



UNIVERSITAS INDONESIA

PENGEMBANGAN KONFIGURASI PENGENDALIAN  
TEGANGAN KELUARAN DARI PROTON EXCHANGE  
MEMBRANE FUEL CELL MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY

SKRIPSI

OLEH

MARCEL LEONARDO  
0606074092

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

PENGEMBANGAN KONFIGURASI PENGENDALIAN  
TEGANGAN KELUARAN DARI PROTON EXCHANGE  
MEMBRANE FUEL CELL MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana  
Teknik

OLEH

MARCEL LEONARDO  
0606074092

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2010

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Marcel Leonardo**

**NPM : 0606074092**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 10-Juni-2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Marcel Leonardo

NPM : 0606074092

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Pengembangan Konfigurasi Pengendalian  
Tegangan Keluaran dari Proton Exchange  
Membrane Fuel Cell Menggunakan Logika  
Fuzzy

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.Ir. Feri Yusivar M.Eng (.....)

Penguji : ..... (.....)

Penguji : ..... (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 14 Juni 2010

## UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan YME atas berkat dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini tepat waktu. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr.Ir. Feri Yusivar M.Eng. , selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran didalam mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Keluarga dari penulis yang telah memberikan perhatian dan dukungan moral dan mareil sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini
- (3) Teman-teman yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini, Suria, Jepry, Aghny Arisya Putra dan teman-teman lain yang tidak disebut namanya atas dukungan dan bantuannya.

Akhir kata, penulis berharap kepada Tuhan YME berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu dan penulis menyadari keterbatasan dari laporan ini, sehingga penyusun mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang.

Depok, Juni 2010

Penulis

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

---

---

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

Nama : Marcel Leonardo  
NPM : 0606074092  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**PENGEMBANGAN KONFIGURASI PENGENDALIAN  
TEGANGAN KELUARAN DARI PROTON EXCHANGE  
MEMBRANE FUEL CELL MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 14 Juni 2010

Yang menyatakan

(Marcel Leonardo)

## ABSTRAK

Nama : Marcel Leonardo  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : ” PENGEMBANGAN KONFIGURASI PENGENDALIAN TEGANGAN KELUARAN DARI PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY”

Dalam skripsi ini dibandingkan performansi dari beberapa konfigurasi pengendali logika fuzzy pada fuel cell. Pada konfigurasi pertama, masukan hidrogen dan oksigen ditetapkan sebagai perbandingan tetap proporsional hidrogen dan oksigen ( $O_{2in}/H_{2in}=1.168$ ), sedangkan pada konfigurasi kedua, masukan oksigen diatur secara dinamik proporsional terhadap masukan hidrogen menggunakan pengendali logika fuzzy kedua. Pada kedua pengendali logika fuzzy (FLC1 dan FLC2) dilakukan variasi nilai fuzzifikasi untuk setiap variabel linguistik dan performansinya terhadap pengendalian tegangan fuelcell dibandingkan. Konfigurasi yang terbaik dipilih berdasarkan pembobotan nilai pada parameter settling time dan overshoot dari respon dinamik pengendalian tegangan fuelcell. Dari hasil penilaian didapat konfigurasi dengan dua pengendali logika fuzzy mempunyai performansi pengendalian yang lebih baik dibandingkan konfigurasi satu pengendali logika fuzzy.

**Kata kunci: Logika Fuzzy, Fuel Cell, Kendali, C-Mex Matlab**

## ABSTRACT

Name : Marcel Leonardo  
Study Program: Electrical Engineering  
Title : "THE DEVELOPMENT OF OUTPUT VOLTAGE  
CONTROLLER CONFIGURATION FOR PROTON  
EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL SYSTEM  
USING FUZZY LOGIC"

This Thesis compares the performance of fuzzy logic controller configuration for Fuel Cell. In the first configuration, the input of hydrogen and oxygen is determined which using proportional gain ratio ( $O_{2in}/H_{2in}=1.168$ ). In the second configuration, the input of oxygen is controlled by dynamic proportional from hydrogen input using the second fuzzy logic controller. Both of fuzzy logic controller (FLC1 and FLC2) fuzzification is varied for every linguistic variable and then the performances of the controller are compared. The best configuration is determined by using weighting factor of settling time and overshoot parameters of Fuel cell voltage dynamic response. As a result, the second configuration using two fuzzy logic controller has better performance than using one fuzzy logic controller

**Key Words: Fuzzy Logic, Fuel Cell, Control, C-Mex Matlab**



## DAFTAR ISI

HALAMAN ORISINALITAS.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Sistematika Penulisan.....	2
<b>BAB 2 DASAR TEORI.....</b>	<b>3</b>
2.1 FuelCell.....	3
2.1.1 Perkembangan Fuel Cell.....	3
2.1.2 Komponen utama sistem Fuel Cell.....	4
2.1.3 Prinsip kerja Fuel Cell.....	5
2.1.4 Karakteristik PEMFC.....	6
2.2 Logika Fuzzy.....	10
2.2.1 Himpunan Fuzzy.....	10
2.2.2 Operasi Himpunan Fuzzy.....	11
2.2.3 Fungsi Keanggotaan.....	12
2.2.4 Fuzzifikasi.....	14
2.2.5 Inference and Combining.....	15
2.2.6 Defuzzifikasi.....	16
2.2.7 Sistem Kendali Fuzzy.....	18
<b>BAB 3 PENGENDALI FUZZY UNTUK FUEL CELL.....</b>	<b>20</b>
3.1 Model Dinamik Fuel Cell.....	20
3.2 Fuzzifikasi masukan dan keluaran.....	24
3.3 Aturan Fuzzy.....	27
3.4 Defuzzifikasi keluaran.....	27
3.5 Pengendali Fuzzy menggunakan S-Function.....	28
<b>BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISA.....</b>	<b>32</b>
4.1 Efek Variasi Konfigurasi <i>Fuzzy Logic Controller</i> terhadap respons sistem Fuel Cell.....	32

4.2 Analisis Efek Variasi Beban terhadap Respons Sistem Fuel Cell.....	41
4.3 Analisis Efek Perubahan <i>Flow</i> terhadap Respons Sistem Fuel Cell.....	43
<b>BAB 5 KESIMPULAN.....</b>	<b>46</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>48</b>
<b>LAMPIRAN A.....</b>	<b>49</b>
<b>LAMPIRAN B.....</b>	<b>50</b>
<b>LAMPIRAN C.....</b>	<b>51</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Struktur Umum Fuel Cell.....	5
Gambar 1.2 Struktur PEM Fuel Cell.....	6
Gambar 1.3 <i>Losses-losses</i> dari Ideal voltage.....	9
Gambar 1.4 Himpunan fuzzy.....	11
Gambar 1.5 Elemen-elemen fungsi keanggotaan.....	12
Gambar 1.6 Himpunan berdasarkan keanggotaan.....	13
Gambar 1.7 Keanggotaan-keanggotaan.....	14
Gambar 1.8 Keanggotaan Triangular.....	15
Gambar 1.9 Keanggotaan Inference clipping.....	15
Gambar 2.0 Keanggotaan Inference scaling.....	15
Gambar 2.1 Keanggotaan Combining.....	16
Gambar 2.2 Max Membership.....	16
Gambar 2.3 Centroid .....	17
Gambar 2.4 Weighted average.....	18
Gambar 2.5 Sistem Kendali Fuzzy.....	18
Gambar 2.6 Ilustrasi Aliran Gas.....	20
Gambar 2.7 Hasil Simulasi Model Dinamik Fuel Cell.....	24
Gambar 2.8 Fuzzifikasi Fuzzy.....	25
Gambar 2.9 Defuzzifikasi Fuzzy weighted area method.....	28
Gambar 3.0 Algoritma Fuzzy.....	29
Gambar 3.1 Blok Diagram <i>Fuzzy Logic Controller</i> dengan <i>Gain</i> .....	32
Gambar 3.2 Blok Diagram <i>Fuzzy Logic Controller</i> dengan <i>Flow Differenc</i> ..	33
Gambar 3.3 Tegangan output hasil simulasi H dan O <i>Gain</i> .....	34
Gambar 3.4 Sinyal Kendali hasil simulasi H dan O <i>Gain</i> .....	34
Gambar3.5 Gambar grafik perbandingan konfigurasi dengan <i>overshoot</i> hasil simulasi H dan O <i>gain</i> .....	35
Gambar3.6. Gambar grafik perbandingan konfigurasi dengan <i>settling time</i> hasil simulasi H dan O <i>gain</i> .....	35
Gambar3.7. Gambar tegangan output hasil simulasi H dan O <i>difference</i> ...	36
Gambar3.8. Gambar sinyal kendali hydrogen hasil simulasi H dan O <i>difference</i> .....	37
Gambar3.9. Gambar sinyal kendali oksigen hasil simulasi H dan O <i>difference</i> .....	37
Gambar4.0. Gambar grafik perbandingan konfigurasi dengan <i>overshoot</i> hasil simulasi H dan O <i>difference</i> .....	38
Gambar4.1. Gambar grafik perbandingan konfigurasi dengan <i>settling time</i> hasil simulasi H dan O <i>difference</i> .....	38
Gambar4.2. Gambar respons fuzzy.....	39
Gambar4.3. Gambar efek beban.....	42
Gambar4.4. Gambar grafik perbandingan delta <i>flow</i> dengan <i>overshoot</i> .....	43
Gambar4.5. Gambar grafik perbandingan delta <i>flow</i> dengan <i>settling time</i> ..	44
Gambar4.6. Gambar simulasi hasil tegangan output dengan delta pressure 0.1.....	44

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.1</b> Perbandingan ukuran dan efisiensi sistem pembangkitan energi.....	8
<b>Tabel 1.2</b> Perbandingan Jenis Fuel Cell.....	8
<b>Tabel 1.3</b> Parameter-parameter yang digunakan untuk simulasi PEMFC.....	23
<b>Tabel 1.4.</b> Tabel Konfigurasi Simulasi Hidrogen dan Oksigen dengan <i>Gain</i> .....	25
<b>Tabel 1.5.</b> Tabel Konfigurasi untuk Simulasi H dan O dengan <i>Flow Difference</i> .....	26
<b>Tabel 1.6</b> Aturan-aturan Fuzzy.....	27
<b>Tabel 1.7</b> Aturan-aturan Fuzzy.....	30
<b>Tabel 1.8.</b> Tabel Pembobotan Konfigurasi yang digunakan pada simulasi H dan O <i>Gain</i> .....	40
<b>Tabel 1.9.</b> Tabel Pembobotan Konfigurasi yang digunakan pada simulasi H dan O <i>Difference</i> .....	40
<b>Tabel 2.0.</b> Konfigurasi Terbaik.....	41

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A GAMBAR SIMULINK 1 <i>FUZZY LOGIC CONTROLLER</i> DENGAN <i>GAIN</i> .....	46
Lampiran B GAMBAR SIMULINK 1 <i>FUZZY LOGIC CONTROLLER</i> DENGAN <i>FLOWDIFFERENCE</i> .....	47
Lampiran C DATA SIMULASI.....	48

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Energi merupakan bagian terpenting dari hidup manusia dan kebutuhana akan hal tersebut semakin meningkat seiring berjalannya waktu, akan tetapi energi yang berbasis minyak fosil semakin lama semakin menipis. Dengan semakin menipisnya sumber energi yang berbasis minyak fosil, serta dampak polusi akibat penggunaan minyak fosil yang sangat memprihatinkan, maka riset dan industri di bidang sumber energi baru dan terbarukan merupakan prioritas utama bagi dunia saat ini. Dalam proses mencari energi baru dan terbarukan ini telah muncul beberapa alternatif, misalnya: energi nuklir, energi angin, energi aliran air, bio-fuell, fuel-cell dan sel surya. Masing-masing alternatif memiliki keunggulan dan kelemahan terhadap yang lain. Namun tujuan utama dari berbagai alternatif tersebut adalah untuk mendapatkan sumber energi baru dan terbarukan yang memiliki efek polusi serendah mungkin.

Pada skripsi ini yang akan dibahas adalah Fuel cell, yaitu suatu perangkat yang mengubah energi kimia ke bentuk energi listrik dimana setiap Fuel cell terdiri dari sebuah fuel elektroda (anoda) dan sebuah oksidan elektroda (katoda), yang dipisahkan oleh sebuah elektrolit penghubung ion. Gas hidrogen yang masuk diionisasikan untuk membentuk ion hidrogen dan elektron pada anoda. Elektrolit hanya akan menghubungkan ion-ion. Sedangkan elektron akan mengalir dari anode melalui rangkaian eksternal. Atom oksigen pada katoda bereaksi dengan elektron dari rangkaian eksternal dan membentuk air ( $H_2O$ ).

Dan seperti yang kita ketahui, Pengendali Fuzzy saat ini telah banyak digunakan di bidang industri ataupun alat-alat elektronik, seperti mesin cuci. Hal ini karena pengendali fuzzy menggunakan variabel linguistic yang mudah dimengerti oleh pola pikir manusia. Pengendali fuzzy sendiri sangat banyak ditemui di Negara maju seperti Jepang atau Amerika Serikat dimana salah satu aplikasi logika fuzzy yang dapat digunakan adalah mengendalikan tegangan dari

fuel cell dimana bertujuan agar menjadi lebih efisien dan optimal.

Pada skripsi ini juga diterapkan pengendali fuzzy menggunakan blok s-function pada SIMULINK MATLAB R2007b dan pemrograman dilakukan dengan menggunakan bahasa C-MEX untuk blok yang digunakan

## 1.2 TUJUAN

Skripsi ini merupakan suatu riset yang dilakukan untuk mengaplikasikan dan menganalisa teori algoritma logika *Fuzzy* yang diterapkan pada pengendalian fuel cell. Tujuan dari skripsi ini adalah:

- Merancang algoritma *Logika Fuzzy* untuk Fuel cell.
- Mengimplementasikan algoritma *Logika Fuzzy* pada pengendalian sistem *Fuel Cell*.
- Menganalisa dampak perubahan parameter *Logika Fuzzy* terhadap hasil pengendalian.

## 1.3 BATASAN MASALAH

Skripsi ini menjelaskan mengenai fuel cell dan cara kerjanya serta penggunaan logika fuzzy sebagai kendali dari fuel cell tersebut. Aplikasi pengendalian fuzzy disimulasikan menggunakan SIMULINK MATLAB R2007b dan akan dibandingkan simulasi pengendalian Fuel Cell dengan menggunakan ratio *gain* Hidrogen dan Oksigen dengan pengendalian Fuel Cell dengan menggunakan perbedaan tekanan antara Hidrogen dan Oksigen terhadap variasi beban dan variasi konfigurasi kontroller.

## 1.4 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan skripsi ini dibagi menjadi 5 bab. Bab 1 merupakan pendahuluan yang memuat latar belakang, batasan masalah dan sistematika penulisan. Bab 2 berisi dasar teori mengenai Fuel Cell dan Logika Fuzzy serta pengendalian dengan logika fuzzy. Bab 3 berisi mengenai perancangan dan pembuatan logika fuzzy untuk pengendalian fuel cell. Bab 4 berisi simulasi dan analisa dari pengendalian logika fuzzy pada fuel cell dan yang terakhir berupa kesimpulan.

## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 FUEL CELL

##### 2.1.1 Perkembangan Fuel Cell

Teknologi ini ditemukan oleh Sir William Grove pada tahun 1839, seorang penemu berkebangsaan wales. Grove menemukan proses elektrolisis yang memisahkan air dengan listrik dapat di balik menghasilkan listrik dengan katalis tertentu. Kemudian, Francis Bacon (1904-1992), pria lulusan Cambridge University dan berkebangsaan Inggris meneruskan penelitian Fuel Cell. Bacon yang memulai penelitiannya sejak tahun 1930, menemukan fuel cell yang menggunakan elektrolit basa (KOH), yang kemudian disebut alkaline fuel cell (fuel cell tipe basa). Berselang setelah ditemukan alkaline fuel cell, di tahun 1950-an, Perusahaan Amerika, General Electric (GE), berhasil mengembangkan fuel cell tipe baru, dengan polimer membran sebagai elektrolitnya, yang kemudian disebut PEMFC. PEMFC yang ditemukan oleh GE memiliki keunggulan pada design, lebih *compact*, bila dibandingkan fuel cell yang ditemukan oleh F Bacon saat itu.

Fuel Cell mulai mendapat perhatian, ketika NASA mulai menggunakan fuel cell buatan GE sebagai sumber energi pada komputer dan alat komunikasinya pada tahun 1965. Ketika Neil Armstrong, dkk, sebagai manusia pertama yang berhasil menginjakkan kaki di bulan pada tahun 1969, pada pesawat Apollo 11 yang digunakan telah terpasang fuel cell didalamnya. Fuel cell yang digunakan saat itu adalah alkaline fuel cell, yang dayanya lebih besar dibanding buatan GE. Fuel cell tersebut digunakan pada *space shuttle* sebagai sumber listrik di dalam pesawat dan sumber air minum hingga saat ini.

Fuel cell merupakan perangkat elektrokimia yang terus menerus mengubah energi kimia ke bentuk energi listrik. Fuel Cell sendiri terbagi berdasarkan teknologi yang digunakan proton membrane fuel cells, alkaline Fuel cell, phosphoric fuel cell, molten carbonate fuel cell dan solid oxide fuel cell. Namun, penggunaan PEMFC lebih populer dibanding yang lainnya disebabkan PEMFCs beroperasi pada temperatur rendah (dibawah 90 °C), densitas tenaga



besar, dan mudah menangani cairan fuelnya. Fuel cell juga menghasilkan air dan panas di samping energi listrik

Fuel Cell memiliki beberapa keunggulan lain yaitu :

1. Mempunyai kemampuan untuk mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan lebih sempurna (efisiensi tinggi, panas buangan dapat digunakan kembali).
2. Ramah lingkungan .Fuel cell beroperasi dengan emisi rendah, tanpa bising dan hasil buangan yang tidak berbahaya (air dan panas).
3. Fuel cell dapat ditempatkan diberbagai lokasi sesuai kebutuhan, ukurannya fleksibel.

Namun, fuel cell juga memiliki beberapa kekurangan, diantaranya;

1. Harga pasaran yang relative masih tinggi
2. Hidrogen yang akan digunakan sebagai bahan bakar tidak tersedia dengan mudah

### 2.1.2. Komponen utama sistem fuel cell

Fuel cell terdiri dari sebuah fuel elektroda (anoda) dan sebuah oksidan elektroda (katoda), yang dipisahkan oleh sebuah elektrolit penghubung ion. Gas hidrogen yang masuk diionisasikan untuk membentuk ion hidrogen dan elektron pada anoda. Elektrolit hanya akan menghubungkan ion-ion. Sedangkan elektron akan mengalir dari anode melalui rangkaian eksternal. Atom oksigen pada katoda bereaksi dengan elektron dari rangkaian eksternal dan membentuk air (H<sub>2</sub>O).

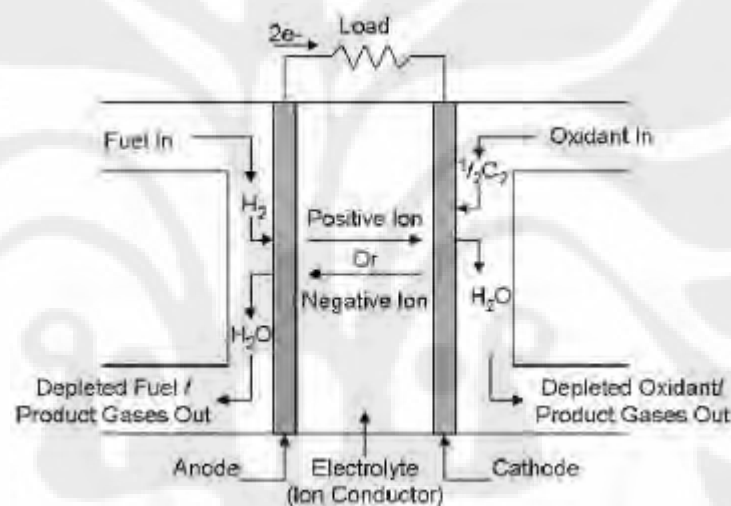
Tiap unit sistem fuel cell terdiri atas 4 komponen utama, yaitu:

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

eksternal kembali kea dalam fuel cell yang akhirnya menghasilkan air dan panas.

3. **Elektrolit** yaitu bahan yang berfungsi sebagai penghantar yang mengalirkan ion yang berasal dari bahan bakar di anoda menuju katoda.
4. **Katalis** yaitu material atau bahan khusus untuk mempercepat reaksi kimiawi atau reduksi-oksidasi.

Untuk mampu menghasilkan tegangan yang tinggi/yang diinginkan maka sel tersebut dihubungkan secara seri. Kumpulan dari banyak sel tunggal ini disebut *stack*. Untuk membuat *stack*, selain dibutuhkan sel tunggal, juga diperlukan sel separator.



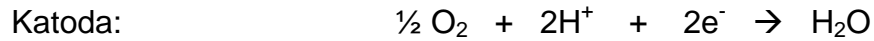
Gambar 1.1. Struktur umum fuel cell

### 2.1.3. Prinsip kerja fuel cell

Saat elektroda dihubungkan dengan beban dari luar, maka proses yang terjadi adalah sebagai berikut; Hidrogen (H<sub>2</sub>) yang menyentuh permukaan anoda akan bereaksi secara kimiawi (reduksi), menghasilkan ion hidrogen (H<sup>+</sup>) dan ion elektron (e<sup>-</sup>). Sedangkan pada katoda terjadi reaksi oksidasi, menghasilkan air. Ion hidrogen (H<sup>+</sup>) akan bergerak dari permukaan anoda menuju katoda melalui elektrolit dan ion elektron (e<sup>-</sup>) bergerak ke beban lalu menuju katoda.

Proses kimia yang terjadi dalam fuel cell dapat dirumuskan dalam persamaan kimia sebagai berikut.

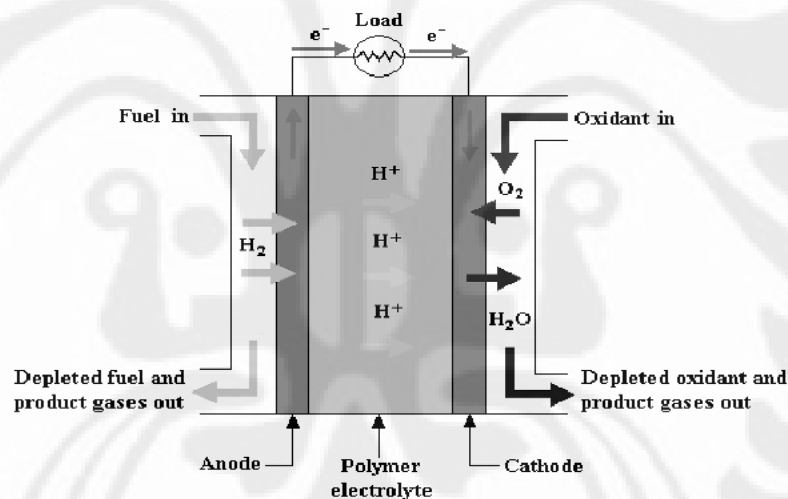




Pemisahan molekul hidrogen menggunakan katalis yaitu platina. Akan tetapi pemisahan molekul oksigen yang lebih kuat lebih susah sehingga menyebabkan adanya energi yang hilang.

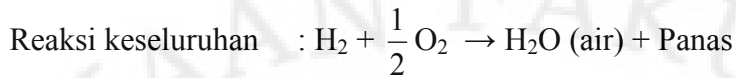
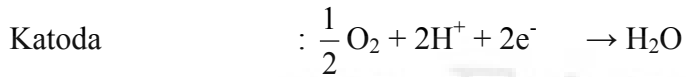
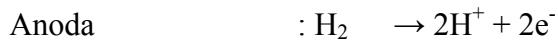
#### 2.1.4. Karakteristik PEMFC

Proton Exchange Membrane Fuel Cell mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik melalui proses reaksi elektrokimia. Bagian penting dari PEMFC adalah membrane electrode assembly(MEA) yang terdiri dari polymer elektrolit yang berhubungan dengan anoda dan katoda dari kedua sisi, fungsinya membran mengantarkan ion hidrogen(proton) dan memisahkan kedua gas untuk melalui bagian cell lainnya



Gambar 1.2. Struktur umum PEM fuel cell

Dari gambar terlihat ada 2 bagian masukan yaitu fuel(hidrogen) dan oksigen(oxidant), pada bagian anoda hidrogen di pisah menjadi proton yang melalui PEM menuju katoda dimana elektron yang dihasilkan melalui rangkaian eksternal/beban menuju katoda menghasilkan arus listrik. Di katoda, elektron bergabung kembali dengan proton dan bersama dengan molekul oksigen membentuk air murni hasil reaksi yang mengalir keluar fuel cell. Proses pemisahan molekul hidrogen umumnya menggunakan katalisis platina. Lalu untuk mengurangi rugi akibar resistansi dari membrane maka membrane dibuat tipis sekitar 50mikrometer. Berikut reaksi kimianya:



Reaksi ini akan terus berlangsung (kontinyu) untuk menghasilkan energi listrik selama suplai hidrogen ada. Karena bahan bakar yang digunakan adalah hidrogen murni, maka dibutuhkan alat untuk mengkonversi gas alam atau metanol menjadi hidrogen. Alat ini disebut Reformer. Metanol dapat menghasilkan hidrogen yang lebih baik dan gas CO yang rendah (gas CO beracun dan dapat mengurangi kinerja dan merusak fuel cell).

Seperti yang dijelaskan dibagian sebelumnya 1 buah PEM fuel cell hanya menghasilkan tegangan dibawah 1V sekitar 0.7V dan arus  $1\text{A}/\text{cm}^2$ , sehingga untuk memperoleh tegangan yang lebih besar dibutuhkan stack atau gabungan dari fuel cell yang dapat dipasang secara seri/paralel.

Kelebihan PEMFC adalah suhu operasionalnya yang rendah ( $80\text{-}100^\circ\text{C}$ ), yang berarti waktu untuk menghasilkan energi dapat dilakukan dengan cepat, paling cocok digunakan untuk peralatan elektronik serta pembangkit listrik skala kecil seperti perumahan dan gedung. Akan tetapi PEMFC mempunyai keterbatasan karena suhu operasionalnya rendah, tidak dapat membuat reformer internal (di dalam) PEMFC, sehingga dibutuhkan reformer eksternal. Selain itu sulit untuk dikombinasikan dengan pembangkit jenis lain yang bekerja pada suhu dan tekanan yang tinggi, hal ini juga menyebabkan pada saat start-up proses yang terjadi terkadang mati akibat fuel cell memiliki reaksi yang lambat atau transient yang lambat sehingga dibutuhkan katalis yaitu platina atau menaikkan temperature kerja. Hal ini disebabkan pada anoda walaupun hidrogen bereaksi dan menghasilkan energi, energi yang dihasilkan tidak cukup untuk melakukan aktivasi. Jadi apabila jika suatu molekul mempunyai energi yang rendah maka reaksi yang terjadi akan lambat kecuali pada temperatur tinggi.

PEMFC bekerja pada temperatur rendah karena adanya penggunaan membran yang bekerja dengan menarik air dalam bentuk liquid sehingga tidak boleh mengalami kekeringan, keadaan ini berdasarkan reaksi kimia pada

membran sehingga jika adanya air menyebabkan  $H^+$  bergerak bebas dan tidak terikat dengan  $SO_3$  yang ada pada membran. PEMFC dapat bekerja pada temperatur yang normal(1-5 atm) ataupun tinggi(8atm) akan tetapi hal ini menyebabkan dibutuhkan bantuan alat kompresor yang besar. Dari segi efisiensi PEMFC mempunyai efisiensi yang tidak terlalu besar berdasarkan tabel 1.1 akibat adanya rugi-rugi daya.

Tabel 1.1. Perbandingan ukuran dan efisiensi sistem pembangkitan energi [4]

Type	Size	Efficiency(%)
Reciprocating engines	50 kW-6 MW	33-37
Micro Turbines	10 kW-300kW	20-30
Fuel Cell, PAFC	50 kW-1 MW	40
Fuel Cell, MCFC	250 kW-3 MW	47-50
Fuel Cell, SOFC	5 kW-3 MW	45-65
Fuel Cell, PEMFC	<1 kW- 1 MW	34-36

Perbandingan beberapa jenis fuel cell yang banyak digunakan saat ini ditunjukkan pada Tabel 1.2.

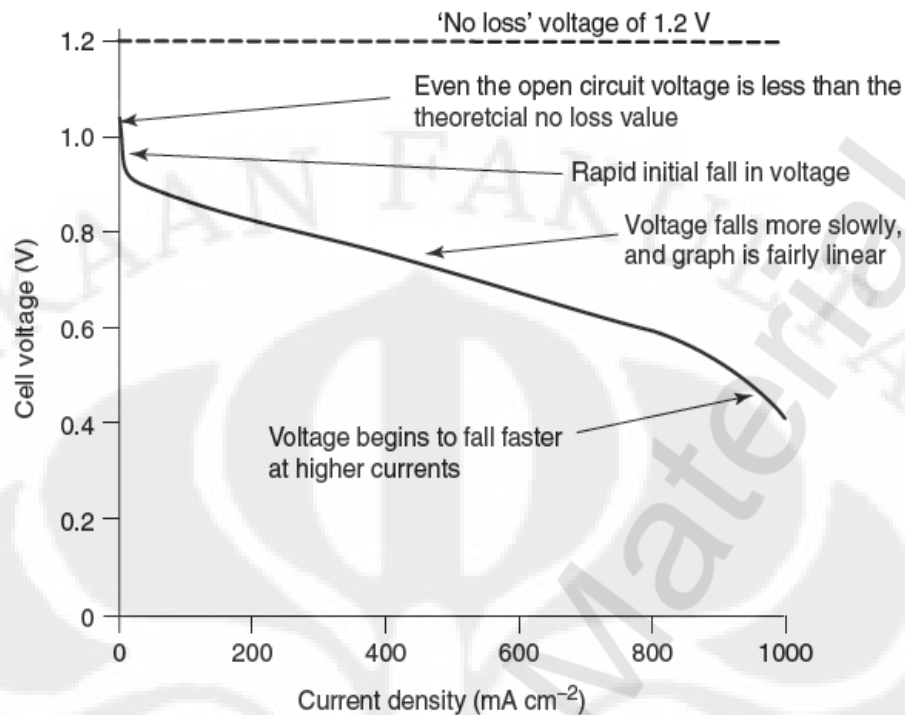
Tabel 1.2. Perbandingan Jenis Fuel Cell [4].

Fuel Cell Type	Operating Temp $^{\circ}C$	Charge Carrier	External Reformer
Proton Exchange Membrane Fuel Cell(PEMFC)	80-100	$H^+$	Yes
Phosphoric Acid Fuel Cell(PAFC)	180-205	$H^+$	Yes
Molten Carbonate Fuel Cell(MCFC)	600-700	$CO_3^{2-}$	No
Solid Oxide Fuel Cell(SOFC)	600-1000	$O^{2-}$	No

Fuel cell umumnya menghasilkan tegangan antara 0.6 V to 0.7 V pada beban penuh. Ketika fuel cell dibebani, tegangan akan turun dan arus akan naik.

Hal ini disebabkan oleh faktor berikut ini yang disebabkan irreversibility:

- Rugi aktivasi akibat reaksi kimia(untuk membentuk dan memecahkan ikatan)
- Arus internal dan fuel cell crossover, yang disebabkan oleh fuel yang terbuang setelah melalui elektrolit
- Rugi ohmik (tegangan jatuh akibat resistansi komponen dan interkoneksi)
- Rugi perpindahan massa (penurunan konsentrasi reaktan pada katalis saat beban tinggi menyebabkan penurunan tegangan yang cepat)



Gambar 1.3. *Losses-losses* dari Ideal Voltage

Pada Fuel Cell juga terdapat purging yang dilakukan secara periodik, hal ini dilakukan untuk menjaga tekanan dan kelembapan dalam fuel cell serta membuang gas- gas yang tidak berguna seperti gas yang mengandung uap air ataupun karbon yang beracun.

## 2.2 LOGIKA FUZZY

Seperti yang kita ketahui bahwa logika klasik hanya mempunyai 2 nilai yaitu benar dan salah (1 dan 0), akan tetapi hal ini kurang mendeskripsikan logika manusia sebagai contoh apabila dia mempunyai tinggi diatas 180cm maka dia tinggi, diluar itu pendek maka seseorang yang mempunyai tinggi 179,9 cm dianggap pendek. Notasi untuk logika klasik ini adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} \chi_A(x) &= 1, x \in A \\ &0, x \notin A \end{aligned} \quad (2.1)$$

Dimana  $\chi_A$  merupakan fungsi keanggotaan dari elemen  $x$  dalam himpunan  $A$ ,  $x \in A$  artinya merupakan anggota himpunan dan  $x \notin A$  bukanlah anggota himpunan  $A$ .

Oleh karena itu dikembangkan logika baru yaitu logika fuzzy yang meniru cara berpikir manusia menggunakan teori kesamaran yang ditemukan oleh Dr. Lofti Sadeh. Logika Fuzzy mencakup seluruh interval dari 0 sampai 1. Fuzzy sendiri mempunyai beberapa konsep dasar yaitu:

- 1) Keanggotaan dengan perbedaan yang sama
- 2) Menggunakan variable linguistic
- 3) Distribusi probabilitas
- 4) Fuzzy If then-rules

Logika Fuzzy menggunakan variabel linguistik sesuai dengan logika berpikir manusia dalam memandang suatu hal seperti sangat berat, cukup berat, agak berat, berat dan sebagainya sehingga Logika fuzzy sangat cocok untuk mengatasi masalah yang tidak pasti. Logika fuzzy sendiri merupakan salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mengembangkan kendali cerdas dan pengembangan informasi karena menggunakan pengetahuan dan alasan.

### 2.2.1 Himpunan Fuzzy

Himpunan Fuzzy mempunyai perbedaan dengan himpunan klasik pada umumnya dimana himpunan klasik mempunyai batasan yang jelas mengenai tingkat keanggotaannya. Sebagai contoh: Bilangan bulat ganjil lebih kecil dari 10 mempunyai anggota himpunan 5 yaitu 1,3,5,7,9. Sementara untuk logika fuzzy batas-batas tersebut samar-samar mengenai tingkat keanggotaannya. Berikut notasi himpunan fuzzy dalam semesta  $x$  yang diskrit dan tertentu:

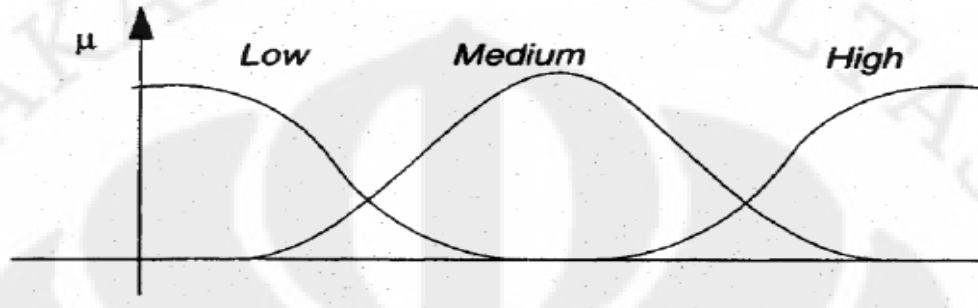
$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum_i \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \right\} \quad (2.2)$$

Dan untuk yang kontinu

$$A = \left\{ \int \frac{\mu_A(x)}{x} \right\} \quad (2.3)$$

Yang merupakan derajat keanggotaan( $\mu$ ) yang nilainya berkisar dari 0 sampai 1. Berikut salah satu contoh himpunan fuzzy sederhana pada temperatur.

**A Complete Term Set for Temperature.**



Gambar 1.4. Himpunan fuzzy

### 2.2.2 Operasi himpunan Fuzzy

Berbeda dengan himpunan klasik yang mempunyai operasi dasar sebagai berikut:

Union	$A \cup B = \{x   x \in A \text{ or } x \in B\}$
Intersection	$A \cap B = \{x   x \in A \text{ and } x \in B\}$
Complement	$\bar{A} = \{x   x \notin A, x \in X\}$
Difference	$A \setminus B = \{x   x \in A \text{ and } x \notin B\}$

Operasi logika fuzzy akan menghasilkan himpunan fuzzy yang baru dengan operasi yang berbeda:

Union	$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$
Intersection	$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$
Complement	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$

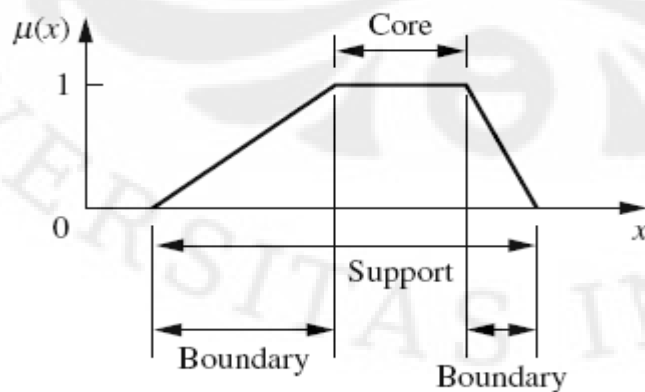
Selain itu juga masih banyak operasi lainnya yang merupakan pengembangan dari operasi dasar tersebut seperti *difference*, selain itu berdasarkan hukum Demorgan logika fuzzy mempunyai hukum yang sama dengan logika klasik kecuali hukum *law of contradiction* dan *excluded middle laws*. Berikut properti dari operasi himpunan fuzzy beserta hukum De Morgan:



Commutative Laws	$A \cup B = B \cup A$ $A \cap B = B \cap A$
Associative Laws	$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$ $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$
Distributive Laws	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
Law of Double Complementation	$\overline{\overline{A}} = A$
DeMorgan's Laws	$\overline{(A \cup B)} = \overline{A} \cap \overline{B}$ $\overline{(A \cap B)} = \overline{A} \cup \overline{B}$
Law of the Excluded Middle	$A \cup \overline{A} = U$
Law of the Contradiction	$A \cap \overline{A} = \phi$
Law of Tautology	$A \cup A = A$ $A \cap A = A$
Law of Absorption	$A \cap (A \cup B) = A$ $A \cup (A \cap B) = A$

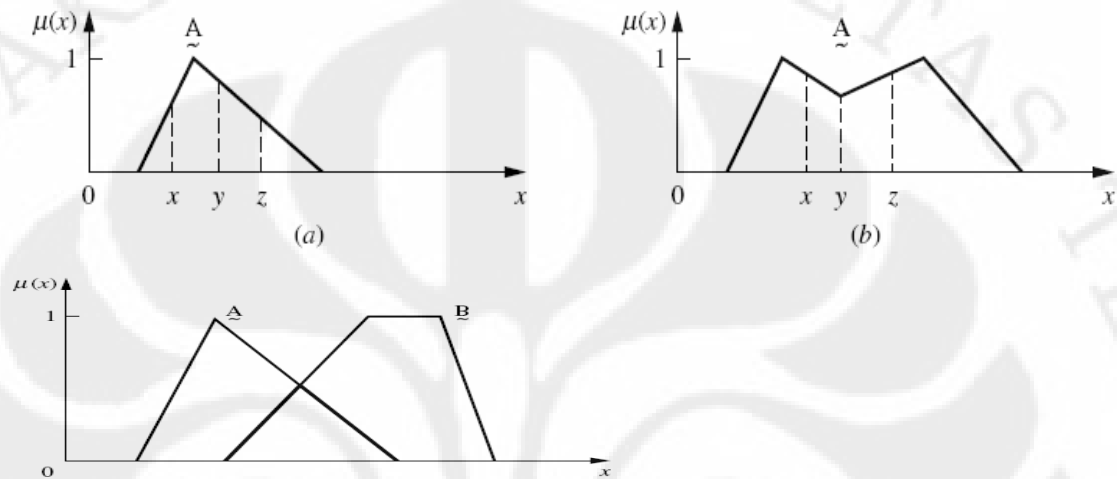
### 2.2.3 Fungsi Keanggotaan

Setiap elemen dalam semesta  $x$  yang merupakan himpunan fuzzy mempunyai derajat keanggotaan, dimana fungsi keanggotaan memetakan setiap elemen memiliki nilai derajat keanggotaan. Elemen yang memiliki nilai keanggotaan 1 disebut *core*, nilai keanggotaan 0-1 disebut *boundaries*, dan *support* nilai selain 0, *crossover point* merupakan elemen yang mempunyai nilai 0.5



Gambar 1.5. Elemen-elemen fungsi keanggotaan

Himpunan sendiri terbagi lagi berdasarkan nilai derajat keanggotaannya, jika ada yang mempunyai derajat keanggotaan 1 disebut normal, dan jika tidak ada disebut subnormal. Selain itu juga terdapat fuzzy convex yang memiliki keanggotaan dengan nilai monoton naik atau turun atau naik dan turun dimana irisan 2 himpunan fuzzy convex menghasilkan fuzzy convex



Gambar 1.6. himpunan berdasarkan keanggotaan

Berikut adalah jenis-jenis dari fungsi keanggotaan:

1. Triangular: fungsi keanggotaan berbentuk segitiga

$$\begin{aligned} \text{triangle}(x : a, b, c) &= 0, & x < a \\ & \frac{(x-a)/(b-a)}{1}, & a \leq x \leq b \\ & \frac{(c-x)/(c-b)}{1}, & b \leq x \leq c \\ & 0, & x > c \end{aligned}$$

2. Trapezoidal: fungsi keanggotaan berbentuk trapesium

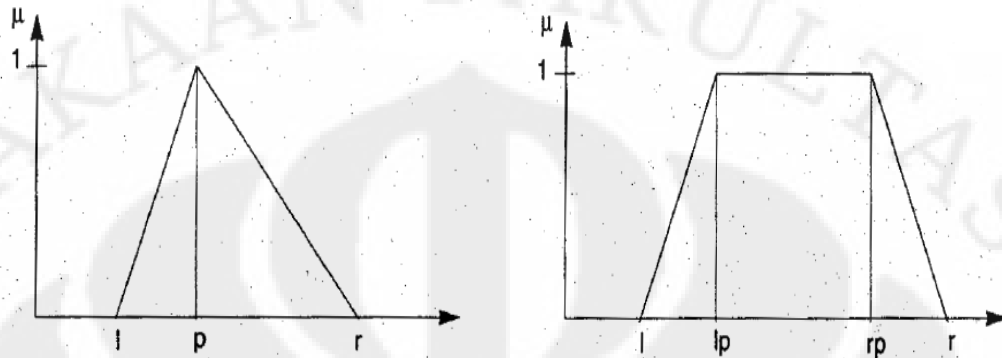
$$\begin{aligned} \text{trapezoid}(x : a, b, c, d) &= 0, & x < a \\ & \frac{(x-a)/(b-a)}{1}, & a \leq x \leq b \\ & 1, & b \leq x \leq c \\ & \frac{(c-x)/(c-b)}{1}, & c \leq x \leq d \\ & 0, & x \geq d \end{aligned} \quad (2.4)$$

3. Gaussian: fungsi keanggotaan dengan distribusi gaussian

$$\text{Gaussian}(x : m, \sigma) = \exp\left(-\frac{x-m^2}{\sigma^2}\right) \quad (2.5)$$

4. Bell-shaped: fungsi keanggotaan berbentuk bell

$$Bell(x : a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (2.6)$$



Gambar 1.7. keanggotaan-keanggotaan

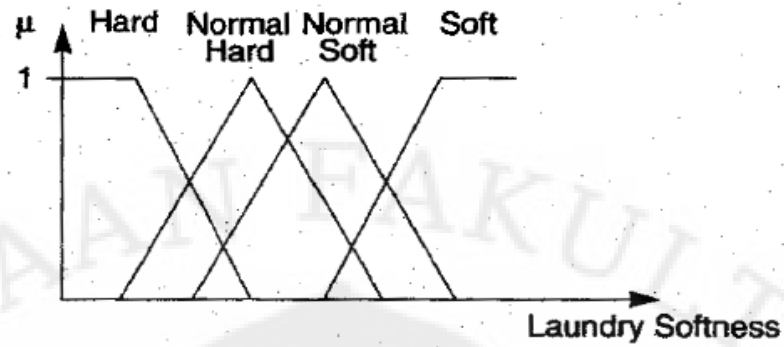
Selain keempat jenis diatas yang sering digunakan juga terdapat Sigmoidal function, S function serta  $\Pi$  function.

### 2.2.4 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan suatu proses untuk membuat suatu besaran crisp menjadi besaran fuzzy. Ada bermacam-macam metode fuzzifikasi, diantaranya:

1. Intuisi
2. Inferensi
3. *Neural Network*
4. *Genetic Algorithm*
5. *Inductive*
6. Statistik

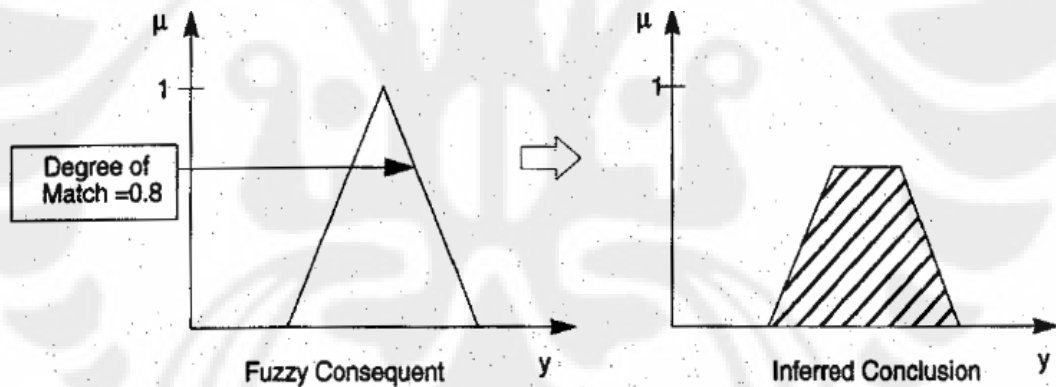
Berikut salah satu contoh proses fuzzifikasi berdasarkan pengetahuan/intuisi mengenai kekerasan laundry sehingga bila ada 1 nilai crisp yang masuk akan di transformasi menjadi besaran fuzzy berdasarkan hasil fuzzifikasi berupa derajat keanggotaan dari masing-masing variabel yang ada.



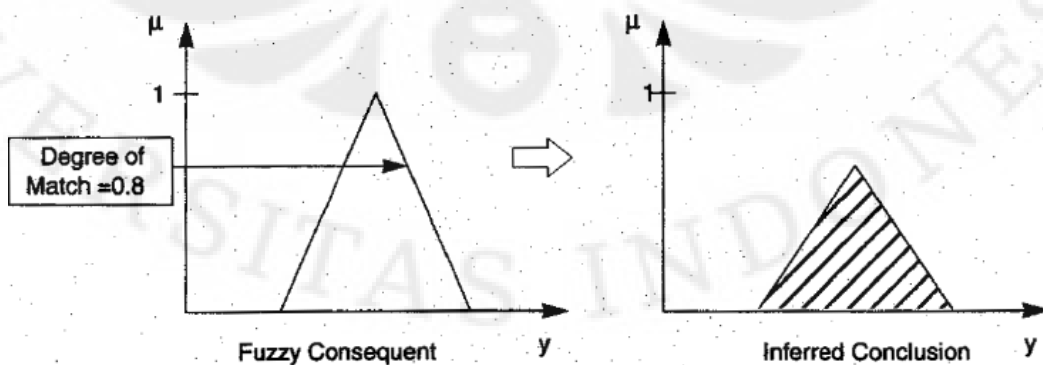
Gambar 1.8. keanggotaan triangular

### 2.2.5 Inference dan Combining

Bagian dari logika fuzzy untuk menghasilkan kesimpulan dari aturan-aturan yang ada sesuai dengan nilai derajat keanggotaannya setelah fuzzifikasi/*matching*. Inferensi ada 2 yaitu: *Clipping*/memotong dan *Scaling* sesuai nilai derajat keanggotaan.

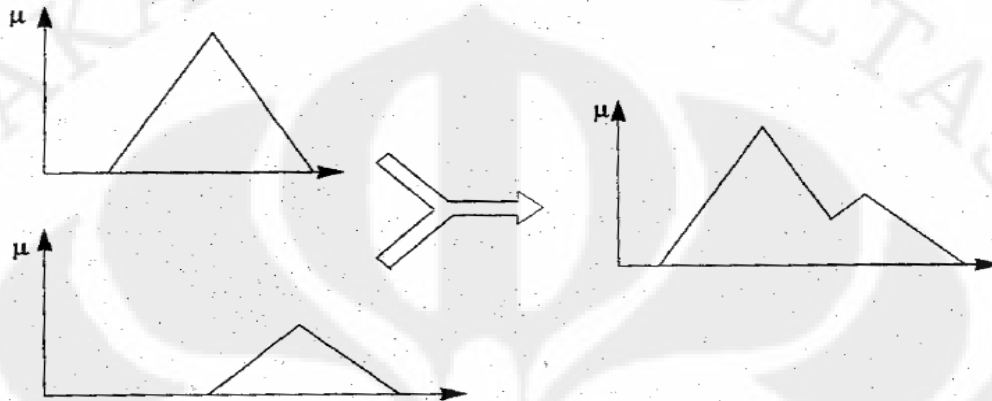


Gambar 1.9 keanggotaan inference clipping



Gambar 2.0 keanggotaan inference scaling

Setelah inferensi langkah yang berikutnya dilakukan adalah penggabungan (combining) semua conclusion fuzzy yang ada dimana penggabungan melihat nilai maksimum dari conclusion yang ada baik untuk scaling ataupun clipping.



Gambar 2.1. keanggotaan combining

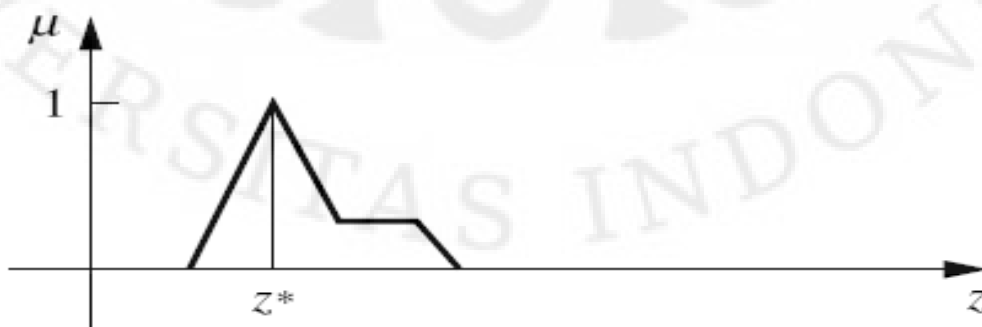
### 2.2.6 Defuzzifikasi

Proses ini merupakan kebalikan dari fuzzifikasi dimana memperoleh nilai crisp dari suatu himpunan fuzzy. Banyak metode-metode yang digunakan pada defuzzifikasi, namun yang umumnya digunakan adalah:

1. Max membership principle

Atau dikenal juga dengan nama height method, keluaran dari metode ini merupakan nilai maksimum dari nilai derajat keanggotaan pada konklusi yang ada, akan tetapi metode ini mempunyai kelemahan jika terdapat 2 atau lebih nilai maksimum yang sama. Berikut persamaan aljabarnya:

$$\mu_c(z^*) \geq \mu_c(z) \quad \text{for all } z \in Z$$

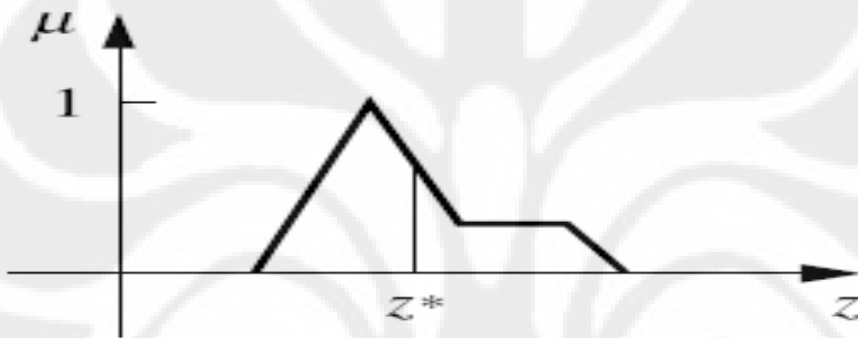


Gambar 2.2. gambar max membership

## 2. Centroid method

Metode ini dikenal dengan *center of gravity/area*, karena keluaran dari metode ini merupakan pusat gravitasi dari konklusi yang ada. Berikut persamaan aljabarnya:

$$z^* = \frac{\int \mu_c(z) \square z dz}{\int \mu_c(z) dz} \quad (2.7)$$

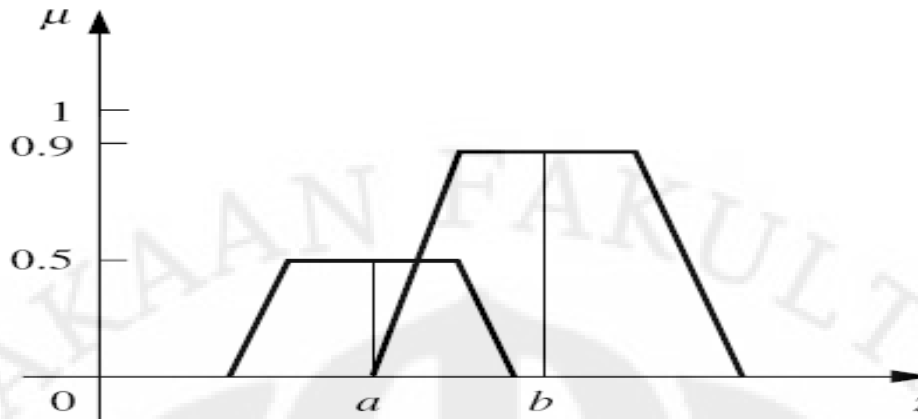


Gambar 2.3. gambar centroid

## 3. Weighted average method

Metode ini digunakan untuk mencari rata-rata dari tiap konklusi yang ada akan tetapi terbatas pada fungsi-fungsi yang simetri. Persamaan aljabarnya sebagai berikut:

$$z^* = \frac{\sum \mu_c(\bar{z}) \square \bar{z}}{\sum \mu_c(\bar{z})} \quad (2.8)$$

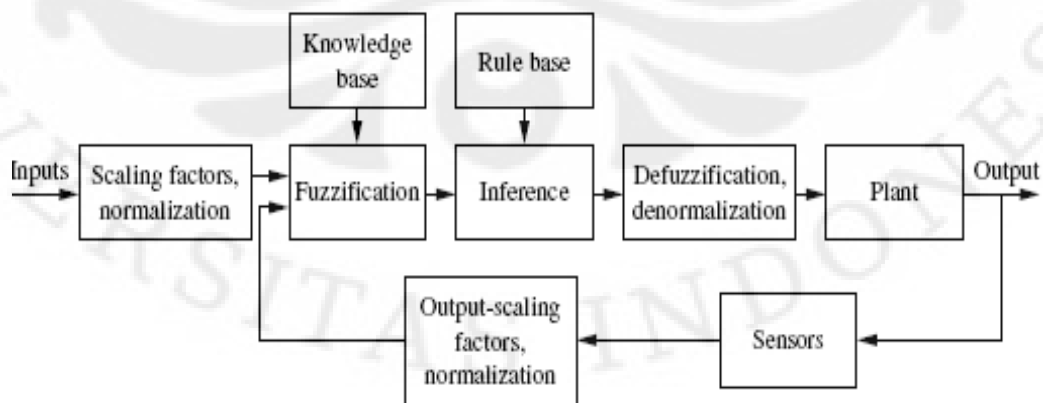


Gambar 2.4. gambar weighted average

Selain ketiga metode diatas masih terdapat metode lainnya seperti mean of max dan lainnya. Pada satu proses defuzzifikasi setiap hasil defuzzifikasi dengan metode berbeda menghasilkan output crisp yang berbeda karena menggunakan cara perhitungan dan konsep yang berbeda.

### 2.2.7 Sistem kendali fuzzy

Sistem kendali fuzzy berbeda dengan sistem kendali umumnya karena bekerja secara verbal, dimana persamaan verbal ini menggunakan if-then rules. Selain itu proses pengendalian juga melalui proses yang ada diatas fuzzifikasi, inferensi, defuzzifikasi. Di bagian fuzzifikasi seperti yang sudah dijelaskan diatas dapat ditentukan berdasarkan pengetahuan yang ada, lalu dibuat aturan-aturan untuk bagian inferensi setelah itu defuzzifikasi dan combining konklusi dari inferensi.



Gambar 2.5. gambar sistem kendali fuzzy

Basis aturan(rule base), merupakan kumpulan dari aturan-aturan kendali yang dibuat dengan format

If  $x$  is  $A_i$  and  $y$  is  $B_i$  then  $z$  is  $C_i$

Dimana  $x$  dan  $y$  merupakan inputan, dan  $z$  merupakan output dari kendali. If disebut bagian premise/condition dan then disebut bagian action/consequence.

Proses inferensi sendiri mempunyai beberapa metode yang dapat digunakan namun pada skripsi ini yang akan digunakan adalah metode Mamdani. Metode ini menggunakan proses minimum(And) pada setiap rules yang ada dan maximum(or) pada derajat keanggotaan semua konklusi yang ada untuk proses combining.



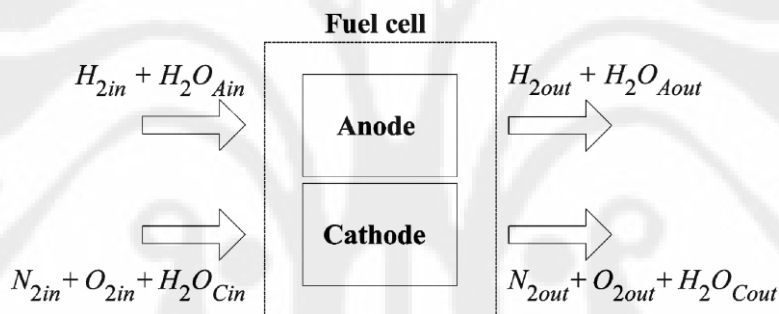
# BAB 3

## PENGENDALI FUZZY

### UNTUK FUEL CELL

#### 3.1 Model Dinamik Fuel Cell

Tekanan parsial dari hidrogen, oksigen dan air pada sisi katoda didefinisikan sebagai variabel keadaan (state variable) sistem. Pada hukum gas ideal dinyatakan bahwa tekanan parsial setiap gas adalah proporsional terhadap banyaknya gas dalam cell, yang mana dari ketiga kontribusi tersebut relevan dan tergantung dari *flow rate* masukan, konsumsi gas dan *flow rate* keluaran gas [9].



Gambar 2.6. ilustrasi aliran gas

Sehingga diperoleh persamaan keadaan yang dinyatakan dalam persamaan (3.1) :

$$\begin{aligned}
 \frac{dpH_2}{dt} &= \frac{RT}{V_A} (H_{2-in} - H_{2-used} - H_{2-out}) \\
 \frac{dpO_2}{dt} &= \frac{RT}{V_C} (O_{2-in} - O_{2-used} - O_{2-out}) \\
 \frac{dpH_2O_C}{dt} &= \frac{RT}{V_C} (H_{2O_{C-in}} + H_{2O_{C-produce}} - H_{2O_{C-out}})
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

dimana :

$H_{2-in}$ ,  $O_{2-in}$  dan  $H_2O_{C-in}$  : *flow rate* masukan hidrogen, oksigen dan air pada katoda.

$H_{2-out}$ ,  $O_{2out}$  dan  $H_2O_{C-out}$  : *flow rate* keluaran masing-masing gas.

$H_{2-used}$ ,  $O_{2used}$  dan  $H_2O_{C-produced}$  : gas-gas yang digunakan dan dihasilkan.

Pada sistem electrokimia, dinyatakan bahwa antara gas yang digunakan dan yang dihasilkan dipengaruhi arus keluaran  $I$ , dan dinyatakan dengan persamaan (3.2.):

$$H_{2-used} = 2O_{2-used} = 2K_r I = 2K_r A_c I \quad (3.2)$$

dimana :

$K_r$  :  $N/(4F)$

$A_c$  : luasan cell yang aktif

$I$  : kerapatan arus cell

Demikian juga keluaran *flow rate* didefinisikan dan dinyatakan dalam persamaan (3.3) :

$$\begin{aligned} H_{2-out} &= (Anoda_{in} - 2K_r I)F_{H_2} \\ O_{2-out} &= (Cath_{in} - K_r I)F_{O_2} \\ H_2O_{out} &= (Cath_{in} + 2K_r I)F_{H_2O_c} \end{aligned} \quad (3.3)$$

dimana :

$$Anoda_{in} = H_{2-in}$$

$$Cath_{in} = N_{2-in} + O_{2-in}$$

$F_{H_2}, F_{O_2}$  dan  $F_{H_2O}$  adalah tekanan masing-masing gas didalam fuel cell, dan dinyatakan dalam persamaan (3.4) :

$$\begin{aligned} F_{H_2} &= \frac{p_{H_2}}{P_{op}} \\ F_{O_2} &= \frac{p_{O_2}}{P_{op}} \\ F_{H_2O_c} &= \frac{p_{H_2O_c}}{P_{op}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Persamaan (3.4) dan (3.3) disubstitusi ke persamaan (3.1) maka diperoleh persamaan (3.5) yang merupakan persamaan keadaan orde-3 sebagai fungsi dari variabel keadaan dan fungsi masukan :

$$\begin{aligned}
\frac{dpH_2}{dt} &= \frac{RT}{V_A} \left( H_{2-in} - 2K_r A_c i - (Anoda_{in} - 2K_r A_c i) \frac{pH_2}{P_{op}} \right) \\
\frac{dpO_2}{dt} &= \frac{RT}{V_C} \left( O_{2-in} - 2K_r A_c i - (Cathoda_{in} - K_r A_c i) \frac{pO_2}{P_{op}} \right) \\
\frac{dpH_2O_c}{dt} &= \frac{RT}{V_C} \left( H_2O_{C-in} + 2K_r A_c i - (Cathoda_{in} + 2K_r A_c i) \frac{pH_2O_c}{P_{op}} \right)
\end{aligned} \quad (3.5)$$

Dengan menggunakan persamaan (3.5) dan mensubstitusi  $Anoda_{in}$  dan  $Katoda_{in}$  maka dapat diperoleh persamaan (3.6) seperti dibawah ini:

$$\begin{aligned}
\frac{dpH_2}{dt} &= \frac{RT}{V_A} \left( H_{2-in} - 2K_r A_c i - (H_{2-in} - 2K_r A_c i) \frac{pH_2}{P_{op}} \right) \\
\frac{dpO_2}{dt} &= \frac{RT}{V_C} \left( O_{2-in} - K_r A_c i - (O_{2-in} + H_2O_{C-in} - K_r A_c i) \frac{pO_2}{P_{op}} \right) \\
\frac{dpH_2O_c}{dt} &= \frac{RT}{V_C} \left( H_2O_{C-in} + 2K_r A_c i - (O_{2-in} + H_2O_{C-in} + 2K_r A_c i) \frac{pH_2O_c}{P_{op}} \right)
\end{aligned} \quad (3.6)$$

Dari persamaan perubahan tekanan parsial gas-gas yang digunakan, dapat dituliskan persamaan variabel keadaan dan keluaran model nonlinier sistem dinamik fuel cell PEM, yang dinyatakan dalam persamaan (3.6a) dan persamaan (3.6b) :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{RT}{V_A} \left( 1 - \frac{x_1}{P_{op}} \right) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{RT}{V_C} \left( 1 - \frac{x_2}{P_{op}} \right) \\ -\frac{RT}{V_C P_{op}} x_3 \end{bmatrix} u_2 + \begin{bmatrix} \frac{RT}{V_A} \left( -2K_r A_c \left( 1 - \frac{x_1}{P_{op}} \right) \right) \\ \frac{RT}{V_C} \left( -K_r A_c \left( 1 - \frac{x_2}{P_{op}} \right) \right) \\ \frac{RT}{V_C} \left( 2K_r A_c \left( 1 - \frac{x_3}{P_{op}} \right) \right) \end{bmatrix} u_3 \quad (3.6a)$$

$$y = V = N \left( E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left\{ \frac{pH_2 (pO_2 / P_{std})^{0.5}}{pH_2O} \right\} \right) - L \quad (3.6b)$$

dimana :

$$x = \begin{bmatrix} pH_2 & pO_2 & pH_2O_c \end{bmatrix}^T$$

$$u = \begin{bmatrix} H_{2-in} & O_{2-in} & i \end{bmatrix}^T$$

$$y = V$$

Model matematis non linier dari fuel-cell yang telah diuraikan dan dinyatakan dalam persamaan (3.6a dan 3.6b) disimulasikan, yang merupakan model non-linear, untuk menggambarkan karakteristik fuel-cell yang sebenarnya.

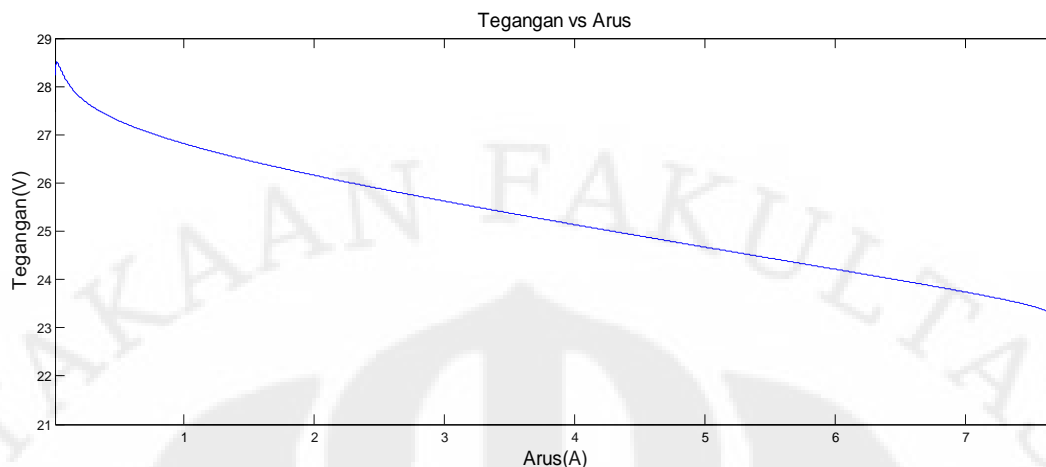
Pada model yang ideal, tegangan keluaran dari sebuah Fuel-Cell adalah konstan dengan meningkatnya arus. Pada kenyataannya hal ini tidak dapat dicapai, tegangan akan cenderung menurun dengan meningkatnya kerapatan arus ( $i$ ). Hal ini disebabkan meningkatnya *losses* dalam cell dengan meningkatnya arus.

Karakteristik PEMFC akan disimulasikan dengan menggunakan Simulink dan parameter yang digunakan dalam model matematik dari PEM Fuel-Cell ditunjukkan pada Tabel 1.3 berikut ini.

Tabel 1.3. Parameter-parameter yang digunakan untuk simulasi PEMFC[9,10].

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Konstanta gas	R	8,3144	J/mole*k
Konstanta Faraday	F	96.439	C/mole
Tekanan Kerja	Pop atau Pstd	100000	Pa
Luas aktif Cell	Ac	136,7	cm <sup>2</sup>
Volume Anoda	Va	6,495	cm <sup>2</sup>
Volume Katoda	Vc	12,96	cm <sup>2</sup>
Banyaknya Cell	N	35	
Temperatur kerja	T	353	K
Tegangan tanpa beban	Enol	0.8	V
Rasio Aliran Hidrogen-Oksigen		1,1168	
Kerapatan Arus aktivasi	Io	1.4e-5	A
Kerapatan Arus konsentrasi	Ii	7.7	A
Konstanta Aktivasi	A	0.16	V
Konstanta Konsentrasi	B	0.063	V
Rloss	Rloss	0.34	ohm

Berikut Hasil Simulasi model karakteristik fuel cell dengan inputan sebesar 0.2 untuk aliran Hidrogen dan arus meningkat dari 0-1A

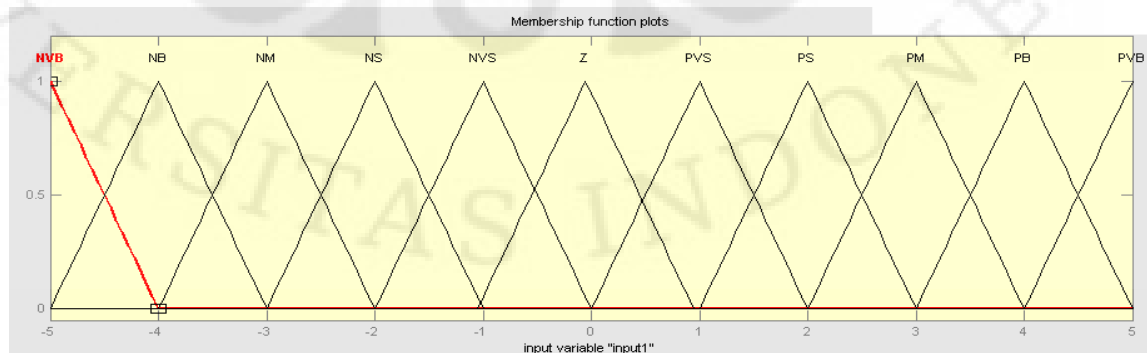


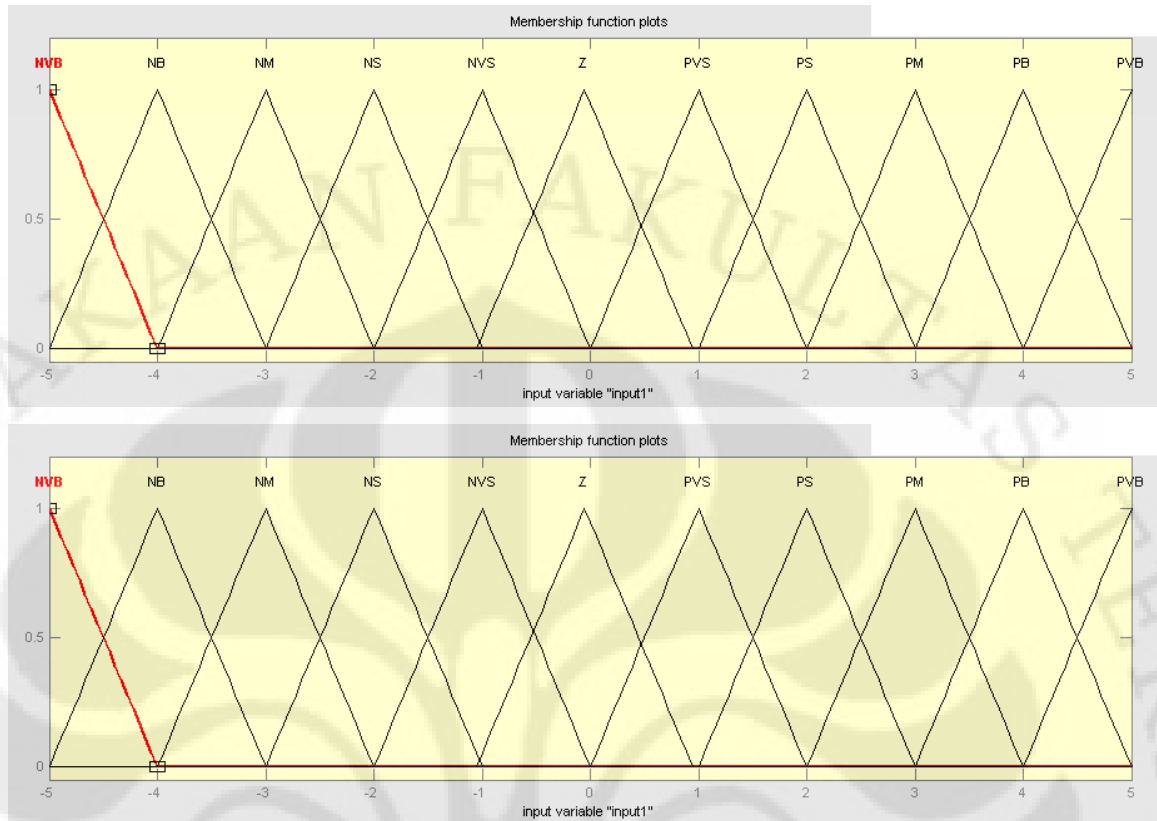
Gambar 2.7. Hasil simulasi model dinamik Fuel Cell

Dapat terlihat dari hasil simulasi tegangan awal dimulai sekitar 27 volt, hal ini disebabkan adanya rugi-rugi aktivasi, dan kemudian turun terus secara linear akibat adanya rugi-rugi ohmik dan terakhir adanya pengaruh rugi konsentrasi di bagian ujung grafik. Model ini sudah sesuai dengan sifat karakteristik asli dari Fuel Cell.

### 3.2 Fuzzifikasi masukan dan keluaran

Sebelum masuk ke dalam pengendali fuzzy diperlukan suatu *gain* agar nilai *error* dan *change of error* masuk ke dalam batas fuzzifikasi yang sudah dibuat, *gain* ini ada di simulasi simulink. Fungsi keanggotaan yang digunakan untuk masukan dan keluaran adalah fungsi segitiga yang sama kaki dimana terdapat 7 region yaitu: NVB(negative very big), NB(negative big), NM(negative medium), NS(negative small), Z(zero), PS(positive small), PM(positive medium), PB(positive big), PVB(Positive Very Big). Berikut representasi untuk input dan output.





Gambar 2.8. gambar fuzzifikasi fuzzy

Pada skripsi ini akan dilakukan variasi nilai fuzzy untuk sistem 1 pengendali dan sistem 2 pengendali. Berikut konfigurasi untuk sistem 1 pengendali(konfigurasi A):

Tabel 1.4. Tabel Konfigurasi Simulasi Hidrogen dan Oksigen dengan Gain

Konfigurasi	fuzzifikasi					
	Masukan	PVB	PB	PM	PS	PVS
A1	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
	ce	0.01	0.005	0.001	0.0005	0.0001
A2	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
	ce	0.01	0.005	0.001	0.00005	0.00001
A3	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
	ce	0.001	0.0005	0.0001	0.000005	0.000001
A4	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
	ce	0.01	0.005	0.001	0.0002	0.0001
A5	e	1	0.5	0.1	0.05	0.001
	ce	0.01	0.005	0.001	0.0001	0.00005
A6	e	1	0.5	0.1	0.05	0.001
	ce	0.01	0.005	0.001	0.0002	0.0001

Penentuan nilai fuzzy pada konfigurasi A1 sampai A6 ditentukan dari karakteristik tegangan yang dikeluarkan fuel cell pada saat pra-eksperimen menggunakan pengendali PI. Hasil tegangan keluaran dari sistem diambil nilai

error dan change of error maksimum yang mungkin terjadi. Untuk sistem dengan 2 pengendali juga dilakukan variasi nilai fuzzy untuk FLC1 dan FLC2. Konfigurasi pada sistem 2 FLC(konfigurasi B) dapat dilihat pada tabel

Tabel 1.5. Tabel Konfigurasi Simulasi Hidrogen dan Oksigen dengan *selisih flow*

Konfigurasi	fuzzifikasi Masukan		PVB	PB	PM	PS	PVS
B1	FLC1	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.01	0.005	0.001	0.0005	0.0001
	FLC2	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001
B2	FLC1	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.01	0.005	0.001	0.00005	0.00001
	FLC2	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001
B3	FLC1	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.001	0.0005	0.0001	0.000005	0.000001
	FLC2	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001
B4	FLC1	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.01	0.005	0.001	0.0002	0.0001
	FLC2	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001
B5	FLC1	e	1	0.5	0.1	0.05	0.001
		ce	0.01	0.005	0.001	0.0001	0.00005
	FLC2	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001
B6	FLC1	e	1	0.5	0.1	0.05	0.001
		ce	0.01	0.005	0.001	0.0002	0.0001
	FLC2	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001

Penentuan nilai fuzzy untuk konfigurasi B hampir sama dengan konfigurasi A untuk FLC1, akan tetapi untuk FLC2 nilai fuzzy diambil dari percobaan konfigurasi A yang menggunakan gain sebagai perbandingan proporsional masukan untuk fuel cell. Nilai error dan change of error yang mungkin terjadi dari selisih flow diambil sebagai variasi B1 sampai B6. Pada bagian 4 akan dilakukan pembobotan nilai untuk konfigurasi A1 sampai B6. Nilai variable error dan change of error ini berpengaruh pada transient response dan steady state error yang terjadi.

### 3.3 Aturan-aturan fuzzy

Aturan-aturan yang digunakan berdasarkan If-Then Rules, berikut tabel rules yang digunakan:

Tabel 1.6. tabel aturan-aturan fuzzy

e\de	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB
NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z
NB	NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS
NM	NVB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS
NS	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM
NVS	NVB	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB
Z	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB
PVS	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB
PS	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB
PM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB	PVB
PB	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB
PVB	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB

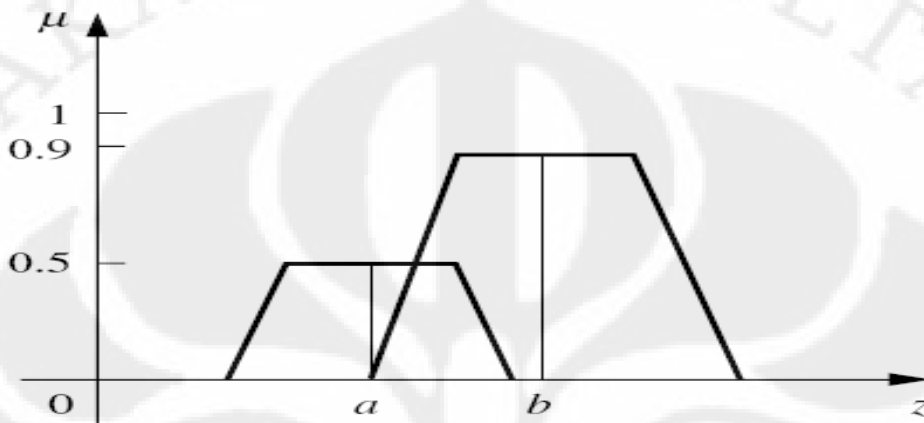
Dimana inputnya berupa *error* dari tegangan keluaran fuel cell dengan referensi, dan *change of error* atau besar perubahan *error* yang terjadi setiap waktunya. Jadi sebagai contoh jika *error* NB(Negative big) dan *change of error* NB(Negative big) maka dibutuhkan sinyal kendali NB(Negative very big), hal ini mengartikan bahwa sinyal output melebihi batas referensi dan masih terus naik keatas sehingga dibutuhkan sinyal untuk menurunkannya menuju referensi. Rules ini berdasarkan metode inferensi mamdani(max-min method).

### 3.4 Defuzzifikasi keluaran

Untuk Defuzzifikasi output metode yang digunakan adalah metode weighted area method. Metode ini digunakan untuk mencari rata-rata dari tiap konklusi yang ada akan tetapi terbatas pada fungsi-fungsi yang simetri. Persamaan aljabarnya sebagai berikut:



$$z^* = \frac{\sum \mu_c(\bar{z}) \bar{z}}{\sum \mu_c(\bar{z})} \quad (3.7)$$



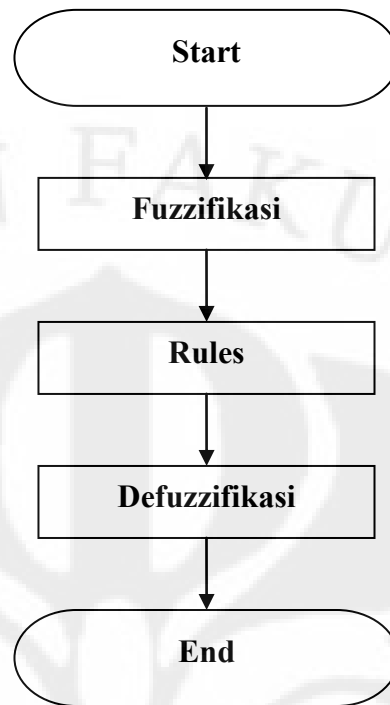
Gambar 2.9. gambar defuzzifikasi weighted area method

Selain ketiga metode diatas masih terdapat metode lainnya seperti mean of max dan lainnya. Pada satu proses defuzzifikasi setiap hasil defuzzifikasi dengan metode berbeda menghasilkan output crisp yang berbeda karena menggunakan cara perhitungan dan konsep yang berbeda.

### 3.5 Pengendali fuzzy menggunakan S-function

Pengendali fuzzy dapat diterapkan di berbagai aplikasi termasuk *microcontroller* dan computer, tetapi untuk melakukannya diperlukan suatu bahasa pemrograman. Untuk penggunaan dalam aplikasi ini digunakan bahasa C-MEX yang merupakan bahasa C yang digunakan pada matlab. Pemograman ini bertujuan menghasilkan pengendali fuzzy dalam bentuk blok s-function yang nantinya dapat digunakan dalam simulasi simulink pada Matlab

Pada pemograman ini fungsi keanggotaan yang digunakan sama dengan di bagian sebelumnya begitu juga dengan aturan-aturan dan metode defuzzifikasi yang digunakan yaitu weighted area method. Berikut Diagram Alir logika fuzzy:



Gambar3.0. gambar algoritma fuzzy

Berikut algoritma di setiap bagian diagram alir:

#### 1. Fuzzifikasi

Untuk algoritma fuzzifikasi dapat menggunakan beberapa cara, seperti menggunakan persamaan garis dan kesimetrisan segitiga. Pada algoritma kali ini yang digunakan adalah keduanya. Berikut listing algoritma fuzzifikasi pada c-mex

```

//fuzzification
if(Input<0.0) {se=-1;}
if(Input>0.0) {se=1;}
if(Input>=nvs1) && (Input <=pvs1)
{c=Input *1/pvs1;
xl=0;           →nilai bawah segitiga
xh=se;         →nilai atas segitiga
b=(c-xl)*se;   →persamaan garis
a=1-b;        →a=1-b
}
  
```

Dimana  $se$  = sign of *error* yang menandakan nilai tersebut negative atau positif

$x_l$  = keanggotaan yang lebih rendah contohnya Z lebih kecil dari

PS

$a$  = nilai keanggotaan dari  $x_l$

xh= keanggotaan yang lebih tinggi  
 b = nilai keanggotaan dari xh

## 2. Aturan-aturan

Untuk aturan yang digunakan di sesuaikan dengan tabel aturan yang ada tetapi dimodifikasi dengan melihat bahwa ada 2 inputan dan dari fuzzifikasi ada 4 kemungkinan variasi aturan yang terbentuk dari nilai kualitatif yang didapat. Dan langsung membuat nilai tengah atau rata-rata dari setiap segitiga yang ada, jadi NVB=-5, NB=-4, NM=-3, NS=-2, NVS=-1, Z=0, PVS=1, PS=2, PM=3, PB=4, PVB=5, berikut listing programnya

```
z1=(x1+x11);
if (z1>5) {z1=5;}
if (z1<-5) {z1=-5;}
if (a>a1)
{mz1=a1;}
if (a1>a)
{mz1=a;}

```

Dimana  $mz1=mz2=mz3=mz4$  merupakan nilai keanggotaan output setelah aturan yang mengalami proses and(minimum) dari kedua input dan  $z1,z2,z3,z4$  merupakan nilai centroid dari setiap output yang ada. Berikut tabel kombinasi kedua inputan:

Tabel 1.7. tabel aturan fuzzy

e\de	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB
NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z
NB	NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS
NM	NVB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS
NS	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM
NVS	NVB	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB
Z	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB
PVS	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB
PS	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB
PM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB	PVB
PB	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB
PVB	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB

### 3. Defuzzifikasi

Proses Defuzzifikasi menggunakan rumus weighted area method akan tetapi dilakukan manipulasi jika terdapat output yang mempunyai besaran kualitatif sama sehingga terjadi proses or(max). Berikut listing programnya:

```
//if there is same output
if(z1=z2=z3=z4) → nilai centroid dari rules yang digunakan
{
  if(mz1>mz2)
    {mz12=mz1;}
  if(mz2>mz1)
    {mz12=mz2;} → Proses Maximum bila ada nilai yang sama
  if(mz12>mz3)
    {mz123=mz12;}
  if(mz3>mz12)
    {mz123=mz3;}
  if(mz4>mz123)
    {mz1234=mz4;}
  if(mz123>mz4)
    {mz1234=mz123;}
  z=mz1234*z1/mz1234;

  {z=(mz1*z1+mz2*z2+mz3*z3+mz4*z4)/(mz1+mz2+mz3+mz4);}
  Y[0]=z; → Proses Weighted Area Method
}
```

Dimana z= output hasil defuzzifikasi

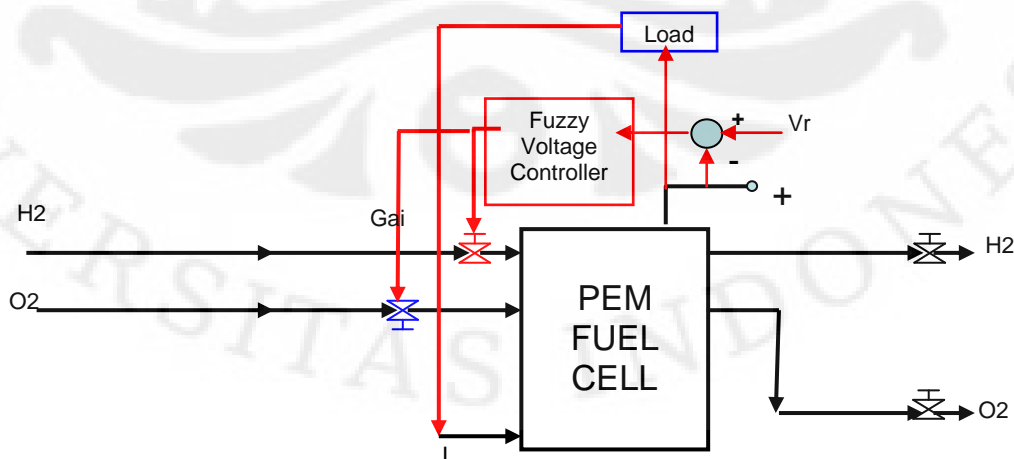
Y[0]=keluaran untuk c-mex

mz= menandakan nilai keanggotaan output setelah rules dan juga setelah mengalami proses maksimum karena adanya nilai output yang sama

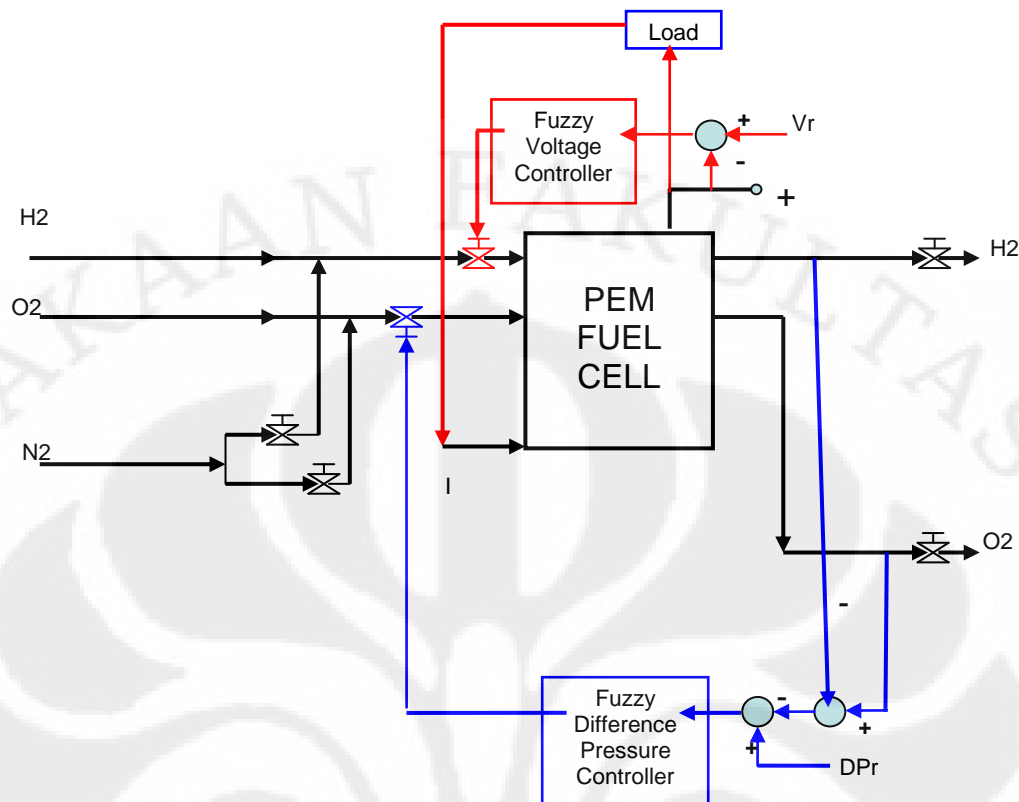
## BAB 4

### HASIL SIMULASI DAN ANALISA

Metode pengendalian dengan fuzzy disimulasikan dengan menggunakan simulink dan blok s-function. Ada 2 Simulasi Fuzzy yang digunakan dan akan dibandingkan baik dari hasil sinyal kendali dan output. Untuk simulasi pertama, fuel cell dikendalikan dengan *Fuzzy Logic Controller* dimana Hidrogen dan Oksigen menggunakan ratio atau *gain* untuk inputan dan untuk simulasi kedua akan dikendalikan dengan *Fuzzy Logic Controller Flow Difference* dimana Oksigen dikontrol berdasarkan perbedaan *flow* dengan hidrogen. Disini akan dibandingkan antara sinyal kendali dari kedua sinyal kendali dari *Fuzzy Logic Controller*. Pada simulink berikut juga terlihat ada 2 blok s-function lain yaitu PEMFC sebagai model Fuel Cell dan change untuk menghitung *change of error* dan *error* sebagai masukan FLC serta integral untuk proses integral, juga load sebagai beban.(simulasi 1 dan 2). Tujuan dari simulasi ini adalah memperoleh pengendali fuzzy yang paling baik untuk fuel cell terhadap variasi beban. Pertama kita akan mevariasikan konfigurasi controller fuzzy untuk simulasi dengan gain dan simulasi dengan flow difference, dimana tegangan dibuat konstan dan beban divariasikan. Hasil dari simulasi tersebut diberi pembobotan nilai sehingga didapat konfigurasi yang paling baik untuk Fuel Cell. Pada bab ini juga akan dijelaskan pengaruh beban dan pengaruh beda aliran pada Fuel Cell. Berikut Blok Diagram *Fuzzy Logic Controller* dengan *Gain* dan *Flow Difference Control*.



Gambar3.1. Gambar blok diagram *Fuzzy Logic Controller* dengan *Gain*



Gambar3.2. Gambar blok diagram *Fuzzy Logic Controller* dengan *Flow Difference*

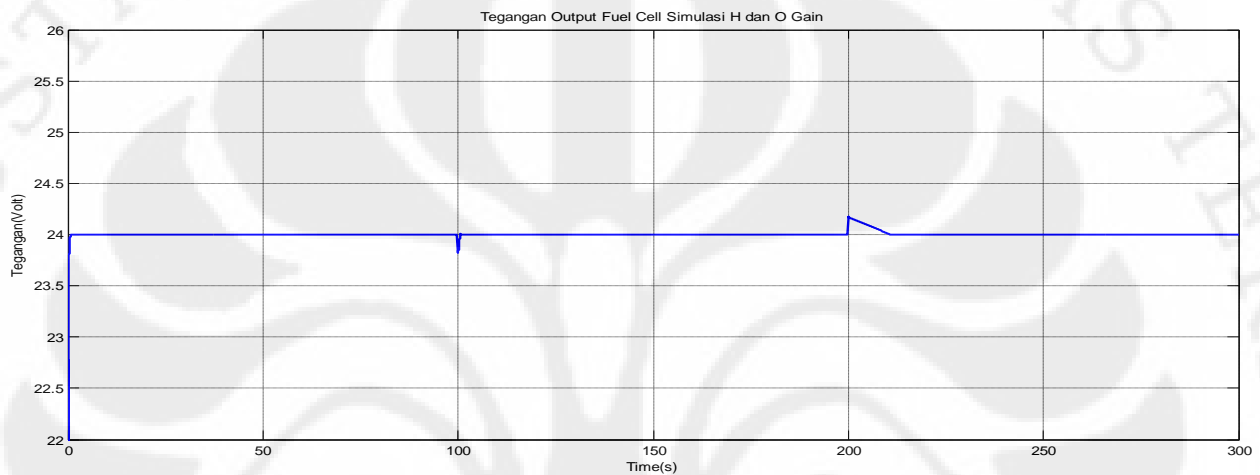
#### 4.1 Efek Variasi Konfigurasi *Fuzzy Logic Controller* terhadap Respons Sistem Fuel Cell

Simulasi pertama yang dilakukan digunakan untuk mengetahui efek beberapa konfigurasi *Fuzzy Logic Controller* pada Respons sistem Fuel Cell. Ada 2 Inputan yaitu *error* dan *change of error* yang bisa diubah pada proses fuzzifikasi, daerah yang mendekati 0 umumnya sangat terpengaruh oleh *change of error* dan kita butuh menghilangkan *Steady state error* yang ada dengan mencari nilai fuzzy zero untuk *error* yang tepat. Konfigurasi sistem 1 FLC dibuat untuk mengendalikan tegangan dari fuel cell dimana masukan untuk pengendali fuzzy adalah error dari tegangan keluaran fuel cell dan perubahan error tegangan yang terjadi. Keluaran pengendali fuzzy berupa flow hidrogen dan flow oksigen yang merupakan proportional dari hidrogen sebesar 1.168 sebagai input dari fuel cell.

Sementara itu, Konfigurasi B mempunyai 2 pengendali yaitu FLC1 sebagai pengendali tegangan yang mirip dengan konfigurasi A, akan tetapi

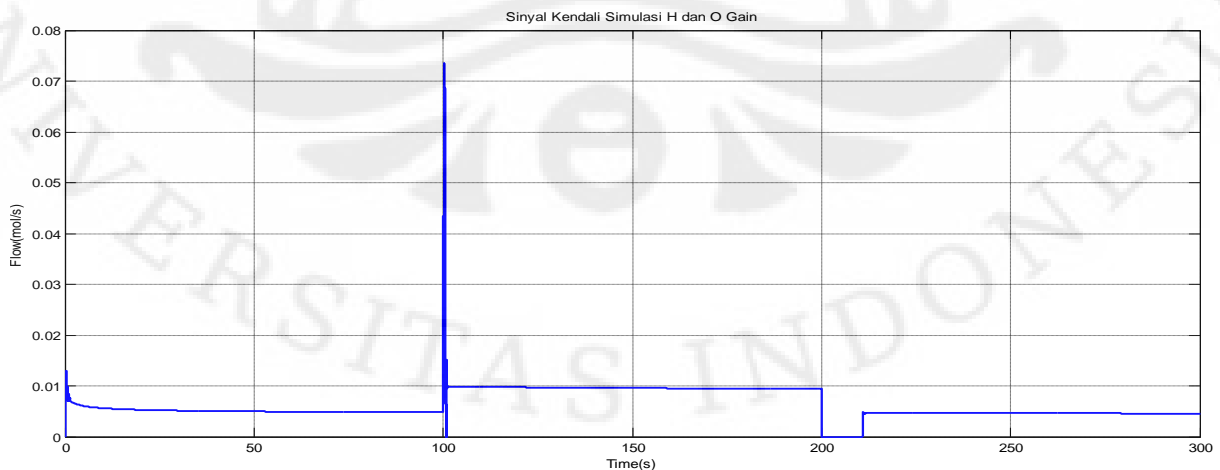
mempunyai keluaran flow hidrogen. FLC2 sebagai pengendali flow oksigen berdasarkan selisih flow antara oksigen dan hidrogen, keluaran dari pengendali ini adalah flow oksigen yang masuk ke fuel cell. Kedua masukan flow ini yang akan menjadi perbandingan kedua sistem fuel cell yang ada.

Berikut adalah simulasi pada sistem 1 FLC yang dihasilkan dengan menggunakan konfigurasi A5 dan adanya perubahan beban dari 1 ohm ke 0.5 ohm pada saat 100s dan 0.5 ohm ke 1ohm pada saat 200s.



Gambar3.3. Gambar tegangan output hasil simulasi H dan O gain

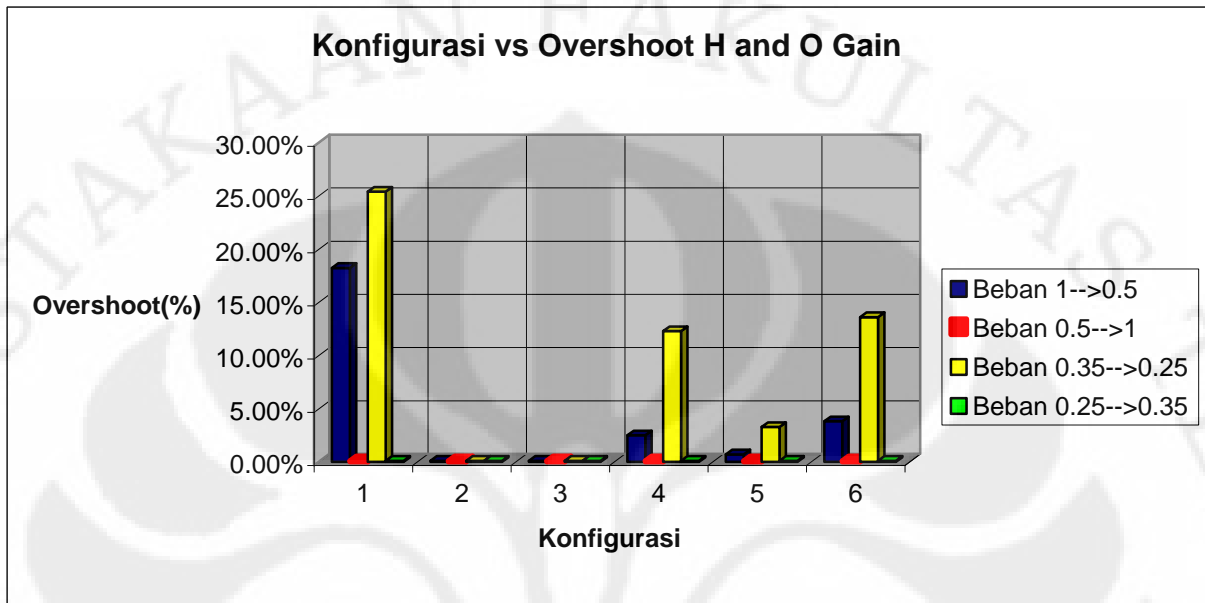
Terlihat pada gambar 3.3 bahwa pada saat beban diturunkan dari 1 ohm ke 5 ohm pada saat 100s, tegangan mengalami penurunan akibat losses yang ada semakin besar, dan pada saat 200s tegangan mengalami kenaikan akibat adanya perubahan beban dari 0.5 ohm ke 1 ohm, settling time yang ada lama akibat aliran tidak bisa bernilai negative dan minimum bernilai 0 mol/s.



Gambar3.4. Gambar sinyal kendali hasil simulasi H dan O gain

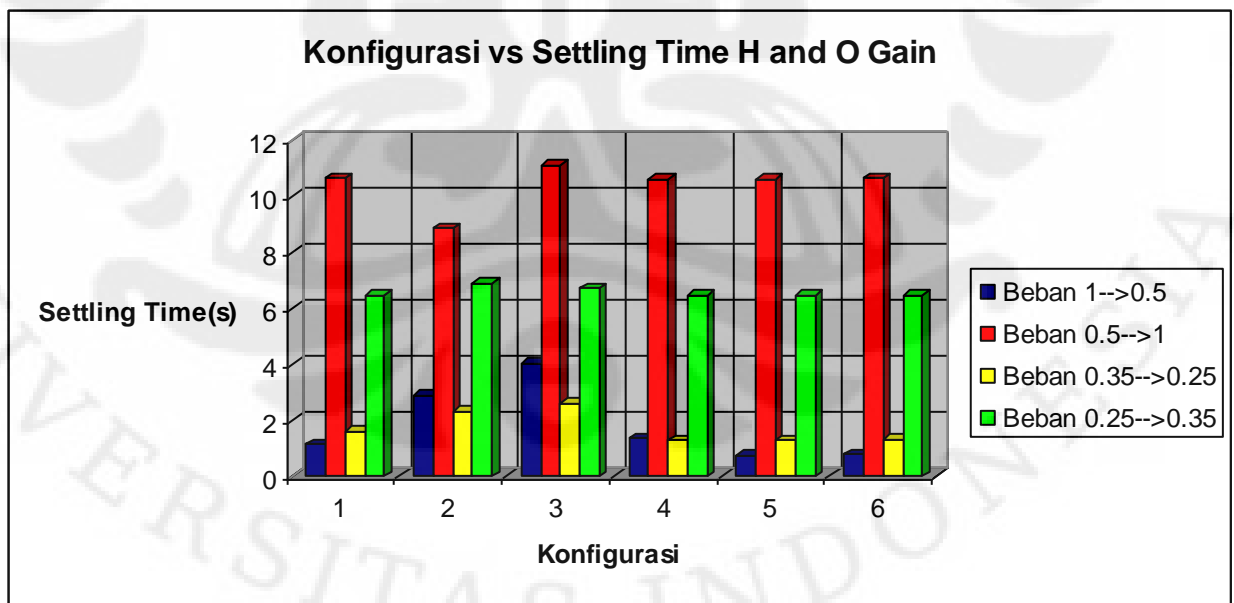
Pada gambar 3.4 terlihat nilai sinyal kendali keluaran controller dimana pada saat 100s diberikan aliran lebih besar dan pada saat 200s aliran tidak ada.

Dan berikut adalah grafik hasil perbandingan Konfigurasi dengan Respons Sistem



Gambar3.5. Gambar grafik perbandingan konfigurasi dengan *overshoot* hasil simulasi H dan O *gain*

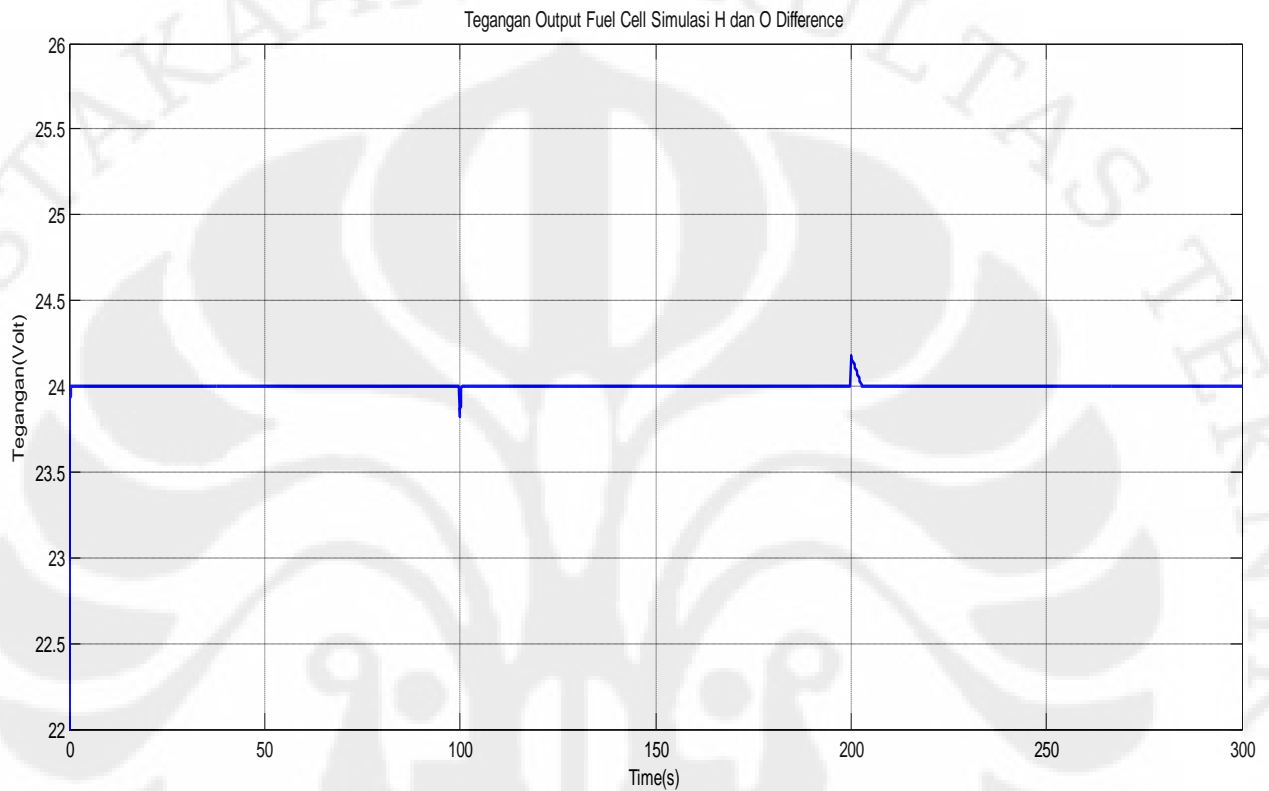
Dari grafik 3.5 terlihat bahwa konfigurasi 2 dan 3 mempunyai overshoot paling kecil dibanding konfigurasi yang lain untuk simulasi dengan gain. Hal ini disebabkan nilai fuzzifikasi yang sesuai.



Gambar3.6. Gambar grafik perbandingan konfigurasi dengan *settling time* hasil simulasi H dan O *gain*



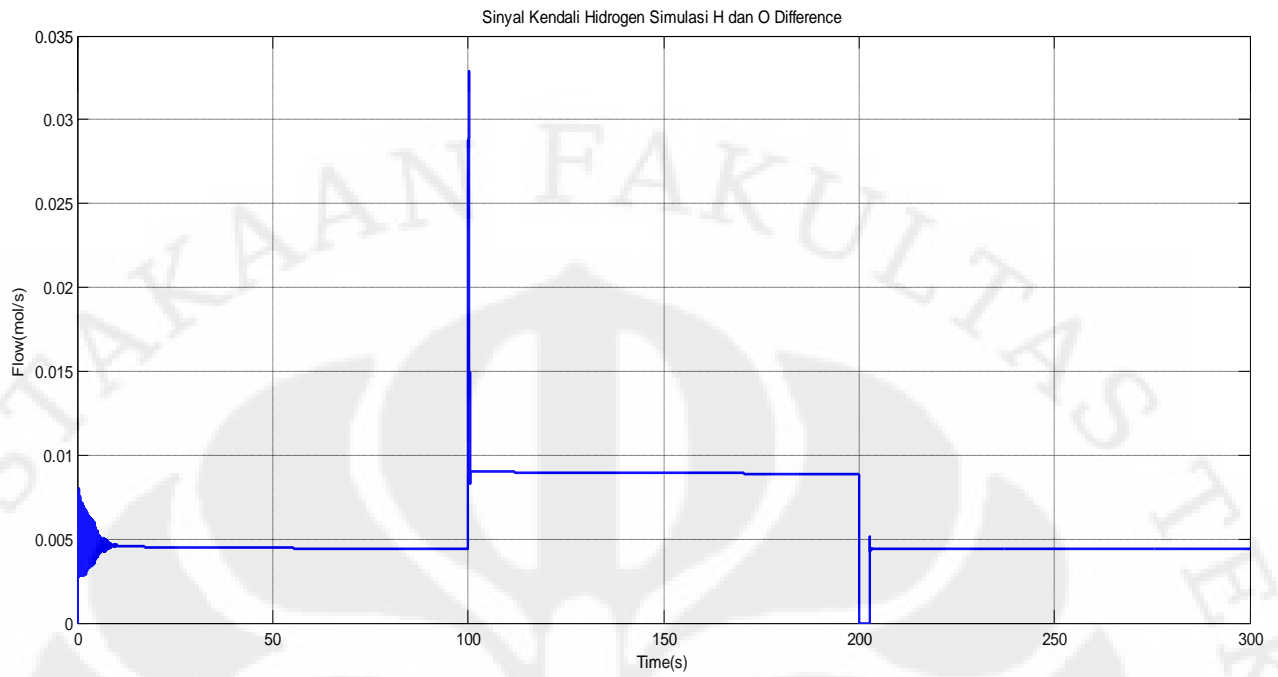
Sementara untuk grafik 3.6 settling time yang diperoleh berbeda-beda untuk setiap kondisi beban dimana konfigurasi A5 paling baik untuk semua kondisi beban.



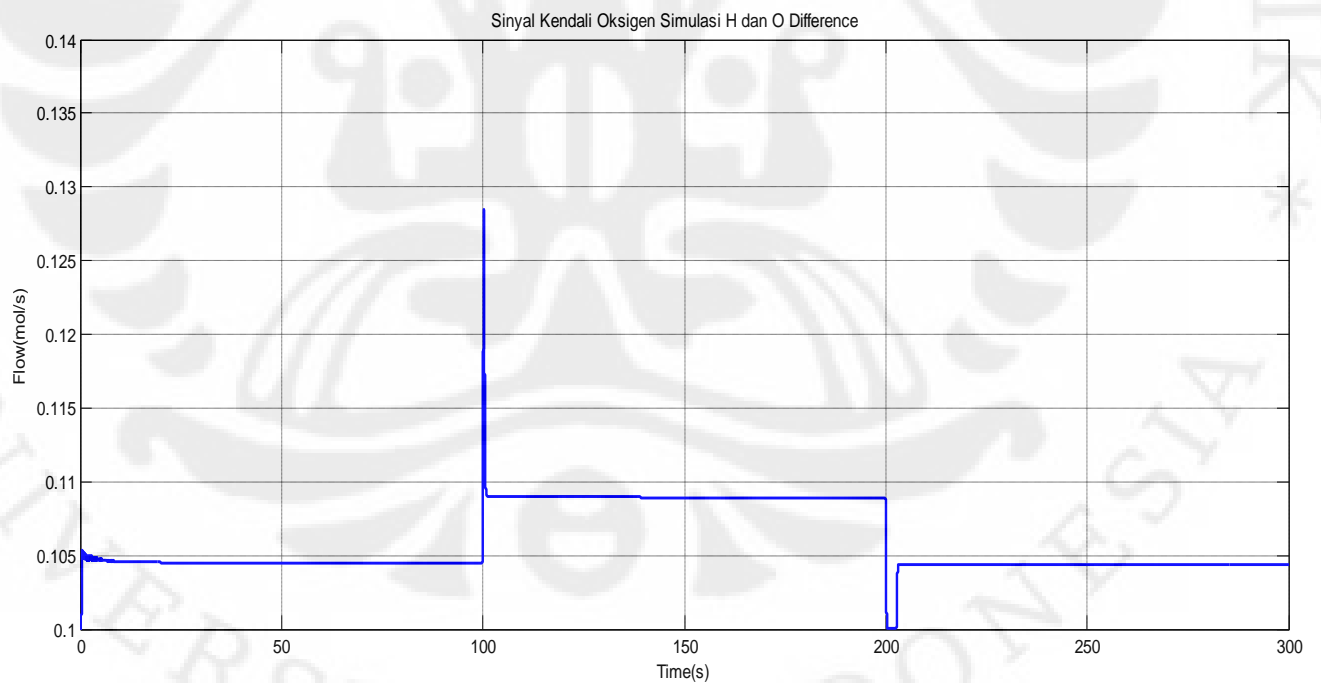
Gambar3.7. Gambar tegangan output hasil simulasi H dan O *difference*

Hasil simulasi gambar 3.7 dengan menggunakan konfigurasi B5 memperlihatkan perubahan tegangan akibat beban. Terlihat Settling time yang diperoleh lebih cepat pada saat beban diubah dari 0.5 ohm ke 1 ohm pada saat 200s dibanding simulasi dengan gain. Hal ini disebabkan beda flow sebesar 0.1 yang digunakan pada simulasi ini.

Hasil simulasi gambar 3.9 dan 3.8 dengan menggunakan konfigurasi B5 memperlihatkan sinyal kendali yang dikeluarkan controller. Terlihat oksigen lebih tinggi dari hidrogen sebesar 0.1 berdasarkan input. Pada hidrogen, terlihat ada ringing keluaran fuzzy controller, hal ini disebabkan adanya nilai yang masuk ke dalam range fuzzifikasi secara berulang akibat aturan fuzzy yang digunakan.

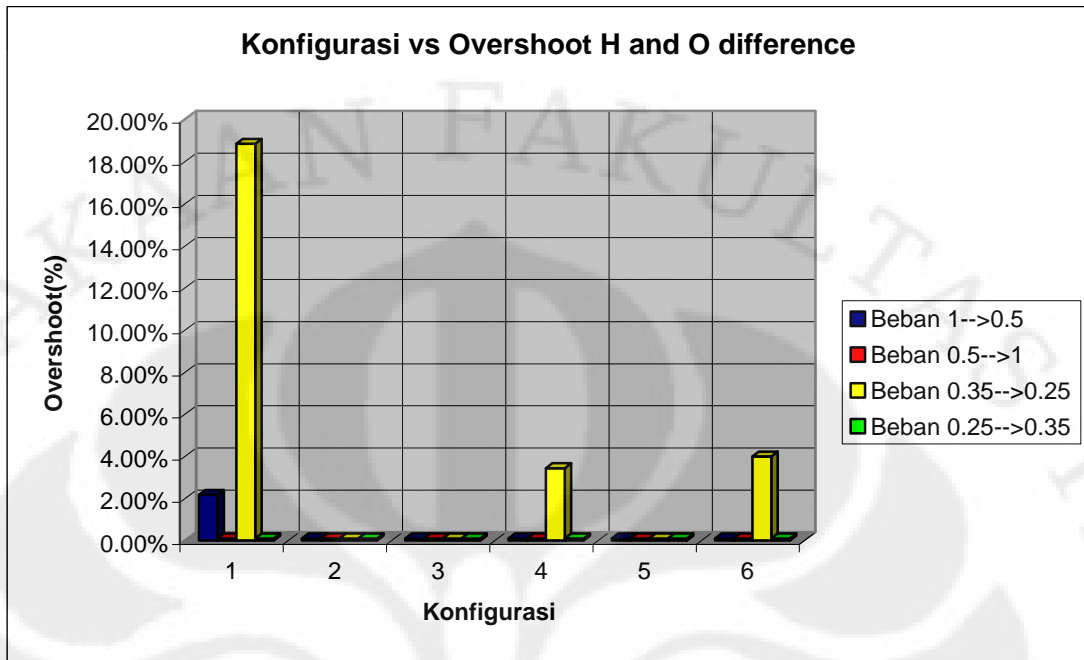


Gambar3.8. Gambar sinyal kendali hydrogen hasil simulasi H dan O *difference*

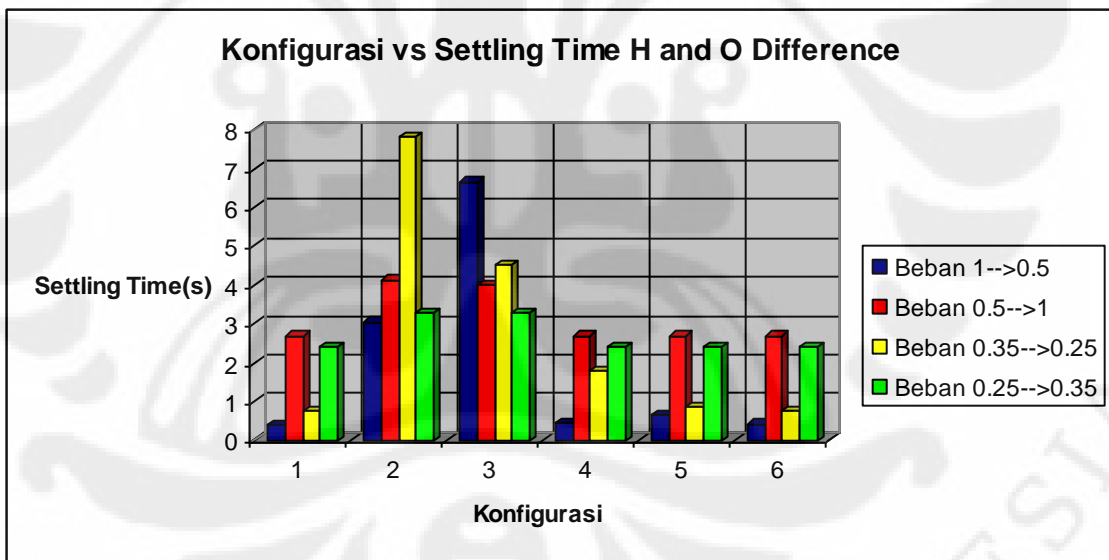


Gambar3.9. Gambar sinyal kendali oksigen hasil simulasi H dan O *difference*

Berikut adalah grafik perbandingan antara konfigurasi dengan respons sistem



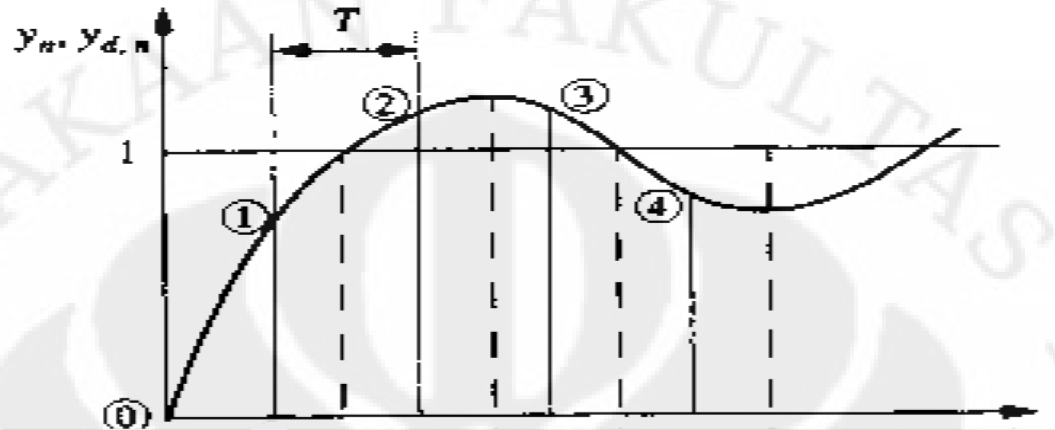
Gambar4.0. Gambar grafik perbandingan konfigurasi dengan *overshoot* hasil simulasi H dan O *difference*



Gambar4.1. Gambar grafik perbandingan konfigurasi dengan *settling time* hasil simulasi *difference*

Dari Hasil Simulasi dan grafik 4.0 dan 4.1 terlihat bahwa efek konfigurasi fuzzifikasi *error* dan *change of error* berpengaruh pada respons sistem. Hal ini disebabkan adanya rules fuzzy yang menyebabkan sinyal kendali berubah sesuai dengan aturannya apabila *error* dan *change of error* berada pada range tersebut. Apabila *error* besar maka *change of error* tidak terlalu berpengaruh tetapi

menandakan *error*nya menuju ke arah semakin besar atau semakin kecil. Terlihat konfigurasi 5 paling baik karena tidak ada overshoot dan mempunyai settling time yang cepat untuk setiap variasi beban.



Gambar4.2. Gambar respons fuzzy

Dapat terlihat pada gambar 4.2 titik 1 apabila *error* besar dan *change of error* negative maka diperlukan sinyal kendali positif besar agar dapat menuju set point, pada no 2, *error* negative tetapi tidak terlalu besar tetapi *change of error* positif sehingga diberikan sinyal negative medium dan seterusnya sehingga mencapai steady state. *Change of error* sangat berpengaruh pada keadaan mendekati set point sehingga diperlukan konfigurasi yang pas agar respons sistem baik dan cepat.

Kemudian dapat dilihat di hasil simulasi H and O *difference* terdapat ringing atau sedikit osilasi pada saat start-up hal ini disebabkan adanya nilai yang berada pada range fuzzifikasi tertentu ketika di beri sinyal kendali kembali ke range tersebut sampai nanti akhirnya mengalami pindah range atau steady state.

Dari Simulasi dan data diatas kita akan memperoleh konfigurasi yang paling baik dengan memberi pembobotan nilai pada setiap konfigurasi berdasarkan respons yang mereka punya. Dimana 5 merupakan nilai paling buruk, dan 1 merupakan nilai yang baik.

Berikut range pembobotan nilai untuk *overshoot* dan *settling time*:

Bobot Nilai	Jangkauan
-------------	-----------

a. *Overshoot*

1	0-2.5%
2	2.5%-10%
3	10%-15%
4	15%-20%
5	>20%

b. *Settling time*

Bobot Nilai	Impedansi Beban naik	Impedansi Beban turun
1	0-1s	0-2.5s
2	1-2s	2.5-4s
3	2-3s	4-7.5s
4	3-4s	7.5-10s
5	>4s	>10s

Tabel 1.8. Tabel Pembobotan Konfigurasi yang digunakan pada simulasi H dan O *Gain*.

Konfigurasi i	OS 1	Ts1	OS 2	Ts2	OS 3	Ts3	OS4	Ts4	Total
A1	4	2	1	5	5	2	1	3	23
A2	1	3	1	4	1	3	1	3	17
A3	1	5	1	5	1	3	1	3	20
A4	1	2	1	5	3	2	1	3	18
A5	1	1	1	5	2	2	1	3	16
A6	2	1	1	5	3	2	1	3	18

Dari Tabel 1.7 terlihat bahwa konfigurasi A5 memperoleh nilai yang paling baik dari semua respons sistem yang kita peroleh, baik *overshoot*, *settling time* pada berbagai kondisi beban. Sementara untuk simulasi H dan O dengan *delta flow* berikut hasil pembobotannya:

Tabel 1.9. Tabel Pembobotan Konfigurasi yang digunakan pada simulasi H dan O *Difference*.

Konfigurasi	OS1	Ts1	OS2	Ts2	OS3	Ts3	OS4	Ts4	Total
B1	1	1	1	2	4	1	1	1	12
B2	1	4	1	3	1	5	1	2	18
B3	1	5	1	2	1	5	1	2	18
B4	1	1	1	2	2	2	1	1	11
B5	1	1	1	2	1	1	1	1	9
B6	1	1	1	2	2	1	1	1	10

Dari Tabel 1.8 terlihat bahwa konfigurasi B5 memperoleh nilai yang paling baik dari semua respons sistem yang kita peroleh, baik *overshoot*, *settling time* pada berbagai kondisi beban. Dari pembobotan nilai diatas dapat terlihat

bahwa simulasi dengan menggunakan *difference* jauh lebih baik daripada dengan menggunakan *gain* dimana hampir semua konfigurasi mengalami peningkatan dari segi respons. Konfigurasi terbaik adalah konfigurasi 5o atau konfigurasi yang digunakan pada simulasi hidrogen dan oksigen dengan *flow difference*, dengan *difference* 0.1. Hal ini disebabkan adanya *flow* oksigen masuk yang lebih besar daripada hidrogen apabila delta *flow* besar. Fuzzifikasi yang digunakan pada rules 5 ini adalah

Tabel 2.0 Konfigurasi Terbaik

Konfigurasi	fuzzifikasi		PVB	PB	PM	PS	PVS
	Masukan						
B5	FLC1	e	1	0.5	0.1	0.05	0.001
		ce	0.01	0.005	0.001	0.0001	0.00005
	FLC2	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001

Pemilihan *change of error* berdasarkan 1% dan untuk daerah small dan very small dibuat lebih kecil karena *change of error* sangat kecil terjadi, sehingga lebih sensitif pada saat dekat dengan keadaan steady state. *Error* sendiri dipilih lebih kecil mendekati steady state agar menghilangkan offset *error* yang terjadi. Dari Konfigurasi ini diperoleh data sebagai berikut untuk beban 1ohm ke 0.5 ohm pada saat 100s tidak ada *overshoot* dan *settling time* 0.647s, untuk beban 0.5 ohm ke 1 ohm tidak *overshoot* dan waktu turunnya sebesar 2.685s, untuk beban 0.35ohm ke 0.25ohm tidak *overshoot* dan *settling time* 0.857s, dan 0.25ohm ke 0.35ohm tidak *overshoot* dan *settling time* 2.416s. Dapat terlihat dari data yang diperoleh *overshoot* tidak ada dan waktu *settling time* yang cepat, dapat disimpulkan bahwa pengendali Fuzzy dengan konfigurasi B5 baik digunakan pada variasi beban.

## 4.2 Analisis Efek Variasi Beban terhadap Respons Sistem Fuel Cell

Pada simulasi kedua ini akan dilakukan perubahan beban baik naik maupun turun pada kedua simulasi fuzzy *controller* yang ada. Untuk data hasil respons dapat dilihat dari grafik-grafik sebelumnya. Ketika beban diturunkan, arus

yang dihasilkan akan meningkat, sehingga mengakibatkan *losses* yang terjadi semakin besar sehingga tegangan yang dihasilkan model turun akibat terjadinya penurunan beban, dan sebaliknya ketika beban dinaikkan arus yang dihasilkan berkurang mengakibatkan *losses* turun akibatnya tegangan yang dihasilkan naik. Hal ini sebanding dengan rumus *losses*:

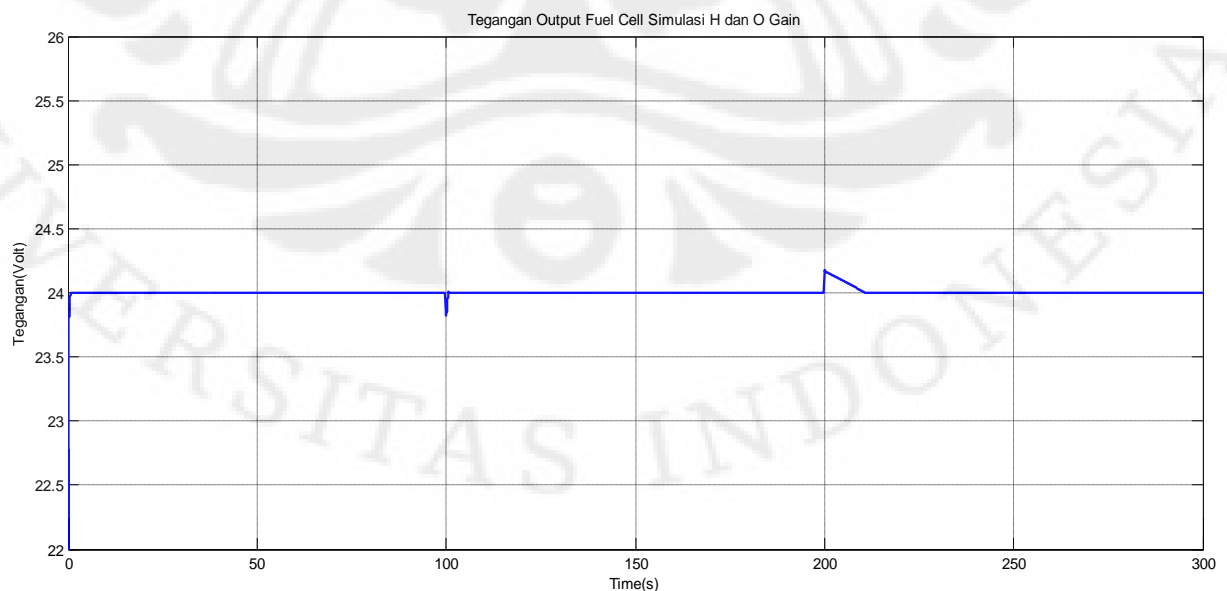
$$L = (i + i_n)r + a \ln\left(\frac{i + i_n}{i_o}\right) - b \ln\left(1 - \frac{i + i_n}{i_l}\right) \quad (4.1)$$

dimana :

- $i$  : keluaran kerapatan arus
- $i_n$  : kerapatan arus internal terhadap rugi-rugi arus internal
- $i_o$  : pertukaran kerapatan arus sehubungan rugi-rugi aktivasi
- $i_l$  : batas kerapatan arus sehubungan rugi-rugi konsentrasi
- $r$  : luas tahanan spesifik sehubungan rugi-rugi tahanan
- $a, b$  : konstanta.

Jadi untuk menjaga tegangan tetap konstan pada disturbance akibat arus ini, sinyal kendali menaikkan  $H_2$  dan  $O_2$  yang masuk ke dalam Fuel Cell. Hal ini disebabkan hukum nerst yang digunakan berbanding lurus dengan  $H_2$  dan  $O_2$  yang masuk.

$$V = N\left(E^0 + \frac{RT}{2F} \ln\left\{\frac{pH_2(pO_2/P_{std})^{0.5}}{pH_2O}\right\}\right) - L \quad (4.2)$$



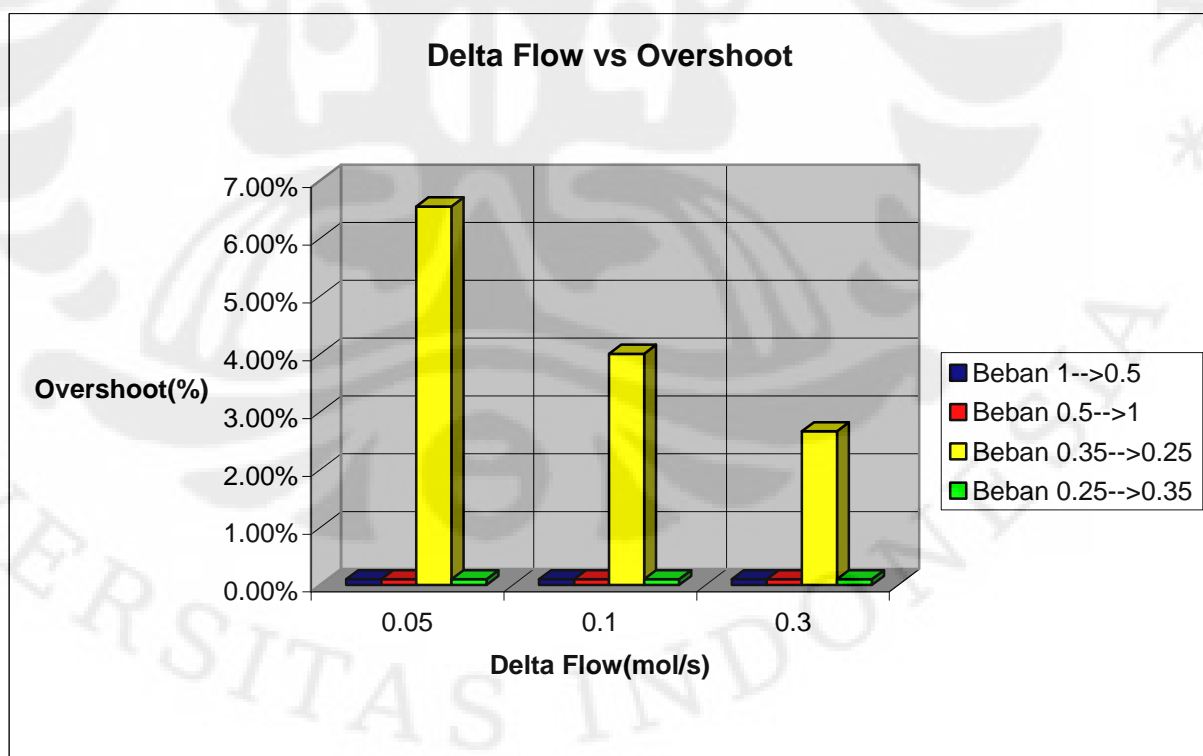
Gambar4.3. Gambar efek beban

Dapat dilihat dari hasil simulasi bahwa pada saat beban diturunkan, tegangan mengalami penurunan dan kembali ke nilai setpoint setelah beberapa saat akibat peningkatan Hidrogen dan Oksigen yang masuk. Dan pada saat beban dinaikkan, tegangan mengalami kenaikan dan kembali turun dalam waktu yang cukup lama akibat *Flow* yang diberikan dibatasi pada 0 dan 2 mol/s agar tidak merusak membrane, dan tidak mungkin negatif karena tidak ada aliran balik.

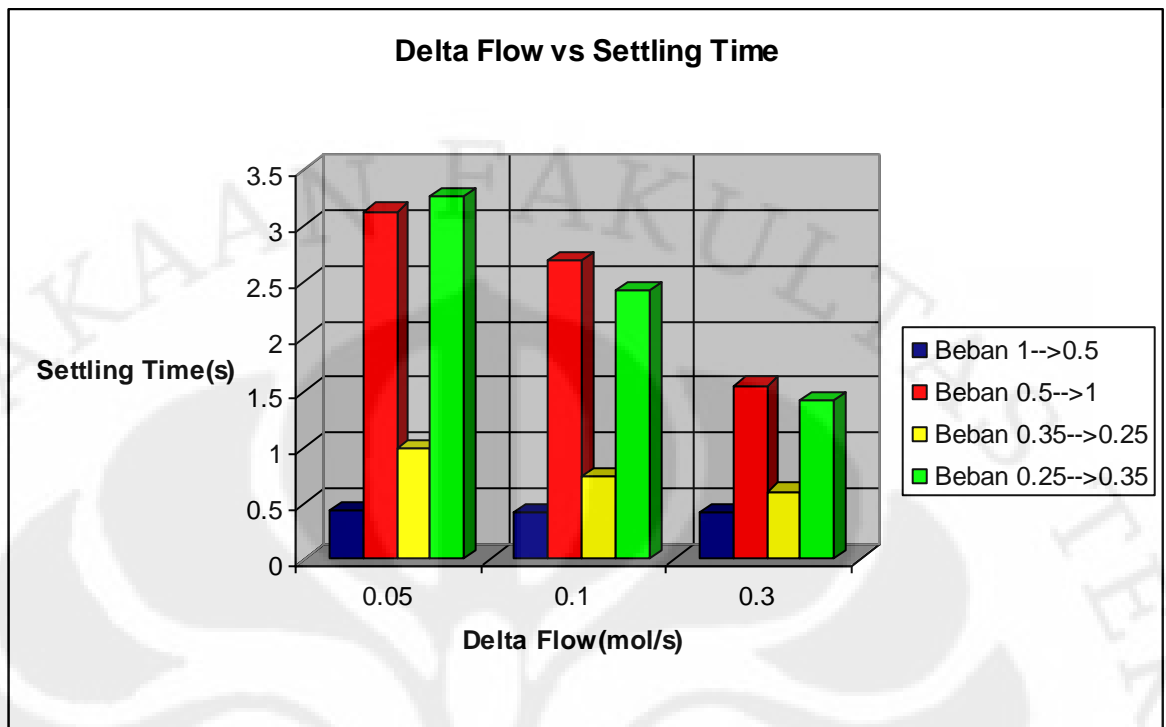
### 4.3 Analisis Efek Perubahan *Flow* terhadap Respons Sistem Fuel Cell

Di bagian sebelumnya sudah dibahas mengenai efek beban pada fuel cell dan bagaimana *Flow* H<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> memegang peranan penting dalam respons sistem terhadap disturbance yang ada. Pada bagian ini akan dilakukan simulasi membandingkan perbedaan *flow* antara O<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub> dan efeknya ke respons dari sistem fuel cell.

Berikut data hasil simulasi

Gambar4.4. Gambar grafik perbandingan delta *flow* dengan *overshoot*

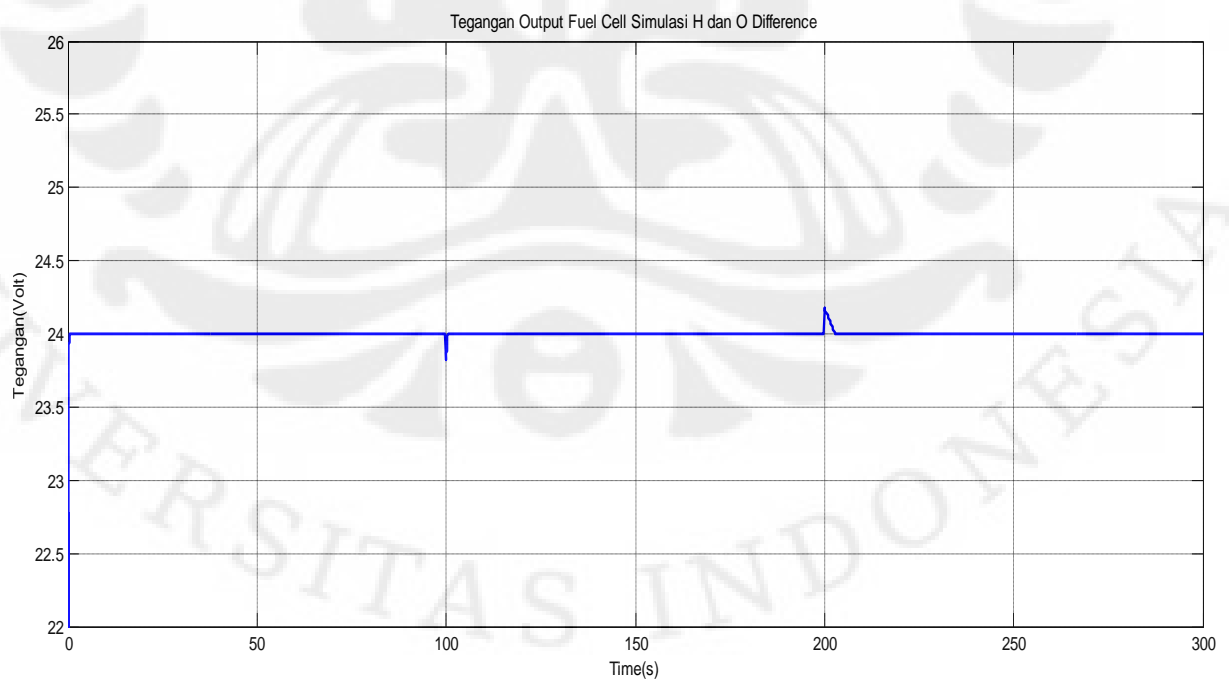




Gambar4.5. Gambar grafik perbandingan delta *flow* dengan *settling time*

Pada gambar 4.5 dan 4.4 dapat dilihat bahwa semakin besar delta flow yang digunakan semakin baik respons settling time dan overshoot yang diperoleh.

Dan berikut hasil simulasi yang digunakan untuk delta pressure 0.3



Gambar4.6. Gambar simulasi hasil tegangan output dengan delta pressure 0.3

Dari data grafik dan hasil simulasi 4.5 dan 4.6 terlihat pengaruh delta pressure pada *settling time* sistem dan *overshoot* sistem, semakin besar delta pressure yang diberikan semakin baik responsnya. Jadi Oksigen lebih banyak daripada Hidrogen pada saat masuk ke dalam Fuel Cell, hal ini disebabkan operasi standar Fuel Cell umumnya tekanan katoda lebih besar sama dengan anoda. Oksigen sendiri sangat berpengaruh pada peningkatan Tegangan Reversibel pada jumlah reaktan yang lebih banyak, berdasarkan rumus hukum Nerst (4.2).

$$V = N(E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left\{ \frac{pH_2(pO_2 / P_{std})^{0.5}}{pH_2O} \right\}) - L$$

Pada Fuel Cell juga terdapat purging yang dilakukan secara periodik, hal ini dilakukan untuk menjaga tekanan dan kelembapan dalam fuel cell serta membuang gas- gas yang tidak berguna seperti gas yang mengandung uap air ataupun carbon yang beracun, pada simulasi ini Purging digunakan pada saat *flow* mencapai 0 mol/s.

Pemilihan *change of error* berdasarkan 1% dan untuk daerah small dan very small dibuat lebih kecil karena *change of error* sangat kecil terjadi, sehingga lebih sensitif pada saat dekat dengan keadaan steady state. *Error* sendiri dipilih lebih kecil mendekati steady state agar menghilangkan offset *error* yang terjadi. Dari Konfigurasi ini diperoleh data sebagai berikut untuk beban 1ohm ke 0.5 ohm pada saat 100s tidak ada *overshoot* dan *settling time* 0.647s, untuk beban 0.5ohm ke 1 ohm tidak *overshoot* dan waktu turunnya sebesar 2.685s, untuk beban 0.35ohm ke 0.25ohm tidak *overshoot* dan *settling time* 0.857s, dan 0.25ohm ke 0.35ohm tidak *overshoot* dan *settling time* 2.416s. Dapat terlihat dari data yang diperoleh *overshoot* tidak ada dan waktu *settling time* yang cepat, dapat disimpulkan bahwa pengendali Fuzzy dengan konfigurasi 5o baik digunakan pada variasi beban.

## BAB 5

### KESIMPULAN

Dari hasil pengamatan dan simulasi dari pengendalian tegangan fuel cell dengan menggunakan logika fuzzy dapat disimpulkan:

1. Penggunaan pengendalian dengan logika fuzzy cukup baik diterapkan pada proses pengendalian tegangan pada fuel cell dimana pengendalian menggunakan perbedaan *flow* lebih baik daripada menggunakan *gain*, hal ini disebabkan lebih banyaknya oksigen yang masuk ke dalam fuel cell sehingga mengurangi *losses* yang ada.
2. Fuzzifikasi berpengaruh pada respons sistem karena pengaruh sinyal kendali dari *Fuzzy Logic Controller*, dimana *error* mempengaruhi transient response suatu sistem dan *change of error* berpengaruh pada saat mendekati keadaan steady state.
3. Sinyal kendali dan hasil output kendali yang dihasilkan terkadang mengalami ringing disaat Start up akibat adanya nilai error yang masuk ke dalam range fuzzifikasi tertentu misalnya 0.001 dan 0.005, dan kembali masuk ke range fuzzifikasi yang sama setelah diberi sinyal kendali berdasarkan aturan yang berlaku sampai mencapai steady state.
4. Beban berpengaruh pada arus dimana beban berbanding terbalik dengan arus. Arus sendiri mempengaruhi *losses* yang ada pada Fuel Cell. Semakin besar nilai impedansi, arus semakin kecil sehingga *losses* semakin kecil, untuk mendapatkan tegangan rendah maka dibutuhkan beban yang kecil, dan sebaliknya.
5. Efek perbedaan *flow* oksigen dan hidrogen berpengaruh pada respons suatu sistem karena oksigen berpengaruh pada state dan tegangan. Hal ini dapat dilihat dari rumus hukum Nerst(4.2)
6. Konfigurasi terbaik adalah konfigurasi 5o atau konfigurasi yang digunakan pada simulasi hidrogen dan oksigen dengan *flow difference*, dengan *difference* 0.1. Hal ini disebabkan adanya *flow* oksigen masuk yang lebih

besar daripada hidrogen apabila delta *flow* besar. Fuzzifikasi yang digunakan pada rules 5 ini adalah

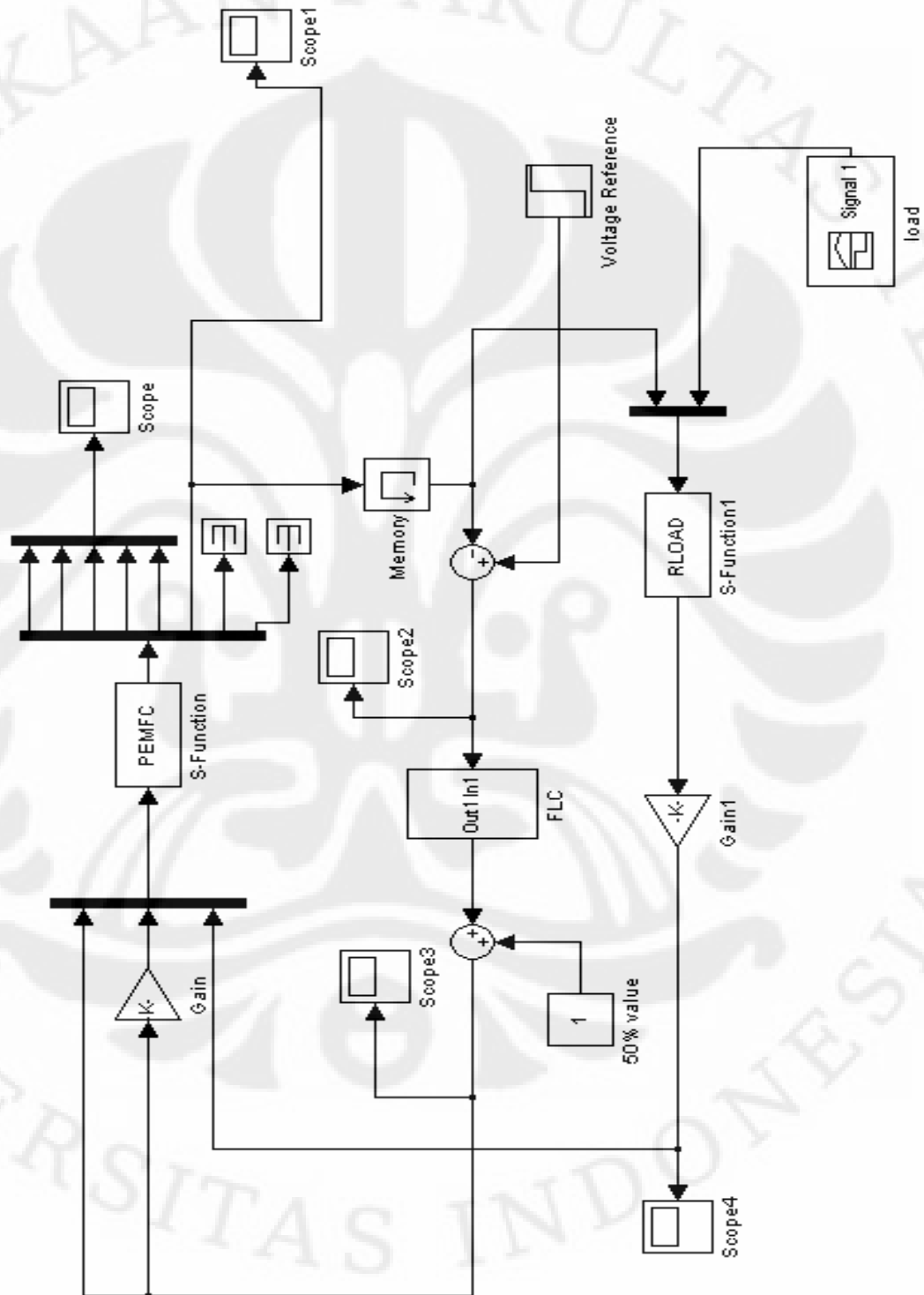
Konfigurasi	fuzzifikasi		PVB	PB	PM	PS	PVS
	Masukan						
B5	FLC1	e	1	0.5	0.1	0.05	0.001
		ce	0.01	0.005	0.001	0.0001	0.00005
	FLC2	e	1	0.5	0.1	0.05	0.01
		ce	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001

7. Pemilihan *change of error* berdasarkan 1% dan untuk daerah small dan very small dibuat lebih kecil karena *change of error* sangat kecil terjadi, sehingga lebih sensitif pada saat dekat dengan keadaan steady state. *Error* sendiri dipilih lebih kecil mendekati steady state agar menghilangkan offset *error* yang terjadi. Dari Konfigurasi ini diperoleh data sebagai berikut untuk beban 1 ohm ke 0.5 ohm tidak ada *overshoot* dan *settling time* 0.647s, untuk beban 0.5 ohm ke 1 ohm tidak *overshoot* dan waktu turunnya sebesar 2.685s, untuk beban 0.35 ohm ke 0.25 ohm tidak *overshoot* dan *settling time* 0.857s, dan 0.25 ohm ke 0.35 ohm tidak *overshoot* dan *settling time* 2.416s. Dapat terlihat dari data yang diperoleh *overshoot* tidak ada dan waktu *settling time* yang cepat, dapat disimpulkan bahwa pengendali Fuzzy dengan konfigurasi 5o baik digunakan pada variasi beban.

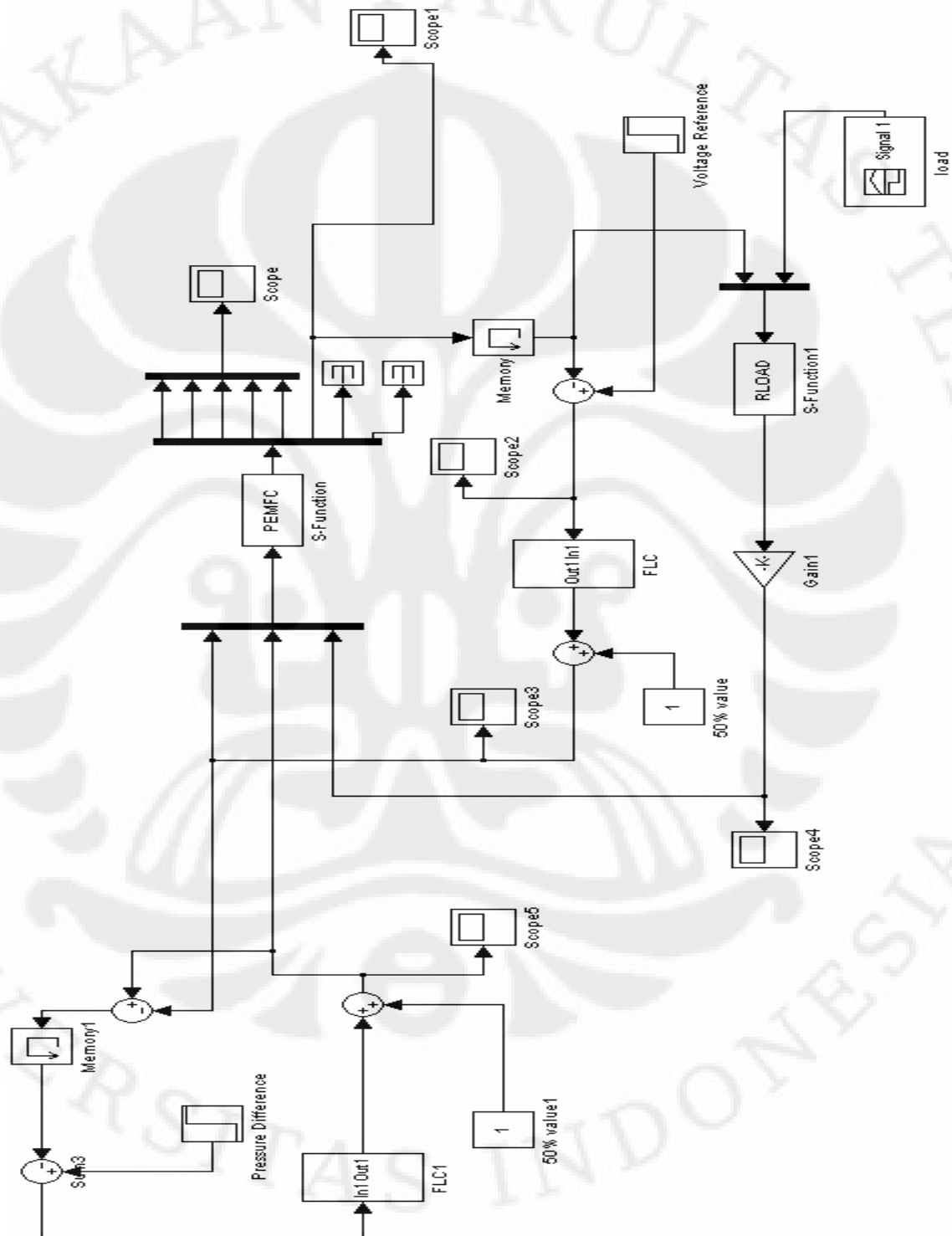
## DAFTAR PUSTAKA

1. Widodo, Anjar, "Perbaikan Pengukuran Kecepatan Rotor Menggunakan Pengendali Fuzzy Pada Sistem Pengendalian Kecepatan Motor dengan Encoder Resolusi Rendah", Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2005.
2. Yusivar, Feri, "Improving Rotor Speed Calculation op Permanent Magnet Synchronous Motor using Fuzzy Logic Algorithm", Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. 2005
3. Aryani, Dharma, "Identifikasi Sistem PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) Dengan Metode Kuadrat Terkecil", Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. 2008
4. Larminie, James & Dicks, Andrew, "Fuel Cell System Explained" .John Wiley and Sons. 2001
5. Zhang, JiuJun, "PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers Fundamental and Applications". Springer.2008
6. Mamar, Khaled and Chaker, Abdelkader, " Fuzzy Logic Based Control of Power of PEM Fuel Cell for Residential Application". Departement of Electrical Engineering, Université of Bechar. Algeria. 2009
7. Yen, John and Langari, Reza. "Fuzzy Logic Inteligennce, Control, and Information". Prentice Hall. 1999
8. Zhijun, Mo, Xinjian, Zhu and Guangyi, Cao. "Design and Simulation of Fuzzy Controller for PEMFCs. IEEE. 2005
9. Na, Woonki & Gou, Bei and Diong, Bill, "Nonlinear Control of PEM Fuel Cell by Exact Linearization". IEEE. 2005
10. Wingelaar, P.J.H, Duarte J.L and Hendrix, M.A.M, "Dynamic Characteristic of PEM fuel cell". IEEE. 2005

**LAMPIRAN A**  
**GAMBAR SIMULINK 1 FUZZY LOGIC CONTROLLER**  
**DENGAN GAIN**



**LAMPIRAN B**  
**GAMBAR SIMULINK 2 FUZZY LOGIC CONTROLLER**  
**DENGAN DIFFERENCE**



**LAMPIRAN C**  
**DATA SIMULASI**

H and O Gain	Beban 1-->0.5		Beban 0.5-->1		Beban 0.35-->0.25		Beban 0.25-->0.35				
Konfigurasi	OS(%)	Ts(s)	Konfigurasi	OS(%)	Ts(s)	Konfigurasi	OS(%)	Ts(s)	Konfigurasi	OS(%)	Ts(s)
1	18.23%	1.12	1	0.10%	10.634	1	25.40%	1.591	1	0.10%	6.45
2	0.10%	2.9	2	0.10%	8.86	2	0.10%	2.3	2	0.10%	6.9
3	0.10%	4.05	3	0.10%	11.1	3	0.10%	2.61	3	0.10%	6.715
4	2.50%	1.34	4	0.10%	10.632	4	12.30%	1.293	4	0.10%	6.45
5	0.70%	0.742	5	0.10%	10.632	5	3.28%	1.293	5	0.10%	6.45
6	3.82%	0.77	6	0.10%	10.634	6	13.60%	1.314	6	0.10%	6.48
H and O Difference	Delta =0.1										
Konfigurasi											
1	2.17%	0.375	1	0.10%	2.686	1	18.85%	0.767	1	0.10%	2.416
2	0.10%	3.05	2	0.10%	4.13	2	0.10%	7.8	2	0.10%	3.27
3	0.10%	6.65	3	0.10%	3.985	3	0.10%	4.5	3	0.10%	3.27
4	0.10%	0.458	4	0.10%	2.686	4	3.44%	1.78	4	0.10%	2.416
5	0.10%	0.647	5	0.10%	2.685	5	0.10%	0.857	5	0.10%	2.416
6	0.10%	0.419	6	0.10%	2.686	6	4.00%	0.738	6	0.10%	2.416
Delta P											
0.05	0.10%	0.435	6	0.10%	3.128	6	6.55%	0.995	6	0.10%	3.259
0.1	0.10%	0.419	6	0.10%	2.686	6	4.00%	0.738	6	0.10%	2.416
0.3	0.10%	0.418	6	0.10%	1.559	6	2.66%	0.606	6	0.10%	1.429