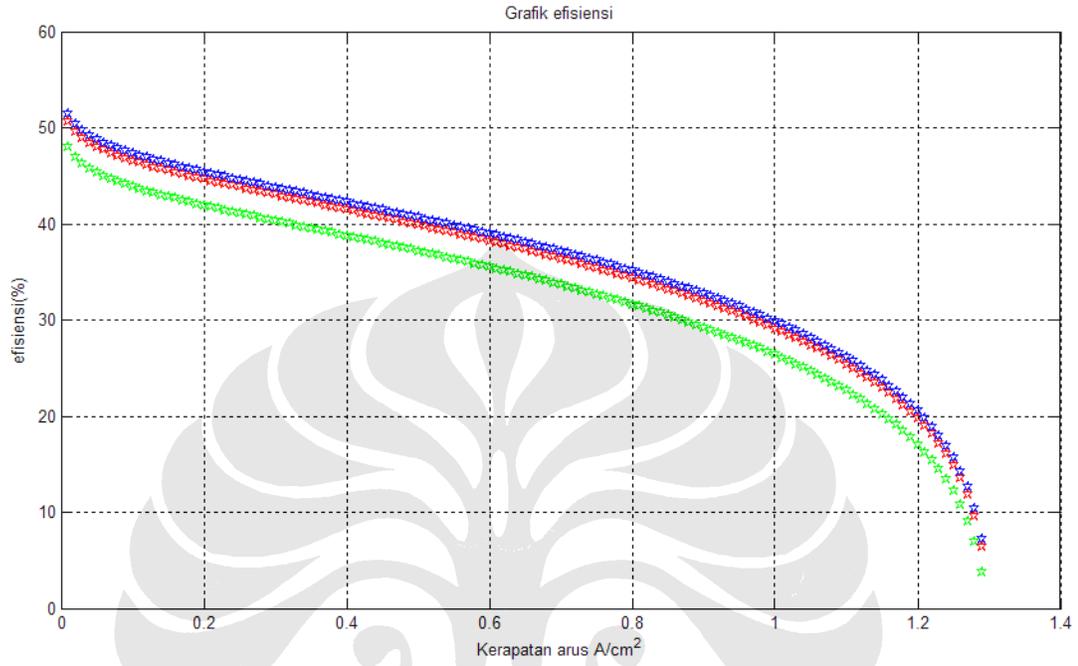


Efisiensi

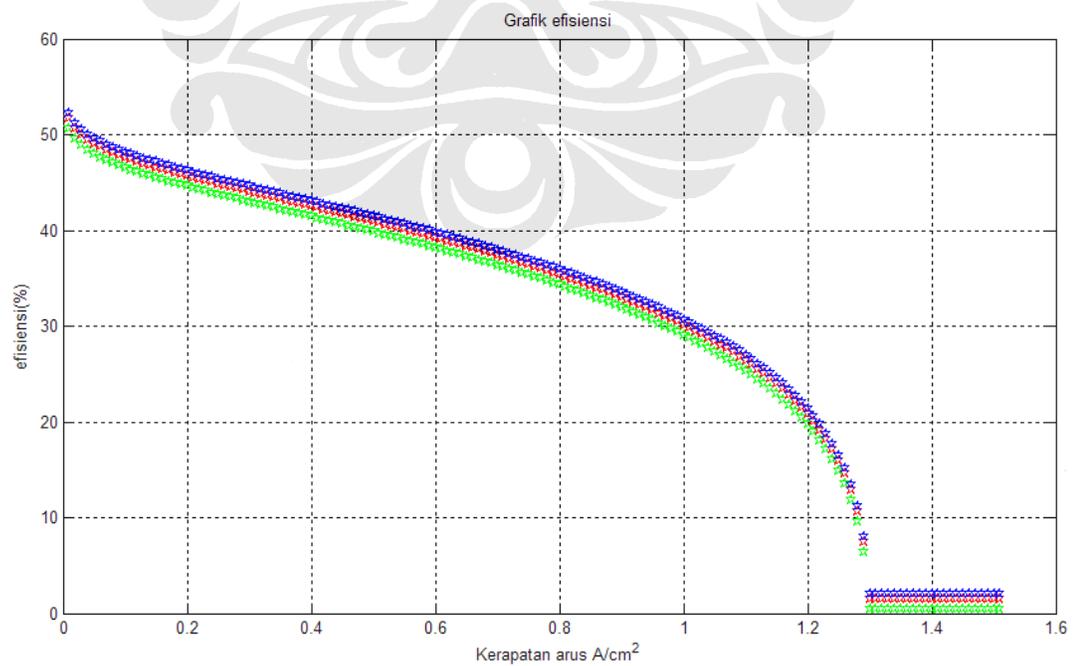
a. Suhu konstan dan variasi tekanan

$P = 3\text{kw}$ dan $P=5\text{kw}$

353^0K



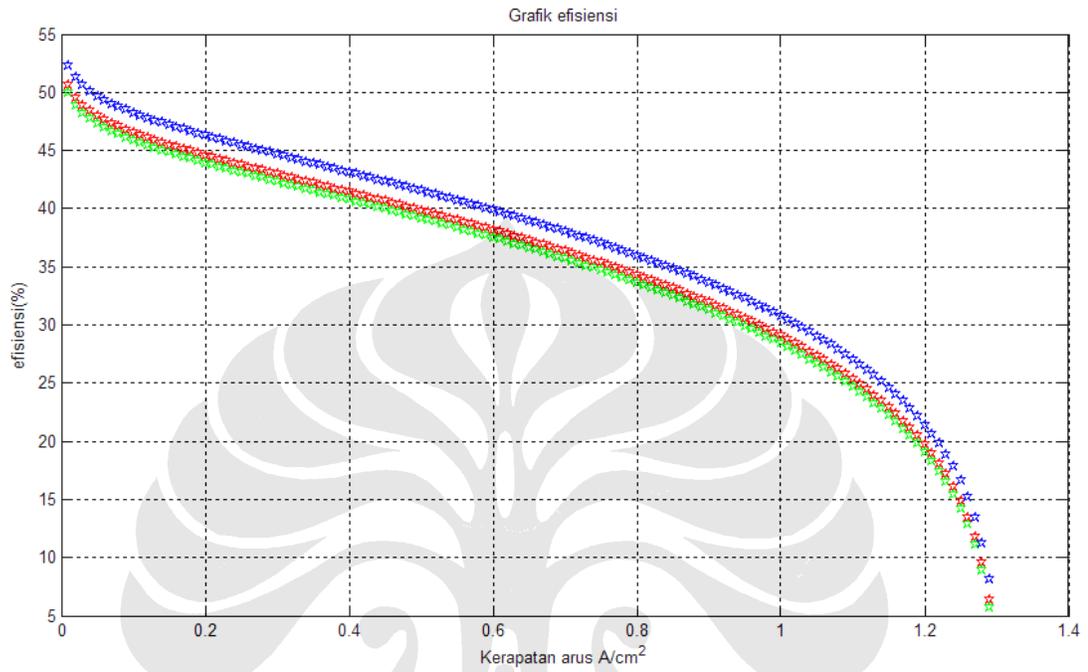
333^0K



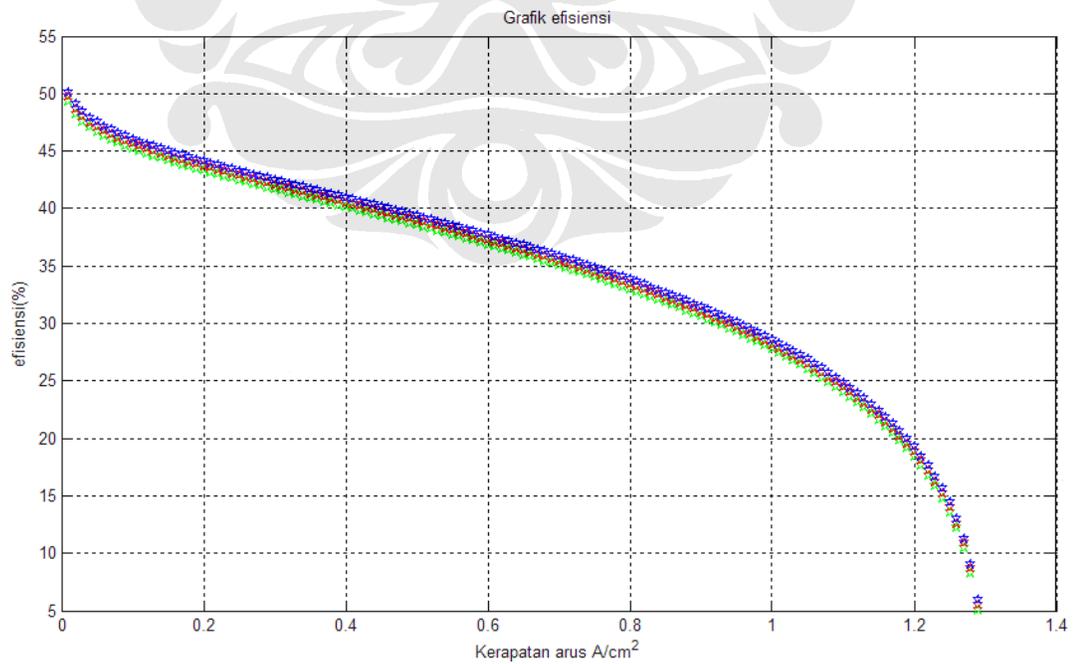
b. Tekanan konstan dan variasi suhu

P = 3kw dan P=5kw

1 atm



3 atm



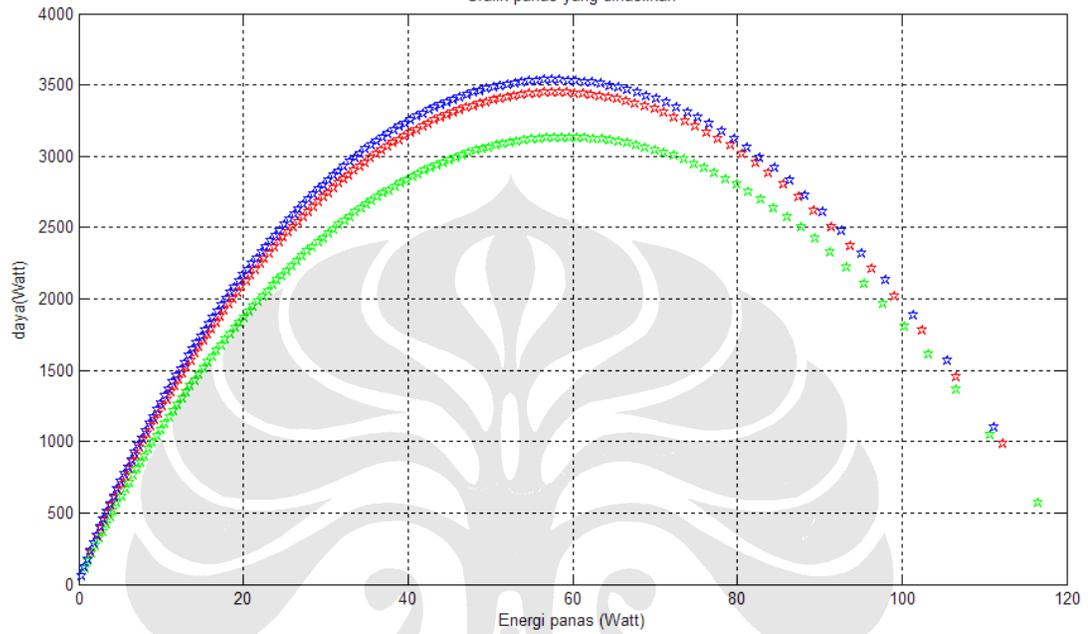
Panas

a. Suhu konstan dan variasi tekanan

$P = 3\text{kw}$

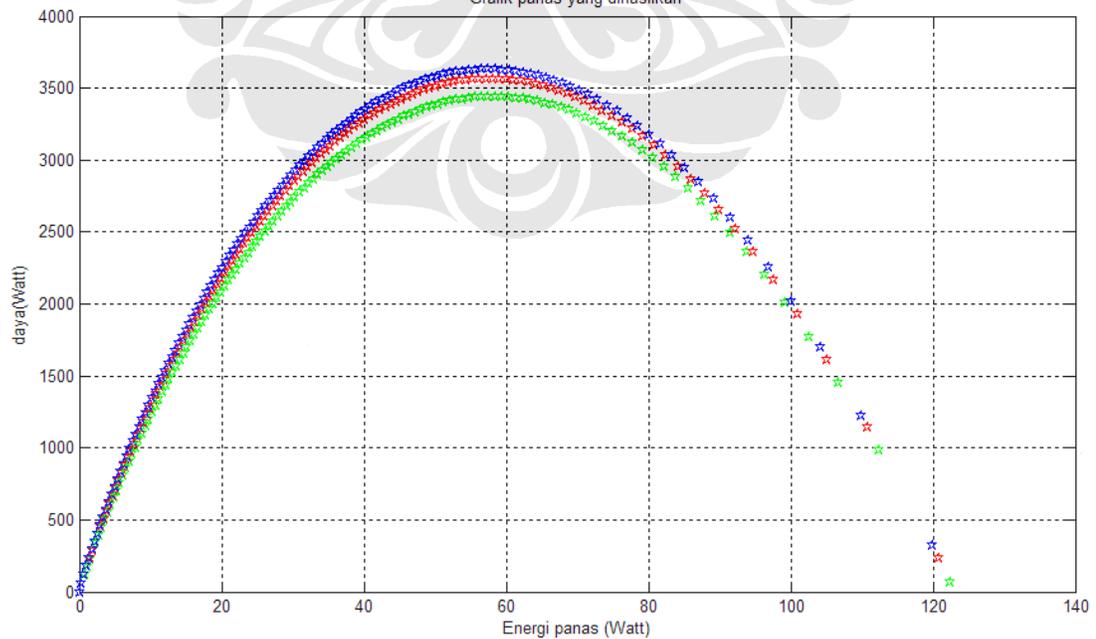
353°K

Grafik panas yang dihasilkan



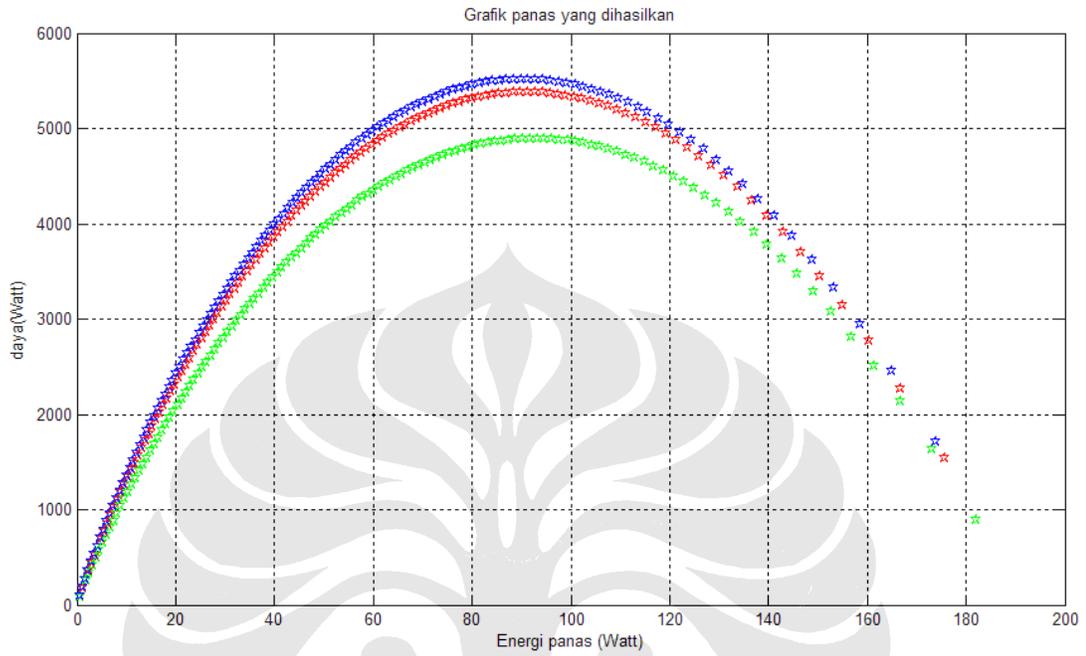
333°K

Grafik panas yang dihasilkan

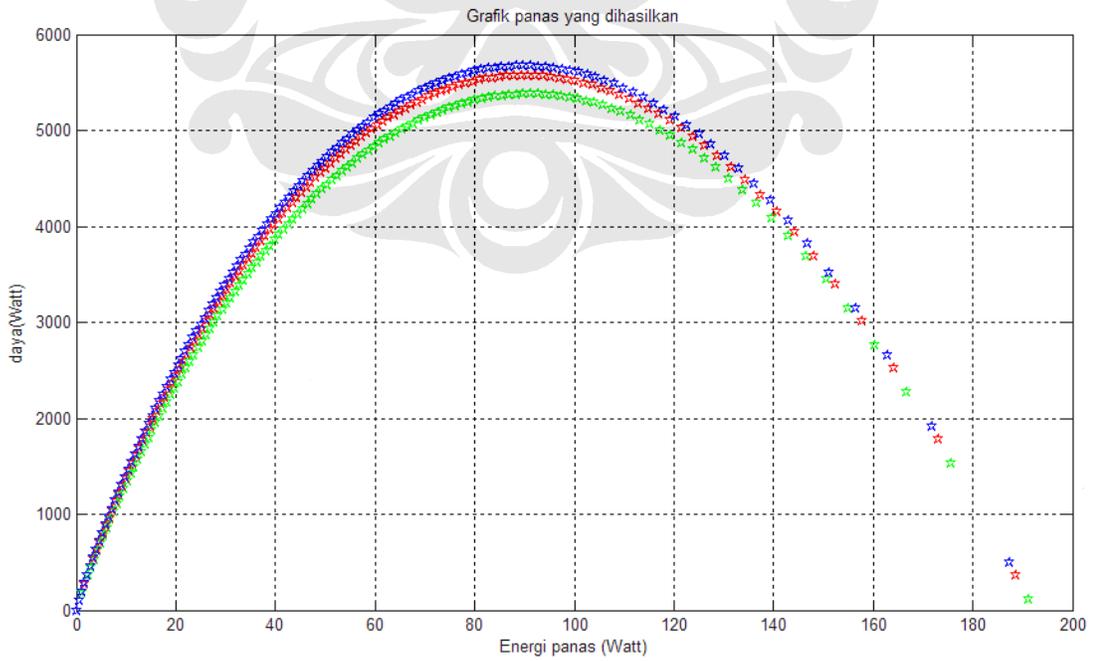


$P = 5\text{kw}$

353^0K



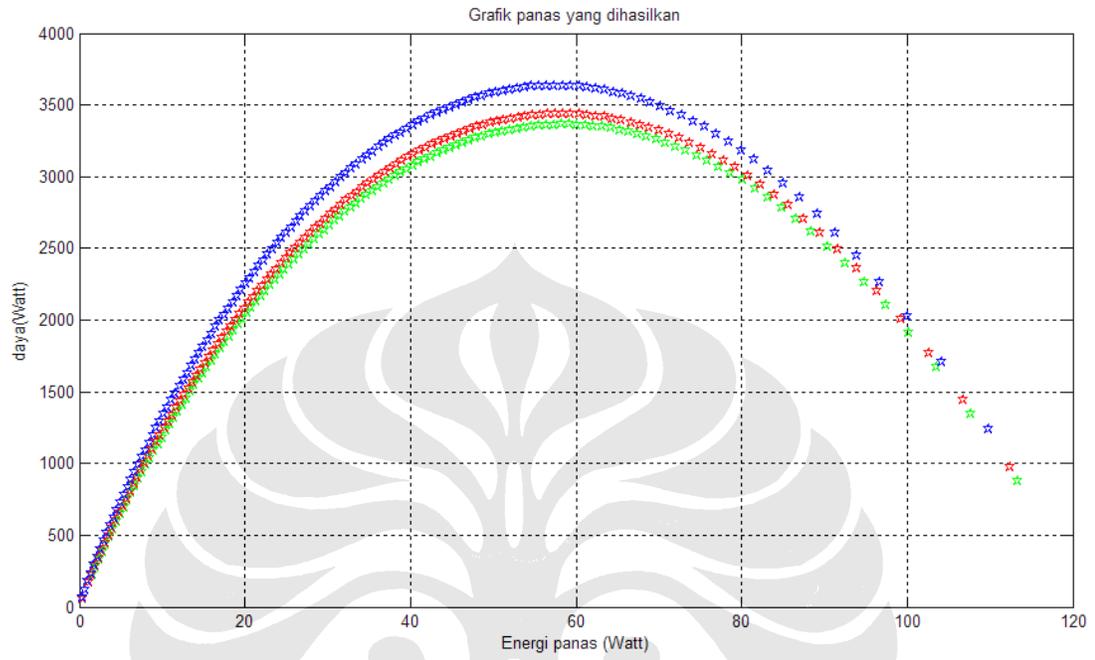
333^0K



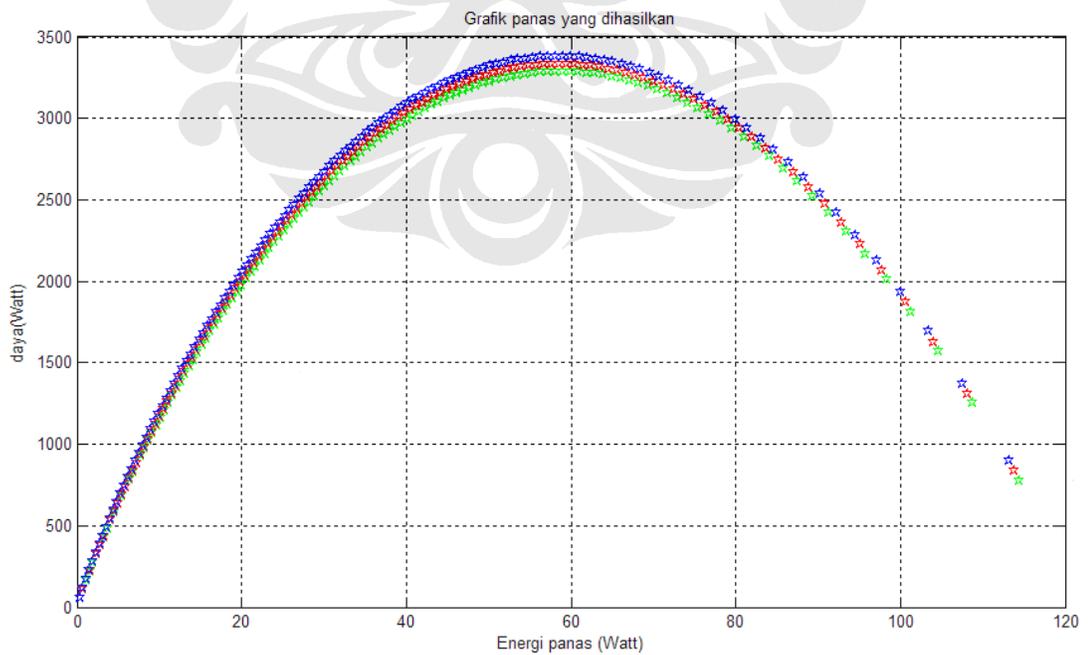
b. Tekanan konstan dan variasi suhu

P = 3kw

1 atm

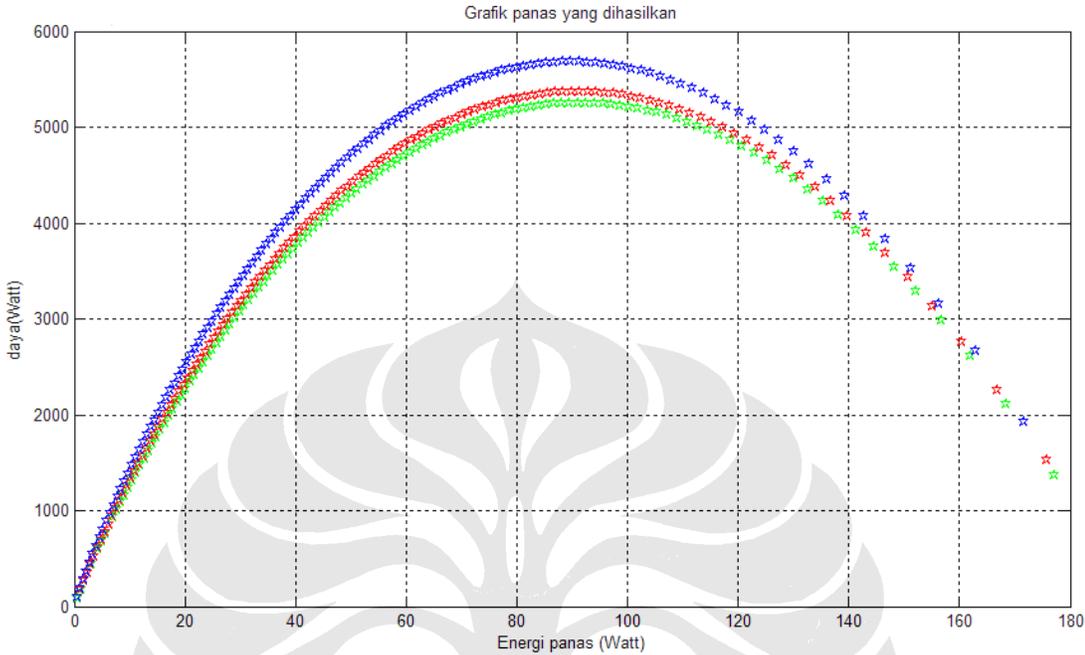


3 atm

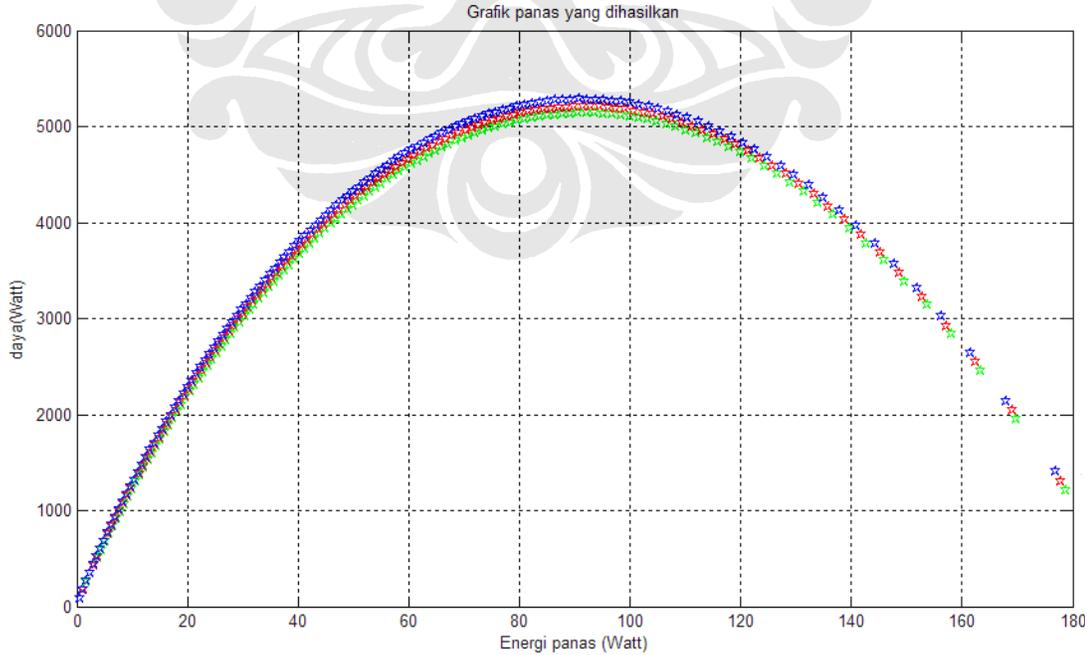


P = 5kw

1 atm



3 atm

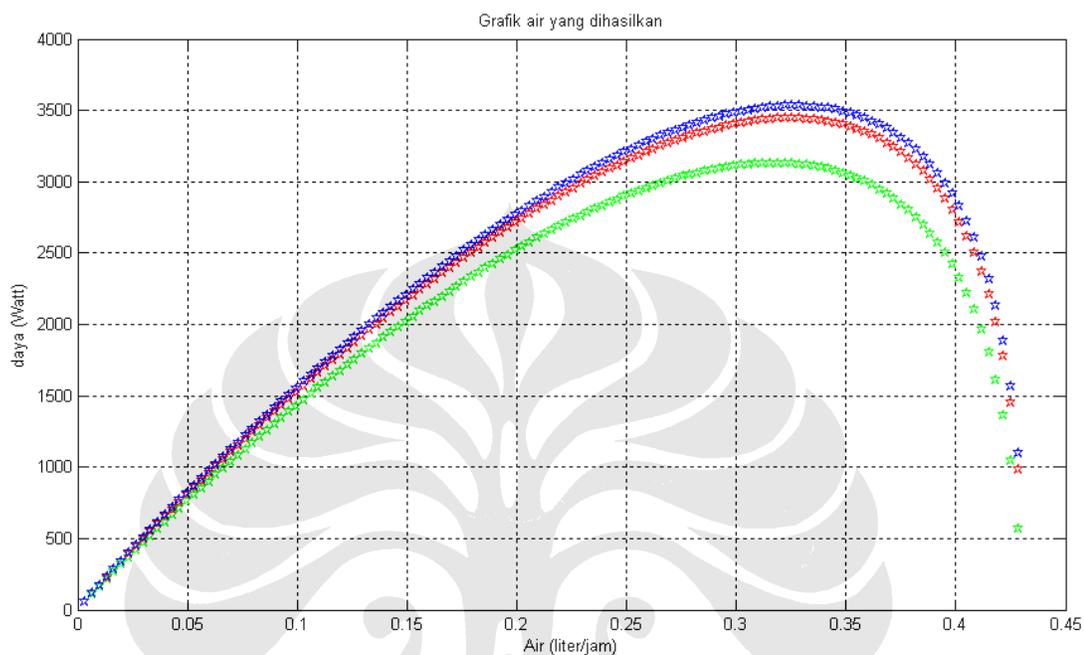


Air

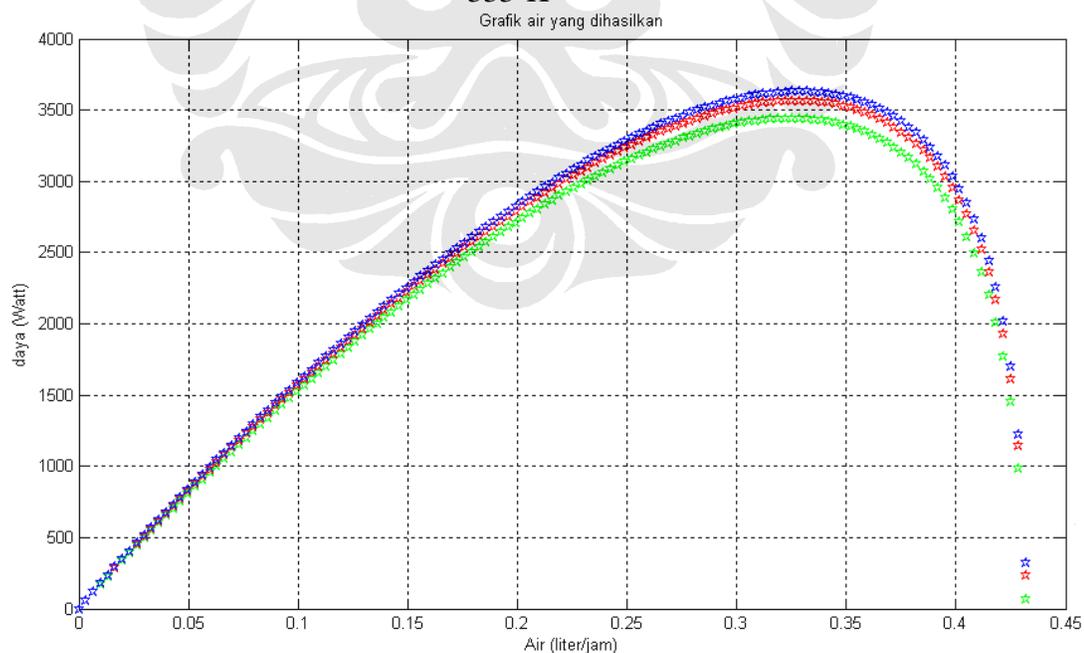
a. Suhu konstan dan variasi tekanan

$P = 3\text{kw}$

353^0K



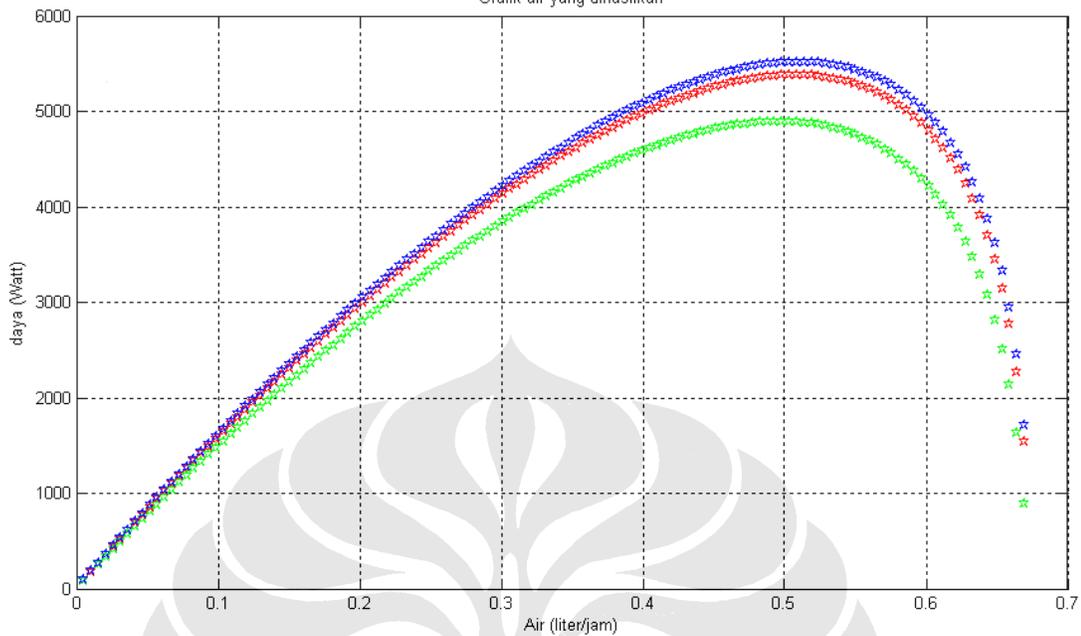
333^0K



P = 5kw

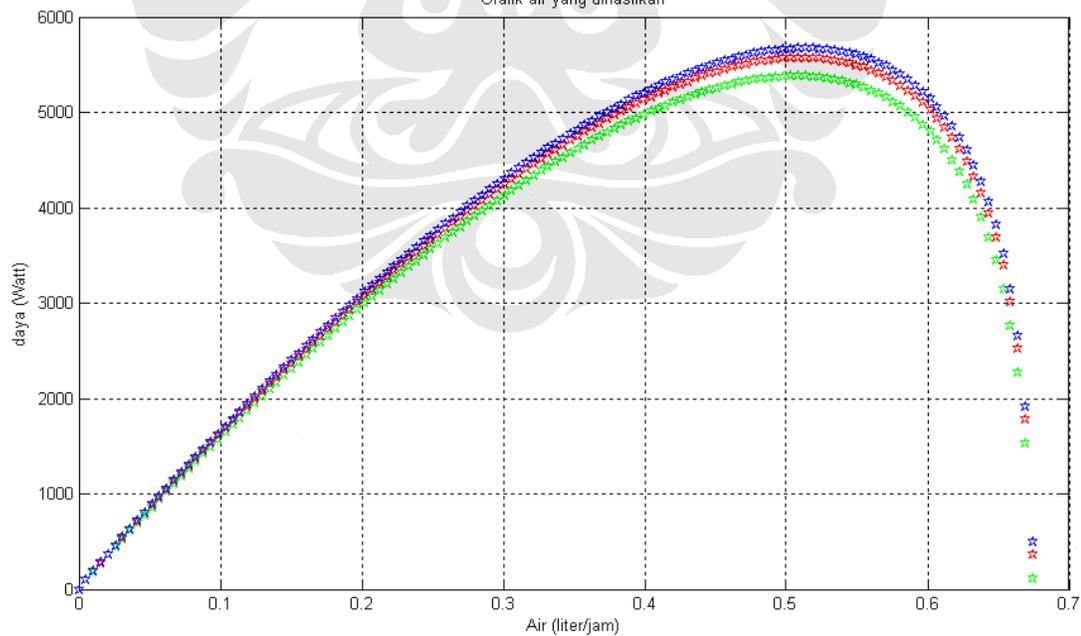
353⁰K

Grafik air yang dihasilkan



333⁰K

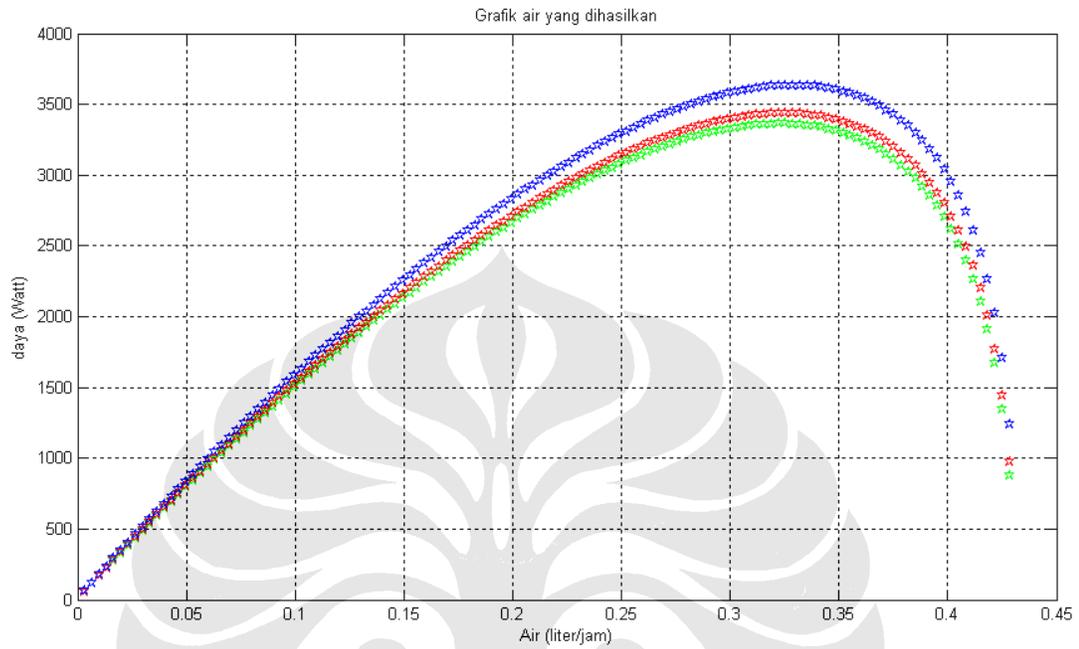
Grafik air yang dihasilkan



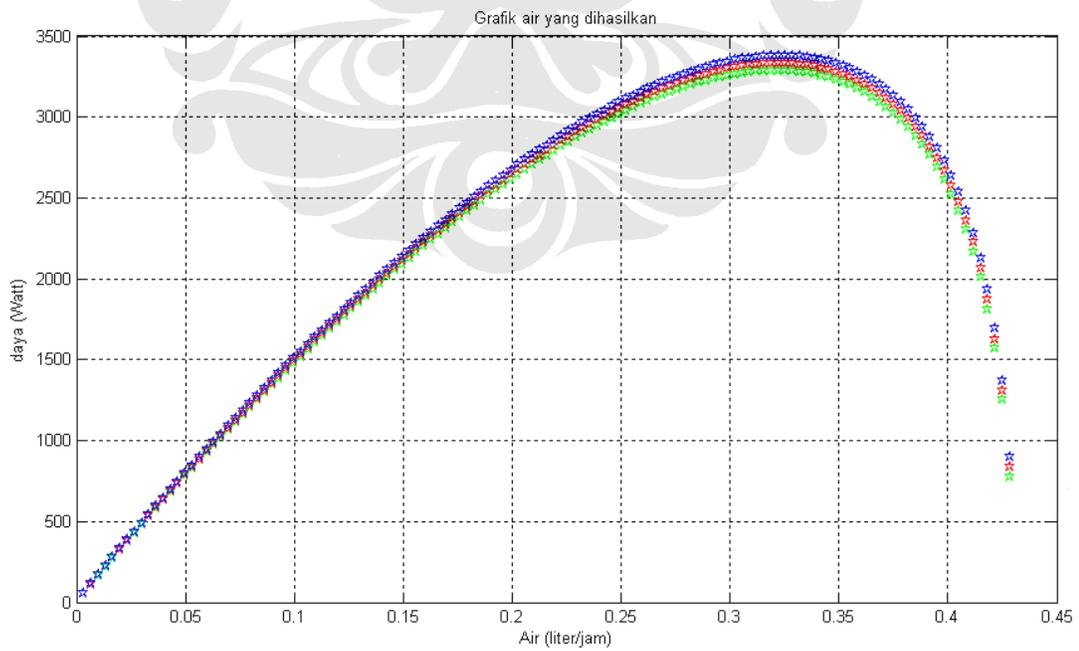
b. Tekanan konstan dan variasi suhu

P = 3kw

1 atm

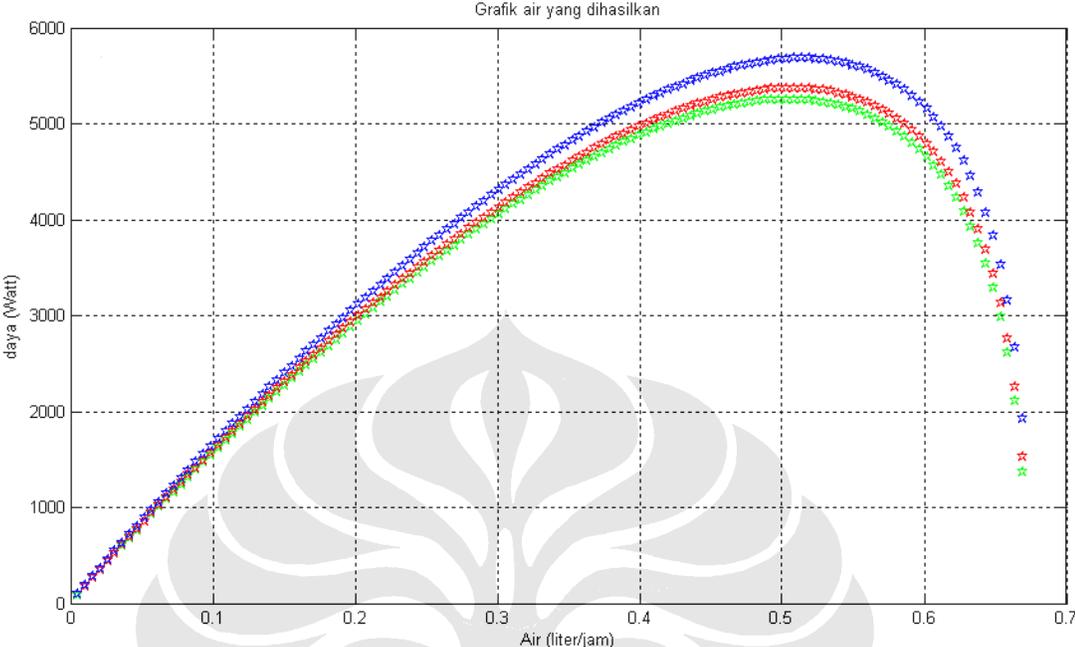


3 atm

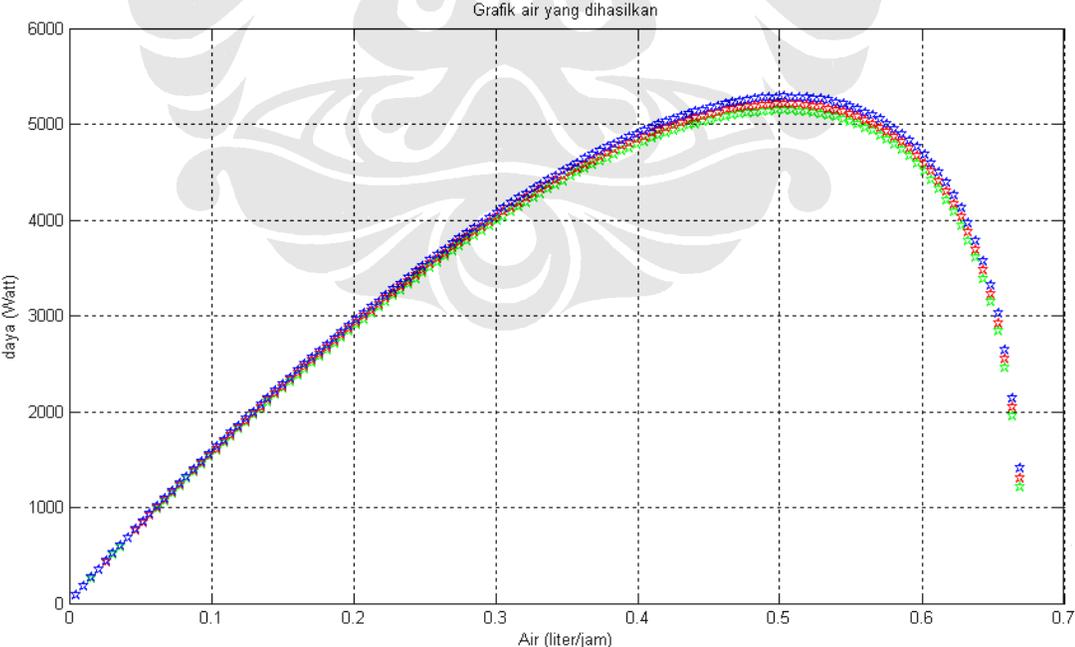


P = 5kw

1 atm



3 atm



LAMPIRAN

Program Matlab

```
% Mengambil Data yang diinginkan
%input1
H= findobj('Tag','suhu');      H = get(H,'String');  H = str2num(H);
S=findobj('Tag','tekanan');    S = get(S,'String');  S = str2num(S);
%input2
C= findobj('Tag','suhu');      C= get(C,'String');  C= str2num(C);
D = findobj('Tag','tekanan2'); D = get(D,'String');  D = str2num(D);
%input3
A= findobj('Tag','suhu3');     A= get(A,'String');  A= str2num(A);
B = findobj('Tag','tekanan3'); B = get(B,'String');  B = str2num(B);

%MEMILIH KAPASITAS DAYA PEMBANGKIT
data=findobj('Tag','Daya');
data = get(data,'value');

if data== 1
    P=100;
    Q=64;
end

if data==2
    P=100;
    Q=100;
end

if data==3
    P=100;
    Q=152;
end

%MEMILIH SAMPLE DATA
data=findobj('Tag','data');
data = get(data,'value');

if data== 1
    %sampel data-1
    r=0.191; io=(10^-6.912); b=0.06;
    %konstanta tambahan untuk sampel data-1
    Al=0.085; k=1.1;      Bt=1.148;
else
    %sample data -2
    r=0.246; io=(10^-6.631); b=0.06;
    %konstanta tambahan untuk sampel data-2
    Al=0.112; k=2;      Bt=1.146;
end

%MEMILIH JENIS KARAKTERISTI YANG AKAN DITAMPILKAN
jns=findobj('Tag','jenis');
jns = get(jns,'value');

R=8.3145
F=96485      %Konstanta faraday
mm_H2=2.02*(10^-3); %massa hidrogen (kg/mol)
Mm_H2o=18.02*(10^-3); %massa molekul air (Kg/mol)

Tk1=H;      %Temperatur (kelvin)
Tc1=Tk1-273; %Temperatur (celcius)
Tk2=C;      %Temperatur (kelvin)
Tc2=Tk2-273; %Temperatur (celcius)
Tk3=A;      %Temperatur (kelvin)
Tc3=Tk3-273; %Temperatur (celcius)

P_air1=S;      %Tekanan dengan batas 0,6-3 atm
```

```

P_Hyd1=S;           % Tekanan dengan batas 0,6-3 atm
P_air2=D;           % Tekanan dengan batas 0,6-3 atm
P_Hyd2=D;           % Tekanan dengan batas 0,6-3 atm
P_air3=B;           % Tekanan dengan batas 0,6-3 atm
P_Hyd3=B;           % Tekanan dengan batas 0,6-3 atm

A_cell=P;           % luas cell dalam bentuk persegi (cm)
N_cells=Q;          % jumlah cell

Alpha=0.5;          % koefisien alpha
UF=0.8014;          % faktor penggunaan bahan bakar
Gf_Vap=-238610;     % konstanta Fungsi pada bentuk uap
Gf_liq=-236810;     % konstanta Fungsi pada bentuk cair

E_LHV=1.25;         % Tegangan Fuel cell saat panas rendah
E_HHV=1.48;         % Tegangan Fuel cel saat panas tinggi

% LOOPING DATA DARI 0-125
loop=1;
i=0;
for N =0:150
    i=i+0.01;

    % Penghitungan detail untuk berbagai jenis tekanan
    % Penghitungan kejenuhan tekanan air
    expt1=-2.1794+0.02953*Tc1-9.1837*(10^-5)*Tc1*Tc1+1.4454*(10^-7)*Tc1*Tc1*Tc1;
    P_sat_H2o1=(10^expt1);

    expt2=-2.1794+0.02953*Tc2-9.1837*(10^-5)*Tc2*Tc2+1.4454*(10^-7)*Tc2*Tc2*Tc2;
    P_sat_H2o2=(10^expt2);

    expt3=-2.1794+0.02953*Tc3-9.1837*(10^-5)*Tc3*Tc3+1.4454*(10^-7)*Tc3*Tc3*Tc3;
    P_sat_H2o3=(10^expt3);

    % penghitungan tekanan oksigen dan hidrogen
    PP_oxy1=P_air1/(exp(4.192*i/(Tk1^1.334)))-P_sat_H2o1;
    PP_hyd1=0.5*(P_Hyd1)/(exp(1.653*i/(Tk1^1.334)))-P_sat_H2o1;

    PP_oxy2=P_air2/(exp(4.192*i/(Tk2^1.334)))-P_sat_H2o2;
    PP_hyd2=0.5*(P_Hyd2)/(exp(1.653*i/(Tk2^1.334)))-P_sat_H2o2;

    PP_oxy3=P_air3/(exp(4.192*i/(Tk3^1.334)))-P_sat_H2o3;
    PP_hyd3=0.5*(P_Hyd3)/(exp(1.653*i/(Tk3^1.334)))-P_sat_H2o3;
    % Penghitungan aktifitas tegangan yang hilang (Voltage Losses)
    V_act=-b*log10(i/i0);
    % Penghitungan dari tahanan yang hilang (Ohmic Losses)
    V_ohmic=-(i*r);

    if ((H == A)|| (H == C)|| (C == A)) && ((S>D>B)|| (S>B>D)|| (S<B<D)|| (S<D<B)|| (B<S<D)|| (B>S>D))
    E_ernst1=-Gf_liq/(2*F)-((R*Tk1)*log(P_sat_H2o1/(PP_hyd1*(PP_oxy1^0.5))))/(2*F);

    E_ernst2=-Gf_liq/(2*F)-((R*Tk2)*log(P_sat_H2o2/(PP_hyd2*(PP_oxy2^0.5))))/(2*F);

    E_ernst3=-Gf_liq/(2*F)-((R*Tk3)*log(P_sat_H2o3/(PP_hyd3*(PP_oxy3^0.5))))/(2*F

    elseif ((S==B)|| (S==D)|| (D==B))&& ((H>C>A)|| (H>A>C)|| (H<A<C)|| (H<C<A)|| (A<H<C)|| (A>H>C))
    E_ernst1=-Gf_liq/(2*F)-((R*Tk1)*log(PP_hyd1/(P_sat_H2o1*(PP_oxy1^0.5))))/(2*F);

    E_ernst2=-Gf_liq/(2*F)-((R*Tk2)*log(PP_hyd2/(P_sat_H2o2*(PP_oxy2^0.5))))/(2*F);

    E_ernst3=-Gf_liq/(2*F)-((R*Tk3)*log(PP_hyd3/(P_sat_H2o3*(PP_oxy3^0.5))))/(2*F);

    else
    E_ernst1=-Gf_liq/(2*F)-((R*Tk1)*log(P_sat_H2o1/(PP_hyd1*(PP_oxy1^0.5))))/(2*F);

    E_ernst2=-Gf_liq/(2*F)-((R*Tk2)*log(P_sat_H2o2/(PP_hyd2*(PP_oxy2^0.5))))/(2*F);

```

```

E_nernst3=-Gf_liq/(2*F)-((R*Tk3)*log(P_sat_H2o3/(PP_hyd3*(PP_oxy3^0.5))))/(2*F)

end
%Penghitungan RUGI akibat perpindahan massa
term =(1.5-(Bt*i));
if term >0
    V_add=A1*(i^k)*log(term);
else
    V_add=0;
end

%penghitungan tegangan keluaran (V_out)
V_out1=E_nernst1+V_ohmic+V_act+V_add;
if term <0
    V_out1=0;
end
if V_out1<0;
    V_out1=0;
break
end

V_out2=E_nernst2+V_ohmic+V_act+V_add;
if term <0
    V_out2=0;
end
if V_out2<0;
    V_out2=0;
break
end

V_out3=E_nernst3+V_ohmic+V_act+V_add;
if term <0
    V_out3=0;
end
if V_out3<0;
    V_out3=0;
break
end

=====hidrogen=====
P_stack1=N_cells*(V_out1*(i*A_cell));
if V_out1<=0
    Hyd_usage1=0;
else
    Hyd_usage1=(P_stack1)/(2*V_out1*F);
end

P_stack2=N_cells*(V_out2*(i*A_cell));
if V_out2<=0
    Hyd_usage2=0;
else
    Hyd_usage2=(P_stack2)/(2*V_out2*F);
end

P_stack3=N_cells*(V_out3*(i*A_cell));
if V_out3<=0
    Hyd_usage3=0;
else
    Hyd_usage3=(P_stack3)/(2*V_out3*F);
end

if jns == 1

%=====Penghitungan dan grafik dari penggunaan methane=====
if V_out1 <=0
    Methane_usage1=0;
else

```

```

Methane_usage1=(Hyd_usage1)/(2.02);
end
    if V_out2 <=0
        Methane_usage2=0;
    else
        Methane_usage2=(Hyd_usage2)/(2.02);
    end

    if V_out3 <=0
        Methane_usage3=0;
    else
        Methane_usage3=(Hyd_usage3)/(2.02);
    end
title('Grafik Penggunaan metan Vs Daya yang diinginkan dicapai')
ylabel('Daya yang dicapai(Watt)');
xlabel('Penggunaan gas metan(mol/sec)');
plot(Methane_usage1,P_stack1,'gp');
plot(Methane_usage2,P_stack2,'rp');
plot(Methane_usage3,P_stack3,'bp');
grid on ;
hold on;
disp(Methane_usage1);
disp(Methane_usage2);
disp(Methane_usage3);
end
if jns == 2
%=====Penghitungan hidrogen yang terpakai untuk N_cells=====
title('Grafik Penggunaan gas Hidrogen Vs Daya yang diinginkan dicapai')
ylabel('Daya yang dicapai(Watt)');
xlabel('Penggunaan gas hidrogen (mol/sec)');
plot(Hyd_usage1,P_stack1,'gp');
plot(Hyd_usage2,P_stack2,'rp');
plot(Hyd_usage3,P_stack3,'bp');
grid on
hold on
disp(Hyd_usage1)
disp(Hyd_usage2)
disp(Hyd_usage3)
end
if jns == 3
%=====grafik polarisasi=====
title('Garfik POLARISASI')
xlabel('Kerapatan arus A/cm^2');
ylabel('Tegangan keluaran(Volt)');
plot(i,V_out1,'gp');
plot(i,V_out2,'rp');
plot(i,V_out3,'bp');
grid on
hold on
disp(V_out1);
disp(V_out2);
disp(V_out3);
end

%=====air=====
if jns ==4
%=====perhitungan air yang digunakan=====
P_stack1=N_cells*(V_out1*(i*A_cell));
if V_out1<=0
    Water_Prod1=0;
else

```

```

    Water_Prod1=(Mm_H2o*P_stack1)/(3600*V_out1*F);
end
%=====
P_stack2=N_cells*(V_out2*(i*A_cell));
if V_out2<=0
    Water_Prod2=0;
else
    Water_Prod2=(Mm_H2o*P_stack2)/(3600*V_out2*F);
end
%=====
P_stack3=N_cells*(V_out3*(i*A_cell));
if V_out3<=0
    Water_Prod3=0;
else
    Water_Prod3=(Mm_H2o*P_stack3)/(3600*V_out3*F);
end
%=====Penghitungan dan grafik dari air yang dihasilkan=====
title('Grafik air yang dihasilkan')
ylabel('kerapatan arus A/cm^2');
xlabel('Air (galon/jam)');
plot(Water_Prod1,P_stack1,'gp');
plot(Water_Prod2,P_stack2,'rp');
plot(Water_Prod3,P_stack3,'bp');
grid on
hold on
disp(Water_Prod1)
disp(Water_Prod2)
disp(Water_Prod3)

end
%-----heatofloss-----
if jns == 5
%-----penghitungan rugi-rugi panas-----
P_stack1=N_cells*(V_out1*(i*A_cell));
if V_out1<=0
    Heat_rate1=0;
else
    Heat_rate1=[i*N_cells*(E_HHV-V_out1)];
end
%=====
P_stack2=N_cells*(V_out2*(i*A_cell));
if V_out2<=0
    Heat_rate2=0;
else
    Heat_rate2=[i*N_cells*(E_HHV-V_out2)];
end
%=====
P_stack3=N_cells*(V_out3*(i*A_cell));
if V_out3<=0
    Heat_rate3=0;
else
    Heat_rate3=[i*N_cells*(E_HHV-V_out3)];
end

title('Grafik panas yang dihasilkan')
ylabel('Kerapatan daya(W)');
xlabel('energi panas (Watts)');
plot(Heat_rate1,P_stack1,'gp')
plot(Heat_rate2,P_stack2,'rp')
plot(Heat_rate3,P_stack3,'bp')

grid on
hold on
disp(Heat_rate1)
disp(Heat_rate2)
disp(Heat_rate3)

```

```

end
%=====perhitungan power=====
if jns == 6
    %=====grafik power=====
    Pd_stack1=N_cells*(V_out1*(i*A_cell));
    Pd_stack2=N_cells*(V_out2*(i*A_cell));
    Pd_stack3=N_cells*(V_out3*(i*A_cell));

    title('Grafik daya ')
    xlabel(' arus ');
    ylabel('Daya(Watt)');
    plot(i,Pd_stack1,'gp')
    plot(i,Pd_stack2,'rp')
    plot(i,Pd_stack3,'bp')
    grid on
    hold on
    disp(Pd_stack1)
    disp(Pd_stack2)
    disp(Pd_stack3)
end
%=====efisiensi=====
if jns == 7
    %=====Penghitungan dan grafik efisiensi=====
    if V_out1<=0
        Eff_HHV=0;
    else
        Eff_HHV1=(UF*V_out1*100)/(E_HHV);
    end
    %=====
    if V_out2<=0
        Eff_HHV=0;
    else
        Eff_HHV2=(UF*V_out2*100)/(E_HHV);
    end
    %=====
    if V_out3<=0
        Eff_HHV=0;
    else
        Eff_HHV3=(UF*V_out3*100)/(E_HHV);
    end
    title('Grafik efisiensi')
    xlabel('Kerapatan arus A/cm^2');
    ylabel('efisiensi');
    plot(i,Eff_HHV1,'gp')
    plot(i,Eff_HHV2,'rp')
    plot(i,Eff_HHV3,'bp')
    grid on
    hold on
    disp(Eff_HHV1)
    disp(Eff_HHV2)
    disp(Eff_HHV3)
end
end
% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
open('TUTORIAL.htm');
% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
close all;

% --- Executes on button press in pushbutton10.
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)
winopen ('animasi.swf');

% --- Executes on button press in pushbutton9.
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
cla;

```