



**RANCANG BANGUN MODEL *PROTON EXCHANGE*
*MEMBRANE (PEM) FUEL CELL***

SKRIPSI

Diajukan guna melengkapi skripsi dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Strata-1 Teknik Elektro
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

DAVID BOBBI SETIABUDI

NIM 101910201089

**PROGRAM STUDI STRATA-1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**

PERSEMBAHAN

Puji syukur kepada Tuhan penelitian ini dapat terselesaikan. Penulis mempersembahkan karya ini kepada:

1. Tuhan Yesus Kristus yang telah memberi saya kekuatan, pengharapan dan semangat sehingga saya mampu menyelesaikan skripsi ini hingga selesai. Ini semua hanya oleh karena anugerahNya.
2. Ayah dan Ibu saya, Yesaya Setiabudi dan Ani Santoso yang telah melahirkan saya dan membuat saya tetap kuat mengerjakan skripsi sampai selesai.
3. Dosen Pembimbing Skripsi Bapak Bambang Srikaloko dan Bapak Widyono Hadi, terima kasih atas ketekunan dan kesabarannya dalam membimbing saya.
4. Dosen penguji skripsi saya, Bapak Gozali dan Bapak Supriyadi, yang telah membantu dalam pembuatan skripsi ini.
5. Keluarga Besar Teknik Elektro Angkatan 2010, terima kasih atas semangat dukungan dan motivasi yang kalian berikan.
6. Kedua kakak saya, Melisa Permatasari dan Maria Permatasari yang telah bantu dalam bentuk dana sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi saya.
7. Bapak Alfredo yang telah membantu dan mendukung saya, sehingga saya mampu mengerjakan kembali skripsi saya yang tertunda.
8. Laboratorium Konversi Energi Listrik, di tempat ini banyak pengalaman dan kenangan yang tak akan pernah terlupakan.
9. Teman-teman pemuda Gereja Ekklesia yang tidak pernah lelah bertanya kapan saya lulus.
10. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.

MOTTO

Untuk segala sesuatu ada masanya, untuk apapun dibawah langit ada waktunya.

(Pengkhotbah 3:1)

Sebab tujuh kali orang benar jatuh, namun ia bangun kembali, tetapi orang fasik akan roboh dalam bencana.

(Amsal 24:16)

You have to endure caterpillars if you want to see butterflies.

Anda harus tahan terhadap ulat jika ingin dapat melihat kupu-kupu. **(Antoine De Saint)**

Anda tidak akan pernah bisa mengalahkan orang yang tidak pernah mau menyerah.

(tanpa nama)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : David Bobby Setiabudi

NIM : 101910201089

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya tulis yang berjudul : **“RANCANG BANGUN MODEL *PROTON EXCHANGE MEMBRANE (PEM) FUEL CELL* BERBASIS *FUZZY LOGIC* “** adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 16 Januari 2018

Yang menyatakan,

David Bobby Setiabudi

NIM. 101910201089

**RANCANG BANGUN MODEL *PROTON EXCHANGE*
MEMBRANE (PEM) FUEL CELL BERBASIS *FUZZY LOGIC***

Oleh

David Bobbi Setiabudi

NIM 101910201089

Pembimbing :

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Bambang Srikaloko, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Ir. Widyono Hadi, M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “RANCANG BANGUN MODEL PROTON EXCHANGE MEMBRANE (PEM) FUEL CELL BERBASIS FUZZY LOGIC” telah diuji dan disahkan pada :

hari, tanggal : Kamis, 18 Januari 2018

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji :

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Dr. Bambang Srikaloko S.T., M.T.

Ir. Widnyono Hadi M.T.

NIP 19710402200121001

NIP 196104141989021001

Penguji I,

Penguji II,

H.R.B. Moch. Gozali, S.T., M.T.

Supriyadi Prasetyono, S.T., M.T.

NIP 196906081999031002

NIP 197004041996011001

Mengesahkan,

Dekan

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M

NIP 196612151995032001

ABSTRACT

PEM Fuel Cell requires hydrogen and oxygen as the main ingredients to produce electricity. Pressure and temperature on hydrogen and oxygen and the amount of current required will affect the power produced. The greater the pressure on hydrogen and oxygen, the lower the voltage will be. The higher the temperature of oxygen and oxygen will produce a lower voltage. And the greater the current strength required, the lower the voltage will be.

In the simulation of Proton exchange membrane using simulink Matlab it is found that when the pressure is raised from zero to one at a fixed temperature and pressure (temperature = 248K, current = 5 A), there will be a considerable decrease in voltage resulting from a balanced pressure change to not balanced. Increasing the pressure from 1 to 6 ATM voltage will drop from 43.55V to 42.26V.

In the simulation of Proton exchange membrane using Simulink Matlab, it was found that when the temperature rose from 323K to 373K there was a gradual decrease in the voltage which was a voltage drop of 0.96 volts (Temperature = 248K, Current Strength 5 A). Sloping shaped graph, because there is no change in ENernst which is still 1.44V, this is caused because in this state that is entering the pressure of hydrogen, oxygen and the output of water produced in the same pressure that is 1 ATM causes entropy to be zero, so ENernst derived energy Gibbs free becomes the same as the enthalpy without reducing the temperature and entropy.

In the simulation of Proton exchange membrane using simulink Matlab it is found that when the current is increased from zero to ten there is a voltage change in the fuel cell (Temperature = 348K, Pressure = 1 ATM), that is a voltage drop of 6.93 Volt when the current strength of 1 ampere becomes 10 ampere. This voltage reduction is caused because in the fuel cell there is an electrode fluid that carries electrons when the reaction breaks hydrogen into 2 hydrogen positive ions and four electrons. The amount of current that flows will greatly affect the performance of the electrode and the catalyst which functions to break down hydrogen into an energy.

Key words : Fuel Cell, Temperature, pressur, current.

RINGKASAN

PEM Fuel Cell membutuhkan hidrogen dan oksigen sebagai bahan utama untuk menghasilkan listrik. Tekanan dan suhu pada hidrogen dan oksigen serta besarnya arus yang dibutuhkan akan mempengaruhi daya yang dihasilkan. Semakin besar tekanan pada hidrogen dan oksigen maka akan menghasilkan tegangan yang semakin rendah. Semakin tinggi suhu oksigen dan oksigen maka akan menghasilkan tegangan yang semakin rendah. Dan semakin besar kuat arus yang dibutuhkan maka akan menghasilkan tegangan yang semakin rendah.

Dalam simulasi Proton exchange membrane menggunakan simulink Matlab didapatkan bahwa ketika tekanan dinaikkan dari nol menjadi satu pada suhu dan tekanan yang tetap (suhu = 248K, arus = 5 A), maka akan terjadi penurunan tegangan yang cukup besar yang diakibatkan dari perubahan tekanan yang seimbang menjadi tidak seimbang. Menaikkan tekanan dari 1 menjadi 6 ATM tegangan akan turun dari 43,55V menjadi 42,26V.

Dalam simulasi Proton exchange membrane menggunakan simulink Matlab didapatkan bahwa ketika suhu naik dari 323K menjadi 373K terjadi penurunan tegangan yang stabil secara bertahap yaitu tegangan yang jatuh sebesar 0.96 volt (Suhu = 248K, Kuat Arus 5 A). Grafik berbentuk landai, karena tidak terjadi perubahan pada E_{Nernst} yaitu tetap 1.44V, hal ini diakibatkan karena dalam keadaan ini yaitu masukkan tekanan hidrogen, oksigen serta keluaran air yang dihasilkan dalam tekanan yang sama yaitu 1 ATM menyebabkan entropy menjadi nol, sehingga E_{Nernst} yang berasal energi bebas Gibbs menjadi sama dengan entalpinya saja tanpa dikurangi dari suhu dan entropinya.

Dalam simulasi Proton exchange membrane menggunakan simulink Matlab didapatkan bahwa ketika arus dinaikkan dari nol menjadi sepuluh terjadi perubahan tegangan pada *fuel cell* (Suhu = 348K, Tekanan = 1 ATM), yaitu terjadi penurunan tegangan sebesar 6,93 Volt ketika kuat arus 1 ampere menjadi 10 ampere. Penurunan tegangan ini diakibatkan karena didalam *fuel cell* terdapat cairan elektroda yang membawa elektron ketika terjadi reaksi pemecahan hidrogen menjadi 2 buah ion positif hidrogen dan empat buah elektron. Besarnya

arus yang mengalir akan sangat mempengaruhi kinerja dari elektroda serta katalis yang berfungsi memecah hidrogen menjadi sebuah energi.

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan yang maha esa, yang telah memberikan kemudahan, kesempatan dan kelancaran sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “RANCANG BANGUN MODEL *PROTON EXCHANGE MEMBRANE (PEM) FUEL CELL* BERBASIS *FUZZY LOGIC*” tanpa ada halangan yang berarti. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Program Studi Strata Satu (S1) Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Jember.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu tersusunnya skripsi ini, khususnya kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
2. Bapak Bambang Sri Kaloko, ST., MT selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember.
3. Bapak Bambang Sri Kaloko, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing I dan Ir. Widiono Hadi, MT selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu, pikiran dan perhatian dalam penyusunan skripsi ini.
4. Bapak selaku Dosen Penguji I Bapak H.R.B. Moch. Gozali, ST., MT., dan Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji II.
5. Ayah dan Ibu saya, Yesaya Setiabudi dan Ani Santoso yang telah melahirkan saya dan membuat saya tetap kuat mengerjakan skripsi sampai selesai.
6. Teman-teman GPDI Ekklesia yang selalu membatu mendukung saya, sehingga saya terus berusaha mengerjakannya sampai selesesai.
7. Teman-teman Teknik Elektro 2010 yang tidak pernah lelah mencari saya, meskipun saya sangat sulit dihubungi.

Dalam penyusunan skripsi ini penulis menyadari masih banyak kekurangan, kritik dan saran tetap diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat

Jember, 25 Januari 2018

Penulis



DAFTAR ISI

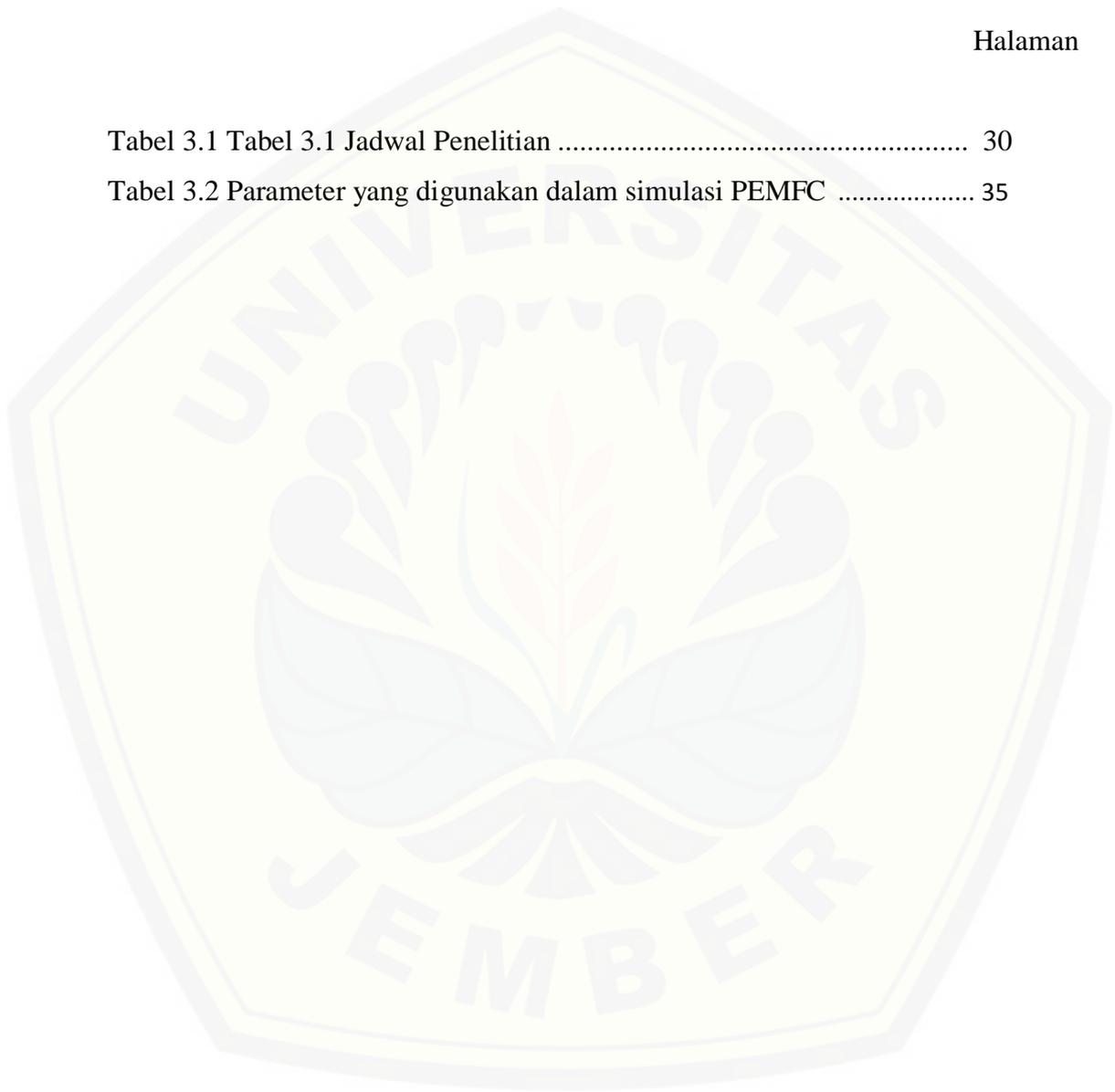
	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	vi
ABSTRACT	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Pembahasan	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Fuel Cell</i>	5
2.1.1 Aplikasi Penggunaan Fuel Cell	7
2.2 Jenis-jenis Fuel Cell	8
2.3 Proton Exchange Membrane (PEMFC)	9
2.4 KOMPONEN PEMFC	11

2.4.1 Membrane Electrolyte Assembly (MEA).....	11
2.4.2 Pelat Bipolar	11
2.4.3 Pelat Penutup.....	12
2.4.4 Penyimpan Arus	13
2.5 Cara Kerja Fuel Cell.....	14
2.6 Persamaan Elektrokimia dalam Fuel cell	15
2.7 Persamaan Nernst Untuk Tegangan Reversibel Fuel cell	15
2.8 Kerugian Aktivasi (Kehilangan Tegangan)	19
2.8.1 <i>Activation Losses</i>	19
2.8.2 <i>Ohmic Losses</i>	21
2.8.3 Mass Transport Losses	23
2.8.4 Efek Kapasitansi Lapisan Ganda.....	24
2.9 Produksi Air dan Panas pada Fuel Cell.....	26
2.9.1 Produksi Air	26
2.9.2 Produksi Panas	26
2.10 Penggunaan Hidrogen dan Oksigen	26
2.10.1 Penggunaan Hidrogen	26
2.10.2 Penggunaan Oksigen	27
2.11 Model Respon Perubahan Suhu (Keseimbangan Energi Termodinamika).....	27
BAB 3. METODE PENELITIAN	30
3.1 Tempat dan Waktu	30
3.2 Tahap Perencanaan.....	30
3.3 Diagram Alir Penelitian	32
3.4 Blok Diagram Sistem	33
3.5 Blok Diagram Keseluruhan Model PEMFC	34
3.6 Parameter yang Ditentukan	35
3.7 Simulasi Persamaan Nernst.....	36
3.8 Simulasi Persamaan Tegangan Aktivasi	36
3.9 Simulasi Persamaan Mass Transport Losses	37

3.10 Persamaan Ohmic Losses.....	37
3.11 Simulasi Persamaan Efek Lapisan Ganda.....	38
3.12 Simulasi PEM Fuel Cell.....	38
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Pengaruh Tekanan Hidrogen Terhadap Tegangan.....	39
4.2 Pengaruh Perubahan Suhu Terhadap Tegangan.....	40
4.3 Pengaruh Perubahan Arus Terhadap Tegangan.....	45
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	51
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA.....	52
LAMPIRAN.....	54

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Tabel 3.1 Jadwal Penelitian	30
Tabel 3.2 Parameter yang digunakan dalam simulasi PEMFC	35



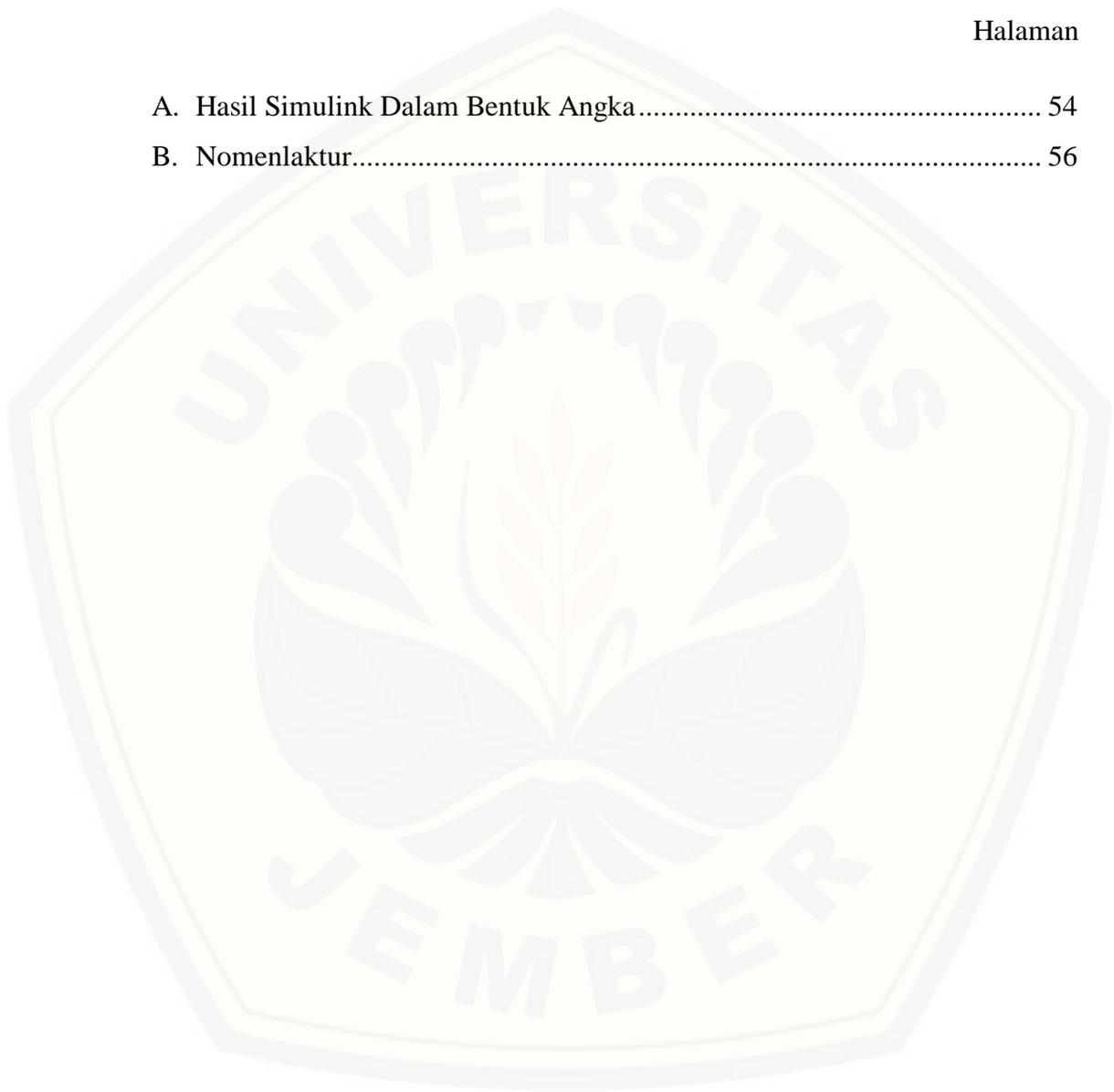
DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Komponen dan diagram alur sistem fuel cell.....	6
2.2 Reaksi elektrokimia PEMFC.....	10
2.3 Struktur rangkaian <i>fuel cell</i>	12
2.4 Proses <i>fuel cell</i>	14
2.5 Karakteristik arus dan tegangan <i>fuel cell</i> ideal	19
2.6 Contoh spektrum impedensi dari anoda (SOFC) yang beroperasi pada 850° C	22
2.7 Rangkaian Listrik Ekuivalen untuk Efek Kapasitansi di dalam PEMFC	25
3.1 Diagram Alir Penelitian	32
3.2 Blok Diagram Sistem	33
3.3 Blok Diagram Keseluruhan Model PEMFC	34
3.4 Simulasi Persamaan Nernst.....	36
3.5 Simulasi Persamaan Tegangan Aktivasi	36
3.6 Simulasi Persamaan Tegangan Mass Transport Losses.....	37
3.7 Simulasi Persamaan Tegangan <i>Ohmic Losses</i>	37
3.8 Simulasi Persamaan Tegangan Efek Lapisan Ganda.....	38
3.9 Simulasi Persamaan Tegangan <i>Mass Transport Losses</i>	38
4.1 Perubahan tekanan terhadap tegangan pada PEM <i>fuel cell</i> dalam keadaan suhu 348K, arus 5A, tekanan O ₂ dan H ₂ O 1 ATM	39
4.2 Perubahan suhu terhadap tegangan pada PEM <i>fuel cell</i> dalam keadaan arus 5A, tekanan H ₂ , O ₂ , dan H ₂ O 1 ATM	41
4.3 Perubahan suhu terhadap tegangan pada ENernst dalam keadaan tekanan H ₂ , O ₂ , dan H ₂ O 1 ATM	42
4.4 Perubahan suhu terhadap tegangan pada Entropi dalam keadaan tekanan H ₂ , O ₂ , dan H ₂ O 1 ATM	43
4.5 Perubahan suhu terhadap tegangan pada Entropi dalam keadaan	

tekanan $H_2 = 2 \text{ ATM}$, O_2 , dan $H_2O = 1 \text{ ATM}$	44
4.6 Perubahan suhu terhadap tegangan pada E_{Nernst} dalam keadaan tekanan $H_2 = 2 \text{ ATM}$, O_2 , dan $H_2O = 1 \text{ ATM}$	44
4.7 Perubahan arus terhadap tegangan pada PEM <i>fuel cell</i> dalam keadaan suhu 348K tekanan H_2 , O_2 , dan $H_2O = 1 \text{ ATM}$	45
4.8 Perubahan arus terhadap tegangan pada E_{Nernst} dalam keadaan suhu 348K tekanan H_2 , O_2 , dan $H_2O = 1 \text{ ATM}$	46
4.9 Perubahan arus terhadap tegangan pada V_{Act} dalam keadaan suhu 348K tekanan H_2 , O_2 , dan $H_2O = 1 \text{ ATM}$	47
4.10 Perubahan arus terhadap tegangan pada V_{Mt} dalam keadaan suhu 348K tekanan H_2 , O_2 , dan $H_2O = 1 \text{ ATM}$	48
4.11 Perubahan arus terhadap tegangan pada V_{Ohm} dalam keadaan suhu 348K tekanan H_2 , O_2 , dan $H_2O = 1 \text{ ATM}$	49
4.12 Perubahan arus terhadap tegangan pada V_{D} dalam keadaan suhu 348K tekanan H_2 , O_2 , dan $H_2O = 1 \text{ ATM}$	49

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Hasil Simulink Dalam Bentuk Angka.....	54
B. Nomenlaktur.....	56



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada masa modern ini, pertumbuhan suatu negara akan meningkatkan kebutuhan energi. Semakin majunya negara menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi yang tinggi. Hal ini terjadi karena setiap industri, pemerintahan, ataupun lembaga selalu membutuhkan akan teknologi.

Di Indonesia kebutuhan energi terus meningkat dengan cepat setiap tahunnya. Menurut Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral atau ESDM (2006) dari tahun 2004 energi fosil dan cadangan minyak bumi di Indonesia diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 18 tahun dengan rasio cadangan/produksi pada tahun tersebut, sedangkan gas diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 61 tahun dan batubara 147 tahun. Sedangkan menurut Colleen Spiegel (2008) energi fosil di dunia hanya akan bertahan 30 tahun lagi. Untuk itu, salah satu cara pemerintah untuk memenuhi tingginya kebutuhan energi listrik karena terbatasnya sumber daya energi yang ada, serta untuk mengurangi emisi global adalah dengan mengembangkan dan meningkatkan energi terbarukan. Pemerintah berkomitmen akan meningkat energi terbarukan di Indonesia hingga sebanyak 10% pada tahun 2025 (ESDM. 2006) .

Salah satu energi terbarukan yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan energi adalah dengan menggunakan *fuel cell*. *Fuel cell* adalah sebuah alat elektrokimia yang mirip dengan baterai, tetapi berbeda karena dirancang untuk dapat diisi terus reaktannya yang dikonsumsi; yaitu dia memproduksi listrik dari penyediaan bahan bakar hidrogen dan oksigen dari luar (Wikipedia). *Fuel cell* memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan pembangkit konvensional seperti memiliki efisiensi operasi yang tinggi, memiliki banyak jenis bahan sumber, tidak menghasilkan emisi, dan memiliki *maintenance* yang rendah karena tidak memiliki bagian yang bergerak (Colleen Spiegel, 2008).

Sebagai energi masa depan, *fuel cell* pada saat ini telah banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti transportasi, pertanian dan astronomi. Penerapan *fuel cell* ini khususnya banyak digunakan pada negara maju. Meskipun demikian

masih banyak perkembangan yang dilakukan untuk membuat *fuel cell* semakin lebih baik.

Proton exchange membrane (PEM) adalah salah satu jenis *fuel cell* yang sering digunakan pada saat ini. PEM *fuel cell* banyak digunakan karena memiliki suhu yang rendah yaitu sekitar 50 – 100 °C, sehingga cocok digunakan untuk kendaraan bermotor ataupun sebagai sumber energi utama peralatan elektronik seperti *handphone* dan laptop. Meskipun demikian PEM *fuel cell* memiliki beberapa kekurangan seperti pada dasarnya harus menggunakan hidrogen murni serta menghasilkan CO₂ dalam bentuk *liquid*.

PEM *fuel cell* saat ini telah mengalami berbagai kemajuan seperti hanya perlu menggunakan sedikit elektroda platina yaitu 50 gram platina per cm² menjadi 1 gram per cm² (Bei Gou, 2010) ataupun telah berhasil ditemukan pengganti-pengganti yang lain. Dibumi ini platina memiliki persediaan terbatas dan mahal. Secara umum saat ini dalam perkembangannya PEMFC memiliki permasalahan seperti mahalnya bahan atau perlengkapan yang diperlukan serta kompleksnya sistem yang dibutuhkan untuk menjalankan PEMFC.

Berbagai penelitian tentang PEMFC telah banyak dilakukan untuk mengembangkan suatu sistem yang baik pada PEMFC, salah satunya yaitu tentang pengontrolan masukan hidrogen (suhu, tekanan, dan jumlah mol hidrogen). Ganesha Tri Chandrasa dalam “Penelitian Pengaruh Pengontrol Panas Terhadap Daya Keluaran Stack Fuel Cell PEM Dengan Beban Dinamis” melakukan penelitian dengan pemasangan kipas pada PEMFC, dari hasil penelitian didapatkan bahwa tegangan *fuel cell* menjadi lebih tinggi saat kipas dihidupkan (suhu pada PEMFC naik).

Dari dua penelitian tersebut maka dirancanglah sebuah penelitian yaitu pengaturan oksigen dan hidrogen pada PEMFC. Diharapkan dengan penelitian ini akan meningkatkan efisiensi *fuel cell* serta mendapatkan hasil *output* yang sesuai dengan yang diinginkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka diambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana membuat pemodelan pada PEMFC dengan model software *Simulink MatLab*?
2. Bagaimana hasil pengaturan gas hidrogen dan oksigen pada PEMFC?

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan masalah dalam skripsi ini tidak terlalu melebar maka perlu dibatasi oleh hal-hal berikut:

1. Identifikasi analisis pengoperasian *Fuel Cell* dalam simulasi menggunakan bantuan software MATLAB 7.1.
2. Gas yang dimodelkan adalah gas ideal.
3. Suhu yang digunakan untuk proses termodinamika adalah suhu rata-rata pada *stack* dimana variasi suhu di dalam *stack* diabaikan.

1.4 Tujuan

Skripsi ini dilakukan dengan tujuan untuk :

1. Membuat model PEMFC dengan model software *Simulink MatLab*.
2. Membandingkan antara model pengaturan gas hidrogen dan oksigen pada PEMFC software *Simulink Matlab*.

1.5 Manfaat

Penelitian yang diusulkan dalam proposal ini memiliki beberapa manfaat diantaranya:

1. Memberikan literatur baru untuk energi terbarukan.
2. Memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya tentang pengoptimuman energi alternatif.
3. Menjadi referensi awal dalam penelitian tentang energi terbarukan serta simulasinya khususnya tentang *fuel cell*.

1.6 Sistematika Pembahasan

Secara garis besar penyusunan proposal skripsi ini adalah sebagai berikut:

Bab satu berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan pembahasan, manfaat pembahasan dan sistematika pembahasan.

Bab dua membahas tentang pustaka yang menguraikan pendapat-pendapat atau hasil-hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan, landasan toeri merupakan penjabaran dari tinjauan pustaka.

Bab tiga menjelaskan tentang metode yang digunakan untuk menyelesaikan penelitian ini.

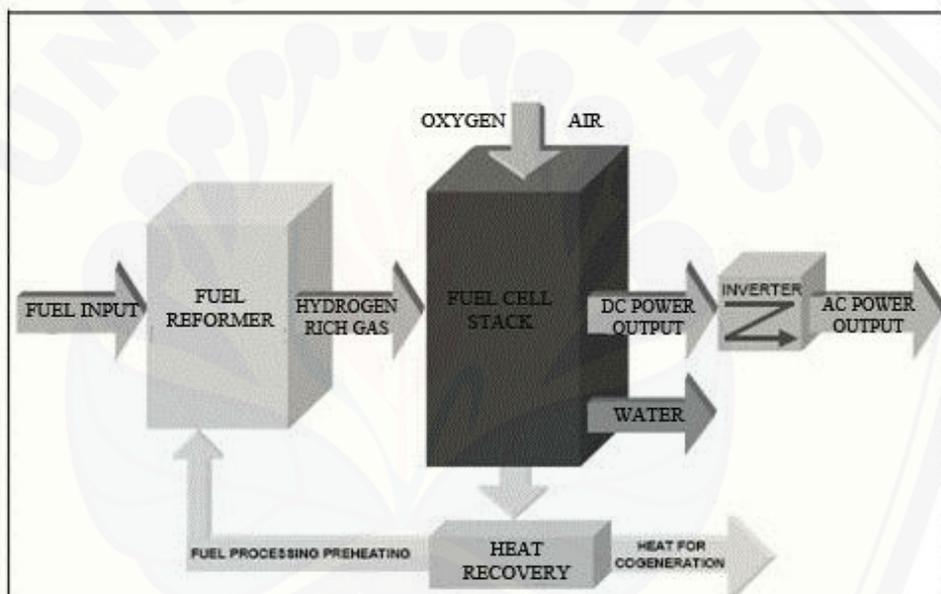
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Fuel cell*

Fuel cell adalah sebuah alat elektrokimia yang menghasilkan listrik tanpa suara dan tanpa pembakaran. *Fuel cell* terdiri dari dua elektroda yang mengapit mengelilingi sebuah elektroda. Oksigen melalui sebuah elektroda dan hidrogen melalui elektroda yang lainnya yang menghasilkan listrik, air, dan panas. Tidak seperti alat elektrokimia yang lain seperti baterai, *fuel cell* tidak mengalami penurunan atau memerlukan pengisian ulang. *Fuel cell* menghasilkan energi dalam bentuk listrik dan panas selama bahan disuplai. Dengan demikian *fuel cell* membuat energi dapat digunakan dari listrik dan panas dengan menggabungkan hidrogen dan oksigen dari udara ke reaksi elektrokimia. Untuk penggunaannya, hidrogen dibuat dari gas alami dengan menggunakan *reformer*. *Fuel cell* memiliki efisiensi energi yang tinggi, menghasilkan dua atau tiga kali lebih banyak energi yang berguna dari bahan bakar daripada metode generasi lainnya. Karena sel bahan bakar tidak memiliki bagian bergerak dalam sistem inti, kehandalan bisa tinggi. Fuel tidak menggunakan pembakaran sehingga tidak menghasilkan polutan udara ketika dioperasikan dengan bahan hidrogen murni dan tentunya mengurangi polusi udara (John M. Nail. 2003).

Sistem *fuel cell* terdiri dari tiga bagian sistem utama yang bekerja bersama: *reformer fuel cell*, membrane electrode assembly, gas dan distribusi air berlipat ganda dengan kontrol elektronik. *Reformer* bertanggung jawab untuk memproduksi aliran yang kaya hidrogen, biasanya dari sumber bahan bakar fosil, yang kemudian dimasukkan ke dalam perakitan membran untuk dikombinasikan

dengan oksigen dari udara. Kombinasi reaktif katalis dari hidrogen dan oksigen menghasilkan listrik. *Reformer* dapat dirancang untuk mengkonversi sejumlah bahan bakar sehari-hari menjadi hidrogen, termasuk gas alam, propana, gas coal-bed (gas asam), gas dekomposisi TPA, dan bensin. *Reformer* menjauhkan hidrogen dari molekul hidrokarbon, umumnya menggunakan uap atau panas yang diambil dari sel bahan bakar operasi. Atau, hidrogen dapat diproduksi secara massal di fasilitas terpisah dan kemudian diangkat dan disimpan di suatu tempat dalam bentuk gas terkompresi atau terikat dalam hidrida logam (John M. Nail, 2003).



Gambar 2.1 Komponen dan diagram alur sistem *fuel cell*

Inti dari *fuel cell* adalah perakitan membran elektroda, terdiri dari anoda, katoda, elektrolit, dan saluran terkait untuk mengirimkan hidrogen dan oksigen dan untuk menghilangkan air dan panas. Elektroda anoda dan katoda terisolasi elektrik dari satu sama lain, tetapi dengan membran di antara elektroda memungkinkan ion hidrogen yang dikatalis pada anoda bermigrasi ke katoda untuk bergabung dengan oksigen dari udara menghasilkan air (John M. Nail, 2003).

Fuel cell memiliki beberapa keuntungan sebagai salah satu energi terbarukan yaitu: *fuel cell* memiliki efisiensi yang tinggi dibandingkan dengan mesin pembakaran yang menggunakan piston atau turbin sebagai penggerak

utama; *Fuel cell* sangat sederhana. *Fuel Cell* tidak memiliki bagian yang bergerak. Sehingga memiliki keandalan yang tinggi dan dapat digunakan untuk jangka panjang; Hasil dari *fuel cell* adalah panas dan air, sehingga menghasilkan nol emisi. *Fuel cell* cocok digunakan untuk kendaraan bermotor, karena dapat mengurangi emisi kendaraan bermotor (Sudaryono, 2013)

2.1.1 Aplikasi Penggunaan Fuel Cell

a. Peralatan

Peralatan fuel cell adalah sebuah nama yang ditujukan kepada suatu alat yang dibangkitkan dengan fuel cell pada suatu lokasi yang tetap dan tidak bergerak seperti mobil. Peralatan fuel cell memiliki berbagai macam ukuran. Dari yang terkecil pada fuel cell antara 1 dan 10kW untuk memberi tenaga listrik pada rumah, perkantoran, atau aplikasi alat elektronik yang berdiri sendiri seperti tower telepon. Contohnya adalah *fuel cell* pada perumahan Plug Power menghasilkan sekitar 5 kW . Sejak teknologi ini modular dan mudah memungkinkan unit yang akan ditambahkan bersama-sama, unit daya didistribusikan tersebut dapat digunakan untuk hotel listrik, rumah sakit, atau industri instansi yang membutuhkan ratusan kilowatt daya. *Fuel cell* peralatan yang lebih besar menghasilkan antara 50 dan 200 MW dari daya dan lebih cocok untuk pembangkit listrik pusat. Setiap konsumen listrik dapat menggunakan *fuel cell*. Satu keuntungan dari didistribusikan di tempat peralatan *fuel cell* adalah kemampuan untuk menjual listrik tambahan yang dihasilkan , tetapi tidak dikonsumsi kembali ke "grid". Untuk bersaing dengan listrik yang berasal dari grid, power unit sel bahan bakar harus mampu menghasilkan listrik kurang dari \$ 1.000 / kW.

b. Transportasi

Sel bahan bakar Ballard telah didukung bus di Kanada sejak tahun 1993. Semua produsen otomotif besar memiliki kendaraan sel bahan bakar dalam pengembangan dan pengujian sekarang - General Motors, Ford, Daimler Chrysler, Honda, Toyota, Hyundai, dan Volkswagen. Untuk bersaing dengan mesin pembakaran internal , kereta listrik sel bahan bakar harus dibuat kecil, ringan, dan sangat biaya efektif kurang dari \$ 50 / kW - yang lebih dari 10 kali lebih murah

daripada unit stasioner .Penetrasi pasar sel bahan bakar kemungkinan akan mulai dipasarkan saat di mana biaya tidak lebih besar dari kendaraan pada umumnya. Pasar-pasar baru akan mencakup unit pendistribusian untuk listrik komersial dan residensial dan juga mikro *fuel cell* .

c. Listrik Portabel

Micro fuel cell akan memungkinkan konsumen untuk berbicara sampai satu bulan terus menerus pada telepon selular tanpa mengisi ulang. Sel bahan bakar akan mengubah dunia telekomunikasi, laptop dan asisten digital pribadi lainnya (PDA) lainnya . Banyak dari *micro fuel cell* berjalan pada metanol , alkohol murah yang digunakan dalam cairan wiper . Sejak konsumen membayar lebih dari \$ 5.000 / kW untuk baterai isi ulang dengan keterbatasan *charge*. Maka selama 10 tahun ke depan diharapkan pasar *fuel cell* terus berkembang, sehingga *micro fuel cell* pada saat nya nanti akan turun ke bawah \$ 1.000 / kW. Stasioner dan *micro fuel cell* akan berfungsi untuk mengkatalisasi pembangunan infrastruktur industri manufaktur *fuel cell* yang akan menjadi penting untuk penggunaan otomotif, di mana poin biaya yang jauh lebih ketat dan target teknologi yang kuat harus dipenuhi

2.2 Jenis-jenis *Fuel Cell*

Perbedaan utama antara masing-masing jenis bahan yang digunakan dalam *fuel cell* stack untuk menghasilkan reaksi kimia yang diperlukan untuk menghasilkan listrik (John M. Nail. 2003).

2.2.1 Proton Exchange Membrane (PEMFC)

- Suhu : 50 – 100 °C
- Elektroda: Solid polymer, proton-conducting electrolyte
- Penggunaan : Transportasi, pembangkit, alat listrik portabel
- Keterangan : Lebih dari 1.900 pembangkit *fuel cell* kecil digunakan pada tahun 2003, 75% adalah PEM. Plug Power telah terpasang lebih dari 100

fuel cell PEM stasioner untuk demonstrasi. Ballard telah menghasilkan sel bahan bakar PEM untuk mobil dan truk selama dekade terakhir

2.2.2 Direct Methanol (DMFC)

- Elektroda : Solid polymer, proton-conducting elektroda
- Suhu : 40 – 100 °C
- Penggunaan : Alat listrik portabel, transportasi, pembangkit
- Keterangan : Dari 3.500 FC portabel digunakan saat ini, sekitar 45% menggunakan metanol.

2.2.3 Solid Oxide (SOFC)

- Elektroda : Yttria stabilized zirconia
- Suhu : 800 – 1000 °C
- Penggunaan : Alat listrik portabel, transportasi, pembangkit
- Keterangan : 25% dari 1.900 pembangkit *fuel cell* kecil digunakan pada tahun 2003 adalah oksida padat.

2.2.4 Phosphoric Acid (PAFC)

- Elektroda : Phosphoric Acid
- Suhu : 190 – 210 °C
- Penggunaan : pembangkit
- Keterangan : Lebih dari 200 FC telah dipasang di seluruh dunia, termasuk di rumah sakit, hotel, dan gedung perkantoran.

2.2.5 Molten Carbonate (MCFC)

- Elektroda : Carbonate
- Suhu : 630 – 650 °C
- Penggunaan : pembangkit
- Keterangan : *fuel cell* karbonat untuk aplikasi pembangkit/stasionari telah berhasil ditunjukkan di Jepang dan Italia.

2.3 Proton Exchange Membrane (PEMFC)

PEMFC, juga disebut solid polymer *fuel cell*, pertama kali dikembangkan oleh General Electric di Amerika Serikat sekitar tahun 1960-an, yang digunakan

oleh NASA pada kendaraan angkasa berawak pertama mereka. Jenis *fuel cell* ini utamanya tergantung pada membran polimer khusus yang dilapisi dengan partikel katalis terdispersi tinggi. Hidrogen diumpankan ke anoda sisi membran (yang mungkin tekanan lebih besar dari tekanan atmosfer) di mana katalis menyebabkan atom hidrogen melepaskan elektron sehingga menjadi ion H⁺ (proton) (Beo Gou. 2010):



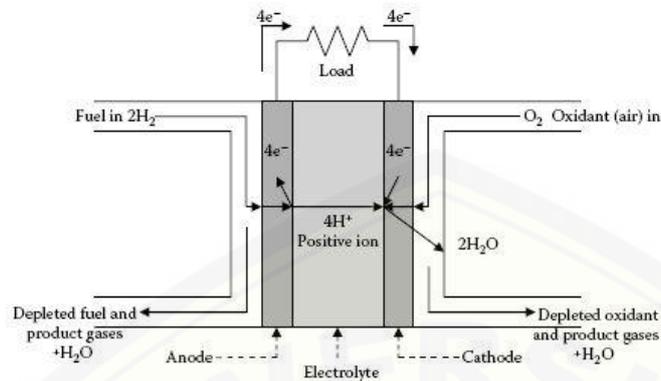
seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Proton Exchange Membrane (PEM) hanya memungkinkan ion H⁺ untuk melewati itu, sedangkan elektron dikumpulkan dan dimanfaatkan sebagai listrik yang melewati beban sebelum mereka mencapai sisi katoda. Elektron dan ion hidrogen yang berdifusi melalui membran bergabung dengan oksigen yang didapat dari udara untuk membentuk air, sebuah reaksi yang melepaskan energi dalam bentuk panas (Beo Gou. 2010):



Air hasil dari produk harus dihilangkan untuk mencegah sel dari kemungkinan banjir dan membuat tidak beroperasi. Selain itu, setiap hidrogen dan oksigen yang tidak terpakai (udara) harus dikeluarkan dari anoda dan katoda melalui outlet masing-masing. Untuk reaksi terus menerus, elektron yang dihasilkan pada anoda harus mengalir melalui sirkuit eksternal untuk sel bahan bakar, dan proton harus mengalir melalui PEM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 (Beo Gou. 2010).

Reaksi dalam sebuah sel *fuel cell* menghasilkan tegangan output sekitar 0,7 V; untuk aplikasi umum, beberapa sel-sel individual dihubungkan secara seri untuk membentuk *stack fuel cell* untuk menghasilkan tegangan yang diinginkan. Suhu operasi yang diperlukan untuk PEMFCs hanya 50° C - 100° C, yang memungkinkan operasi start-up yang cepat. Dengan demikian, PEMFC sangat menarik untuk aplikasi transportasi, dan juga sebagai kecil atau menengah

didistribusikan pembangkit tenaga listrik karena memiliki kepadatan tinggi daya,



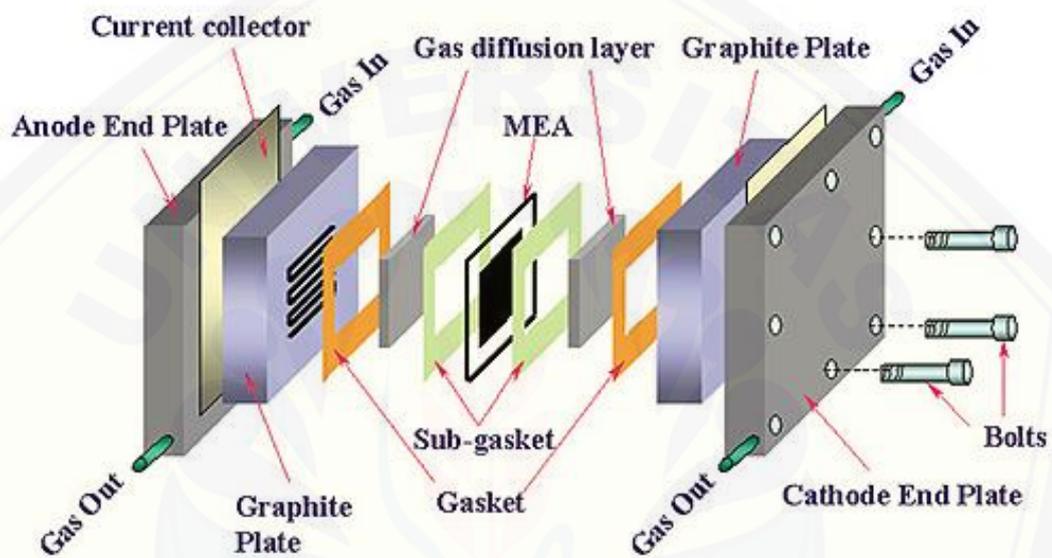
Gambar 2.2 Reaksi elektrokimia PEMFC

elektrolit padat, umur *stack fuel cell* panjang, dan korosi rendah. Keuntungan lainnya termasuk produk yang bersih (air murni ketika hidrogen adalah bahan bakar, yang berarti "nol-emisi"), efisiensi energi tinggi lebih dari 40% biasanya dalam produksi tenaga listrik, dan operasi yang tidak bersuara. Oleh karena itu PEMFCs sangat mungkin digunakan untuk mobil listrik, pesawat (daya tambahan), rumah dan kantor-kantor kecil, dan elektronik portabel (sebagai pengganti baterai isi ulang) (Beo Gou. 2010).

2.4 KOMPONEN PEMFC

Bagian utama dari PEMFC diilustrasikan pada Gambar 2.2. Membran elektroda perakitan / *membrane electrode assembly* (MEA) terdiri dari membran polimer bersama elektroda dan lapisan difusi gas. Setiap elektroda pada dasarnya terdiri dari lapisan partikel katalis (biasanya platinum diendapkan pada permukaan partikel yang lebih besar dari dukungan karbon bubuk), dan ditempelkan ke salah satu membran atau lapisan difusi gas. Lapisan difusi gas terbuat dari bahan berpori dan elektrik konduktif, seperti kain karbon, untuk memungkinkan reaktan berdifusi ke dalam dan keluar dari MEA, dan untuk mengumpulkan arus yang dihasilkan dengan memberikan kontak listrik antara elektroda dan pelat bipolar luar. Selain itu, memungkinkan air yang terbentuk di katoda untuk keluar ke saluran gas (Beo Gou. 2010).

Pelat bipolar / *bipolar plates*, disebut juga pelat medan aliran, berfungsi mendistribusikan gas reaktan di atas permukaan elektroda melalui saluran aliran pada permukaan pelat bipolar. Pelat bipolar juga mengumpulkan arus dan membentuk struktur pendukung dari *fuel cell*. Untuk listrik dan konduktivitas termal yang baik, ditambah kekuatan fisik dan stabilitas kimia, biasanya digunakan grafit pada sebagai bahan pelat tersebut. (Beo Gou. 2010)



Gambar 2.3 Struktur rangkaian *fuel cell*

2.4.1 Membrane Electrolyte Assembly (MEA)

MEA terdiri dari 2 elektroda, 1 membran elektrolit dan 2 GDL. Membran memisahkan (dengan pembatas gas) 2 setengah reaksi sel dan melepas proton dari anoda ke katoda. Lapisan katalis yang terdispersi pada elektroda memacu setiap setengah reaksi, GDL mendistribusikan gas secara merata ke katalis di membran dan mengalirkan elektron dari area aktif menuju pelat bipolar dan membantu pengaturan air. Material MEA terdiri dari polimer solid terintergrasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda, Kertas atau kain carbon berpori untuk lapisan difusi gas (GDL). (Beo Gou. 2010)

2.4.2 Pelat Bipolar

Mendistribusikan gas di bagian area aktif membran. Mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda. Membuang air keluar sel.

Material pelat bipolar terdiri dari grafit, *stainless steel*, atau komposit polimer termoplastik. (M. Hatta Adam. 2008)

2.4.3 Pelat Penutup

Berfungsi menyatukan rangkaian *fuel cell*. Material pelat penutup memiliki kekuatan mekanik yang baik (biasanya baja atau aluminium). (M. Hatta Adam. 2008)

2.4.4 Penyimpan Arus

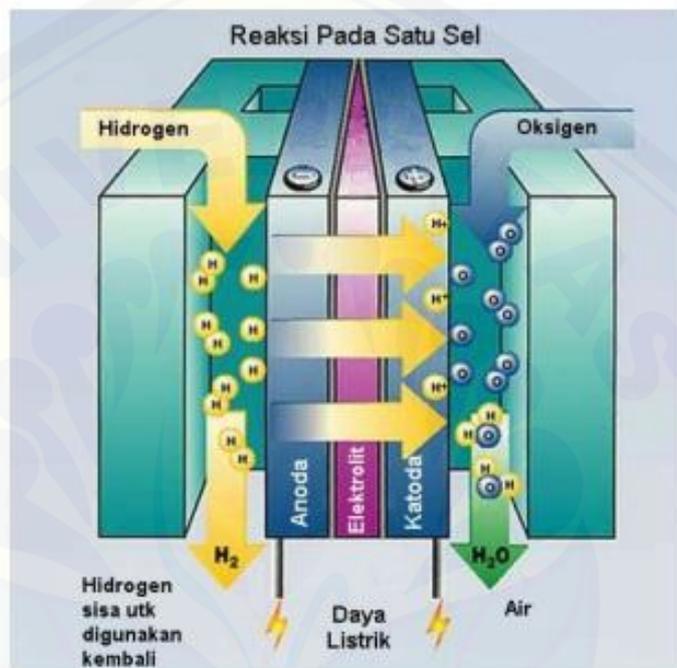
Menyimpan dan mentransfer arus listrik dari dalam ke luar sirkuit. Material yang digunakan adalah logam dengan kontak elektrik dan konduktivitas yang baik (biasanya tembaga). (M. Hatta Adam. 2008)

Dalam sistem *fuel cell* terdapat komponen dasar yang menyusun sistem *fuel cell*, sekurang-kurangnya terbagi menjadi empat bagian yaitu:

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 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 2.4 Proses *fuel cell*

2.5 Cara Kerja *Fuel cell*

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

1. Hidrogen (H_2) yang menyentuh permukaan anoda akan bereaksi 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 elektroda yang sama dituju ion hidrogen (H^+) yaitu katoda.
4. Oksigen, ion hidrogen dan elekteron mengalami reaksi kimia dengan oksigen elektroda maka pada permukaanya akan menghasilkan air (H_2O) dan panas sebagai efek dari reaksi tersebut.

2.6 Persamaan Elektrokimia dalam *Fuel cell*

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:

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{Act} - V_{Ohmic} - V_{mt} \quad (2.3)$$

Dimana : V_{FC} = tegangan keluaran *fuel cell*, V

E_{NERST} = tegangan Nernst / tegangan open circuit, V

V_{Act} = tegangan aktivasi (disaat activation polarization), V

V_{Ohmic} = tegangan ohmic (disaat ohmic polarization), V

V_{Mt} = tegangan akibat perpindahan (Mass transport losses), V

2.7 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)

$$E_{Nernst} = E^o - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2}}{P_{H_2}(P_{O_2})^{0.5}} \right) \quad (2.4)$$

Dimana : E_{Nernst} = Tegangan Nernst / tegangan open circuit, V

E^o = Tegangan *fuel cell* dalam keadaan ideal

R	= Konstanta gas universal (8,3142 Joule/mol.K)
T	= Suhu (K)
F	= Konstanta Faraday
P_{H_2}	= Tekanan parsial hidrogen (Pascal)
P_{O_2}	= Tekanan parsial oksigen (Pascal)

Setiap proses reaksi kimia secara langsung bertujuan untuk meminimalkan adanya energi yang hilang dari dan nilai negatif pada seimbangan. Energi yang hilang itu biasa disebut energi bebas gibbs (*gibbs free energy*), yang didefinisikan dengan persamaan berikut (Dhanar Dwi K. 2008) :

$$G = H - TS \quad (2.5)$$

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 dihasilkan 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 (Dhanar Dwi K. 2008):

$$\Delta(g_f) = (g_f) \text{ products} - (g_f) \text{ reaktan} \quad (2.6)$$

Dengan persamaan reaksi kimia :



Maka dari persamaan 2.7 kita dapat menghasilkan perubahan dalam energi bebas gibbs dan persamaan berikut (Dhanar Dwi K. 2008):

$$\Delta(g_f) = (g_f)_{H_2O} - (g_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (g_f)_{O_2} \quad (2.8)$$

Persamaan 2.8 mengasumsikan bahwa reaksi kimia dalam *fuel cell* ialah reversibel dan bahwa semua energi bebas gibbs diubah menjadi energi elektron. Perubahan energi ini sama dengan energi yang di produksi (dihasilkan), oleh karenanya (Dhanar Dwi K. 2008):

$$\Delta(g_f) = -2FE \quad E = -\frac{\Delta(g_f)}{2F} \quad (2.9)$$

Sehingga persamaan ini memberikan tegangan open circuit reversibel dari *fuel cell* hidrogen dan bernilai 1.167nVolt pada suhu 100° C untuk kondisi volume dianggap / diatur tetap (isothermal) dan prosesnya reversibel, turunan dari energi bebas gibbs, sebagai berikut (Dhanar Dwi K. 2008):

$$d(g_r) = VdP \quad (2.10)$$

Dalam keadaan gas ideal (Dhanar Dwi K. 2008):

$$PV = nRT \quad (2.11)$$

Menukar V pada persamaan 2.10, maka di dapatkan (dalam satuan mol, n = 1)

$$d(g_r) = RT \frac{dP}{P} \quad (2.12)$$

Saat persamaan 2.12 diintegalkan dengan nilai jarak antara 1 dan 2 kita dapatkan:

$$\Delta(g_f) = (g_f^1) - (g_f^0) = RT \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (2.13)$$

Fungsi Gibbs (g_r) ini, berhubungan dengan temperatur, dihitung dengan referensi udara tetap 1 atm, maka didapatkan (Dhanar Dwi K. 2008):

$$g_f(T_k, P_1) = (g_f^0) + RT \ln(P_1) \quad (2.14)$$

Menggunakan persamaan 2.14 dan 2.8

$$\Delta(g_f) = (g_f)_{H_2O} - (g_f)_{H_2} - (g_f)_{O_2}$$

$$= (g_{f_{H_2O}}^o + RT \ln(P_{H_2O})) - 1(g_{f_{H_2}}^o + RT \ln(P_{H_2})) - \frac{1}{2}(g_{f_{O_2}}^o + RT \ln(P_{O_2})) \quad (2.15)$$

Misalkan:

$g_f^o = g_{f_{H_2O}}^o - g_{f_{H_2}}^o - \frac{1}{2} g_{f_{O_2}}^o$, pada persamaan (2.15) didapatkan:

$$\Delta(g_f) = (g_f^o) + RT \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}}\right) \quad (2.16)$$

Karena $\Delta G = -n_e FE^o$ dan $(-n_e = 2)$, maka kita bisa substitusikan persamaan pada 2.16 menjadi seperti berikut (Hoogers Gregor,2003):

$$E_{Nernst} = E^o - \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}}\right) \quad (2.17)$$

Persamaan 2.17 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. Prosedur untuk menghitung tekanan yang terpisah melibatkan pemeriksaan tiga perbedaan fenomena perbedaan dielektroda yaitu (Dhanar Dwi K. 2008):

- Antara saluran aliran gas dan poros elektroda
- Antara gas fase 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 dibagian lain. Untuk mencari tekanan parsial pada elektroda dicari dengan persamaan berikut (Dhanar Dwi K. 2008) :

$$P_{H_2O} = 10^{-X} \quad (2.18)$$

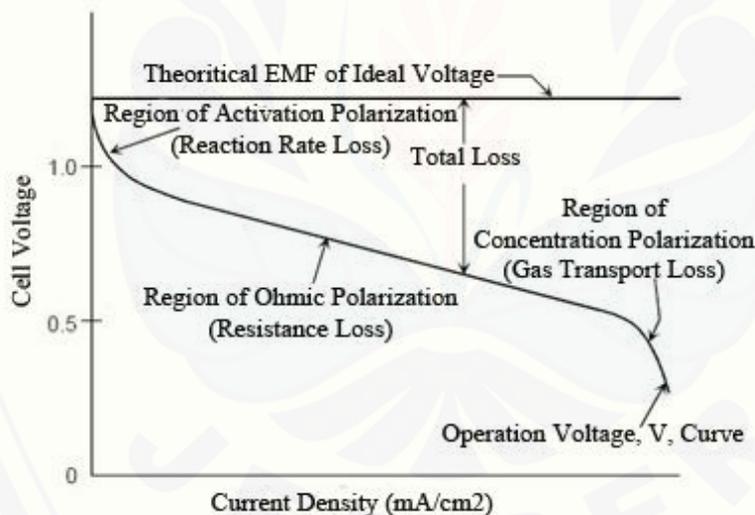
$$X = -2.1974 + 0.02953T_c - 9.1837 \times 10^{-5}T_c^2 + 1.4454 \times 10^{-7}T_c^3 \quad (2.19)$$

$$P_{O_2} = \frac{P_{Udara}}{\exp\left(4.192\frac{i}{T^{1.334}}\right)} - P_{H_2O} \quad (2.20)$$

$$P_{H_2} = \frac{0.5 P_{Udara}}{\exp\left(1.653 \frac{i}{T^{1.334}}\right)} - P_{H_2O} \quad (2.21)$$

2.8 Kerugian Aktivasi (Kehilangan Tegangan)

Kehilangan tegangan yang sering terjadi di dalam sel bahan bakar diilustrasikan pada gambar 2.4, *Fuel cell* menghasilkan tegangan tergantung pada kondisi operasi seperti temperatur, beban yang diberikan, dan laju aliran massa bahan bakar / oksidan. Sebagaimana ditunjukkan pada performa sistem *fuel cell* adalah kurva polarisasi yang mewakili sifat tegangan sel dibandingkan dengan berat jenis daya.



(Gambar 2.5 Karakteristik arus dan tegangan *fuel cell* ideal)

Tegangan aktual dari sebuah sel bahan bakar lebih rendah daripada model secara teoritis karena penyilangan benda dari satu elektroda melalui elektrolit dan daya internal. Tiga klasifikasi utama dari kehilangan yang menghasilkan dari jatuhnya tegangan sirkuit terbuka adalah

1. Polarisasi Aktivasi
2. Polarisasi Ohmic
3. Polarisasi konsentrasi

2.8.1 Activation Losses

Tegangan aktivasi adalah tegangan jatuh yang disebabkan perbedaan aktivasi antara anoda dan katoda (Dr. R.Seyezhai. 2011). Kerugian aktivasi disebabkan oleh lambatnya kinetika elektroda. Ada sebuah kesamaan yang dekat antara reaksi elektrokimia dan kimia dalam melibatkan energi aktivasi yang harus diatasi dengan reaksi tertentu. Pada kenyataannya, kerugian aktivasi adalah hasil tahap reaksi kompleks elektrokimia permukaan, yang masing-masing memiliki laju reaksi mereka sendiri dan energi aktivasi. Biasanya, parameter tingkat dan energi aktivasi dari satu atau lebih tahap reaksi terbatas untuk mengontrol *drop* tegangan yang disebabkan oleh kerugian aktivasi pada elektroda tertentu dalam kondisi tertentu. Namun, dalam kasus reaksi elektrokimia dengan $\eta_{act} > 50-100$ mV, adalah mungkin untuk mendekati drop tegangan karena aktivasi polarisasi oleh persamaan semi-empiris, yang disebut persamaan Tafel (EG & G Technical Service, Inc. 2004).

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_o} \quad (2.22)$$

Selain itu dari persamaan Butler – Volmer kita juga akan mendapatkan persamaan yang sejenis (M. Ismail Haji. 2008):

$$V_{Act} = \frac{RT}{n\alpha F} \ln \left(\frac{i}{i_o} \right) = T (a + b \ln(I)) \quad (2.23)$$

Dimana α (alfa) adalah koefisien transfer ion, I adalah arus yang mengalir pada *fuel cell*, I_o adalah rus pertukaran reaksi, yang merupakan hasil perkalian antara rapat arus pertukaran (j_0) dengan luas permukaan sel. Sedangkan a dan b (dalam satuan Volt / Kelvin) adalah konstanta yang besarnya :

$$a = -\frac{R}{n\alpha F} \ln(I_o), \text{ dan } b = \frac{R}{n\alpha F} \quad (2.24)$$

Rumus empiris untuk menghitung jatuh tegangan aktivasi adalah :

$$V_{Act} = \eta_0 + (T - 298). a + T. b \ln(I) = V_{Act1} + V_{Act2} \quad (2.25)$$

V_{Act1} adalah jatuh tegangan aktivasi yang hanya dipengaruhi oleh faktor suhu,

$$V_{Act1} = (\eta_o + (T - 298).a) \quad (2.26)$$

Dan V_{Act2} adalah nilai jatuh tegangan aktivasi yang dipengaruhi oleh suhu dan arus

$$V_{Act2} = T.b \ln(I) \quad (2.27)$$

Sedangkan η_o adalah besarnya tegangan aktivasi dasar yang tidak bergantung pada suhu maupun arus.

2.8.2 Ohmic Losses

Kerugian ohmik terjadi karena resistensi terhadap aliran ion dalam elektrolit dan resistensi terhadap aliran elektron melalui elektroda . Kerugian ohmic dominan melalui elektrolit berkurang dengan mengurangi pemisahan elektroda dan meningkatkan konduktivitas ionik elektrolit. Karena kedua elektroda elektrolit dan sel bahan bakar mematuhi Hukum Ohm , kerugian ohmik dapat dinyatakan dengan persamaan

$$V_{ohmic} = iR \quad (2.28)$$

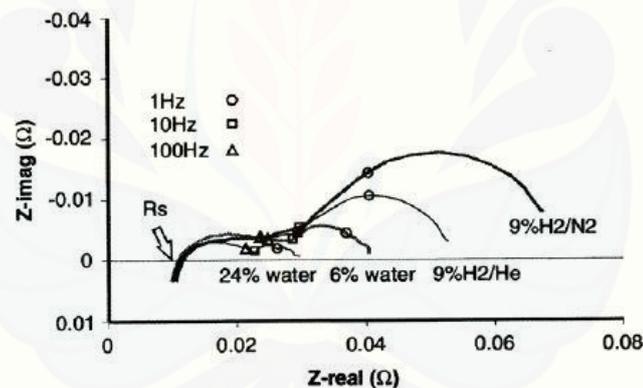
di mana I adalah arus yang mengalir melalui sel , dan R adalah resistansi total sel , yang mencakup elektronik, ion, dan resistensi kontak (EG & G Technical Service, Inc. 2004):.

Setiap komponen ini dapat mendominasi tahanan , tergantung pada jenis selnya, seperti, dalam planar elektrolit – (SOFC) tahanan ionik biasanya mendominasi ; di tubular SOFC tahanan elektronik biasanya mendominasi , dan planar SOFC, tahanan elektrolit kontak sering mendominasi (EG & G Technical Service, Inc. 2004).

Ohmic resistance yang dinormalisasi oleh daerah sel aktif adalah *Area Specific Resistance* (ASR). ASR memiliki unit Ωcm^2 . ASR adalah fungsi dari desain sel, pilihan material, teknik manufaktur dan sifat material berubah dengan suhu. ASR adalah parameter kinerja utama, terutama dalam sel bahan bakar suhu

tinggi, di mana kerugian ohmik sering mendominasi polarisasi keseluruhan sel (EG & G Technical Service, Inc. 2004)..

Dari eksperimental , ada beberapa cara untuk menentukan resistensi sel ohmik . Jika kurva $V - I$ memiliki sebagian besar linear (di tengah) , kemiringan kurva ini biasanya erat mendekati ASR sel . Hanya dalam seperti sebagian linear dari kurva VI ohmic resistensi dominan , dan karenanya penentuan ASR valid . Cara yang akurat untuk menentukan tahanan adalah dari spektroskopi impedansi dalam sebuah impedansi spektrum sel bahan bakar, tahanan adalah nilai riil impedansi dari titik yang impedansi imajiner adalah nol. Seperti dapat dilihat dalam contoh, tahanan invarian dengan konsentrasi gas. Bagian dari impedansi yang berhubungan dengan transportasi massal dan kinetika, bagaimanapun perubahan adalah dengan melihat komposisi masukkan anoda. (EG & G Technical Service, Inc. 2004).



Gambar 2.6 Contoh spektrum impedansi dari anoda (SOFC) yang beroperasi pada 850°C

Persamaan jatuh tegangan ohmik adalah seperti persamaan jatuh tegangan pada resistensi biasa. Namun dalam rangkaianannya, resistensi ini terdiri dari dua jenis, yakni resistensi elektron, yakni resistensi saluran yang dilalui elektron, dan resistensi ion, yakni resistensi saluran yang dilewati ion. Persamaannya ialah:

$$V_{ohm} = IR_{ohm} = I(R_{elec} + R_{ion}) \quad (2.29)$$

Dimana I adalah arus yang mengalir pada PEMFC. R_{elec} adalah resistensi dari konduktor internal PEMFC yang mengalirkan elektron, biasanya berupa kawat atau konduktor yang menghubungkan sel bahan bakar dengan beban atau perangkat daya. Nilai R_{elec} ini biasanya bernilai sangat kecil tergantung pada jenis konduktornya, untuk konduktor tertentu nilai ini bisa diabaikan (M. Ismail Haji. 2008).

Sedangkan R_{ion} adalah resistensi dari konduktor ion, yakni lapisan elektroda, katalis, dan elektrolit (membran). Nilai R_{ion} ini cukup besar karena transfer ion melewati beberapa material yang berbeda. Pada PEMFC, ion akan melewati membran yang berupa polimer. Nilai resistensi ini sangat dipengaruhi oleh konduktivitas polimer (M. Ismail Haji. 2008).

Pada polimer, konduktivitas dipengaruhi oleh porositas dari membran, yakni kemampuan menyerap air pada membran. Semakin besar porositas, maka nilai konduktivitas akan semakin tinggi. Pada Nafion®, porositas ini direpresentasikan oleh kandungan air (λ).

Resistansi dari membran polimer adalah:

$$R_{ion} = \int_0^{\delta} \frac{dz}{\sigma(\lambda(z))} \quad (2.30)$$

dimana δ adalah ketebalan membran, sedangkan σ adalah konduktivitas ion pada membran. Persamaan konduktivitas membran sebagai fungsi dari kandungan air:

$$\sigma = (0.005139\lambda(z) - 0.00326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.31)$$

oleh karena itu, persamaan jatuh tegangan ohmic menjadi (M. Ismail Haji. 2008):

$$V_{ohm} = I \left(R_{elec} + \int_0^{\delta} \frac{dz}{\sigma(\lambda(z))} \right) \quad (2.32)$$

2.8.3 Mass Transport Losses

Mass transport losses atau yang lebih dikenal dengan jatuh tegangan konsentrasi adalah jatuh tegangan yang timbul akibat adanya pengurangan

konsentrasi reaktan akibat arus yang mengalir. Ketika arus yang dihasilkan oleh PEMFC konstan, konsentrasi reaktan dan produk akan konstan pula. Namun apabila terjadi perubahan arus, reaksi kimianya akan menyebabkan reaktan yang bereaksi berkurang di sisi katalis (M. Ismail Haji. 2008).

Konsentrasi reaktan dipermukaan katalis lebih kecil dari konsentrasi reaktan yang disuplai, yang bergantung pada arus, kepadatan membran, dan koefisien difusi. Semakin tinggi kerapatan arus, nilai jatuh tegangan akan semakin besar. Ketika besar kerapatan arus mencapai nilai tertentu sehingga konsentrasi reaktan menjadi nol, maka nilai kerapatan arus tersebut adalah kerapatan arus limit (M. Ismail Haji. 2008).

Persamaan jatuh tegangan konsentrasi adalah:

$$V_{Mt} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{I_L}{I_L - I} \right) \quad (2.33)$$

I_L adalah nilai arus limit (batas) dari membran, sedangkan I adalah nilai arus yang melewati PEMFC.

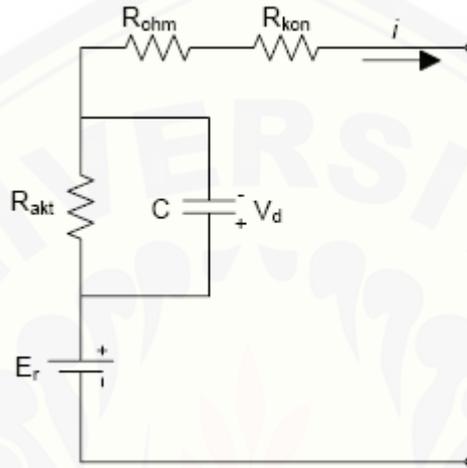
Resistensi konsentrasi (R_{Mt}) merupakan representasi dari jatuh tegangan yang diakibatkan “kejenuhan” arus yang melewati suatu membran, dimana R adalah konstanta gas universal, T adalah suhu dalam kelvin, F adalah konstanta Farraday, dan n adalah jumlah mol. Persamaan R_{Mt} (M. Ismail Haji. 2008) :

$$R_{Mt} = \frac{V_{Mt}}{I} = \frac{RT}{nF} \frac{\ln \left(\frac{I_L}{I_L - I} \right)}{I} \quad (2.34)$$

2.8.4 Efek Kapasitansi Lapisan Ganda

Pada PEMFC, dua elektroda dipisahkan oleh membran yang padat yang dapat melewatkan ion tetapi tidak bisa melewatkan elektron. Elektron akan mengalir dari anoda ke katoda melalui rangkaian listrik eksternal/beban. Sifat membran tersebut dianalogikan sama dengan sifat kapasitor dengan lapisan elektroda sebagai pembatasnya (M. Ismail Aji. 2008).

Lapisan ganda ini dapat menyimpan energi sebagaimana sifat kapasitor. Efek kapasitansi ini menyebabkan keterlambatan dalam pembuangan muatan di permukaan elektroda dan elektrolit. Maka ketika arus naik (atau turun) akan ada jeda waktu untuk tegangan turun (atau naik). Rangkaian ekivalen PEMFC dengan memperhitungkan efek ini ditunjukkan pada gambar 2.6 (M. Ismail Aji. 2008).



Gambar 2.6 Rangkaian Listrik Ekivalen untuk Efek Kapasitansi di dalam PEMFC

R_{akt} adalah resistansi dari jatuh tegangan aktivasi, R_{kon} adalah resistansi dari jatuh tegangan konsentrasi, sedangkan R_{ohm} adalah resistansi dari jatuh tegangan ohmik. Tegangan V_d merupakan tegangan kapasitor, yang merupakan representasi dari T_{akt} yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini. V_d bisa dihitung dengan (M. Ismail Aji. 2008) :

$$V_d = \left(I - C \frac{dV_c}{dt} \right) (R_{Akt} + R_{mt}) \quad (2.35)$$

$$R_{akt} = \frac{V_{akt2}}{I} = \frac{T \cdot b \ln I}{I} \quad (2.36)$$

$$b = \frac{R}{n\alpha F} \quad (2.37)$$

Maka tegangan sel bahan bakar menjadi :

$$V_{out} = E_r - V_d - V_{akt} - V_{ohm} - V_{mt} \quad (2.38)$$

2.9 Produksi Air dan Panas pada Fuel Cell

2.9.1 Produksi Air

Pada *stack fuel cell* yang menggunakan gas hidrogen, akan diproduksi air dengan laju satu mol untuk setiap dua elektron. Hubungan ini dapat ditulis dalam rumus:

$$\text{Produksi Air} = \frac{P_e}{2 \cdot V_{c.F}} \text{ mol s}^{-1} \quad (2.39)$$

Massa molekul air adalah $18,02 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$, sehingga rumus diatas akan menjadi (Ganesha Tri Chandrasa. 2009):

$$\text{Produksi Air} = 9,34 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \text{ kg s}^{-1} \quad (2.40)$$

2.9.2 Produksi Panas

Ketika beroperasi *fuel cell* akan memproduksi panas. Jika semua enthalpy dari reaksi *fuel cell* hidrogen diubah ke energi listrik maka tegangan keluaran akan menjadi (Ganesha Tri Chandrasa. 2009):

1,48 volt jika air yang dihasilkan dalam bentuk cair,

1,25 volt jika air yang dihasilkan dalam bentuk uap jenuh.

Sehingga perbedaan diatas secara jelas memperlihatkan adanya tegangan sesungguhnya dan energi yang tidak sepenuhnya diubah ke bentuk listrik tetapi diubah ke bentuk panas. Total panas yang dihasilkan pembangkit yaitu Q_{cell} (W) untuk tiap n unit ditumpukan *fuel cell* adalah berbeda antara daya yang dihasilkan saat kenyataan (operasi) karena ada rugi-rugi. Dan dapat didefinisikan dengan persamaan berikut (Dhanar Dwi K. 2008):

$$Q_{\text{cell}} = nI(HHV - V_{FC}) \quad (2.41)$$

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

2.10 Penggunaan Hidrogen dan Oksigen

2.10.1 Penggunaan Hidrogen

Nilai dari penggunaan hidrogen tiap cell dalam satuan kg/s, dihitung dengan persamaan (Dhanar Dwi K. 2008):

$$H_2 usage = \frac{(1,05 \times 10^{-8} P_{FC})}{V_{FC}} \quad (2.42)$$

2.10.2 Penggunaan Oksigen

Nilai dari aliran udara dalam satuan kg/s didapatkan dengan persamaan :

$$m_{air} = 9.34 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_s}{V_{FC}} \quad (2.43)$$

Dengan λ adalah konsentrasi oksigen di dalam udara.

2.11 Model Respon Perubahan Suhu (Keseimbangan Energi Termodinamika)

Energi kalor dapat dihasilkan oleh PEMFC karena adanya energi entalpi yang tidak terkonversi menjadi energi listrik. Kalor yang dihasilkan ini dapat menaikkan suhu sistem dari *fuel cell* yang mempengaruhi besarnya tegangan keluaran PEMFC. Energi kalor netto (Q_{net}) per detik yang dihasilkan dari reaksi elektrokimia adalah:

$$Q_{net} = Q_{reaksi} - Q_{el} - Q_{transfer_1} - Q_{transfer_2} \quad (2.44)$$

Dimana Q_{net} adalah energi kalor per detik (Joule/s = Watt) yang dihasilkan atau diserap oleh PEMFC dari reaksi yang berlangsung. Q_{reaksi} adalah energi yang dihasilkan dari reaksi kimia per detik, Q_{el} adalah daya listrik yang dikonsumsi oleh beban. $Q_{transfer_1}$ adalah besarnya energi kalor per detik yang dipindahkan melalui senyawa yang masuk dan keluar sel, sedangkan $Q_{transfer_2}$ adalah energi kalor yang dipindahkan melalui udara.

$$Q_{reaksi} = n_{H_2,reaksi} \Delta G \quad (2.45)$$

$$Q_{reaksi} = n_{H_2,reaksi} \left[\Delta G_0 - RT \ln \left(p_{H_2} (p_{O_2})^{0.5} \right) \right] \quad (2.46)$$

Dimana $n_{H_2,reaksi}$ adalah jumlah mol per detik H_2 yang bereaksi pada proses tersebut dan ΔG adalah perubahan energi Gibbs.

Jumlah mol senyawa X yang bereaksi atau hasil dari sebuah reaksi adalah:

$$n_{x,reaksi/hasil} = Y \frac{1}{nF} \quad (2.47)$$

Dimana n adalah jumlah mol elektron dalam persamaan reaksinya. Sedangkan Y adalah koefisien reaksi yang dialami oleh suatu senyawa pada suatu reaksi.

Q_{el} adalah daya listrik yang dikonsumsi oleh beban, yakni hasil tegangan dikalikan dengan arus:

$$Q_{el} = V_{FC} I \quad (2.48)$$

$Q_{transfer_1}$ adalah besarnya energi kalor per detik yang dipindahkan melalui senyawa yang masuk dan keluar sel.

$$Q_{transfer_1} = n_{H_2,reaksi} (2T_{ref} - T) C_{H_2} + n_{O_2,reaksi} (2T_{ref} - T) C_{O_2} + n_{H_2O,hasil} (T - 2T_{ref}) C_{H_2} + n_{H_2O,hasil} H_u \quad (2.49)$$

Dimana $n_{x,y}$ adalah jumlah mol per detik senyawa X yang melakukan aktivitas Y (masuk/keluar/hasil). Sedangkan C_x adalah kapasitas kalor jenis molar dari senyawa X, dan H_u adalah kalor uap air.

$Q_{transfer_2}$ adalah energi kalor yang dipindahkan melalui udara (terjadi proses konveksi). Persamaannya ialah:

$$Q_{transfer_2} = h_{sel} (T - T_{ref}) \frac{1}{2} N_{sel} A_{sel} \quad (2.50)$$

Dimana h_{sel} adalah koefisien perpindahan kalor secara konveksi pada sel secara keseluruhan, yang nilainya akan berbeda untuk tiap jenis desain sel. N_{sel} adalah banyaknya sel dalam satu *stack*. Sedangkan A_{sel} adalah luas permukaan tiap sel.

Persamaan energi kalor per detik yang dihasilkan oleh *fuel cell* adalah:

$$M_{FC} C_{FC} \frac{dT}{dt} = Q_{net} \quad (2.51)$$

Perubahan suhu akibat proses perubahan energi kalor yang terjadi dalam *fuel cell* ialah:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{net}}{M_{FC} C_{FC}} \quad (2.52)$$

Dimana M_{FC} adalah massa total dari seluruh PEMFC, sedangkan C_{FC} adalah kalor jenis dari keseluruhan PEMFC (M. Ismail Aji. 2008).

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jadwal Penelitian

Penelitian ini direncanakan selesai dalam waktu 6 bulan sebagaimana dijelaskan pada tabel 3.1. Kegiatan penelitian dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember. Adapun kegiatan penelitian dalam skripsi ini meliputi tahapan-tahapan berikut: studi literatur, penyusunan model simulink, pengambilan dan pengolahan data, diakhiri penyusunan laporan skripsi.

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan					
		8	9	10	11	12	1
1	Studi literature						
2	Pembuatan Simulink						
4	Analisis Data						
5	Pembahasan						
6	Laporan						

3.2 Tahap Perencanaan

Penelitian ini adalah mengembangkan model PEMFC berbasis fuzzy logic dengan langkah – langkah perancangan sebagai berikut :

1. Studi literatur

Tahap awal dari penelitian ini mencari literatur dari hasil penelitian sebelumnya. Diharapkan dengan literatur yang didapat bisa memberikan keyakinan bahwa penelitian ini dapat dilaksanakan dan memberikan arahan untuk mengurangi kesalahan dalam penelitian.

2. Pembuatan Model Simulink

Tahap kedua adalah pembuatan model simulink sesuai dengan data-data yang didapatkan dari studi literatur, memasukkan data, dan kemudian menjalankan respon simulasi untuk mendapatkan hasil perhitungan ataupun grafik dari simulasi.

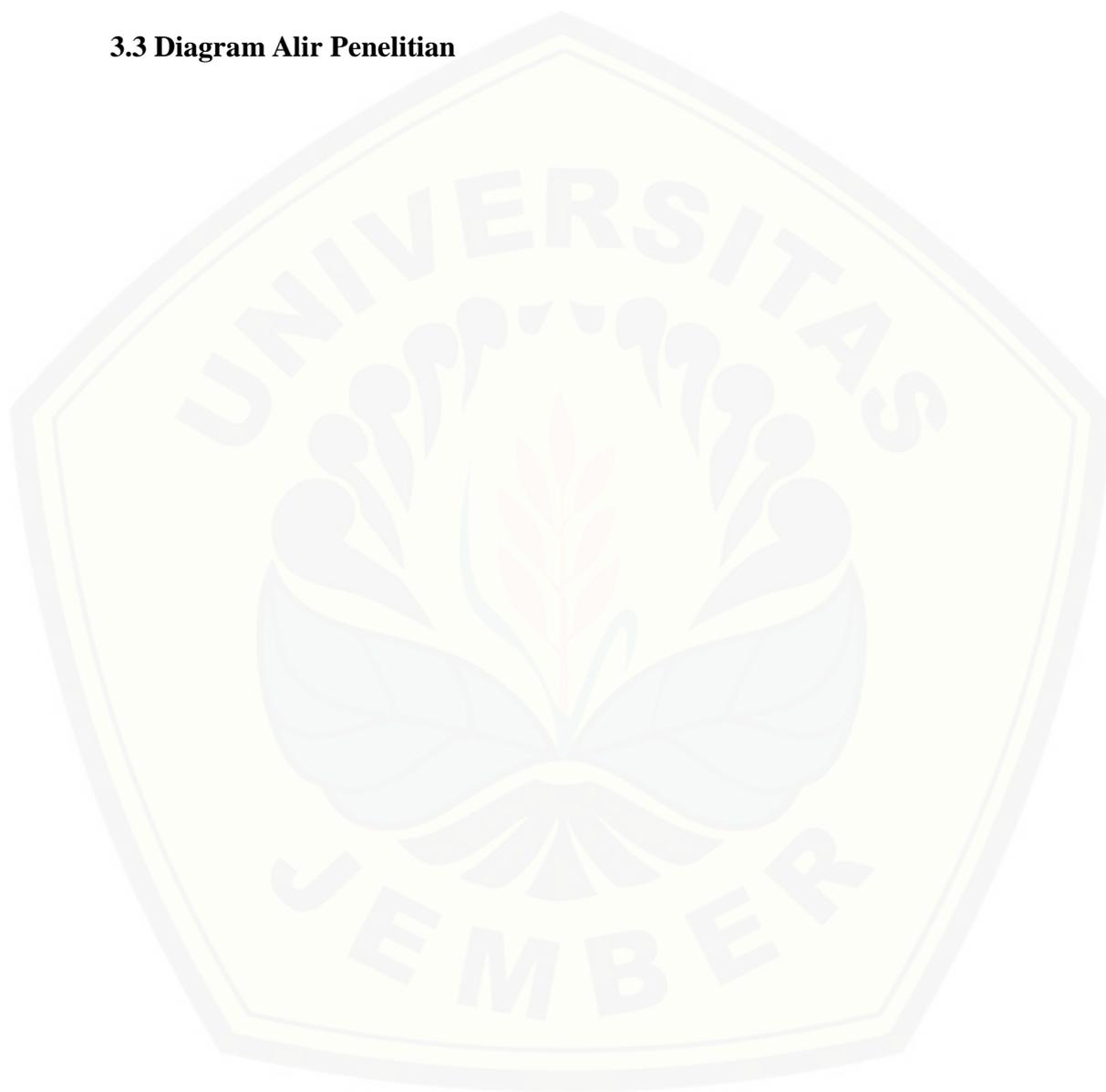
3. Analisa data

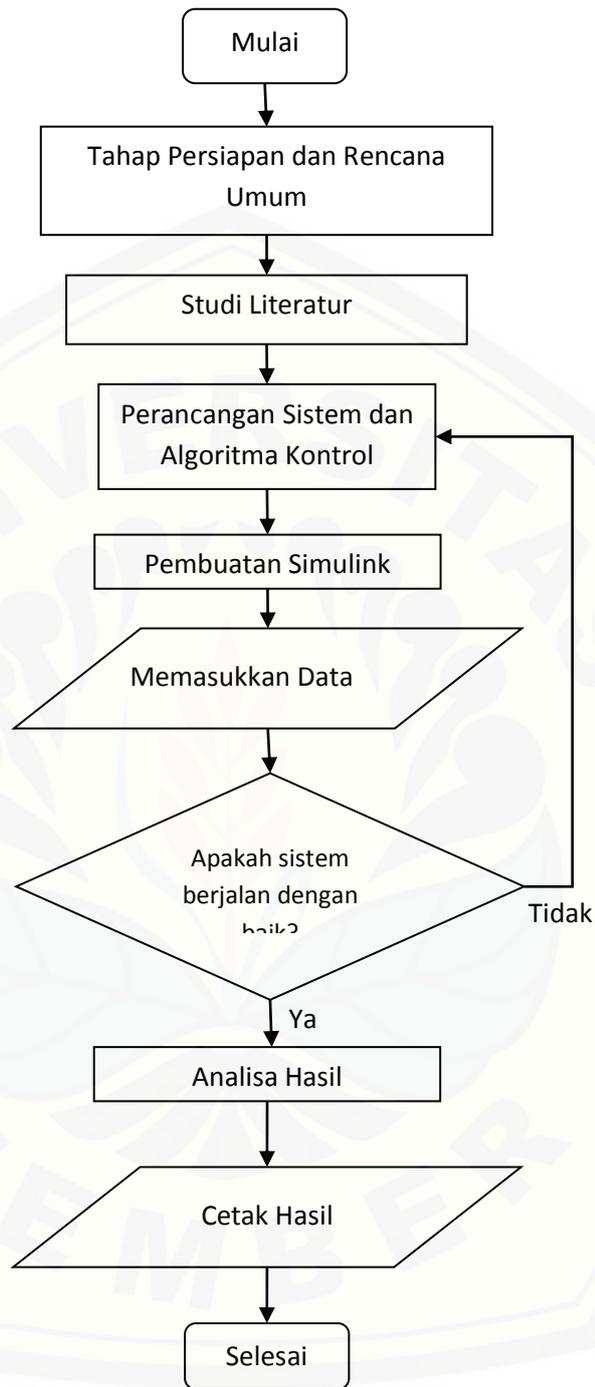
Tahap ketiga adalah analisa data dari hasil model simulink yang kemudian akan dibahas pada tahap selanjutnya.

4. Pembahasan

Tahap keempat adalah pembahasan, di mana dalam tahap ini semua hasil penelitian akan di bahas secara menyeluruh dan detail untuk menjelaskan hasil apa yang di dapat dalam penelitian ini dan sejauh mana penelitian sudah di lakukan.

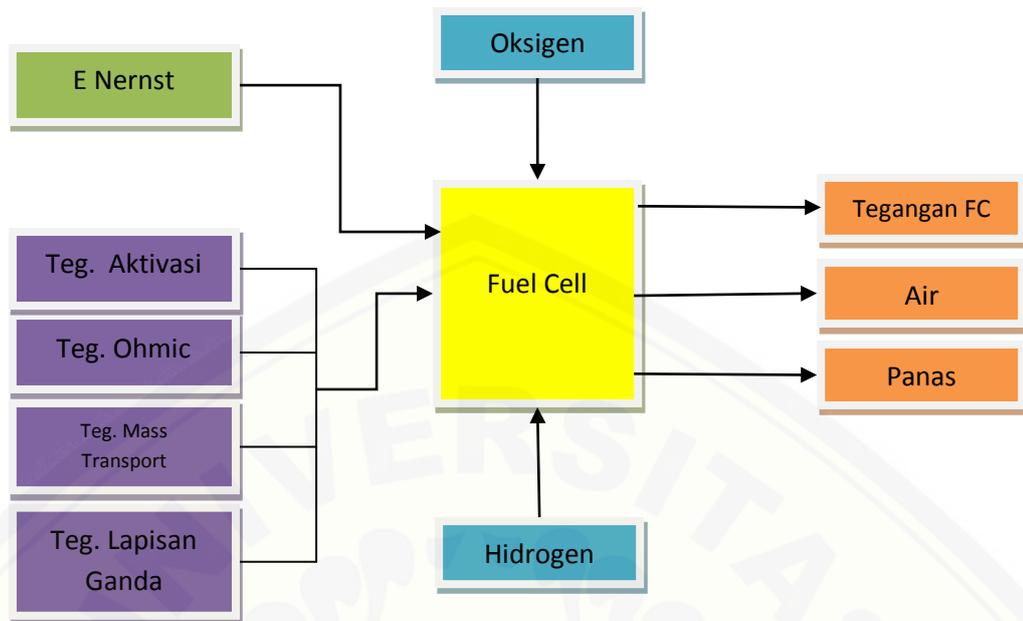
3.3 Diagram Alir Penelitian





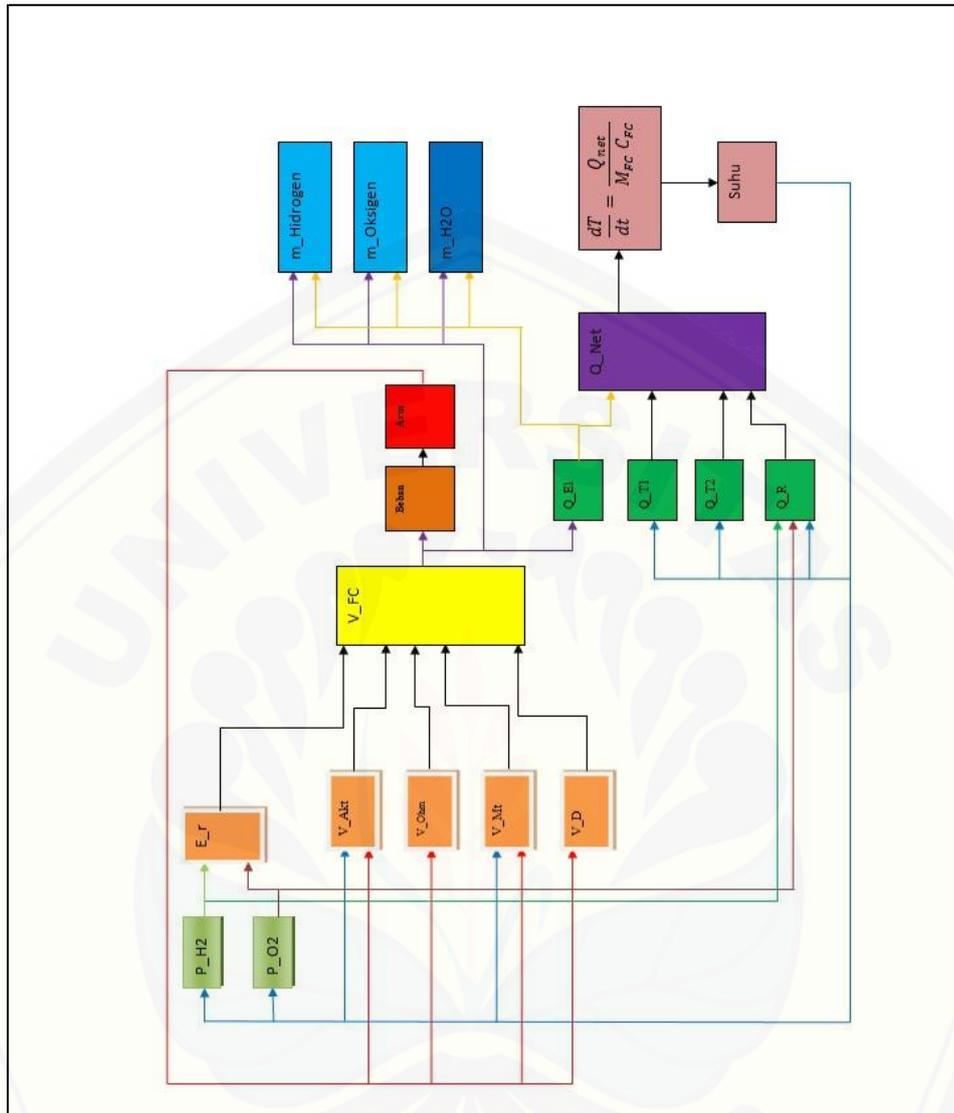
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.4 Blok Diagram Sistem



Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

3.5 Blok Diagram Keseluruhan Model PEMFC



Gambar 3.3 Blok Diagram Keseluruhan Model PEMFC

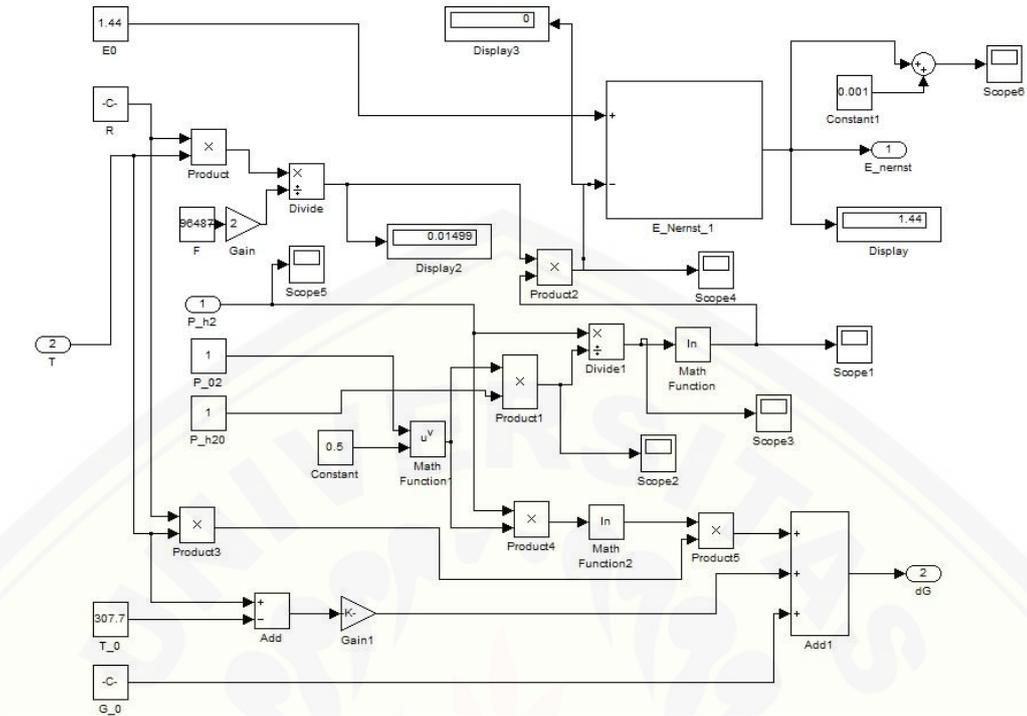
3.6 Parameter yang Ditentukan

Parameter berikut ini ditentukan beberapa referensi, datasheet, serta hasil percobaan referensi pada PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) Avista Lab SR – 12 500W.

Tabel 3.2 Parameter yang digunakan dalam simulasi PEMFC

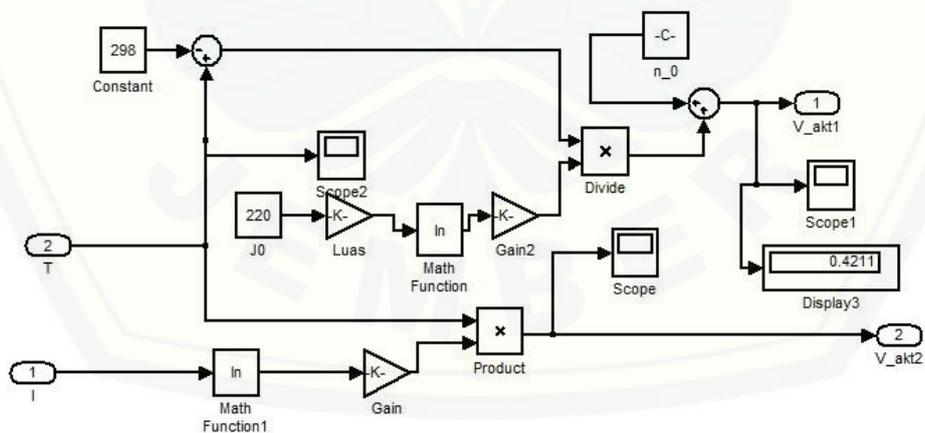
Simbol	Nama Parameter	Nilai (satuan)
N	Jumlah Sel	48
A	Luas Setiap Sel	$62,5 \text{ (cm}^2\text{)} = 6,25 \times 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)}$
H	Koefisien konveksi Sel	$37,5 \text{ (Watt/m}^2\text{.K)}$
M_{FC}	Massa PEMFC	44 (kg)
C_{FC}	Kalor Jenis total PEMFC	500 (Joule/kg/K)
A	Koef. Transfer membran	0,5
Δ	Ketebalan membran	25 (μm)
R	Tetapan gas universal	8,3143 (Joule/mol.K)
F	Tetapan faraday	96487 (coulomb/mol)
P_a	Tekanan anoda	1,5 (atm) = 151987,5 (Pa)
P_k	Tekanan katoda	1 (atm) = 101325 (Pa)
T_r	Suhu ruangan	34,7 ($^{\circ}\text{C}$) = 307,7 (K)
T_0	Suhu awal	34,7 ($^{\circ}\text{C}$) = 307,7 (K)
J_0	Rapat arus pertukaran	220 (A/m^2)
I_L	Arus limit (maksimal)	25 (Ampere)
η_0	Tegangan aktivasi dasar	0,419688 (Volt)
V_d^0	Tegangan kapasitansi dasar	0 (Volt)
λ	Kandungan air membran	5 (%)
C	Kapasitansi	4 (Farad)
D_{H_2O, H_2}^0	Koefisien difusi H ₂ O-H ₂ standar (suhu 25)	$6,3 \times 10^{-9} \text{ (m}^2\text{/s)}$
D_{H_2O, O_2}^0	Koefisien difusi H ₂ O-O ₂ standar (suhu 25)	$2,6 \times 10^{-9} \text{ (m}^2\text{/s)}$
R_{elec}	Resistansi konduktor internal PEMFC	0,0003 (Ω)
l_a	Lebar antara anoda dengan katalis	$1,88 \times 10^{-6} \text{ (m)}$
l_k	Lebar antara katoda dengan katalis	$1,88 \times 10^{-6} \text{ (m)}$
ΔG_0	Energi gibbs standar	$-237,3 \times 10^{-3} \text{ (Joule/mol)}$
C_{H_2}	Kapasitas kalor molar H ₂	28,68 (Joule/mol/K)
C_{O_2}	Kapasitas kalor molar O ₂	29,39 (Joule/mol/K)
$C_{H_2O,l}$	Kapasitas kalor molar H ₂ O	75,4 (Joule/mol/K)
H_u	Koefisien kalor uap H ₂ O	40644 (Joule/mol/K)
ΔS_0	Entropi standar	-163,33 (Joule/mol/K)

3.7 Simulasi Persamaan Nernst



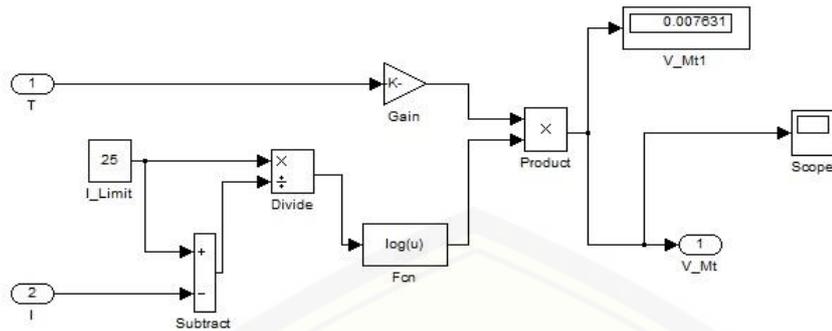
Gambar 3.4 Simulasi Persamaan Nernst

3.8 Simulasi Persamaan Tegangan Aktivasi



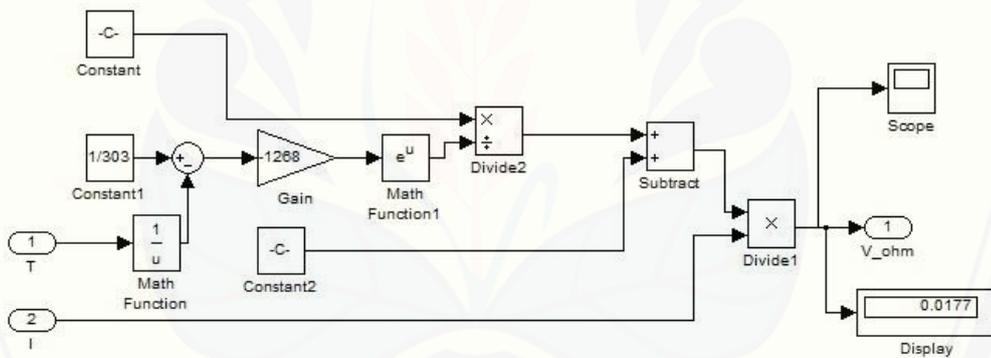
Gambar 3.5 Simulasi Persamaan Tegangan Aktivasi

3.9 Simulasi Persamaan *Mass Transport Losses*



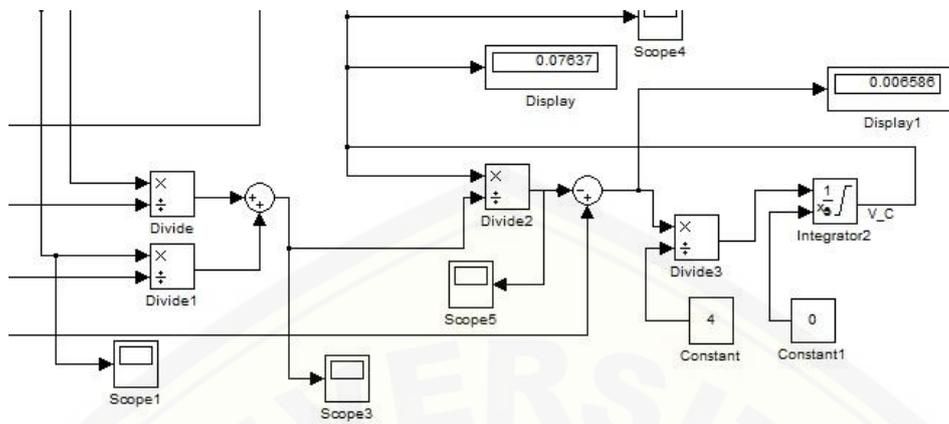
Gambar 3.6 Simulasi Persamaan Tegangan *Mass Transport Losses*

3.10 Simulasi Persamaan *Ohmic Losses*



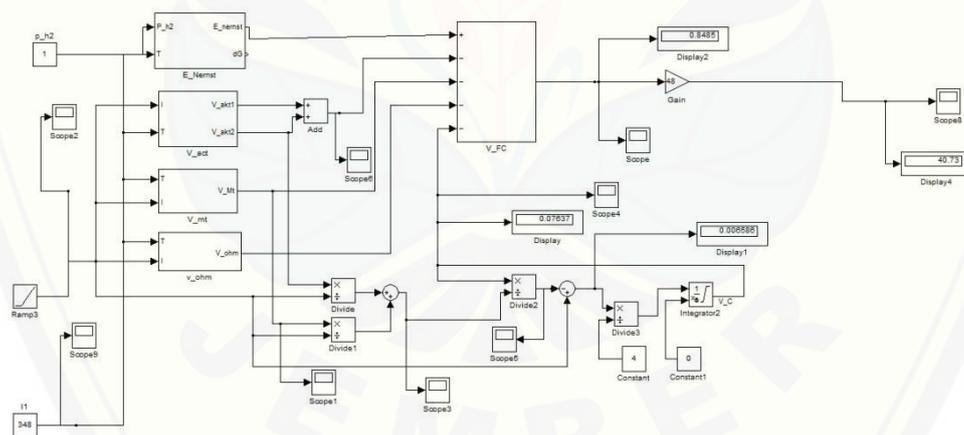
Gambar 3.7 Simulasi Persamaan Tegangan *Ohmic Losses*

3.11 Simulasi Persamaan Efek Lapisan Ganda



Gambar 3.8 Simulasi Persamaan Tegangan Efek Lapisan Ganda

3.12 Simulasi PEM Fuel Cell



Gambar 3.9 Simulasi Persamaan Tegangan Mass Transport Losses

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

BAB 5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengaruh perubahan tekanan hidrogen terhadap tegangan pada PEM *Fuel Cell* adalah ketika tekanan 1 Atm maka tegangan yang dihasilkan adalah 43.55 V, sedangkan saat tekanan 6 Atm maka tegangan yang dihasilkan adalah 42.26 V. Sehingga semakin besar tekanan maka tegangan yang dihasilkan akan semakin rendah.
2. Pengaruh perubahan suhu hidrogen terhadap tegangan pada PEM *Fuel Cell* adalah ketika suhu 323 kelvin maka tegangan yang dihasilkan adalah 44.02 V, sedangkan saat tekanan 373 kelvin maka tegangan yang dihasilkan adalah 43.06 V. Sehingga semakin besar suhu maka tegangan yang dihasilkan akan semakin rendah.
3. Pengaruh perubahan kuat arus hidrogen terhadap tegangan pada PEM *Fuel Cell* adalah ketika kuat arus 1 ampere maka tegangan yang dihasilkan adalah 48.82 V, sedangkan saat kuat arus 9 ampere maka tegangan yang dihasilkan adalah 41.89 V. Sehingga semakin besar kuat arus maka tegangan yang dihasilkan akan semakin rendah.

5.2 Saran

1. Penggunaan *simulink* dapat diperluas lagi dengan perhitungan pipa-pipa yang digunakan, serta banyaknya konsumsi hidrogen yang dibutuhkan.
2. Penggunaan *simulink* dapat digabungkan dengan kecerdasan buatan seperti logika *fuzzy* untuk pengaplikasian alat yang lebih kompleks seperti pada kendaraan bermotor.

DAFTAR PUSTAKA

Adam , Muhammad Hatta. 2008. *Analisis Sifat Mekanik dan Konduktivitas Komposit Polipropilena/Etilena-Propolena-Diena Terpolimer/Kabon (PP/EPDM/C) untuk Aplikasi Pelat Bipolar pada Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cell*. Universitas Jakarta: Jakarta.

Aji , Muhammad Ismail. 2008. *Studi Pemodelan Dan Simulasi Sel Bahan Bakar Membran Pertukaran Proton (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)*. Bandung: Institut Universitas Bandung

Beo Gou. 2010. *Fuel Cells Modeling, Control, and Application*.

Colleen Spiegel. 2008. *PEM Fuel Cell Modelling and Simulation Using Matlab*.

Dhanar Dwi Kuncoro. 2008. *Simulasi Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Sebagai Pembangkit Listrik Perumahan*. Jakarta: Universitas Jakarta.

Departement Energi dan Sumber Daya Mineral. 2006. *Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2005-2025*. Jakarta: ESDM.

EG & G Technical Service, Inc. 2004. *Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)*.

Gregor Hooger. 2003. *Fuel Cell Technology Handbook*.

Ganesha Tri Chandrasa . *Penelitian Pengaruh Pengontrol Panas Terhadap Daya Keluaran Stack Fuel Cell PEM dengan beban dinamis*.

John M. Nail . *The Evolution of the PEM Stationary Fuel Cell in The U.S. Innovation System*. 2003.

Parmaputra Widiyanto. 2014. *Sistem Energi Surya Fotovoltaik (Sesf) Grid-Tied Dengan Menggunakan Fuzzy Logic Controller*. Jember: Universitas Jember.

Seyezhai, R. 2011. *Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell*.

Sri Kusumadewi. 2003. *Artificial Intelligence (Teknik dan Aplikasinya)*. Yogyakarta.

Sudaryono. 2013. Journal: *Neural Network Model Of Polymer Electrolyte Membran Fuel Cell For Electrical Vehicle*.

www.wikipedia.org/wiki/Sel_bahan_bakar. [Diakses 2 Oktober 2016]

LAMPIRAN

A. Hasil Simulink Dalam Bentuk Angka

No	SUHU	TEKANAN	ARUS	TEGANGAN
1	330	0.7	1.25	48.41
2	330	0.7	3.75	45.09
3	330	0.7	6.25	43.35
4	330	0.7	8.75	42.3
5	330	2.2	1.25	47.63
6	330	2.2	3.75	44.28
7	330	2.2	6.25	42.57
8	330	2.2	8.75	41.28
9	330	3.7	1.25	47.27
10	330	3.7	3.75	43.96
11	330	3.7	6.25	42.21
12	330	3.7	8.75	40.92
13	330	5.2	1.25	47.04
14	330	5.2	3.75	43.72
15	330	5.2	6.25	41.98
16	330	5.2	8.75	40.69
17	342	0.7	1.25	48.37
18	342	0.7	3.75	44.91
19	342	0.7	6.25	42.8
20	342	0.7	8.75	41.74
21	342	2.2	1.25	47.56
22	342	2.2	3.75	44.1
23	342	2.2	6.25	42.29
24	342	2.2	8.75	40.93
25	342	3.7	1.25	47.19
26	342	3.7	3.75	43.74
27	342	3.7	6.25	41.92
28	342	3.7	8.75	40.57
29	342	5.2	1.25	46.95
30	342	5.2	3.75	43.49
31	342	5.2	6.25	41.68
32	342	5.2	8.75	40.33
33	354	0.7	1.25	48.32
34	354	0.7	3.75	44.73
35	354	0.7	6.25	42.84

36	354	0.7	8.75	41.42
37	354	2.2	1.25	47.49
38	354	2.2	3.75	43.9
39	354	2.2	6.25	42
40	354	2.2	8.75	40.59
41	354	3.7	1.25	47.11
42	354	3.7	3.75	43.51
43	354	3.7	6.25	41.62
44	354	3.7	8.75	40.21
45	354	5.2	1.25	46.86
46	354	5.2	3.75	43.27
47	354	5.2	6.25	41.37
48	354	5.2	8.75	39.96
49	366	0.7	1.25	44.55
50	366	0.7	3.75	44.55
51	366	0.7	6.25	42.58
52	366	0.7	8.75	41.1
53	366	2.2	1.25	45.16
54	366	2.2	3.75	43.29
55	366	2.2	6.25	41.32
56	366	2.2	8.75	39.84
57	366	3.7	1.25	47.02
58	366	3.7	3.75	43.29
59	366	3.7	6.25	41.32
60	366	3.7	8.75	39.84
61	366	5.2	1.25	46.76
62	366	5.2	3.75	43.04
63	366	5.2	6.25	41.06
64	366	5.2	8.75	39.58

NOMENKLAKTUR

a, b	: Konstanta pada persamaan Tafel (Volt/Kelvin)
A_{sel}	: Luas permukaan sel (m^2)
C	: Kapasitansi pada lapisan ganda (Farad)
C_x	: Kapasitas kalor dari suatu zat x (Joule/mol.K)
C_{FC}	: Kalor jenis keseluruhan sel bahan bakar (Joule/kg.K)
E_r	: Potensial reversibel sel (Volt)
E_r^0	: Potensial reversibel standar (Volt)
F	: Konstanta Faraday
h_{sel}	: Koefisien perpindahan kalor secara konveksi ($Watt/m^2.K$)
H_u	: Kalor penguapan molar air (Joule/mol)
HHV	: Nilai kalor atas / <i>high heating value</i> (Joule)
I, i	: Kuat arus (Ampere)
I_0	: Arus pertukaran (Ampere)
I_L	: Arus limit (Ampere)
J	: Rapat arus ($Ampere/m^2$)
J_0	: Rapat Arus Pertukaran ($Ampere/m^2$)
l_a	: Lebar jarak antara saluran anoda dengan katalis (m)
M_{FC}	: Massa total sel bahan bakar (kg)
n	: Koefisien ekivalen senyawa dalam suatu reaksi (mol)
N_i	: Fluks molar gas dari senyawa i ($mol/s.m^2$)
N_{sel}	: Jumlah sel
R	: Konstanta gas universal (8,3142 Joule/mol.K)
P_a	: Tekanan anoda (Pascal)

P_k	: Tekanan katoda (Pascal)
P_{H_2}	: Tekanan parsial hidrogen (Pascal)
P_{O_2}	: Tekanan parsial oksigen (Pascal)
P_0	: Tekanan pada keadaan standard (1 atm)
R_{act}	: Resistansi aktivasi (ohm)
R_{elec}	: Resistansi dari konduktor elektron, yakni kawat saluran (ohm)
R_{ion}	: Resistansi dari konduktor ion, yakni lapisan elektroda dan elektrolit (ohm)
R_{ohm}	: Resistansi ohmik (ohm)
T	: Suhu (Kelvin)
T_{ref}	: Suhu pada keadaan standar (298 K = 25°C)
q	: Muatan (Coulomb)
V_{act}	: Jatuh tegangan / overpotensial
V_{act1}	: Jatuh tegangan aktivasi yang hanya dipengaruhi faktor suhu (Volt)
V_{act2}	: Jatuh tegangan aktivasi yang dipengaruhi oleh suhu dan arus (Volt)
V_{kon}	: Jatuh tegangan / overpotensial / polarisasi konsentrasi (Volt)
V_d	: Tegangan pada kapasitor (Volt)
V_{ohm}	: Jatuh tegangan / overpotensial / polarisasi ohmik (Volt)
V_{out}	: Tegangan keluaran (Volt)
V_{irrev}	: Tegangan irreversibel / jatuh tegangan total / overpotensial (Volt)
W_{elec}	: Energi Listrik (Joule)
X_i	: Fraksi mol dari senyawa i
$x_{H_2O}^{sol.anoda}$: Fraksi mol saluran anoda H ₂ O
$x_{H_2O}^{sol.katoda}$: Fraksi mol saluran katoda H ₂ O
α	: Koefisien transfer elektron

λ	: kandungan air (%)
α	: ketebalan membran (m)
σ	: konduktivitas ion membran (ohm ⁻¹ = mho)
ΔG	: Energi bebas <i>Gibbs</i> (Joule)
ΔH	: Entalpi (Joule)
ΔS	: Entropi (Joule/Kelvin)
η_0	: Tegangan aktivasi dasar (Volt)
η	: Efisiensi (%)

