



TUGAS AKHIR TF 141581

SIMULASI PENGENDALIAN FREKUENSI BEBAN DENGAN BERBASIS LOGIKA FUZZY PADA TURBIN GAS

**AISYIYAH NUR ISNAENI
NRP 2414 105 032**

**Dosen Pembimbing
Prof.Dr.Ir. Aulia Siti Aisjah,MT**

**JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, 2016**



FINAL PROJECT TF 141581

***SIMULATION OF LOAD FREQUENCY CONTROL
WITH FUZZY LOGIC BASED ON GAS TURBINE***

***AISYIYAH NUR ISNAENI
NRP 2414 105 032***

***Supervisor
Prof.Dr.Ir.Aulia Siti Aisjah,MT***

***ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya, 2016***

LEMBAR PENGESAHAN
SIMULASI PENGENDALIAN FREKUENSI BEBAN
DENGAN BERBASIS LOGIKA FUZZY
PADA TURBIN GAS

TUGAS AKHIR

Oleh :

Aisyiyah Nur Isnaeni
NRP. 2414 105 032

Surabaya,

Mengetahui / Menyetujui

Pembimbing



Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T
NIP. 19660116 198903 2 001

Mengetahui

Kepala Jurusan Teknik Fisika



Agus Muhammad Fatta, S.T, M.Si. Ph.D
NIP. 19780902 200312 1 002

**SIMULASI PENGENDALIAN FREKUENSI BEBAN
DENGAN BERBASIS LOGIKA FUZZY
PADA TURBIN GAS**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

AISYIYAH NUR ISNAENI
NRP. 2414 105 032

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.  Pembimbing
2. Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.kes  Ketua Penguji
3. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, MSc  Penguji I
4. Bagus Tris Atmaja, S.T., M.T.  Penguji II

SURABAYA
Juli 2016

SIMULASI PENGENDALIAN FREKUENSI BEBAN DENGAN BERBASIS LOGIKA FUZZY PADA GAS TURBIN

Nama : Aisyiah Nur Isnaeni
NRP : 2414 105 032
Jurusan : S1 Lintas Jalur Teknik Fisika
Dosen Pembimbing : Prof. Dr.Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T

Abstrak

Sistem pembangkit tenaga listrik berfungsi untuk membangkitkan energi listrik melalui berbagai macam komponen unit pendukung. Salah satu sistem pembangkit listrik yaitu pembangkit listrik tenaga gas. Bagian utama dari pembangkit listrik tenaga gas yaitu kompressor, combustion chamber, dan gas turbin-generator. Sistem pengendalian yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga gas yaitu sistem pengendalian frekuensi beban. Sistem ini memiliki peranan yang sangat penting dalam meningkatkan efisiensi dari daya yang dibangkitkan meskipun terdapat beban pada sistem tersebut. Jika daya yang dibangkitkan dalam sistem lebih kecil dari beban yang diminta, maka frekuensi akan turun. Sehingga diperlukannya pengendalian frekuensi beban untuk menjaga kecepatan pada rotor turbin gas-generator. Pada penelitian ini dilakukan perancangan pengendalian frekuensi beban dengan dua tipe yaitu speed governor dan PID gain schedulling. Dari hasil pengujian menggunakan kedua tipe kendali lebih baik PID gain schedulling memiliki karakteristik performansi yang lebih baik dibandingkan dengan speed governor. Nilai parameter dari uji performansi frekuensi beban menggunakan kendali speed governor yaitu nilai maks. overshoot sebesar 45%, peak time 1,7s, setling time 4,5 s, Rise time 1,7s, ess 9,6. PID gain schedulling dengan nilai parameter uji performansi yaitu nilai maks. overshoot sebesar 40%, peak time 1,6s, setling time 4 s, Rise time 7 s, ess 0,3.

Kata Kunci : Sistem pembangkit tenaga listrik gas, Pengendalian frekuensi beban, Kendali Speed Governor, PID gain schedulling.

SIMULATION OF LOAD FREQUENCY CONTROL WITH FUZZY LOGIC BASED ON GAS TURBINE

Name : ***Aisyiah Nur Isnaeni***
NRP : ***2414 105 032***
Department : ***SI Lintas Jalur Teknik Fisika***
Advisor Lecturer : ***Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T***

Abstract

Power systems serve to arouse the electrical energy through a wide variety of components supporting units. One of the electricity generation system i.e. gas power plant. A major part of the gas power plant that is kompressor, combustion chamber, and gas turbine-generators. Control systems used in gas-fired power plants, namely load frequency control system. This system has a very important role in increasing the efficiency of power raised although there is load on the system. If power is generated in the system is smaller than the requested load, then the frequency will go down. So it needs to keep the load frequency control of the speed of the rotor gas turbines. This research was conducted on the design of the load frequency control with two types namely speed governor and the PID gain schedulling. From the results of testing using both types of control are better PID gain schedulling has better performance characteristics than with a speed governor. The value of the parameters of the test performance using load frequency control speed governor is max. overshoot 45%, peak time 1,7s, settling time 4,5s, rise time 1,7s, ess 9,6. PID gain schedulling performance test parameter value namely the value max. overshoot 40%, peak time 1,6s, settling time 4s, rise time 7s, ess 0,3.

Keywords : *Power system of gas, load frequency control, Speed Control Governor, PID gain schedulling.*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'aalamiin, rasa syukur atas segala limpahan rahmat, kesehatan, keselamatan, dan ilmu yang Allah SWT berikan kepada penulis hingga mampu menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul:

SIMULASI PENGENDALIAN FREKUENSI BEBAN DENGAN BERBASIS LOGIKA FUZZY PADA TURBIN GAS

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, tidak terlepas dari semua pihak yang turut membantu baik moril maupun materiil. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Agus Muhamad Hatta,ST,MT,Msi,Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.,selaku dosen pembimbing yang dengan sabar membimbing, memberikan saran dan kritiknya.
3. Ibu Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.kes, selaku ketua penguji atas saran dan kritiknya.
4. Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, MSc, selaku penguji atas bimbingan materi, saran dan kritiknya.
5. Orang tua penulis, serta kakak yang selalu mendoakan dan memberi semangat.
6. Sahabat IFC atas memberikan semangat dan dukungannya.
7. Teman-teman angkatan 2011 terutama ria dan guntar yang selalu memberikan saran dan motivasinya.
8. Teman-teman lintas jalur terutama buat rio,khamim,shita, ary,rosy, ninin, angkik, erwinda, gesang, berlian, mbak amboro dan P1000 dll atas bantuannya dan sarannya.
9. Mbak andan yang selalu menemani dari ke perak sampai pasuruan buat ngurus surat dan kembali ke surabaya, memberikan semangat dan motivasinya.

10. Buat mas senior SMA jurusan lintas jalur elektro yang memberikan informasi.

Demikian laporan tugas akhir ini dibuat dengan sebaik-baiknya. Semoga laporan ini bermanfaat bagi semua pihak, khususnya untuk kemajuan industri di Indonesia.

Surabaya, Juli 2016

Penulis,

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR NOTASI	xx
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	4
BAB II TEORI PENUNJANG	
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas	5
2.1.1 Prinsip Kerja PLTG	5
2.1.2 Siklus PLTG	5
2.2 Gas Turbin	9
2.3 <i>Combustion Chamber</i>	10
2.4 Kompresor Udara	11
2.5 Generator	12
2.6 Pengaturan Frekuensi dan Daya Aktif	14
2.7 Governor	15
2.8 Speed Droop Governor	15
2.9 Fuzzy Logic Controller	17
2.9.1 Fuzzifikasi	18
2.9.2 Evaluasi aturan	18
2.9.3 Defuzzifikasi	18
2.9.4 Basis Data	19
2.10 Gain Scheduling	19
2.11 Karakteristik Performansi	20
2.12 Metode Ziegler-Nichlos	21

2.13 Penerapan Pengendali PID	22
2.13.1 Pengendali <i>Propotional</i>	22
2.13.2 Pengendali Integral	23
2.13.3 Pengendali Differential	24
2.14 Pengendali PID	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Produser Umum Penelitian	27
3.2 Pengambilan Data	29
3.3 Pemodelan Pada Turbin Gas dan Rotor	30
3.4 Pemodelan Frekuensi Beban	31
3.5 Pemodelan Aktuator	31
3.6 Kendali Speed Governor	32
3.7 Sistem Pengendalian Frekuensi Beban	33
3.8 Simulasi Pengendalian Frekuensi Beban	35
3.9 Kendali Logika Fuzzy	38
3.10 Simulasi Fuzzy dengan Frekuensi Beban	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Uji Speed Pada Rotor	43
4.1.1 Uji Dengan Speed Governor	43
4.1.2 Uji Dengan PID Gain Schedulling	45
4.2 Uji Speed Pada Rotor Dengan disturbance	46
4.2.1 Uji Speed dengan Disturbance 0,1p.u	46
4.2.2 Uji Speed dengan Disturbance 0,2p.u	49
4.3 Uji Pengendalian Frekuensi Beban	52
4.3.1 Uji dengan Speed Governor	52
4.3.2 Uji dengan PID gain Schedulling	54
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Siklus Brayton Terbuka	6
Gambar 2.2	Siklus Brayton Tertutup	6
Gambar 2.3	Diagram T-S Siklus Brayton	7
Gambar 2.4	Diagram P-V Siklus Brayton	9
Gambar 2.5	Gas Turbin	10
Gambar 2.6	Diagram blok Governor	15
Gambar 2.7	Skema Speed Droop	16
Gambar 2.8	Struktur Dasar Logika Fuzzy	17
Gambar 2.9	Fungsi Keanggotaan Segitiga	18
Gambar 2.10	Logika fuzzy PID Gain Schedulling	20
Gambar 2.11	Karakteristik Performansi	21
Gambar 2.12	Diagram Blok Pengendali <i>Proportional</i>	22
Gambar 2.13	Kurva Sinyal Kesalahan dan Sinyal Pengendali	24
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 3.2	Skema Sistem pengendalian frekuensi beban untuk sinyal besar	34
Gambar 3.3	Skema Sistem pengendalian frekuensi beban untuk sinyal kecil	34
Gambar 3.4	Simulink Kendali speed governor dengan keluaran speed pada rotor	35
Gambar 3.5	Simulink Kendali PID dengan keluaran speed pada rotor	36
Gambar 3.6	Simulink frekuensi beban dengan kendali speed governor	37
Gambar 3.7	Simulink frekuensi beban dengan kendali PID	38
Gambar 3.8	Perancangan kontrol logika fuzzy pada frekuensi beban	39
Gambar 3.9	Membership function ke 3 fungsi keanggotaan.	39
Gambar 3.10	Simulink fuzzy dengan pengendalian frekuensi beban	41
Gambar 3.11	Hasil rule PID gain schedulling	42

Gambar 4.1	Hasil respon uji speed pada rotor dengan kendali speed governor	44
Gambar 4.2	Hasil respon uji speed pada rotor dengan kendali PID gain schedulling Fuzzy	45
Gambar 4.3	Hasil respon uji speed pada rotor dengan disturbance sebesar torsi load 0,1 p.u dengan kendali speed governor	47
Gambar 4.4	Hasil respon uji speed pada rotor dengan disturbance torsi load sebesar 0,1 p.u dengan kendali PID gain schedulling Fuzzy	48
Gambar 4.5	Hasil respon uji speed pada rotor dengan disturbance torsi load sebesar 0,2 p.u dengan speed governor	50
Gambar 4.6	Hasil respon uji speed pada rotor dengan disturbance torsi load sebesar 0,2 p.u dengan kendali PID gain schedulling Fuzzy	51
Gambar 4.7	Hasil Uji Pengendalian frekuensi beban dengan kendali speed governor.	53
Gambar 4.8	Hasil Uji Pengendalian frekuensi beban dengan kendali PID.	54
Gambar 4.9	Hasil Uji Pengendalian frekuensi beban dengan kendali PID gain schedulling	55

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Rincian Data <i>Plant</i>	29
Tabel 3.2	Parameter PID dengan metode ZN	37
Tabel 3.3	Interval fungsi keanggotaan error dan delta error pengendalian frekuensi beban	40
Tabel 3.4	Parameter nilai K_p , K_i , K_d range untuk keluaran PID gain scheduling	40
Tabel 3.5	<i>Rule base</i> pengendalian frekuensi beban	41
Tabel 4.1	Hasil Performansi uji speed pada rotor dengan kendali speed governor	44
Tabel 4.2	Performansi uji speed pada rotor dengan PID gain scheduling fuzzy	46
Tabel 4.3	Hasil Performansi uji speed pada rotor dengan disturbance torsi load 0.1 p.u dengan kendali speed governor	47
Tabel 4.4	Performansi uji speed pada rotor dengan PID gain scheduling fuzzy dengan beban torsi load 0.1 p.u	49
Tabel 4.5	Hasil Performansi uji speed pada rotor dengan b disturbance torsi load sebesar 0,2 p.u dengan spees governor	50
Tabel 4.6	Performansi uji speed pada rotor dengan PID gain scheduling fuzzy dengan beban 0.2	52
Tabel 4.7	Performansi uji pengendalian frekuensi beban dengan kendali speed governor	53
Tabel 4.8	Performansi uji pengendalian frekuensi beban dengan PID gain scheduling	55

DAFTAR NOTASI

W	gain 1/droop
X	lead time compensator
Y	lag time compensator
Z	control mode
ΔP_{reff}	change in power reference setting (p.u)
$1/R$	governor droop setting (Hz/p.u Mw)
N	turbine rotor speed (p.u)
VCE	governor output (p.u)
f_d	keluaran dari bahan bakar
e_1	keluaran valve positioner (p.u)
a	valve positioner constant
b	valve positioner constant
c	valve positioner constant
f_s	keluaran fuel system
t_f	time constant fuel system
f_d	keluaran dari bahan bakar
Wf	karakteristik dinamik turbin gas
t_{cd}	time constant compressor volume discharge
f_s	diperoleh dari valve positioner dan fuel system.
T_d	<i>Keluaran turbin berupa torsi</i> (p.u)
N	Kecepatan putar (p.u)
Δf	Perubahan sistem frekuensi
T_l	Load torque (p.u)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada sistem Pembangkit tenaga listrik dalam pengoperasiannya banyak menemui berbagai permasalahan. Salah satu permasalahan yaitu pemakaian tenaga listrik selalu berubah dari waktu ke waktu, biaya bahan bakar yang relatif tinggi serta gangguan kondisi alam dan lingkungan yang sering mengganggu jalannya operasi (Dwi putri anggraini , 2013).

Sistem pembangkit tenaga listrik berfungsi untuk membangkitkan energi listrik melalui berbagai macam pembangkit tenaga listrik. Salah satu sistem pembangkit tenaga listrik yaitu pembangkit listrik tenaga gas. Bagian utama dari pembangkit listrik tenaga gas yaitu kompressor, *combustion chamber*, gas turbin-generator.

Pembangkit listrik tenaga gas memerlukan stabilitas sistem dari setiap komponen sistem pembangkit tenaga listrik. Hal ini dikarenakan setiap komponen pembangkit listrik tenaga gas harus mampu memenuhi kebutuhan tenaga listrik dari konsumen (Sardono 2013).

Salah satu penelitian tentang stabilitas sistem pembangkit tenaga listrik yaitu Azadeh Mansouri “*A Hybrid PSO-Fuzzy-PID Controller For Gas Turbine Speed Control*” menjelaskan bahwa penelitiannya bertujuan untuk menjaga kecepatan turbin dan gas buang dalam interval yang diinginkan selama proses startup dan kondisi operasi. Dari hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa respon dari kendali PSO-Fuzzy-PID efektif dibandingkan dengan kendali yang lain. Dyah Putri Angriani dalam penelitian berikut “Pengendalian Frekuensi dengan Menggunakan Kontrol Fuzzy Prediktif pada Simulator Plant Turbin-Generator pada PLTU” menjelaskan bahwa kestabilan sangat dibutuhkan pada proses pembangkit sehingga sistem pengendalian digunakan untuk menjaga variabel tetap stabil. Hasil dari penelitian ini dengan menggunakan kontrol fuzzy prediktif sebagai frekuensi, diperoleh error dapat direduksi sebesar 1.04% (Azadeh 2013).

Penelitian pada tugas akhir ini akan melakukan perancangan sistem pengendalian pada komponen sistem tenaga listrik yang pada pembangkit listrik tenaga gas yaitu sistem pengendalian frekuensi beban, dimana sistem ini memiliki peranan yang sangat penting dalam meningkatkan efisiensi dari daya yang dibangkitkan meskipun ada beban pada sistem. Jika daya yang dibangkitkan dalam sistem lebih kecil dari beban yang diminta, maka frekuensi akan turun. Oleh karena itu pada penelitian tugas akhir ini di rancang simulasi suatu sistem pengendalian frekuensi beban dengan berbasis logika fuzzy pada turbin gas.

1.2 Rumusan Permasalahan

Permasalahan yang muncul dalam tugas akhir ini adalah

- a. Bagaimana merancang pengendalian frekuensi beban berbasis logika fuzzy pada turbin gas.
- b. Bagaimana menentukan rule sistem kendali fuzzy pada turbin gas.
- c. Apakah performansi respon sistem kendali sudah memenuhi kriteria.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini antara lain:

- a. Parameter pada model plant diperoleh dari data jurnal.
- b. Variabel yang dikendalikan yaitu beban frekuensi pada turbin gas dan variabel yang dimanipulasi yaitu laju bahan bakar.
- c. Sistem pengendali menggunakan logika fuzzy takagi sugeno.
- d. Software yang digunakan yaitu matlab.

1.4 Tujuan

Pada tugas akhir ini tujuan yang ingin dicapai adalah

- a. Untuk merancang pengendalian frekuensi beban berbasis logika fuzzy pada gas turbin.
- b. Untuk menentukan rule sistem kendali fuzzy dengan merubah-ubah membership function.

- c. Untuk mendapatkan performansi sistem pengendalian frekuensi beban berbasis logika fuzzy sesuai yang diharapkan dengan melihat maks. overshoot, settling time, rise time, dll.

Halaman sengaja dikosongkan

BAB II DASAR TEORI

2. 1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

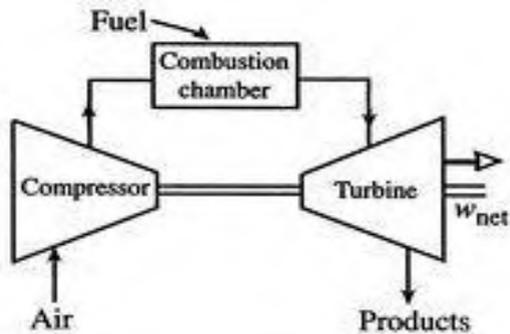
Sistem pembangkit tenaga listrik berfungsi untuk membangkitkan energi listrik melalui berbagai macam pembangkit tenaga listrik. Salah satu sistem pembangkit tenaga listrik yaitu pembangkit listrik tenaga gas. Pembangkit listrik tenaga gas merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan udara dan gas yang bertekanan yang dapat menggerakkan sudu-sudu gas turbin. Bagian utama dari pembangkit listrik tenaga gas ini meliputi kompresor, *combustion chamber*, gas turbin-generator (Murty,2010).

2.1. 1 Prinsip Kerja PLTG

Prinsip kerja PLTG yaitu udara masuk ke dalam kompresor melalui saluran masuk udara (inlet). Udara dikompresor akan dikompresi menjadi udara yang bertekanan tinggi dan masuk ke dalam ruang bakar (*combustion chamber*). Di dalam ruang bakar udara dan bahan bakar disemprotkan sehingga bahan bakar dan udara tercampur dan akan terjadi proses pembakaran. Proses pembakaran ini berlangsung dalam keadaan tekanan konstan dan temperature tinggi. Gas hasil pembakaran sebagian akan dialirkan ke turbin untuk mendorong sudu-sudu turbin dan sisanya akan dibuang melalui exhaust. Daya yang dihasilkan oleh gas turbin akan digunakan untuk memutar kompresor dan memutar beban yaitu generator dll.

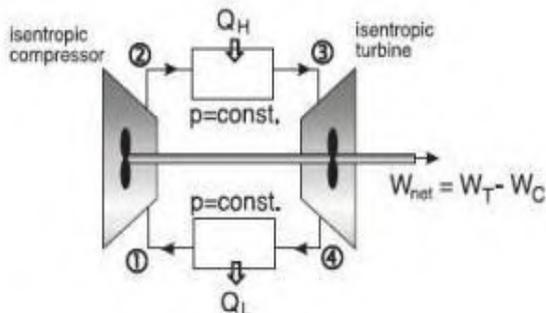
2.1. 2 Siklus PLTG

Siklus yang di pakai pada PLTG yaitu siklus brayton. Klasifikasi siklus brayton dibagi menjadi dua yaitu siklus brayton tertutup dan terbuka. Gambar 2.1 dan gambar 2.2 merupakan gambar siklus brayton terbuka dan tertutup:



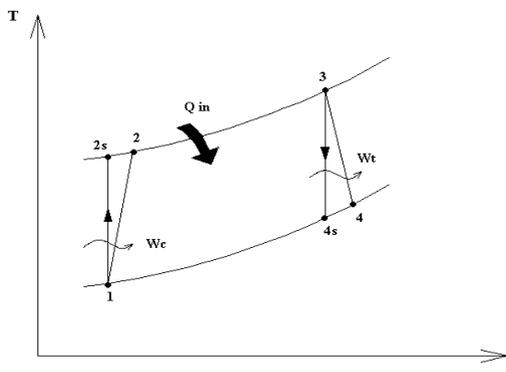
Gambar 2. 1 Siklus Brayton Terbuka (Murty,2010).

Pada gambar 2.1 di atas merupakan siklus brayton terbuka. Proses kerja siklus ini yaitu udara dikompresor akan dikompresi menjadi udara yang bertekanan tinggi dan masuk kedalam ruang bakar (*combustion chamber*). Didalam ruang bakar udara akan disemprotkan dengan bahan bakar sehingga tercampur antara bahan bakar dan udara dan akan terjadi proses pembakaran. Proses pembakaran ini berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga ruang bakar hanya untuk menaikkan temperature. Gas panas hasil pembakaran akan diekspansi didalam turbin yang akan menghasilkan gas sisa dengan temperature yang cukup tinggi dan tekanan lebih tinggi dari tekanan atmosfer. Kemudian hasil gas sisa tersebut dibuang melalui exhaust.



Gambar 2. 2 Siklus Brayton Tertutup (Murty,2010).

Pada gambar 2.2 di atas merupakan siklus brayton tertutup. Proses siklus ini, dimana udara dikompresor akan dikompresi menjadi udara yang bertekanan tinggi dan masuk kedalam ruang bakar (*combustion chamber*). Didalam ruang bakar udara akan disemprotkan dengan bahan bakar sehingga tercampur antara bahan bakar dan udara dan akan terjadi proses pembakaran. Proses pembakaran ini berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga ruang bakar hanya untuk menaikkan temperature. Gas panas yang dihasilkan pembakaran diekspansi didalam turbin akan menghasilkan gas sisa dengan temperature yang tinggi dan tekanan yang lebih tinggi dari tekanan atmosfir. Kemudian gas sisa ini dialirkan ke dalam penukaran panas (*heat rejected*) untuk didinginkan dengan menggunakan media pendingin air dan dialirkan kedalam kompresor untuk dikompresi lagi.



Gambar 2. 3 Diagram T-S Siklus Brayton (Murty,2010).

Gambar 2.3 menunjukkan diagram T-S pada siklus brayton terbuka yaitu:

- Proses dari 1 ke 2 merupakan proses kompresi isentropik, pada proses ini kerja dibutuhkan oleh kompresor. Persamaan kerja ditunjukkan dalam persamaan 2.1.

$$W_c = ma(h_2 - h_1) \quad (2.1)$$

Dimana W_c merupakan kerja turbin (joule), \dot{m}_a merupakan laju aliran massa udara (kg/s), (h_2-h_1) merupakan selisih entalpi dari titik 1 ke titik 2.

- Proses dari 2 ke 3 merupakan proses masuknya bahan bakar pada tekanan konstan. Persamaan jumlah bahan bakar ditunjukkan dalam persamaan 2.2.

$$Q_a = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_3 - h_2) \quad (2.2)$$

Dimana Q_a merupakan jumlah bahan bakar, \dot{m}_a merupakan laju aliran massa udara (kg/s), \dot{m}_f merupakan laju aliran massa bahan bakar (kg/s), (h_3-h_2) merupakan selisih entalpi dari titik 3 ke titik 2.

- Proses dari 3 ke 4 merupakan proses ekspansi isentropik dalam turbin, pada proses ini daya dibutuhkan oleh turbin. Persamaan daya ditunjukkan dalam persamaan 2.3.

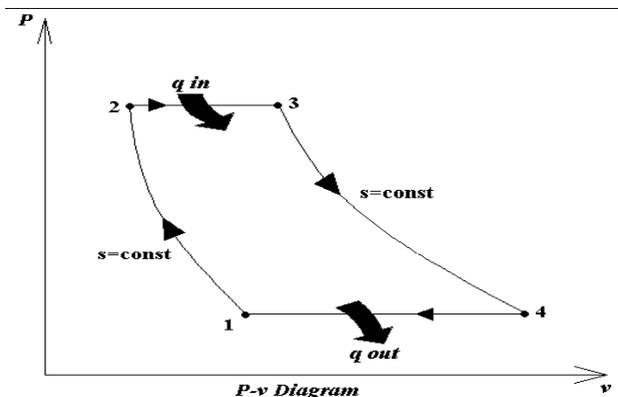
$$W_T = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_3 - h_4) \quad (2.3)$$

Dimana W_T merupakan daya turbin (PU), \dot{m}_a merupakan laju aliran massa udara (kg/s), \dot{m}_f merupakan laju aliran massa bahan bakar (kg/s), (h_3-h_4) merupakan selisih entalpi dari titik 3 ke titik 4.

- Proses dari 4 ke 1 merupakan proses pembuangan panas pada tekanan konstan ke udara. Persamaan jumlah kalor ditunjukkan dalam persamaan 2.4.

$$Q_R = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_4 - h_1) \quad (2.4)$$

Dimana Q_R merupakan jumlah kalor (kJ/kg), \dot{m}_a merupakan laju aliran massa udara (kg/s), \dot{m}_f merupakan laju aliran massa bahan bakar (kg/s), (h_4-h_1) merupakan selisih entalpi dari titik 4 ke titik 1.



Gambar 2. 4 Diagram P-V Siklus Brayton (Murty,2010).

Gambar 2.4 menunjukkan persamaan diagram P-V pada siklus brayton tertutup yaitu:

$$\eta = \frac{(Q_{1-2}) - (Q_{4-1})}{Q_{1-2}} \quad (2.5)$$

$$= 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1}}$$

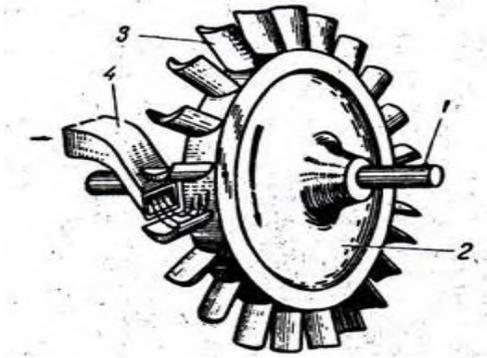
Dimana :

- Q_{1-2} = energi masuk (kg/s)
- Q_{4-1} = energi keluar (kg/s)
- V_2/V_1 = rasio kompresi (m²)
- K = specific heat ratio udara (1,3-1,4)
- η = efisiensi siklus brayton

2. 2 Gas Turbin

Gas turbin merupakan gas panas dari hasil pembakaran untuk mendorong sudu-sudu turbin yang mengakibatkan daya putaran turbin menggerakkan generator. Gas turbin merubah energi panas menjadi energi kinetik. Perubahan terjadi ketika gas panas melewati sudu diam dan sudu bergerak. Ketika melewati sudu diam tekanan gas turun, namun kecepatan naik. Sedangkan saat

mendorong sudu bergerak tekanan dan kecepatan turun (Mohanty, 2014).



Gambar 2. 5

Konstruksi sederhana Turbin gas (Mohanty, 2014).

Pada gambar 2.5 di atas menunjukkan bagian yang ditandai dengan nomor 1 yaitu poros, komponen utama tempat dipasangnya cakram-cakram sepanjang sumbu dimana poros berhubungan langsung dengan generator. Nomor 2 yaitu cakram, tempat sudu-sudu dipasang secara radial pada poros. Nomor 3 yaitu sudu-sudu turbin gas yang berfungsi sebagai penerima gaya dari gaya kinetik uap melalui nozzel. Nomer 4 yaitu nozzel, yang berfungsi sebagai media ekspansi uap yang merubah energi potensial menjadi energi kinetik.

2. 3 *Combustion Chamber*

Combustion Chamber merupakan tempat terjadinya proses pembakaran antara bahan bakar dan udara. Dimana hasil dari *combustion chamber* yaitu berupa gas panas bertekanan tinggi yang akan masuk ke dalam gas turbin. Untuk mendapatkan gas yang bertekanan tinggi dipengaruhi oleh proses pembakaran sempurna pada *combustion chamber*. Dalam proses pembakaran sempurna diperlukan *ratio control* antara bahan bakar dan udara. Dibawah ini adalah persamaan ruang pembakaran : (Edalane, 2011)

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} + \dot{m}_{akh} \quad (2.6)$$

Kesetimbangan massa:

$$V_{cc} \frac{d\rho}{dt} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel} - \dot{m}_{fuel\ gas} \quad (2.7)$$

Kesetimbangan energi:

$$\frac{d(M_{cc} U_{cc})}{dt} = \dot{m}_{air} h_{air} + \dot{m}_{fuel} LHV - \dot{m}_{fuel\ gas} h_{fuel\ gas} \quad (2.8)$$

- Dimana :
- \dot{m}_{air} = laju massa udara dari kompresor yang masuk ke ruang bakar (kg/s)
 - \dot{m}_{fuel} = laju massa bahan bakar yang masuk ke ruang bakar (kg/s)
 - $\dot{m}_{fuel\ gas}$ = laju massa gas yang masuk ke ruang bakar (kg/s)
 - M_{cc} = total massa bahan bakar gas, minyak, udara di dalam ruang bakar(kg)
 - U_{cc} = energi spesifik internal di dalam ruang bakar(J)
 - LHV = low heating value (Kcal/nm³)
 - h_{air} = specific entalpi udara (J/kg)
 - $h_{fuel\ gas}$ = specific entalpi bahan bakar gas (J/kg)
 - V_{cc} = volume (m³)

2. 4 Kompresor Udara

Kompresor merupakan salah satu bagian utama dari pembangkit listrik tenaga gas (PLTG). Kompresor yang digunakan adalah jenis aksial karena mempunyai efisiensi yang tinggi. Prinsip dasarnya kompresor berputar, sehingga kompresor menghisap udara atmosfer dan merubah menjadi udara yang bertekanan tinggi untuk proses pembakaran pada *combustion chamber*. Dibawah ini merupakan persamaan kompresor: (Edalane, 2011)

Rasio kompresi pada kompresor:

$$r_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.9)$$

Dimana r_p merupakan rasio kompresi, P_{out} adalah tekanan setelah dikompresi(Pa), p_{in} adalah tekanan awal sebelum dikompresi(Pa).

Efisiensi isentropic kompresor (η_c):

$$\eta_c = \frac{T_2 - T_1}{T_2' - T_1} \quad (2.10)$$

Dimana T_1 adalah temperature awal kompresor($^{\circ}\text{C}$), T_2 adalah temperature akhir isentropic kompresi($^{\circ}\text{C}$), T_2' adalah temperature akhir isentropic kompresi sebenarnya($^{\circ}\text{C}$).

2. 5 Generator

Generator merupakan sebuah mesin yang mengubah energi gerak(mekanik) menjadi energi listrik. Generator terdiri dari rotor dan stator. Rotor merupakan bagian yang berputar, sedangkan stator bagian yang diam. Apabila diberi tegangan dan arus searah, kumparan rotor rangkaian tertutup dari suatu penghantar akan menimbulkan fluks magnet (Nurmayady, 2010).

Sebuah generator digerakkan oleh penggerak mula (turbin uap, turbin air, turbin gas) yang menggambarkan perputaran dengan 2 torsi berputar yang berbeda. T_m (torsi mekanik) yang berperan untuk menambah kecepatan ketika T_e (torsi elektrik) melakukan perlambatan. Ketika T_m dan T_e mempunyai nilai yang sama, kecepatan putaran ω akan konstan. Pergerakan T_m disebabkan oleh penggerak mula. Penggerak T_e disebabkan oleh perubahan beban. Ketika beban listrik $T_e > T_m$ seluruh sistem yang berputar akan melambat. Jika dibiarkan melambat terlalu lama maka akan menimbulkan beberapa kerusakan. Oleh karena itu, diperlukan suatu usaha untuk meningkatkan T_m sehingga tercapai kembali titik keseimbangan antara T_e dan T_m . Hal ini akan mengembalikan putaran ke nilai yang dapat diterima.

Mesin tunggal merupakan sebuah mesin dalam generator yang mensuplai daya ke suatu beban tanpa dibantu oleh mesin lain. Pemodelan generator terdiri dari dua bagian, persamaan medan magnet dan persamaan torsi. Pemodelan pada penelitian

yang berkaitan hanya pemodelan dengan persamaan torsi., dalam hal ini persamaan ayunan. Model generator yang akan digunakan yaitu sebatas pada persamaan gerak yang mengatur gerakan rotor pada generator tersebut. Persamaan 2.11 yaitu prinsip dasar dalam pergerakan yang menyatakan bahwa torsi percepatan merupakan hasil kali dari momen kelembapan rotor dan percepatan sudut.

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_\alpha = T_m - T_e \quad (2.11)$$

Persamaan 2.12 merupakan jika generator serempak dibangkitkan oleh torsi elektrik dalam keadaan berputar pada kecepatan serempak.

$$T_\alpha = T_m - T_e \quad (2.12)$$

Persamaan 2.13 berlaku untuk daya akselerasi

$$P_\alpha = P_m - P_e \quad (2.13)$$

Dimana P_m merupakan daya mekanik dan P_e merupakan daya elektrik yang dibangkitkan oleh generator. Secara umum daya merupakan perkalian torsi dengan kecepatan sudut.

$$P_\alpha = T_\alpha \omega = I_\alpha \omega = M_\alpha \quad (2.14)$$

$$\text{Dimana } \alpha = \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

Karena θ (sudut pergeseran) diukur pada sumbu diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu berputar dengan kecepatan sinkron dengan persamaan dibawah ini:

$$\theta = \omega_s t + \delta \quad (2.15)$$

Derivative terhadap waktu, maka :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta}{dt} \quad (2.16)$$

Derivative lagi, maka :

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (2.17)$$

Dari persamaan tersebut disubstitusikan menjadi:

$$M \frac{d^2 \theta}{dt^2} = P_\alpha = P_m - P_e \quad (2.18)$$

Bila P_α dalam satuan per unit (pu) dengan gangguan kecil maka persamaan menjadi sebagai berikut:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.19)$$

Persamaan mekanik pada rotor dituliskan di persamaan 2.19, dengan H adalah momen inersia dapat dituliskan kembali dalam bentuk persamaan 2.20 sebagai berikut:

$$\frac{d(\Delta\omega_r)}{dt} = \frac{1}{2H} (P_m - P_e) \quad (2.20)$$

Persamaan 3.3 merupakan kecepatan rotor dinyatakan dalam satuan per unit sebagai berikut:

$$\frac{d\Delta\omega_s}{dt} = \frac{1}{2H} (P_m - P_e) \quad (2.21)$$

Dengan menggunakan transformasi laplace menjadi:

$$\Delta\omega_r(s) = \frac{1}{2H} (P_m - P_e) \quad (2.22)$$

persamaan 2.22 dapat dinyatakan menjadi persamaan 2.23 sebagai berikut:

$$\Delta\omega_r(s) = \frac{1}{T_1 s} \quad (2.23)$$

2. 6 Pengaturan Frekuensi dan Daya Aktif

Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan nilai frekuensi sistem. Penyediaan daya aktif harus sesuai dengan kebutuhan daya aktif beban. Penyesuaian daya aktif dilakukan dengan mengatur kopel penggerak generator, sehingga tidak ada pemborosan penggunaan daya (Patriandri, 2010).

Sistem tenaga listrik digunakan generator tiga fasa untuk pembangkit tenaga listrik yang utama. Maka dari itu kendali frekuensi sistem tergantung pada karakteristik generator sinkron. Menurut Hukum Newton hubungan antara kopel mekanik penggerak generator dengan putaran generator dapat dilihat pada persamaan 2.24 sebagai berikut:

$$(T_g - T_b) = H \times \frac{\partial\omega}{\partial t} \quad (2.24)$$

Dimana: T_g = kopel penggerak generator
 T_b = kopel beban yang membebani generator
 H = momen inersia
 ω = kecepatan sudut putar

Frekuensi akan turun jika daya aktif yang dibangkitkan tidak memenuhi kebutuhan beban. Frekuensi akan naik jika kelebihan daya aktif dalam sistem. Dibawah ini secara mekanisnya sebagai berikut:

$$(T_g - T_b) = \Delta T < 0 \text{ maka } \frac{\partial \omega}{\partial t} < 0, \text{ sehingga frekuensi turun}$$

$$(T_g - T_b) = \Delta T > 0 \text{ maka } \frac{\partial \omega}{\partial t} > 0, \text{ sehingga frekuensi naik}$$

2.7 Governor

Governor berfungsi untuk mengendalikan putaran pada turbin gas dengan cara mengukur kecepatan putar poros generator, hal ini dikarenakan frekuensi yang dihasilkan generator sebanding dengan kecepatan putar poros generator.

Untuk mempermudah penjelasan mengenai prinsip kerja dari governor, maka diperlukannya diagram blok fungsi alih governer (gambar 2.6). Keluaran $C(s)$ diumpan balik ke titik penjumlahan untuk dibandingkan dengan masukan $R(s)$. Keluaran blok $C(s)$ diperoleh dengan mengalihkan fungsi alih $G(s)$ dengan masukan blok $E(s)$ (Sardono, 2013).

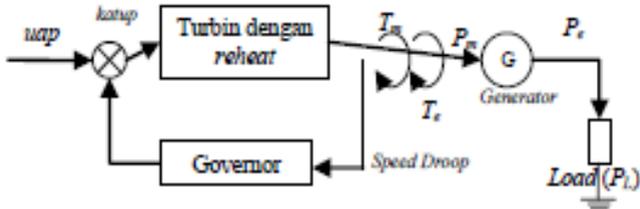


Gambar 2.6 Diagram blok Governor (Sardono, 2013).

2.8 Speed droop Governor

Speed droop merupakan bilangan prosentasi yang menyatakan kepekaan turbin yang merespon perubahan frekuensi. Semakin kecil nilai prosentasi speed droop, maka semakin peka terhadap perubahan frekuensi. Sedangkan semakin besar nilai

prosentase speed droop, maka semakin sulit merespon perubahan frekuensi. Dibawah ini merupakan diagram blok speed droop governer (Patriandri, 2010).



Gambar 2.7 Skema speed droop governer (Patriandri, 2010).

Gambar 2.7 di atas menunjukkan skema speed droop governer yang terdiri dari T_m (Torsi mekanik), T_e (Torsi elektrik), P_m (daya mekanik) yang dibangkitkan oleh turbin gas. Speed droop menentukan hubungan antara sinyal pengendalian putaran dengan output beban yang dibangkitkan oleh generator, dan dinyatakan dengan persamaan 2.21 sebagai berikut:

$$\text{Speed droop} = \frac{R1 - R2}{R} \times 100\% \quad (2.21)$$

Dimana:

R = Putaran nominal

R1 = Putaran tanpa beban

R2 = Putaran beban penuh

Semakin kecil nilai speed droop dari governer, maka semakin peka terhadap perubahan beban. Jika semisal pada suatu pembangkit memiliki nilai speed droop sebesar 5% maka dapat dihitung sebagai berikut:

$$5\% = 0.05 \times 50\text{Hz} = 2.5 \text{ Hz}$$

Dimana yang artinya sistem tersebut dibatasi untuk penurunan frekuensi maksimal 2.5 Hz dari batas nominal 50 Hz.

2. 9 Fuzzy Logic Controller

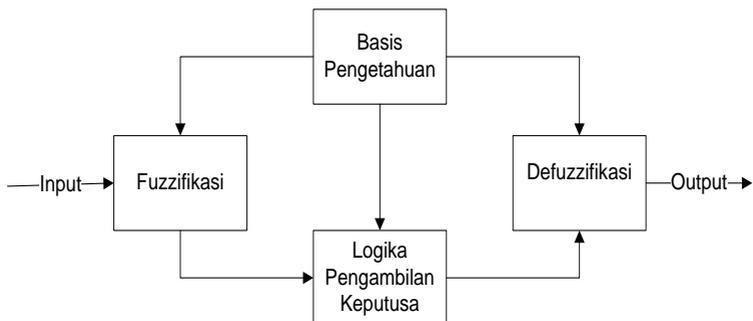
Logika fuzzy merubah konsep logika klasik menjadi konsep yang memetakan suatu variable pada kemungkinan yang tidak eksak sehingga dapat sistem linguistic dan permasalahan yang tidak pasti atau tidak presisi serta permasalahan probabilitas. Beberapa factor penting yang menjadi bahasan dalam logika *fuzzy* sebagai berikut: (Setyawan, 2011)

- Himpunan fuzzy

Himpunan Crisp dapat dinyatakan sebagai nilai yang sebenarnya untuk menyatakan konsep relative, misal seperti kecepatan dan posisi. Didalam penggunaannya, himpunan ini sangatlah terbatas dan berbeda dengan ekspresi linguistic. Himpunan fuzzy memberikan kerangka untuk menyatakan ekspresi pendekatan variable linguistic diatas.

- Struktur dasar logika fuzzy

Pada dasarnya struktur logika fuzzy dapat digambarkan seperti berikut:



Gambar 2. 8 Struktur Dasar Logika Fuzzy (Setyawan, 2011)

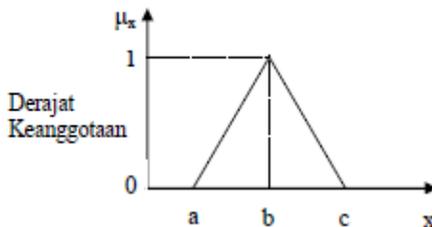
Gambar 2.8 di atas menunjukkan struktur dasar logika fuzzy yang terdiri dari fuzzifikasi, defuzzifikasi, basis data, dan logika pengambilan keputusan yang di jelaskan sebagai berikut:

2.9. 1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan suatu proses yang mengubah masukan dari bentuk tegas (*Crisp*) menjadi peubah fuzzy (*Variabel Linguistic*) yang biasanya disajikan dalam bentuk himpunan-himpunan fuzzy dengan suatu fungsi keanggotaan masing-masing. Proses ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$X = \text{Fuzzifier}(X_0)$$

Dimana X_0 adalah vektor dari nilai crisp untuk satu variabel input dari proses. X merupakan vektor dari himpunan fuzzy untuk variabel tersebut. Sedangkan fuzzifier adalah suatu operator fuzzifikasi dengan efek yang memetakan sata crisp ke himpunan fuzzy.



Gambar 2. 9 Fungsi Keanggotaan Segitiga (Setyawan, 2011).

Gambar 2.9 di atas menunjukkan fungsi keanggotaan segitiga yang mengubah masukan dari bentuk tegas menjadi peubah fuzzy seperti batas bawah, batas tengah, batas atas.

2.9. 2 Evaluasi Aturan (*Rule Evaluation*)

Evaluasi aturan disebut juga proses pengambilan keputusan (*Inference*) yang ditetapkan pada basis aturan (*Rule base*) untuk menghabungkan antar peubah-peubah fuzzy masukan dan peubah fuzzy keluaran. Aturan ini berbentuk IF- THEN.

2.9. 3 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah suatu proses perubahan kembali himpunan fuzzy keluaran menjadi himpunan dalam bentuk tegas (*Crisp*). Hal ini dikarenakan *plant* hanya mengenal nilai tegas. Berikut ini bentuk umum defuzzifikasi sebagai berikut:

$$Z_0 = \text{defuzzifier}(z)$$

Dimana Z merupakan aksi pengendali fuzzy. Z_0 merupakan aksi pengendali *crisp*. Defuzzifier merupakan operator defuzzifikasi. Ada beberapa metode defuzzifikasi yang digunakan yaitu metode titik pusat (*center of area*), metode kriteria maksimum (*criterion max*), dan metode titik tengah (*mean of max*).

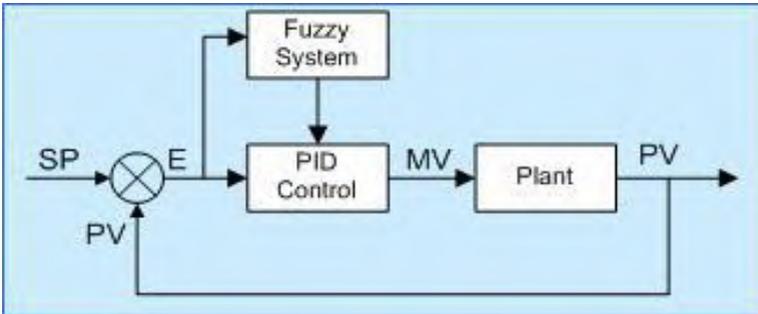
2.9. 4 Basis Data

Basis data berfungsi untuk himpunan-himpunan fuzzy dari sinyal masukan dan sinyal keluaran agar dapat digunakan oleh variabel linguistik dalam basis aturan.

2. 10 Gain Scheduling

Kendali PID adalah algoritma kendali yang banyak digunakan di industri proses karena bentuknya yang sederhana dan mudah diimplementasikan. Kondisi operasi tertentu (misalnya sering terjadi gangguan pada proses atau parameter proses yang berubah-ubah), parameter yang harus dikendalikan harus sering dituning agar kinerjanya tetap baik. Salah satu sistem kendali yang sering dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini yaitu dengan menggunakan metode PID *Gain Scheduling*, dimana parameter kendali diubah secara otomatis jika terjadi perubahan kondisi yang menyebabkan kinerja kendali menurun.

Metode ini dinamakan Fuzzy PID *Gain Scheduling*. Fuzzy ini berfungsi untuk menghitung parameter kontrol PID (K_p , T_i , T_d), berdasarkan kondisi signal error (E) dan perubahan error (ΔE). Diagram fuzzy PID *gain scheduling* kendali dapat digambarkan sebagai berikut: (Balamurugan, 2016)



Gambar 2. 10 Logika fuzzy PID Gain Scheduling (Balamurugan, 2016)

Gambar 2.10 di atas menunjukkan logika fuzzy PID *gain scheduling*. Fuzzy sistem sebagai inputan yang terdiri dari error dan delta error. PID Kontrol yang terdiri nilai K_p , K_i , K_d . Keluaran PID kontrol berupa MV (manipulasi variabel). Kelebihan *gain scheduling* terletak pada responnya yang cepat. Pola konvensional *gain scheduling* merupakan mengembangkan model proses yang terlinearisasi pada beberapa titik operasi dan merancang pengendali liniernya.

2. 11 Karakteristik Performansi

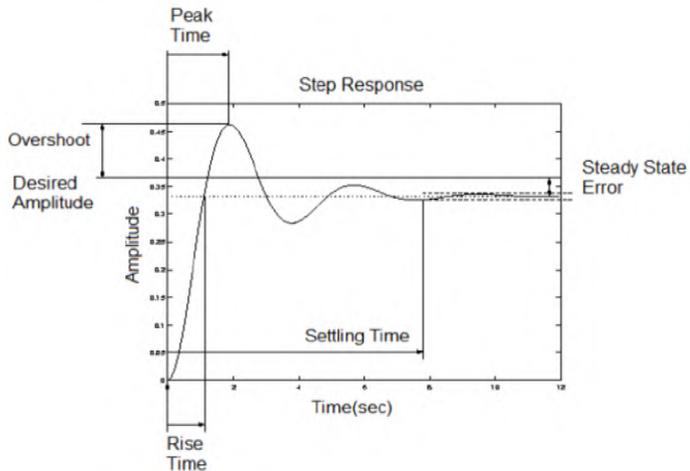
Karakteristik performansi terdiri dari max.overshoot , delay time, settling time, rise time, peak time. untuk menantukkan karakteristik performansi (Gambar 2.12) dapat dilihat dibawah ini macam-macam dari karakteristik performansi: (Ogata, 2009)

- Delay time (T_d) merupakan waktu yang diperlukan untuk mencapai setengah dari nilai akhir pada waktu pertama kali.
- Rise time (T_r) merupakan waktu yang diperlukan untuk naik dari 10 – 90%, 5 – 55%, atau 0 – 100% dari nilai akhirnya. Untuk sistem underdamped : 0 – 100%. Untuk sistem overdamped : 10 – 90%.
- Peak time (T_p) merupakan waktu yang diperlukan untuk mencapai peak pertama dari overshoot.

- Mak.overshoot (M_p) merupakan nilai puncak (peak) maksimum dari kurva respons yang diukur dari satu.

$$\text{maks. over} = \frac{\text{nilai puncak(peak)} - \text{nilai set poin}}{\text{nilai set poin}} \times 100\%$$

- Settling time merupakan waktu yang diperlukan untuk mencapai dan tetap di dalam sebuah range nilai akhir yang ditetapkan oleh persentase absolut dari nilai akhir (biasanya 5% atau 2%).



Gambar 2. 11 Karakteristik performansi (Ogata, 2009)

Gambar 2.12 di atas merupakan untuk mengetahui cara menentukan karakteristik performansi.

2. 12 Metode Ziegler-Nichols

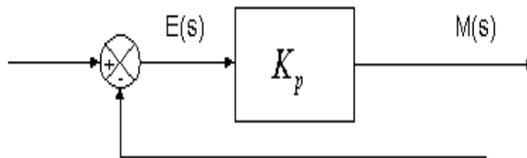
Ziegler-nichols pertama kali memperkenalkan metodenya pada tahun 1942. Metode ini memiliki dua cara yaitu metode osilasi (siklus kontinyu) dan kurva reaksi. Kedua metode ditunjukkan untuk menghasilkan respon sistem dengan lonjakan maksimum sebesar 25% (Protus, 2011).

2. 13 Penerapan Pengendali PID

Sistem pengendali adalah kombinasi dari instrumen dan komponen yang dihubungkan oleh sebuah interaksi untuk melakukan kerjasama dengan tujuan tertentu. Sistem ini dapat berupa sistem fisika, biologi, ekonomi dan sebagainya. Sistem pengendali dapat diaplikasikan pada berbagai bidang, contohnya pada pengendali temperatur, posisi, aliran, tekanan, level dan lain sebagainya. Pada dasarnya pengendali terbentuk dari beberapa fungsi dasar. Hal ini sering disebut sebagai empat fungsi dasar pengendali. Keempat fungsi dasar pengendali tersebut adalah pengukuran (measurement), perbandingan (comparison), koreksi (correction) dan hasil (judgement) (F. Gunterus, 1997).

2.13. 1 Pengendali *Proportional*

Pengendali *proportional* memiliki keluaran yang sebanding dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya). Secara lebih sederhana dapat dikatakan bahwa keluaran pengendali *proportional* merupakan perkalian antara konstanta *proportional* dengan masukannya. Perubahan pada sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya (F. Gunterus, 1997).



Gambar 2. 12 Diagram Blok Pengendali *Proportional* (F. Gunterus, 1997).

Gambar 2.12 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara besaran *setting*, besaran aktual dengan besaran keluaran pengendali *proportional*. Sinyal keasalahan (*error*) merupakan selisih antara besaran *setting* dengan besaran aktualnya. Selisih ini akan mempengaruhi pengendali, untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat

pencapaian harga *setting*) atau negatif (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan). Pengendali *proportional* memiliki 2 parameter, pita *proportional* (*proportional band*) dan konstanta *proportional*. Daerah kerja pengendali efektif dicerminkan oleh pita *proportional*, sedangkan konstanta *proportional* menunjukkan nilai faktor penguatan terhadap sinyal kesalahan (K_p). Ciri pengendali *proportional* harus diperhatikan ketika pengendali tersebut diterapkan pada suatu sistem. Secara eksperimen, penggunaan pengendali *proportional* harus memperhatikan ketentuan sebagai berikut:

1. Bila nilai K_p kecil, pengendali *proportional* hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat.
2. Bila nilai K_p dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai (*steady state*) keadaan mantabnya. Namun jika nilai K_p diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil, atau respon sistem akan berosilasi.

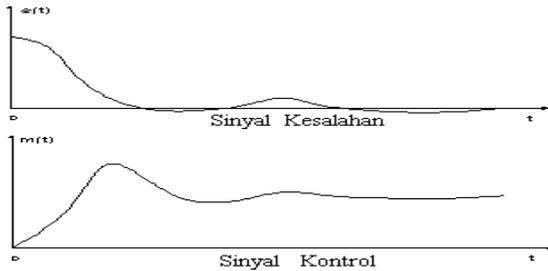
2.13. 2 Pengendali *Integral*

Pengendali *integral* berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap (*steady state*) nol. Jika sebuah *plant* tidak memiliki unsur

integrator $\left(\frac{1}{s}\right)$, pengendali *proportional* tidak akan

mampu menjamin keluaran sistem dengan *error steady state* nol. Dengan pengendali *integral*, respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai *error steady state* nol. Pengendali *integral* memiliki karakteristik seperti halnya sebuah *integral*. Keluaran pengendali sangat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Keluaran pengendali ini merupakan penjumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Jika sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan [10].

Sinyal keluaran pengendali integral merupakan luas bidang yang dibentuk oleh kurva kesalahan penggerak. Sinyal keluaran akan berharga sama dengan harga sebelumnya ketika sinyal kesalahan berharga nol. Gambar 3.13 menunjukkan contoh sinyal kesalahan yang disulutkan ke dalam pengendali *integral* dan keluaran pengendali *integral* terhadap perubahan sinyal kesalahan tersebut (F. Gunterus, 1997).



Gambar 2. 13 Kurva Sinyal Kesalahan dan Sinyal Pengendali (F. Gunterus, 1997).

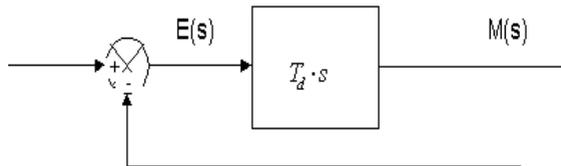
Ketika digunakan, pengendali *integral* mempunyai beberapa karakteristik berikut:

1. Keluaran pengendali membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga pengendali *integral* cenderung memperlambat respon.
2. Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran pengendali akan bertahan pada nilai sebelumnya.
3. Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i .
4. Konstanta integral K_i yang berharga besar akan mempercepat hilangnya *offset*. Tetapi semakin besar nilai konstanta K_i akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran pengendali.

2.13. 3Pengendali *Differential*

Keluaran pengendali differential memiliki sifat seperti halnya suatu operasi derivatif. Perubahan yang mendadak pada masukan pengendali, akan mengakibatkan perubahan yang sangat

besar dan cepat. Gambar 2.14 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara sinyal kesalahan dengan keluaran pengendali (F. Gunterus, 1997).



Gambar 2. 14 Blok Diagram Pengendali Differential (F. Gunterus, 1997).

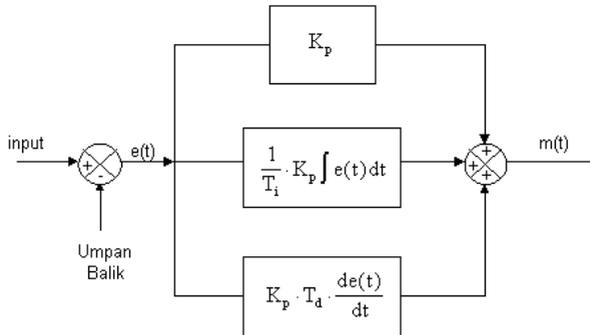
Karakteristik pengendali *differential* adalah sebagai berikut:

1. Pengendali ini tidak dapat menghasilkan keluaran bila tidak ada perubahan pada masukannya (berupa sinyal kesalahan).
2. Jika sinyal kesalahan berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan pengendali tergantung pada nilai T_d dan laju perubahan sinyal kesalahan.
3. Pengendali *differential* mempunyai suatu karakter untuk mendahului, sehingga pengendali ini dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum pembangkit kesalahan menjadi sangat besar. Jadi pengendali differential dapat mengantisipasi pembangkit kesalahan, memberikan aksi yang bersifat korektif dan cenderung meningkatkan stabilitas sistem.

2. 14 Pengendali PID

Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing pengendali P, I dan D dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi pengendali *proportional plus integral plus differential* (pengendali PID). Elemen-elemen pengendali P, I dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang

besar. Karakteristik pengendali PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P, I dan D. Penyetelan konstanta K_p , T_i , dan T_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen (F. Gunterus, 1997).



Gambar 2. 15 Diagram Blok PID (F. Gunterus, 1997).

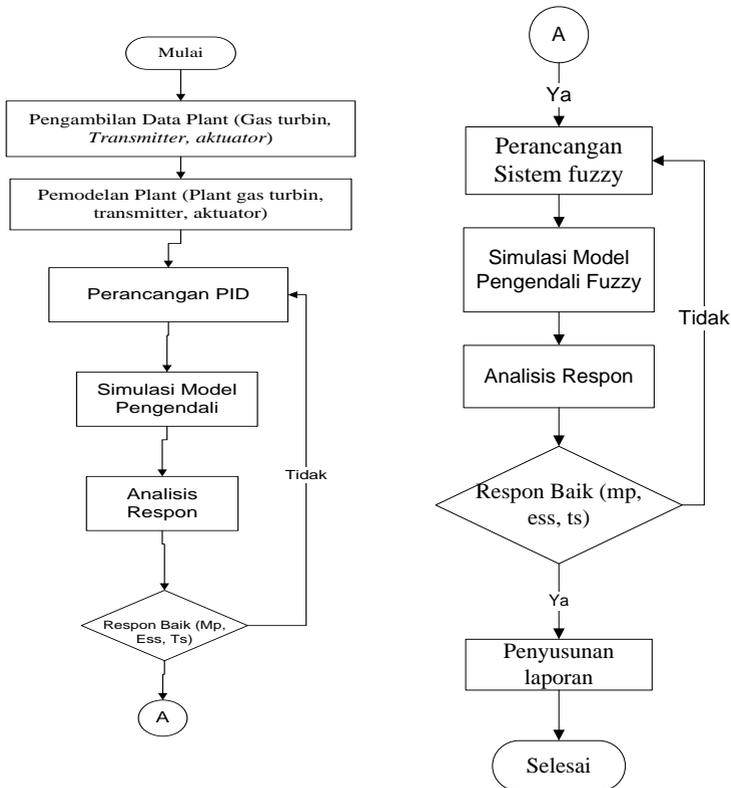
Gambar 2.15 menunjukkan diagram blok PID. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat disetel lebih menonjol dibanding yang lain. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan. Penalaan parameter pengendali PID selalu didasari atas tinjauan terhadap karakteristik yang diatur (*plant*). Dengan demikian betapapun rumitnya suatu plant, perilaku plant tersebut harus diketahui terlebih dahulu sebelum penalaan parameter PID itu dilakukan (F. Gunterus, 1997).

BAB III METODOLOGI

3.1 Prosedur Umum Penelitian

Bab ini menjelaskan mengenai tahapan penelitian yang dilakukan dari mulai pembuatan model sampai sistem perancangan logika fuzzy. Berikut tahapan untuk simulasi kendali dengan sistem logika fuzzy pada gas turbin.

Diagram alir dari penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.1 berikut :



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan gambar 3.1 dapat dijabarkan sebagai berikut :

1. Pengambilan data

Pengambilan data meliputi pengambilan data spesifikasi dari pengendali (*speed governor*), aktuator (*control valve*), *plant* (gas turbine). Spesifikasi data diambil dari beberapa jurnal.

2. Pemodelan *Plant*

Pembuatan model sebagai pembanding sistem dinamik frekuensi beban.

3. Perancangan PID dengan metode Ziegler-Nichols (ZN)

Perancangan Tuning PID dilakukan dengan menggunakan teorema ZN yang dilakukan secara berulang setelah dilakukannya validasi uji open loop.

4. Simulasi Sistem Pengendalian

Simulasi sistem pengendalian ini dengan menggunakan matlab. Dalam simulasi ini digunakan metode ZN dengan menentukan nilai K_p , T_i , T_d .

5. Analisis respon berdasarkan simulasi tuning PID

Untuk mengetahui respon dilakukan simulasi kendali frekuensi beban dengan sistem logika fuzzy.

6. Perancangan Sistem Pengendali Berdasarkan Logika Fuzzy

Perancangan ini dilakukan untuk mendapatkan pengendalian frekuensi beban yang paling stabil dengan menggunakan metode Fuzzy.

7. Simulasi Sistem Pengendalian Fuzzy

Simulasi ini menggunakan matlab. Dalam simulasi ini membuat membership function input dan output, Fuzzyfikasi, Rule base Fuzzy.

8. Analisis respon berdasarkan simulasi sistem logika fuzzy

Untuk menguji performansi dari sistem maka diberikan proses pengendalian frekuensi beban, sehingga didapatkan grafik proses pengendalian suhu dengan metode fuzzy.

9. Penyusunan Laporan

3. 2 Pengambilan Data

Data-data yang dibutuhkan untuk pemodelan *plant* terdapat pada tabel 3.1 dibawah ini. Data tersebut diambil dari beberapa jurnal dan beberapa buku mengenai sistem pengendalian frekuensi beban.

Tabel 3. 1 Rincian Data *Plant*

Notasi	Keterangan dan Sumber	Nilai
W	Gain 1/droop (Balamurugan, 2016)	16,7
X	<i>lead time compensator</i> (Balamurugan, 2016)	0,15
Y	<i>lag time compensator</i> (Balamurugan, 2016)	0,1229
Z	<i>control mode</i> (1=droop, 0=isochronus) (Balamurugan, 2016)	1
t_{cd}	<i>time constant compressor volume discharge</i> (Ramakrishna, 2008).	0,1
1/R(droop)	<i>governor droop setting</i> (Balamurugan, 2016)	2,4
K_p	Sistem daya (Balamurugan, 2016)	100
T_p	Sistem daya (Balamurugan, 2016)	20
a	<i>valve positioner constant</i> (Hannet LN, 1993)	1
b	<i>valve positioner constant</i> (Hannet LN, 1993)	1
c	<i>valve positioner constant</i> (Hannet LN, 1993)	1
t_f	<i>time constant fuel system</i> (Hannet LN, 1993)	0,4
T1	<i>time constant turbin rotor</i> (Balamurugan, 2016)	15,6

3.3 Pemodelan Pada Turbin Gas dan Rotor

Pemodelan plant ditunjukkan pada gambar 3.2 dan gambar 3.3 yang berwarna biru, dengan gas panas sebagai inputan pada turbin gas, yang digunakan untuk mendorong sudu-sudu turbin dan putaran masuk pada rotor. Modelling turbin gas dikembangkan dari Rowen model yang diperoleh dari jurnal (Rowen WI, 1983) dan (Yee Soon Kiat, 2008).

Pengembangan model Rowen pada turbin gas dinyatakan dalam persamaan 3.1.

$$Wf(s) = \frac{1}{t_{cd}s+1} fs(s) \quad (3.1)$$

Dimana:

Wf =keluaran turbin gas yang berupa laju aliran (Kg/s)

t_{cd} =time constant compressor volume discharge
(Ramakrishna, 2008).

$fs(s)$ = diperoleh dari valve positioner dan fuel system pada persamaan 3.4 dan 3.5

Keluaran dari turbin gas berupa torsi yang dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan 3.2.

$$Td(s) = 1,3 * (wf(s) - 0,23) + 0,5 * (1 - N(s)) \quad (3.2)$$

Dimana wf dinyatakan pada persamaan 3.1 dan nilai-nilai persamaan 3.2 merupakan keluaran dari turbin gas yaitu 0,5 (Hannet LN, 1993). 1,3 adalah nilai pressure heat ratio (compressor axial). 0.23 merupakan nilai natural gas (Meherwan P. Beyonce). $(1 - N(s))$ merupakan kecepatan putar turbin gas.

Keluaran dari Td (torsi turbin) yang berupa putaran (Rpm) akan menjadi inputan rotor pada generator tersebut akan menghasilkan kecepatan putaran. Persamaan 3.3 di peroleh dari jurnal (Balamurugan, 2016) merupakan persamaan model torsi yang konversi menjadi kecepatan rotor sebagai berikut:

$$N(s) = \frac{1}{T_1} (T_d - T_l) \quad (3.3)$$

Pada simulasi ($T_d - T_L$) adalah daya mekanik dan daya elektrik yang di bangkitkan oleh generator. Persamaan 3.8 dapat dinyatakan menjadi persamaan 3.4 sebagai berikut:

$$N(s) = \frac{1}{T_1 \cdot s} \quad (3.4)$$

Dimana konstanta T1 pada persamaan 3.5 adalah T1= (2H)

$$= \frac{1}{15,64 \cdot s}$$

3. 4 Pemodelan Frekuensi beban

Pemodelan frekuensi beban merupakan pemodelan kendali frekuensi beban aktif pada kondisi operasi normal. *Input* dari kendali yaitu speed, yang di gunakan untuk menganalisa kendali frekuensi beban yaitu perubahan frekuensi dihitung dari perubahan torsi pada persamaan 3.5 (Elgerd Olle, 1983).

$$\Delta f(s) = \frac{Kp}{1+T_p s} \quad (3.5)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} Kp &= \frac{1}{D} \text{ (Hz/ p.u Mw)} \\ T_p &= \frac{2.H}{f.D} s \\ D &= \frac{\partial P_l}{\partial f} \frac{1}{p_{rl}} \text{ (p.u Mw/Hz)} \end{aligned}$$

Persamaan 3.6 merupakan $\frac{1}{R}$ (Hz/p.u Mw) yaitu governor droop setting (Deepak M, 2014) yang dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{governor droop} = \frac{1}{R} \quad (3.6)$$

Dimana Δf merupakan selisih antara torsi dengan perubahan beban pada sistem frekuensi (p.u), dan Kp merupakan konstanta daya sistem.

3. 5 Pemodelan Aktuator

Pemodelan aktuator dalam hal ini adalah *control valve* ditunjukkan pada gambar 3.2 dan 3.3 yang bertanda merah

(Jurado, 2006). Pemodelan aktuator ini berupa valve positioner dan fuel system. Persamaan 3.7 merupakan persamaan dari persamaan 3.8 dan 3.9 dengan kondisi bahwa bahan bakar yang digunakan pada turbin gas sebesar 77% dan sisanya 23% digunakan untuk operasi lanjut dari turbin gas dari total bahan bakar 100 %.

$$f_d(s) = (0.77 \times VCE) + 0.23) \quad (3.7)$$

Dimana:

$f_d(s)$ = keluaran dari bahan bakar

0.77 = 77% dari bahan bakar

0.23 = 23% dari bahan bakar

Persamaan 3.8 merupakan keluaran valve positioner yang berupa laju aliran bahan bakar gas (Kg/s) dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$e_1(s) = \frac{a}{ab+c} f_d(s) \quad (3.8)$$

Persamaan f_s merupakan keluaran dari fuel system yang berupa laju aliran bahan bakar gas (Kg/s) dinyatakan dalam persamaan 3.9.

$$f_s(s) = \frac{1}{t_f s + 1} e_1(s) \quad (3.9)$$

Dimana:

e_1 = keluaran valve positioner (p.u)

a = valve positioner constant (Hannet LN, 1993)

b = valve positioner constant (Hannet LN, 1993)

c = valve positioner constant (Hannet LN, 1993)

f_s = keluaran fuel system

t_f = time constant fuel system

f_d = keluaran dari bahan bakar

3. 6 Kendali Speed Governor

Salah satu tipe pengendali pada pengendalian frekuensi beban yaitu speed governer. Persamaan 3.1 merupakan perangkat kendali pada turbin gas yang berfungsi untuk mengendalikan kecepatan sistem yang ditunjukkan tanda hijau (gambar 3.2)

diatas. Speed governor diperoleh dari pengembangan dari Rowen model (Rowen WI, 1983) dapat dinyatakan menjadi persamaan 3.10.

$$VCE(s) = \frac{W.X.s+W}{Y.s+Z} \quad (3.10)$$

Dimana :

- W = gain 1/droop
- X = lead time compensator
- Y = lag time compensator
- Z = control mode (1=droop, 0=isochronus)
- VCE = keluaran governor (p.u)

Persamaan 3.2 merupakan pemodelan sinyal kecil dari speed governor dalam pembangkit listrik termal electrical energi system theory(Elgerd Olle, 1983). Speed governor dari turbin gas dalam persamaan 3.10 dimodifikasi untuk sinyal kecil yang ditunjukkan dengan tanda hijau (gambar 3.3) dapat dinyatakan dalam persamaan 3.11 sebagai berikut:

$$\Delta VCE(s) = (\Delta Pref(s) - \frac{1}{R} \Delta f(s)) \frac{Xs+1}{Ys+1} \quad (3.11)$$

Dimana:

- $\Delta Pref$ = change in power refrence setting
- $1/R(\text{droop})$ = governor droop setting (Hz/p.u Mw)
- N = turbine rotor speed (p.u)
- $\Delta VCE(s)$ = keluaran governor yang diperoleh dari selisih antara masukan berupa Hz dengan governor droop setting dan sistem perubahan frekuensi.

3. 7 Sistem Pengendalian Frekuensi Beban

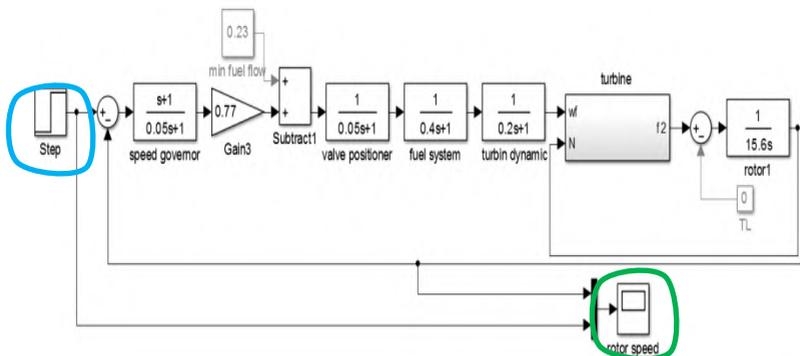
Pada penelitian ini dilakukan perancangan 2 model sistem pengendalian yaitu pengendalian dengan speed governor, pengendalian dengan PID gain schedulling fuzzy. Blok diagram sistem pengendalian beban-frekuensi ini menggunakan fitur simulink pada *software* matlab R2013a dengan *auto-tune*. Controller yang diuji yaitu speed governer dan tuning PID. Nilai

Gambar 3.3 skema sistem pengendalian frekuensi beban dengan mengendalikan kecepatan putar yang menghasilkan frekuensi beban pada power system. Proses skema tersebut set point yang berupa speed refrence memberikan sinyal error yang dikontrol oleh tanda warna hijau yaitu berupa speed governor, memerintahkan aktuator yang bertanda merah yang berupa valve positioner dan fuel system keluaran tersebut berupa laju aliran. Selanjutnya di proses pada plant yang bertanda biru berupa frekuensi beban dan diberikan feed back pada set poin.

Pada gambar 3.2 dan 3.3 merupakan skema sistem pengendalian frekuensi untuk sinyal besar dan kecil. Perbedaan kedua gambar tersebut yaitu untuk sinyal besar set poin berupa speed refrence, keluaran dari sinyal besar berupa kecepatan putar. Sedangkan, sinyal kecil setpoin berupa power refrence, keluaran berupa selisih perubahan frekuensi dan governor droop setting.

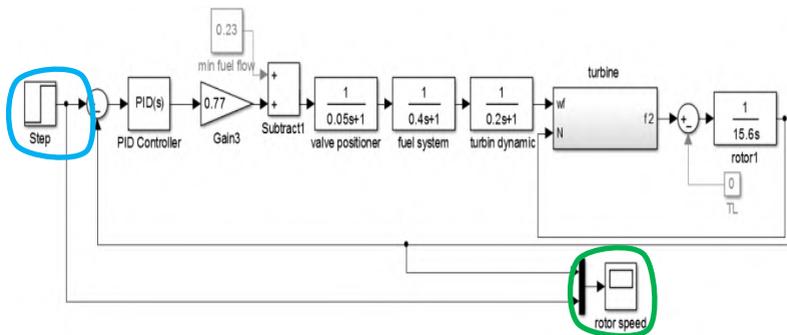
3. 8 Simulasi Pengendalian Frekuensi Beban

Pada simulasi pengendalian beban dilakukan dengan simulasi kendali speed governor dan PID gain schdeulling. Simulasi pengendalian frekuensi beban ini menggunakan software matlab R2013, dan nilai-nilai pada gambar 3.4, 3.5, 3.6 berdasarkan tabel 3.1.



Gambar 3. 4 Simulink Kendali speed governor dengan keluaran speed pada rotor.

Gambar 3.4 di atas menunjukkan simulasi dengan menggunakan simulink matlab R2013 dengan kendali speed governor berdasarkan blok diagram gambar 3.2. Set point 1 p.u terletak pada fungsi step yang bertanda biru (Balamurugan, 2016). keluaran yang dikendalikan pada kendali speed yaitu speed pada rotor bertanda hijau. Sub system pada turbin dengan memasukan persamaan 3.2 dan nilai-nilai pada gambar berdasarkan tabel 3.1.



Gambar 3. 5 Simulink Kendali PID dengan keluaran speed pada rotor.

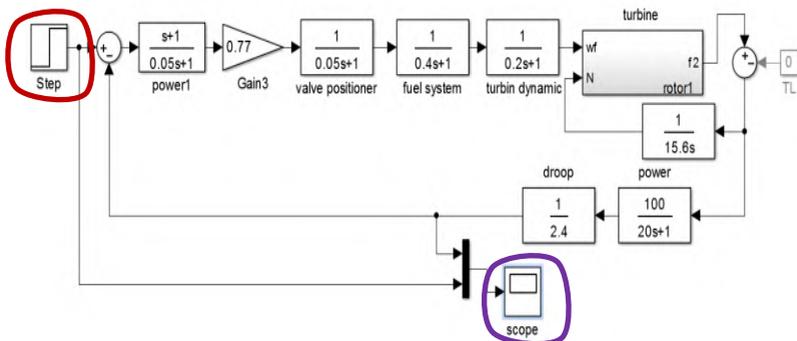
Gambar 3.5 di atas menunjukkan simulasi dengan menggunakan simulink matlab R2013 dengan kendali PID berdasarkan blok diagram gambar 3.2. Set point 1 p.u terletak pada fungsi step yang bertanda biru (Balamurugan, 2016). keluaran yang dikendalikan pada kendali PID yaitu speed pada rotor bertanda hijau. Menentukan nilai K_p , T_i , T_d pada kendali PID yaitu dengan cara melatih nilai gain P untuk mencari respon yang steady. Selanjutnya, mencari nilai P_{cr} dari nilai gain P tersebut. Kemudian didapatkan nilai P_{cr} , nilai tersebut dimasukkan ke dalam tabel 3.2. Hasil dari simulasi dengan memasukan nilai parameter metode ZN akan digunakan sebagai inputan fuzzy gain scheduling berupa error dan delta error.

Inputan fuzzy gain scheduling berdasarkan tabel 3.3. Nilai-nilai pada gambar 3.5 berdasarkan tabel 3.1.

Tabel 3. 2 Parameter PID dengan metode ZN

Tipe pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$\left(\frac{1}{1.2}\right) P_{cr}$	0
PID	$0.6 k_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

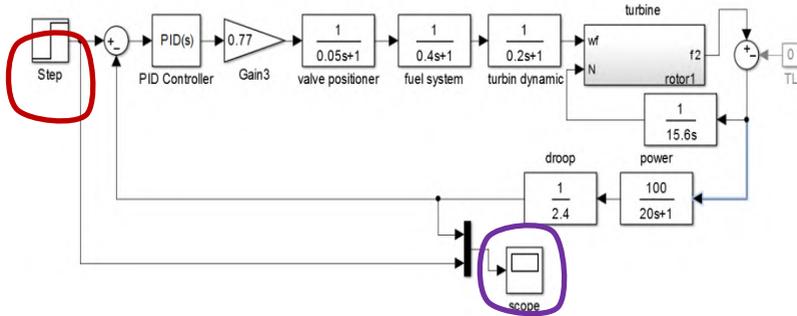
Tabel 3.2 di atas menunjukkan parameter PID dengan metode ZN. Parameter K_p , T_i , T_d merupakan masukan untuk kendali PID.



Gambar 3. 6 Simulink frekuensi beban dengan kendali speed governor

Gambar 3.6 di atas menunjukkan simulasi dengan menggunakan simulink matlab R2013 dengan kendali speed governor berdasarkan blok diagram gambar 3.3. Set point 50Hz terletak pada fungsi step yang bertanda merah. keluaran yang dikendalikan pada kendali speed governor yaitu frekuensi pada droop bertanda ungu. frekuensi beban ini merubah beban dengan mengganti nilai blok pada power dengan persamaan 3.5 dan 3.6

(Elgerd Olle, 1983). Nilai-nilai pada gambar 3.6 berdasarkan tabel 3.1.



Gambar 3. 7 Simulink frekuensi beban dengan kendali PID.

Gambar 3.7 di atas menunjukkan simulasi dengan menggunakan simulink matlab R2013 dengan kendali PID berdasarkan blok diagram gambar 3.3. Set point 50Hz terletak pada fungsi step yang bertanda merah. keluaran yang dikendalikan pada kendali PID yaitu frekuensi pada droop bertanda ungu. Menentukan nilai K_p , K_i , K_d pada kendali PID yaitu dengan cara melatih nilai gain P untuk mencari respon yang steady. Nilai gain P sebesar 15. Selanjutnya, mencari nilai P_{cr} dari respon tersebut. Kemudian didapatkan nilai P_{cr} , nilai tersebut dimasukkan ke dalam tabel 3.2. Hasil dari simulasi dengan memasukan nilai parameter metode ZN akan digunakan sebagai inputan fuzzy gain scheduling berupa error dan delta error. Inputan fuzzy gain scheduling berdasarkan tabel 3.3. Frekuensi beban ini merubah beban dengan mengganti nilai blok pada power dengan persamaan 3.5 dan 3.6. Nilai-nilai pada gambar 3.7 berdasarkan tabel 3.1.

3. 9 Kontrol Logika Fuzzy Pada Frekuensi Beban

a. Fuzzifikasi

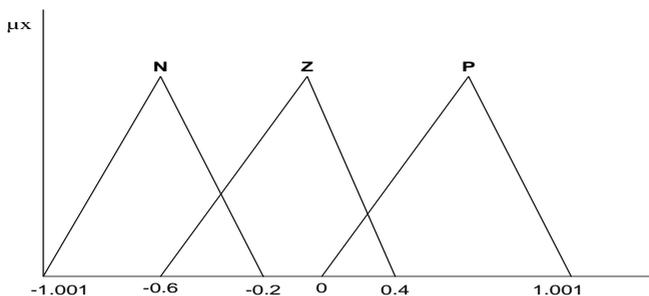
Pada proses fuzzifikasi ini berfungsi untuk mentransformasikan sinyal masukan yang bersifat *crisp* ke dalam

himpunan fuzzy. Sinyal masukan untuk kontrol frekuensi beban yaitu berupa nilai error dan delta error. Sedangkan nilai keluarannya berupa gain K_p , T_i dan T_d . Logika fuzzy yang dipilih dengan metode takagi sugeno, karena untuk menghasilkan nilai keluaran pasti pada P , I , dan D . variabel error dan delta error rpm dinyatakan dalam 3 fungsi keanggotaan yaitu N (negatif), Z (zero), P (positif). Berikut perancangan kontrol frekuensi beban dengan menggunakan logika fuzzy.



Gambar 3. 8 Perancangan kontrol logika fuzzy pada frekuensi beban.

Gambar 3.8 di atas menunjukkan perancangan kontrol logika fuzzy pada frekuensi beban. nilai masukan berupa error dan dan delta error dinyatakan oleh fungsi keanggotaan yaitu *Negative* (N), *Zero* (Z), dan *Positive* (P). Fungsi keanggotaan dari ke 3 variabel fuzzy error dan delta error yaitu segitiga. Gambar 3.9 merupakan fungsi keanggotaan error dan delta error yang berbentuk segitiga untuk pengendalian frekuensi beban.



Gambar 3. 9 Membership function ke 3 fungsi keanggotaan.

Gambar 3.9 di atas menunjukkan membership function ke 3 fungsi keanggotaan. Ada 3 fungsi keanggotaan pada gambar

diatas yaitu Negatif (N), Zero (Z), Positif (P). Ketiga fungsi keanggotaan tersebut mempunyai nilai interval pada tabel 3.1.

Tabel 3. 3 Interval fungsi keanggotaan error dan delta error pengendalian frekuensi beban

$\Delta e/e$	Interval (p.u)
N	(-1.001) – (-0.2)
Z	(-0.6) – (0.4)
P	(0)- (1.001)

Tabel 3.1 di atas menunjukkan interval fungsi keanggotaan error dan delta error pengendalian frekuensi beban. Nilai error dan delta error diperoleh dari respon tuning PID dengan menggunakan metode ZN.

Tabel 3. 4 Parameter nilai Kp, Ki, Kd range untuk keluaran PID gain schedulling

Gain	Range
Kp	0-15
Ti	0-0.001
Td	0-0.2

Tabel 3.2 di atas menunjukkan nilai parameter Kp, Ti, Td untuk keluaran dari PID gain schedulling. Nilai Kp, Ti, Td diperoleh dari mencari nilai gain yang paling baik, kemudian memasukan pada metode ZN.

b. Rule base

Rule base pada kontrol logika fuzzy ini disesuaikan dengan PID yang bekerja dan set poin yang ditentukan. Berikut adalah susunan rule base nya.

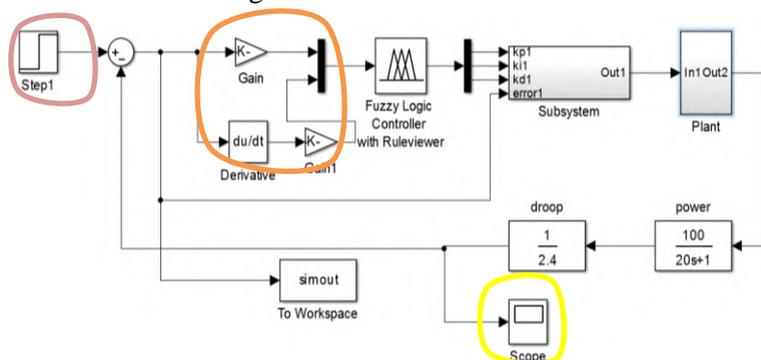
Tabel 3.3 *Rule base* pengendalian frekuensi beban (Balamurugan, 2016)

$\Delta e/$ e	N			Z			P		
	K _p	K _i	K _d	K _p	K _i	K _d	K _p	K _i	K _d
N	N	N	P	N	N	P	Z	Z	Z
Z	N	N	P	Z	Z	Z	P	P	N
P	Z	Z	Z	P	P	N	P	P	N

Tabel 3.3 di atas menunjukkan *rule base* dari pengendalian frekuensi beban. *Rule base* ini diperoleh dari kepakaran (Balamurugan, 2016).

3. 10 Simulasi Fuzzy dengan Pengendalian Frekuensi Beban

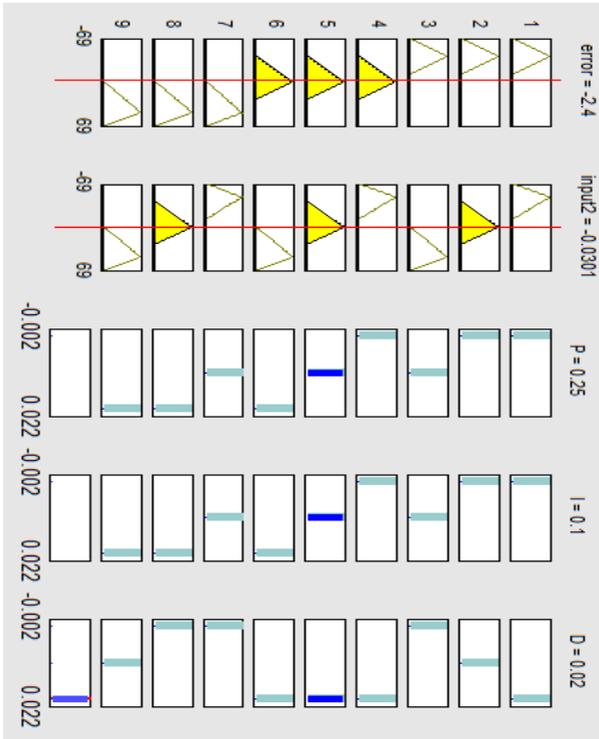
Untuk mengetahui sistem fuzzy yang dirancang sudah sesuai atau belum, maka dilakukan beberapa pengujian dengan menggunakan *tools* pada matlab. Berikut simulasi fuzzy dengan simulink matab sebagai berikut:



Gambar 3.10 Simulink fuzzy dengan pengendalian frekuensi beban.

Pada gambar 3.10 di atas menunjukkan diagram simulink untuk pengendali fuzzy gain schedulling. Set point 50Hz ditunjukkan pada fungsi step berwarna pink. Masukan pada pengendali fuzzy gain schedulling yaitu error dan delta error

bertanda orange (tabel 3.3) yang diperoleh dari keluaran sistem pengendali PID. Keluaran fuzzy gain scheduling yaitu berupa respon grafik yang bertanda kuning. Blok plant berdasarkan gambar 3.3 nilai-nilai pada gambar berdasarkan tabel 3.1.



Gambar 3. 11 Hasil rule PID gain scheduling

Pada gambar 3.11 di atas menunjukkan hasil simulasi fuzzy gain scheduling. Hasil rule diperoleh dari simulasi gambar 3.10. Hasil simulasi diperoleh nilai error sebesar -0.000133 dan delta error sebesar $-2.01e-05$. Keluaran hasil simulasi dengan nilai K_p sebesar 7.5 , K_i 0.005 , dan K_d sebesar 0.1 .

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

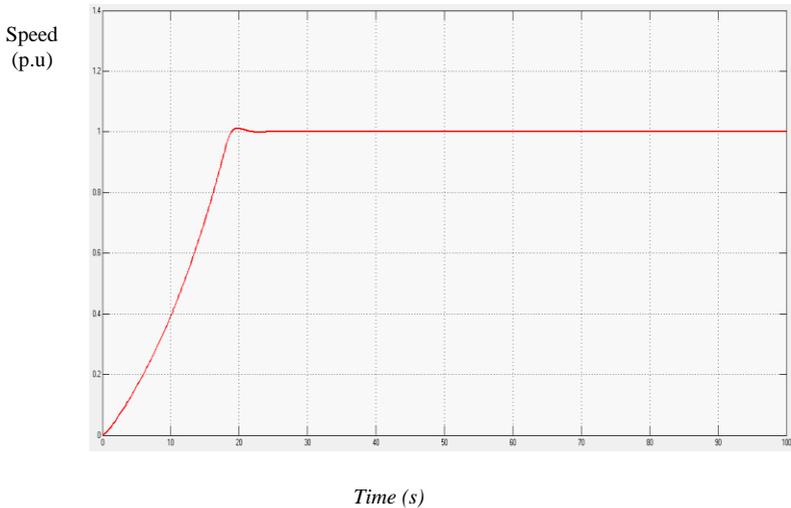
Uji performansi bertujuan untuk mengetahui kendali frekuensi beban yang mampu menstabilkan respon. Uji yang dilakukan 2 macam yaitu uji pengendalian frekuensi beban dengan kendali speed governor dan kendali logika fuzzy.

4. 1 Uji Speed Pada Rotor

Uji dilakukan dengan menggunakan simulink matlabR2013 dengan pengendalian 2 macam. Pengendalian pertama yaitu pengendalian dengan speed governor dan pengendalian kedua yaitu dengan PID gain scheduling.

4.1. 1 Uji Dengan Speed Governor

Hasil uji dengan speed governor dengan nilai set poin 1 p.u. Set poin 1 p.u ditunjukkan dengan fungsi step pada gambar 3.3. Hasil uji dapat dilihat pada gambar 4.1 dan hasil performansi dapat dilihat pada tabel 4.1. Hasil respon gambar 4.1 ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 4. 1 Hasil respon uji speed pada rotor dengan kendali speed governor.

Gambar 4.1 diatas menunjukkan hasil respon uji speed dengan kendali speed governor. respon keluaran menunjukkan kenaikan dari speed yang cenderung cepat sampai dengan terpenuhi set poin. Respon tersebut didapatkan pada gambar 3.6.

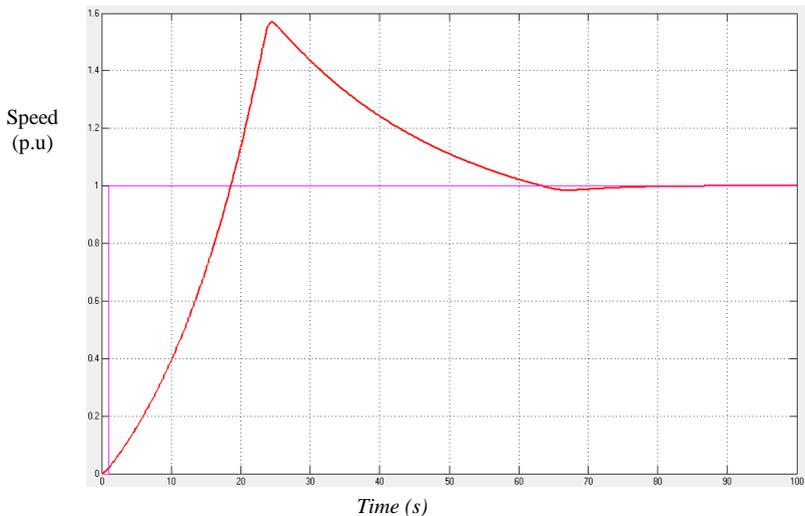
Tabel 4. 1 Hasil Performansi uji speed pada rotor dengan kendali speed governor

Maks.overshoot	1,01%
Peak time	19,5s
Setling time	18.58s
Rise time	16,70 s
ess	0,000612

Respon dari pengendali speed governor adalah maks.over, peak time, setling time, rise time, ess yang ditampilkan pada tabel 4.1. Performansi hasil penelitian (Sergiu, 2008) lebih baik dibandingkan hasil penelitian ini. cara menentukan performansi dapat dilihat pada bab (2.11).

4.1. 2 Uji Dengan PID Gain Scheduling

Hasil uji dengan PID gain scheduling didapatkan simulasi simulink gambar 3.10. Inputan dari PID gain scheduling yaitu nilai error dan delta error dari simulink gambar 3.5. Nilai error dan delta error ditunjukkan pada tabel 3.3. Hasil uji dapat dilihat pada gambar 4.2 dan hasil performansi dapat dilihat pada tabel 4.2. Hasil respon gambar 4.2 ditunjukkan pada gambar 3.12.



Gambar 4. 2 Hasil respon uji speed pada rotor dengan kendali PID gain scheduling Fuzzy

Gambar 4.2 diatas menunjukkan hasil respon uji speed dengan PID gain scheduling. respon keluaran menunjukkan kenaikan dari speed cepat, namun untuk mencapai setopin cenderung lama. Respon tersebut didapatkan pada simulink gambar 3.12.

Tabel 4. 2 Performansi uji speed pada rotor dengan PID gain schedulling fuzzy

Maks.overshoot	1,56%
Peak time	24,5s
Setling time	18,8s
Rise time	16,85s
Ess	-0,01326

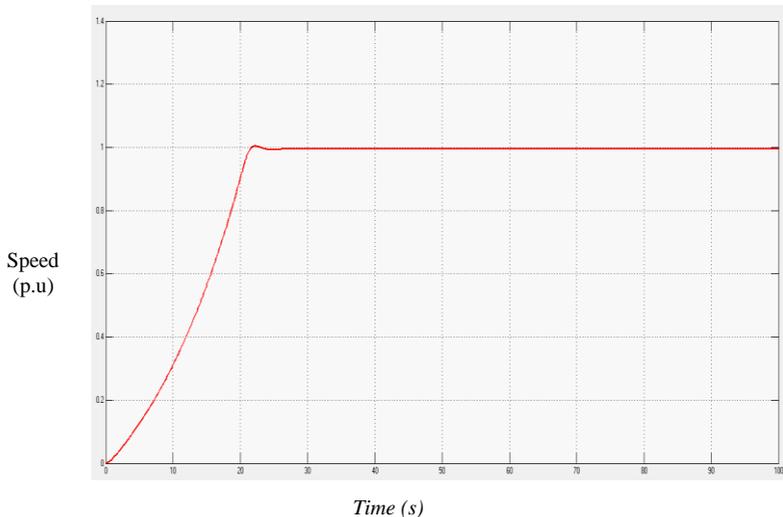
Respon dari pengendali PID gain schedulling adalah maks.over, peak time, setling time, rise time, ess yang ditampilkan pada tabel 4.2. Performansi hasil penelitian (Balamurugan, 2008) lebih baik dibandingkan hasil penelitian ini. cara menentukan performansi dapat dilihat pada bab (2.11).

4. 2 Uji Speed Pada Rotor Dengan Disturbance

Pada penelitian ini menggunakan disturbance untuk melihat respon pada rotor. Uji speed pada rotor dengan disturbance dilakukan 2 kali. Uji disturbance yang pertama dengan disturbance pada torsi load 0,1 p.u, dan yang ke dua dengan disturbance pada torsi load 0,2 p.u. Pengujian ini dilakukan dengan kendali 2 macam yaitu dengan kendali speed governor dan kendali PID gain schedulling.

4.2. 1 Uji Speed Pada Rotor Dengan Disturbance Sebesar 0.1 p.u

Uji speed dengan disturbance pada torsi load sebesar 0,1 p.u dengan kendali speed governor. Hasil uji dapat dilihat pada gambar 4.3 dan hasil performansi dapat dilihat pada tabel 4.3. Hasil respon gambar 4.3 ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 4.3 Hasil respon uji speed pada rotor dengan disturbance sebesar torsi load 0,1 p.u dengan kendali speed governor.

Gambar 4.3 diatas menunjukkan hasil respon uji speed dengan kendali speed governor. respon keluaran menunjukkan kenaikan dari speed yang cenderung cepat sampai dengan terpenuhi set poin dan steady. Respon tersebut didapatkan pada gambar 3.6.

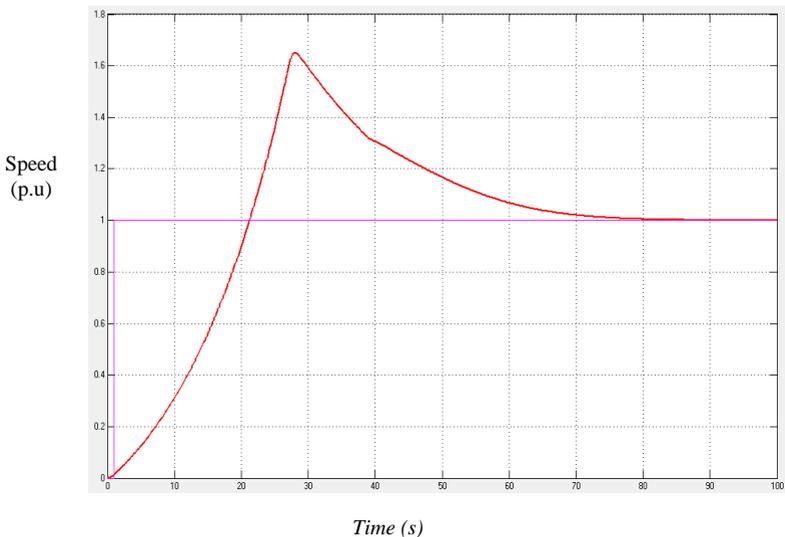
Tabel 4. 3 Hasil Performansi uji speed pada rotor dengan disturbance torsi load 0.1 p.u dengan kendali speed governor

Maks.overshoot	1.04%
Peak time	22s
Setling time	21,17s
Rise time	19,22 s
Ess	-0,58348

Performansi dari respon sistem dengan pengendali speed governor dengan disturbance 0,1 ditunjukkan pada Tabel 4.3. cara mentukan performansi dapat dilihat pada bab (2.11). Dari hasil respon uji performansi tersebut Pengendali speed governor dapat

didapatkan nilai parameter yaitu nilai maks. overshoot sebesar 1,04, peak time 22s, setling time 21,17s, rise time 19,22s, ess - 0,58348.

Uji speed pada rotor dengan disturbance pada torsi load sebesar 0,1 p.u dengan kendali PID gain schedulling. Respon sistem pengendalian PID gain schedulling ditunjukkan pada gambar 4.4. Hasil respon gambar 4.4 ditunjukkan pada gambar 3.12.



Gambar 4. 4 Hasil respon uji speed pada rotor dengan disturbance torsi load sebesar 0,1 p.u dengan kendali PID gain schedulling Fuzzy.

Gambar 4.4 diatas menunjukkan hasil respon uji speed dengan PID gain schedulling dengan disterbnce sebesar torsi load 0,1 p.u. respon keluaran menunjukkan kenaikan dari speed cepat, namun untuk mencapai set poin cenderung lama. Respon tersebut didapatkan pada simulink gambar 3.12.

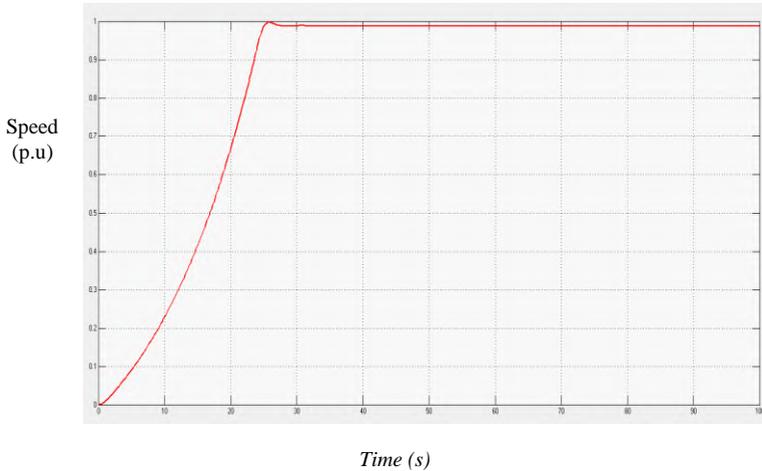
Tabel 4. 4 Performansi uji speed pada rotor dengan PID gain schedulling fuzzy dengan beban torsi load 0.1 p.u

Maks.overshoot	1,65%
Peak time	28s
Setling time	18.81s
Rise time	16,8 s
Ess	0,023914

Performansi dari respon sistem dengan pengendali PID gain schedulling dengan disturbance torsi load sebesar 0,1 p.u ditunjukkan pada Tabel 4.4. cara menentukan performansi dapat dilihat pada bab (2.11). Dari hasil respon uji performansi tersebut Pengendali PID gain schedulling dengan disturbance torsi load sebesar 0,1 dapat didapatkan nilai parameter yaitu nilai maks. overshoot sebesar 1,65, peak time 28s, setling time 18,81s, Rise time 16,8s, ess 0,023914.

4.2. 2 Uji Speed Pada Rotor Dengan Disturbance Sebesar 0.2 p.u

Uji speed pada rotor dengan disturbance torsi load sebesar 0,2 p.u dengan kendali speed governor. Hasil uji dapat dilihat pada gambar 4.15 dan hasil performansi dapat dilihat pada tabel 4.5. Hasil respon gambar 4.5 ditunjukkan pada gambar 3.6. Hasil respon gambar 4.5 ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 4.5 Hasil respon uji speed pada rotor dengan disturbance torsi load sebesar 0,2 p.u dengan speed governor

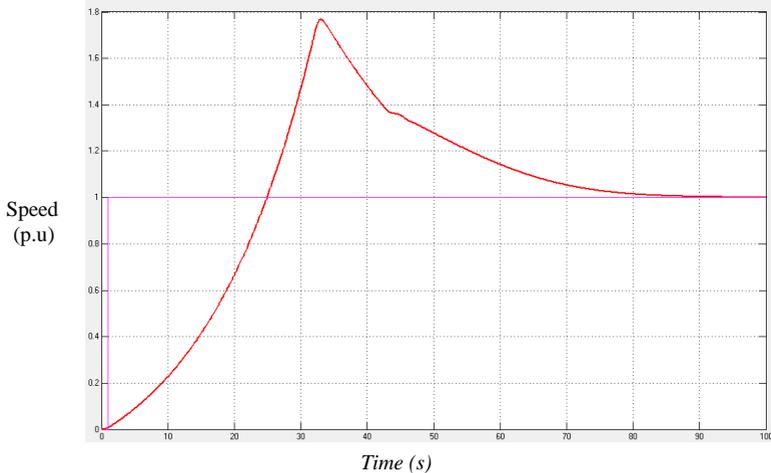
Gambar 4.5 diatas menunjukkan hasil respon uji speed dengan kendali speed governor. respon keluaran menunjukkan kenaikan dari speed yang cenderung menurun sampai dengan tidak mencapai setpoint. Respon tersebut didapatkan pada gambar 3.6.

Tabel 4. 5 Hasil Performansi uji speed pada rotor dengan b disturbance torsi load sebesar 0,2 p.u dengan spees governor

Maks.overshoot	0,997%
Peak time	25,8s
Setling time	27,12s
Rise time	22,48 s
ess	-1,17441

Performansi dari respon sistem dengan pengendali speed governor dengan disturbance torsi load sebesar 0,2 p.u ditunjukkan pada Tabel 4.5. cara mentukan performansi dapat dilihat pada bab (2.11). Dari hasil respon uji performansi tersebut Pengendali speed governor dapat didapatkan nilai parameter yaitu nilai maks. overshoot sebesar 0,997, peak time 25,8s, setling time 27.12s, Rise time 22,48s, ess -1,17441.

Uji speed pada rotor dengan disturbance torsi load sebesar 0,2 p.u dengan kendali PID gain schedulling. Respon sistem pengendalian PID gain schedulling ditunjukkan pada gambar 4.6. Hasil respon gambar 4.6 ditunjukkan pada gambar 3.12.



Gambar 4. 6 Hasil respon uji speed pada rotor dengan disturbance torsi load sebesar 0,2 p.u dengan kendali PID gain schedulling Fuzzy.

Gambar 4.6 diatas menunjukkan hasil respon uji speed dengan PID gain schedulling dengan disterbunce torsi load sebesar 0,2 p.u. Respon keluaran menunjukkan kenaikan dari speed cepat, namun untuk mencapai set poin cenderung lama. Respon tersebut didapatkan pada simulink gambar 3.12.

Tabel 4. 6 Performansi uji speed pada rotor dengan PID gain schedulling fuzzy dengan beban 0.2

Maks.overshoot	1,76%
Peak time	33s
Setling time	18,81s
Rise time	17,45s
Ess	0,073464

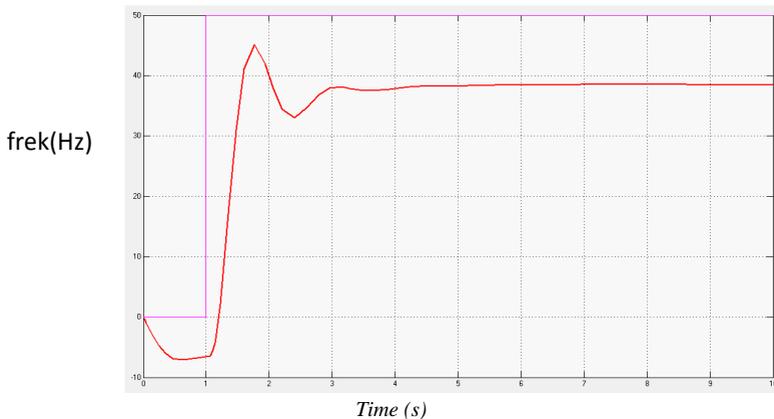
Performansi dari respon sistem dengan pengendali PID gain schedulling dengan disturbance sebesar 0,1 ditunjukkan pada Tabel 4.6. cara mentukan performansi dapat dilihat pada bab (2.11). Dari hasil respon uji performansi tersebut Pengendali PID gain schedulling dengan disturbance 0,1 dapat didapatkan nilai parameter yaitu nilai maks. overshoot sebesar 1,76, peak time 33s, setling time 18,81s, Rise time 17,45s, ess 0,073464.

4. 3 Uji Pengendalian Frekuensi Beban

Uji pengendalian frekuensi beban dilakukan dengan menggunakan simulink matlabR2013 dengan pengendalian 2 macam. Pengendalian pertama yaitu pengendalian dengan speed governor dan pengendalian kedua yaitu dengan PID gain schedulling.

4.3. 1 Uji Frekuensi Beban Dengan Speed Governor

Hasil uji dengan speed governor dengan nilai set poin 50Hz. Nilai set poin 50Hz ditunjukkan dengan fungsi step pada gambar 3.3. Hasil uji dapat dilihat pada gambar 4.7 dan hasil performansi dapat dilihat pada tabel 4.10. Hasil respon gambar 4.7 ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 4. 7 Hasil Uji Pengendalian frekuensi beban dengan kendali speed governor.

Gambar 4.7 diatas menunjukkan hasil respon uji frekuensi dengan kendali speed governor. Respon tersebut didapatkan pada simulink gambar 3.7. Dengan menggunakan frekuensi 50 Hz menghasilkan respon yang tidak mencapai set poin. Respon mengalami undershoot.

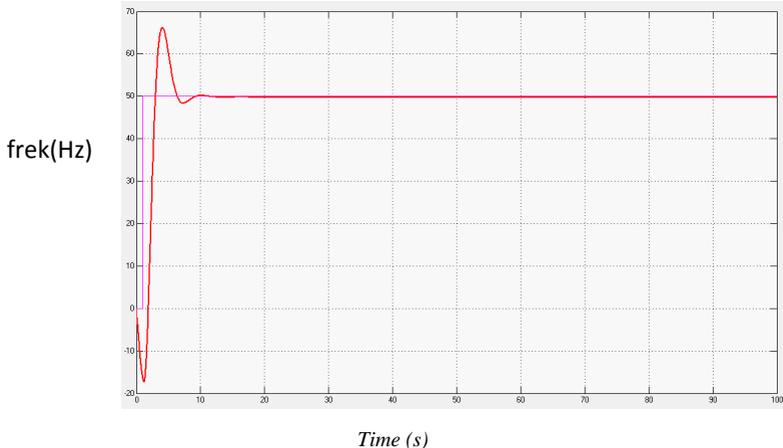
Tabel 4. 7 Performansi uji pengendalian frekuensi beban dengan kendali speed governor

Maks.overshoot	45%
Peak time	1,7s
Setling time	4,5s
Rise time	1,7s
Ess	9,6

Performansi dari respon sistem dengan pengendali speed governor ditunjukkan pada Tabel 4.7. Cara mentukan performansi dapat dilihat pada bab (2.11). Dari hasil respon uji performansi tersebut Pengendali speed governor dapat didapatkan nilai parameter yaitu nilai maks. overshoot sebesar 45, peak time 1,7s, setling time 4,5 s, Rise time 1,7s, ess 9,6.

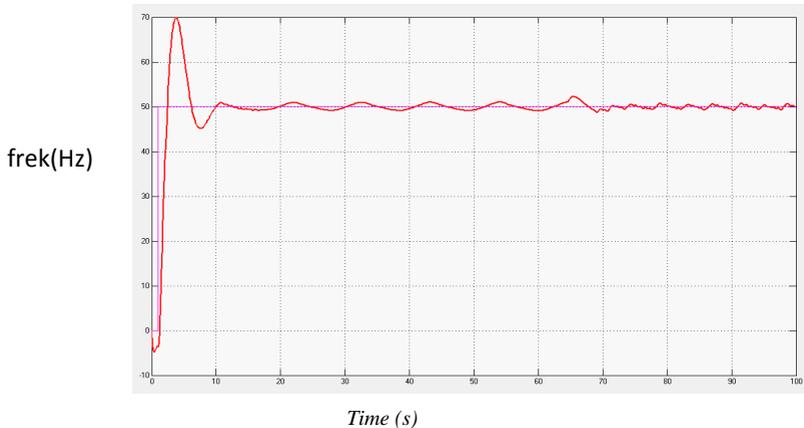
4.3. 2 Uji Frekuensi Beban Dengan PID Gain Scheduling

Hasil uji dengan speed governor dengan nilai set poin 50Hz. Nilai set poin 50Hz ditunjukkan dengan fungsi step pada gambar 3.3. Hasil uji dapat dilihat pada gambar 4.8 dan hasil performansi dapat dilihat pada tabel 4.11. Hasil respon gambar 4.8 ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 4. 8 Hasil Uji Pengendalian frekuensi beban dengan kendali PID.

Gambar 4.8 diatas menunjukkan hasil uji pengendalian frekuensi dengan kendali PID. Hasil simulasi tersebut didapatkan nilai error dan delta error. Nilai error dan delta error tersebut digunakan sebagai inputan kendali logika fuzzy. Respon mengalami lebih undershoot dibandingkan governor.



Gambar 4. 9 Hasil Uji Pengendalian frekuensi beban dengan kendali PID gain schedulling.

Gambar 4.9 diatas menunjukkan hasil respon uji frekuensi dengan kendali PID gain schedulling. Hasil respon gambar 4.9 ditunjukkan pada gambar 3.11. Dengan menggunakan PID gain schedulling dan pada frekuensi yang sama yaitu 50Hz, menghasilkan keluaran respon mencapai set point, akan tetapi memiliki maks.evor yang tinggi dan osilasi terus menerus. Respon undershootya berkurang dibandingkan kendali PID.

Tabel 4. 8 Performansi uji pengendalian frekuensi beban dengan PID gain schedulling

Maks.overshoot	40%
Peak time	1,6s
Setling time	4s
Rise time	7s
Ess	0,3

Performansi dari respon sistem dengan pengendali PID gain schedulling pada Tabel 4.8. Cara menentukan performansi dapat dilihat pada bab (2.11). Dari hasil respon uji performansi tersebut Pengendali speed governor dapat didapatkan nilai parameter yaitu nilai maks. overshoot sebesar 40%, peak time 1,6s, setling time 4s, Rise time 7s, ess 0,3.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Penurunan Model

- Penurunan Model Control Valve
Gain (I/P)

$$G(I/P) = \frac{\text{span output (Psi)}}{\text{span input (mA)}}$$

Gain Pengendali

$$G_{cv} = \frac{\text{perubahan laju aliran(kg/s)}}{\text{perubahan tekanan maks (psi)}}$$

Gain total *control valve*

$$K_{tot} = G_{cv} \times G(I/P)$$

Fungsi Transfer *control valve*

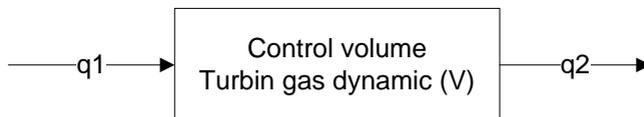
$$\frac{M(s)}{\rho(s)} = \frac{K_{tot}}{T_{cv}S+1}$$

Dimana :

K_{tot} = gain control valve

T_{cv} = konstanta waktu control valve diperoleh dari data sheet emerson fisher

- Penurunan Model Turbin gas dynamic



Hukum kesetimbangan energi:

Dimana :

q_1 = laju aliran massa gas input (kg/s)
 q_2 = laju aliran massa gas output (kg/s)
 V = volume (m³)
 ρ = densitas (kg/m³)
 t = waktu (s)

$$q_1 - q_2 = V \frac{d\rho}{dt} \quad (1)$$

Diasumsikan keluaran gas sebanding terhadap tekanan didalam turbin gas.

$$q_1 = q_0 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2)$$

Sehingga :

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho_0}{q_0} \frac{dq_2}{dt} \quad (3)$$

Diasumsikan pada suhu yang dianggap konstan perubahan densitas.

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{d\rho}{dt} \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \quad (4)$$

Perbedaan aliran gas input dan output.

$$q_1 - q_2 = V \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \frac{d\rho}{dt} = V \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \frac{\rho_0}{q_0} \frac{dq_2}{dt} \quad (5)$$

Diasumsikan jika T_t merupakan konstanta waktu yang berkaitan dengan turbin gas dynamic.

$$T_t = V \frac{\rho_0}{q_0} \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \quad (6)$$

Maka :

$$q_1 - q_2 = T_t \frac{dq_2}{dt} \quad (7)$$

Dengan transform laplace:

$$q_1(s) - q_2(s) = T_t s \times q_2(s) \quad (8)$$

$$\text{Maka : } \frac{q_2(s)}{q_1(s)} = \frac{1}{T_t s + 1}$$

- Penurunan Frekuensi Beban

$$\Delta P_r - \Delta P_D = \frac{2H}{f^0} \frac{d\Delta f}{dt} + D\Delta f \text{ p.u} \quad (1)$$

Maka :

$$\Delta P_r - \Delta P_D = 2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta f}{f^0} \right) + Df^0 \left(\frac{\Delta f}{f^0} \right) \text{ p.u MW} \quad (2)$$

Kemudian transformasi laplace, sehingga:

$$= 2 \frac{H}{f^0} s\Delta f + D\Delta f(s) \quad (3)$$

Persamaan di atas dapat dituiskan menjadi:

$$\Delta f(s) = Gp(s)[\Delta P_r(s) - \Delta P_D(s)] \quad (4)$$

Maka:

$$\Delta f(s) = \frac{Kp}{1+T_p s}$$

$$Kp = \frac{1}{D} \text{ (Hz/ p.u Mw)}$$

$$T_p = \frac{2.H}{f.D} \text{ s}$$

$$D = \frac{\partial P_l}{\partial f} \frac{1}{p_{rl}} \text{ (p.u Mw/Hz)}$$

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5. 1 Kesimpulan

Dari hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan dari tugas akhir mengenai perancangan pengendalian frekuensi beban berbasis logika fuzzy pada turbin gas adalah:

1. Telah dirancang simulasi pengendalian frekuensi beban dengan berbasis logika fuzzy inputan berupa nilai delta error dan nilai error, sedangkan outputan berupa nilai K_p , K_i , K_d .
2. Untuk menentukan rule base fuzzy yang sesuai untuk pengendalian frekuensi beban maka dilakukan iterasi pada rule base kontrol logika fuzzy sesuai dengan kepakaran hingga diperoleh iterasi responya paling baik.
3. Dari hasil uji performansi pengendalian frekuensi beban dengan kendali PID gain schedulling lebih baik dibandingkan speed governor.
4. Hasil uji performansi pengendalian frekuensi beban yaitu dengan kendali speed governor dengan nilai parameter dari uji performansi yaitu nilai maks. overshoot sebesar 45, peak time 1,7s, setling time 4,5s, Rise time 1,7s, ess 9,6. Sedangkan dengan menggunakan PID gain schedulling dengan nilai parameter uji performansi yaitu nilai maks. overshoot sebesar 40%, peak time 1,6s, setling time 4s, Rise time 7 s, ess 0,3.

5. 2 Saran

Dalam proses tugas akhir ini terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya, yakni pengembangan pengendalian frekuensi beban dengan membandingkan data real plant pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU).

DAFTAR PUSTAKA

- Anggraini, D. P. (2013). *Pengendalian Frekuensi dengan Menggunakan Kontrol Fuzzy pada Simulator Plant Turbin-Generator pada PLTU*. Universitas Gadjja Mada.
- Azadeh, M. (2013). A Hybrid PSO-Fuzzy-PID Controller For Gas Turbin. *Tehran University*.
- Balamurugan, S. (2016). Small and Large Signal Modelling Of Heavy Duty Gas turbine Plant For load frequency Control. *Amrita School Of Engineering* .
- Edalane, S. (2011). Gas Turbine Plant Modelling For Dynamic Simulation,. *Department Of energy Technology*.
- Handriani, A. (2007). Perancangan Sistem Pengendalian Temperature Pada Reboiler Methanol Recovery Menggunakan Fuzzy Gain Scheduling-PID Di PT Eterindo Nusa Graha Gresik.
- Mohanty, D. K. (2014). Performance Analysis Of A Combined Cycle Gas Turbine Under Varying Operating Conditions. *Department Mechanical Of Engineering*.
- Murty, D. M. (2010). Modelling Of Gas Turbine And Its Control System.
- Nurmayady, D. (2010). Perancangan Pengendalian Governor pada PLTN. *Universitas Indonesia*.
- Patriandri. (2010). Analisa Pengoperasian Speed Droop Governor Sebagai Pengaturan Frekuensi Pada Sistem Kelistrikan PLTU Gresik. *Institute Technology Sepuluh Nopember*.
- sardono, S. (2013). identifikasi sistem governor control valve dalam menjaga kestabilan putaran turbin uap pltp wayang windu unit 1.

- Setyawan, A. (2011). Perancangan Sistem Pengendalian Temperature Pada Superheater Dengan Metode Fuzzy Logic Di PLTU Unit Pembangkit Gresik,. *Institute Technology Sepuluh Nopember*.
- Yee Soon, K . (2008). *Overview And Comparative Analysis Of Gas Turbine Model For System Stability Studies*. IEEE Trans Power.
- F. Gunterus, Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses, Elex Media Komputindo Jakarta, 1997.
- Elgerd Olle, I. Electrical Energy System Theory. 2nd ed. New Delhi: Tata Mcgraw Hill.19983.
- Ogata Katsuhiko, Modern Control Engineering. 5th ed. Pretice Hall;2009.

BIODATA PENULIS



Aisyiyah Nur Isnaeni merupakan nama lengkap penulis dengan nama panggilannya adalah iis. Penulis dilahirkan di kota Surabaya, Jawa Timur pada tanggal 2 September 1993 sebagai anak kedua dari dua bersaudara pasangan supriyo dan Dra. Sri Sundari. Riwayat pendidikan penulis adalah SD Negeri Kebraon 2 Surabaya tahun 1999-2005, SMP Negeri 28 Surabaya tahun 2005-2008, SMA Negeri 9 Surabaya tahun 2008-2011. Penulis diterima sebagai mahasiswa prodi D3 Metrplogi dan Instrumentasi Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS pada tahun 2011 kemudian, lanjut lintas jalur S1 jurusan teknik fisika pada tahun 201. Fokus pada bidang minat rekayasa instrumentasi dan kontrol untuk menyelesaikan tugas akhirnya. Penulis dapat dihubungi melalui *email*: aisyiyahn738@gmail.com.