



**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**DESAIN KONTROLER PID-ANFIS (ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM) UNTUK PENGATURAN KECEPATAN PADA TURBIN UAP *MULTISTAGE***

Aulia Tri Buana  
NRP. 07111540000110

Dosen Pembimbing  
Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.  
Eka Iskandar, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019



**FINAL PROJECT - EE 184801**

***ANFIS-PID CONTROLLER DESIGN FOR SPEED REGULATION ON  
MULTISTAGE STEAM TURBINE***

Aulia Tri Buana  
NRP. 0711154000110

Supervisor  
Ir. Rusdhianto Effnedi AK, MT.  
Eka Iskandar, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Desain Kontroler PID-ANFIS (*Adaptive Neuro- Fuzzy Inference System*) untuk Pengaturan Kecepatan Turbin Uap *Multistage***” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2019

Aulia Tri Buana  
0711154000021

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**DESAIN KONTROLER FUZZY ROBUST UNTUK**  
**PENGATURAN KECEPATAN PADA *MULTISTAGE STEAM***  
***TURBINE***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,



Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.  
NIP. 195704241985021001

Dosen Pembimbing II,



Eka Iskandar, ST., MT.  
NIP. 198005282008121001

**SURABAYA**  
**DESEMBER, 2019**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **DESAIN KONTROLER PID-ANFIS (*ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM*) UNTUK PENGATURAN KECEPATAN PADA TURBIN UAP *MULTISTAGE***

Aulia Tri Buana  
0711154000110

Pembimbing I : Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.  
Pembimbing II : Eka Iskandar, ST., MT.

## **ABSTRAK**

*Abstrak*— Sistem turbin uap multistage terdiri dari turbin *high pressure*, *medium pressure* dan *low pressure*. Ketika dioperasikan akan terjadi perubahan konstanta beban seiring berjalannya waktu. Saat beban naik, maka kecepatan turun, begitu juga sebaliknya. Diperlukan suatu kontroler yang mampu mengurangi perubahan kecepatan turbin serta mampu segera kembali menuju set poin ketika terjadi perubahan beban. Kontroler klasik PID tidak mampu memenuhi kriteria yang diinginkan. Maka didesainlah kontroler PID-ANFIS. Kontroler PID-ANFIS bertujuan untuk mempertahankan dan mengembalikan output ke nilai steady state dalam waktu 50 detik ketika terjadi perubahan beban. Konstanta beban yang digunakan berada pada kisaran 75%– 125%. Respon sistem stabil di 3000 rpm, dengan nilai RMSE pada tiga variasi beban, yaitu beban naik, beban turun, dan beban fluktuatif secara berturut-turut 1.34%, 0.87% dan 2,06%.

**Kata Kunci** : *PID-ANFIS*, *Turbin Uap Multistage*, , *variasi beban*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# ***DESIGN OF ANFIS-PID CONTROL FOR SPEED REGULATION ON MULTISTAGE STEAM TURBINE***

Aulia Tri Buana  
0711154000110

*Supervisor I* : Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.  
*Supervisor II* : Eka Iskandar, ST., MT.

## ***ABSTRACT***

*Multistage steam turbine system is composed of high pressure turbine, medium pressure turbine, and low pressure turbine. In their operation, there will be a change of load over time. When system uses PID controller and there is a change of load, system response will change along with the change of load. When the load is increasing, the speed will be decreasing and vice versa. Therefore, ANFIS-PID controller is designed. ANFIS-PID controller is used to maintain the steady state value when there is a change of load. ANFIS-PID will doing learning process by giving the load variation which ranged from minimum until maximum load. There are 3 load variation, increasing load, decreasing load, and fluctuating load. Load constant that is used is in the range of 75%– 125% load unit. After ANFIS-PID controller is used, the system response capable of returning to the 3000 rpm setpoint with RMSE values respectively 0.87%, 1,34%, and 2.06%.*

***Keyword*** : *Load Variation, Multistage Steam Turbine, PID-ANFIS*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat yang melimpah dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“Desain Kontroler PID-ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) untuk Pengaturan Kecepatan pada Turbin Uap *Multistage*”**. Tugas akhir ini dibuat untuk melengkapi persyaratan akademis program studi sarjana di Departemen Teknik Elektro ITS.

Oleh karena itu penulis sampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada semua pihak yang membantu dan mendukung selama proses pengerjaan tugas akhir ini sehingga pengerjaan tugas akhir ini dapat selesai tepat waktu. Dengan hormat dan rendah diri penulis sampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga penulis, Talkah Harianto, Endang Susilowati, Hendrita Purwaningtyas dan Fitria Denok Palupi yang telah mendukung penulis secara moral dan material.
2. Dosen Pembimbing, Bapak Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT. dan Bapak Eka Iskandar, ST., MT. yang telah membimbing dan mengarahkan penulis hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Teman-teman mahasiswa Teknik Elektro ITS, khususnya mahasiswa bidang studi teknik sistem pengaturan yang mendukung, membantu, dan membimbing dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis memohon maaf apabila terdapat kesalahan dan penulis menerima masukan, kritik, serta saran dari pembaca sekalian.

Surabaya, 12 Desember 2019

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR .....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
<b>BAB 1</b>	
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	2
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Metodologi .....	2
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
1.7 Relevansi .....	5
<b>BAB 2</b>	
TEORI PENUNJANG .....	7
2.1 Multistage Steam Turbine .....	7
2.2 Dasar Sistem Pengaturan Kecepatan Turbin .....	8
2.2.1 Sistem Pengaturan Kecepatan Turbin .....	9
2.2.2 Konfigurasi Turbin dengan Kontrol Kecepatan .....	10
2.2.3 Komponen Sistem Pengaturan Kecepatan Turbin.....	11
2.3 Pemodelan Multistage Steam Turbine.....	12
2.3.1 Model Blok Turbin.....	12
2.3.2 Fungsi Alih Servomotor dan Beban .....	14
2.3.3 Model Sederhana Sistem .....	15
2.3.4 Persamaan Matematis Sistem .....	15
2.4 Algoritma Kontroler PID.....	16
2.4.1 Kontroler Proporsional.....	17
2.4.2 Kontroler Integral .....	17
2.4.3 Kontroler Diferensial.....	18
2.5 ANFIS .....	18
2.5.1 Arsitektur ANFIS .....	18
2.5.2 Fuzifikasi.....	20

2.5.3 Inferensi Takagi Sugeno.....	21
<b>BAB 3</b>	
PERANCANGAN SISTEM .....	23
3.1 Perancangna Sistem Keseluruhan .....	23
3.1.1 Model Matematis Sistem.....	23
3.1.2 Uji Respon Sistem.....	25
3.2 Desain Kontroler PID ANFIS.....	25
3.2.1 Struktur Kontroler PID-ANFIS .....	26
3.2.2 Fuzifikasi.....	28
3.2.3 Error Model.....	29
3.2.4 Metode Back Propagation Steepest Descent .....	30
3.2.5 Blok Diagram Sistem Keseluruhan .....	30
3.2.6 Proses Pembelajaran.....	32
<b>BAB 4</b>	
PENGUJIAN DAN ANALISIS .....	33
4.1 Jenis Beban.....	33
4.2 Respon Sistem dengan Kontroler PID.....	35
4.2.1 Respon Sistem dengan Kontroler PID pada Variasi Beban Naik.....	36
4.2.2 Respon Sistem dengan Kontroler PID pada Variasi Beban Turun .....	36
4.2.3 Respon Sistem dengan Kontroler PID pada Variasi Beban Fluktuatif .....	37
4.3 Respon Sistem dengan Kontroler PID-ANFIS .....	38
4.3.1 Respon Sistem dengan Kontroler PID-ANFIS pada Variasi Beban Naik .....	38
4.3.2 Respon Sistem dengan Kontroler PID-ANFIS pada Variasi Beban Turun .....	38
4.3.3 Respon Sistem dengan Kontroler PID-ANFIS pada Variasi Fluktuatif .....	39
<b>BAB 5</b>	
5.1 Kesimpulan.....	41
5.2 Saran.....	41
DAFTAR PUSTAKA .....	43
LAMPIRAN.....	45
RIWAYAT PENULIS .....	49

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Multistage Steam Turbine .....	7
Gambar 2.2 Pengaturan Kecepatan Turbin .....	8
Gambar 2.3 Sistem Pengaturan Kecepatan Turbin .....	9
Gambar 2.4 Konfigurasi Multistage Turbine dengan Pengaturan Kecepatan .....	10
Gambar 2.5 Struktur Blok Turbin .....	12
Gambar 2.6 Model Sederhana Sistem .....	15
Gambar 2.7 Diagram Blok Pengendali Proporsional .....	17
Gambar 2.8 Diagram Blok Pengendali Integral .....	17
Gambar 2.9 Diagram Blok Pengendali Diferensial .....	18
Gambar 2.10 Struktur ANFIS .....	18
Gambar 3.1 Blok Diagram Sistem .....	24
Gambar 3.2 Respon Sistem dengan $K=1$ .....	25
Gambar 3.3 Struktur PID-ANFIS .....	26
Gambar 3.4 Fungsi Keanggotaan Input .....	29
Gambar 3.5 Diagram Blok Error Model .....	29
Gambar 3.6 Blok Diagram Simulink .....	31
Gambar 3.7 Blok Diagram Sistem Secara Keseluruhan .....	32
Gambar 4.1 Grafik Varrasi Beban Naik .....	33
Gambar 4.2 Grafik Varrasi Beban Turun .....	34
Gambar 4.3 Grafik Varrasi Beban Fluktuatif .....	35
Gambar 4.4 Respon Sistem dengan Kontroler PID pada Variasi Beban Naik .....	36
Gambar 4.5 Respon Sistem dengan Kontroler PID pada Variasi Beban Turun .....	36
Gambar 4.6 Respon Sistem dengan Kontroler PID pada Variasi Beban Fluktuatif .....	37
Gambar 4.7 Respon Sistem dengan Kontroler PID-ANFIS pada Variasi Beban Naik .....	38
Gambar 4.8 Respon Sistem dengan Kontroler PID-ANFIS pada Variasi Beban Turun .....	38

Gambar 4.9 Respon Sistem dengan Kontroler PID-ANFIS pada Variasi  
8Beban Fluktuatif .....39



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Besaran pada Satuan Turbin.....	12
Tabel 3.1 Parameter Turbin Uap Multistage .....	24
Tabel 3.2 Partisi Variabel Input .....	28
Tabel 3.3 Konstanta Beban Variasi Naik .....	34
Tabel 3.4 Konstanta Beban Variasi Turun .....	34
Tabel 3.5 Konstanta Beban Fluktuatif .....	35

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

Latar belakang dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi parameter plant yaitu turbin uap *multistage*. Setelah itu akan dilakukan studi dan desain kontroler PID ANFIS pada pengaturan kecepatan untuk untuk dapat mempertahankan respon sistem ketika terjadi perubahan variasi beban. Variasi pembebanan dilakukan dengan cara memvariasikan kontanta beban yang akan dicari dari proses pendesainan sistem. Penelitian ini dibatasi pada parameter plant yang telah ditentukan dari penelitina pihak lain [1]. Kontroler PID-ANFIS digunakan untuk memperbaiki respon sistem mendekati orde satu dan mampu mempertahankan nilai steady state sehingga sistem tidak mengalami overshoot yang melebihi batas toleransi. Penelitian diawali dengan melakukan studi literatur, perancangan sistem, analisa respon dan desain kontroler, pengujian dan analisis metode pengaturan dan kesimpulan.

### 1.1 Latar Belakang

Pada proses konversi energi potensial pada uap menjadi energi listrik yang siap didistribusikan memerlukan berbagai macam proses kontrol untuk menjaga agar energi listrik yang dihasilkan dapat memiliki spesifikasi sesuai dengan yang dibutuhkan. Salah satu hal yang perlu diterapkan metode kontrol adalah putaran dari *steam turbine* yang terhubung pada generator. Hal ini karena putaran turbin yang memutar rotor dari generator akan memiliki peranan langsung dalam penentuan frekuensi tegangan yang dihasilkan dimana frekuensi tegangan yang dihasilkan akan sebanding dengan kecepatan putar dari rotor[1]. Apabila putaran yang terjadi pada turbin tidak konstan, maka tegangan yang dibangkitkan pada generator juga tidak akan konstan. Hal ini tidak sesuai dengan yang diinginkan dimana frekuensi tegangan yang dihasilkan oleh suatu generator idealnya adalah konstan dan sesuai dengan spesifikasi tertentu. Oleh karena itu, perlu diterapkannya kontroler yang digunakan untuk mengatur kecepatan putar pada *steam turbine* agar dapat menghasilkan frekuensi tegangan yang konstan.

Hal yang biasa dikontrol agar *steam turbine* dapat memiliki putaran sesuai dengan yang diinginkan adalah aliran *steam* yang mengalir masuk menuju turbin yang berasal dari *boiler*. Aliran dari *steam* tersebut diontrol

menggunakan *control valve* yang ada pada saluran masuk *steam turbine*. Pada mulanya, aliran uap banyak dikontrol menggunakan peralatan mekanik murni seperti *governor* dimana *governor* sendiri menggunakan putaran mesin yang dalam hal ini adalah *steam turbine* sebagai input yang akan mengatur intensitas aliran uap yang mengalir. *Governor* menggunakan prinsip gaya sentrifugal guna mengatur lebar buka tutup jalur yang dilewati oleh steam. Tetapi dengan metode ini, cukup sulit untuk mendapatkan output yang memiliki respon sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Oleh karena itu, pada *governor* sekarang biasanya menggunakan mikroprosesor yang dapat diprogram untuk mengontrol *control valve* agar memberikan bukaan valve yang dapat menghasilkan output putaran turbin sesuai dengan yang diinginkan. Kontroler yang biasa dipakai adalah kontroler PID karena kontroler ini memiliki konstruksi yang cukup sederhana dan juga memiliki kehandalan yang sudah teruji di dunia industri. Namun penentuan nilai parameter - parameter kontroler PID yang pas dinilai cukup sulit untuk diterapkan pada plant asli yang cenderung rumit dan dinamik. Oleh karena itu, perlu adanya metode khusus guna memudahkan kita untuk mengatur nilai parameter kontroler PID yaitu dengan metode kontroler PID ANFIS.

### **1.2 Perumusan Masalah**

Perumusan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Apakah metode kontrol yang diterapkan dapat mempertahankan nilai steady state sistem ketika beban divariasikan ?
2. Bagaimana proses perancangan metode kontrol ?

### **1.3 Batasan Masalah**

Permasalahan pada penelitian ini dibatasi oleh :

1. Parameter plant yang ditentukan dari penelitian pihak lain
2. Beban turbin bersifat integrator

### **1.4 Tujuan Penelitian**

1. Mendesain kontroler PID-ANFIS untuk pengujian dan analisa respon sistem
2. Menguji ketahanan sistem dengan dilakukannya variasi beban

### **1.5 Metodologi**

Tahapan penyelesaian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a) Studi Literatur

Studi literatur akan berisi pengumpulan serta pengkajian teori, data dan penelitian yang dianggap relevan dan terpercaya untuk mendukung keabsahan tugas akhir ini. Literatur yang digunakan akan memiliki batasan-batasan tertentu. Yaitu, literatur yang digunakan harus bersumber dari paper, jurnal, buku, maupun artikel yang berasal dari badan pemerintahan atau institusi akademik terpercaya.

- b) **Pemodelan Control Valve dan Steam Turbine**  
Pada tahap ini, akan dibuat model matematis dari plant yang berupa steam turbine beserta aktuator yang berupa kontrol *valve*. Setelah menemukan model matematis yang dibutuhkan, selanjutnya akan disusun transfer function dari plant. Dan juga pada tahap ini juga ditentukan spesifikasi output yang diinginkan yang kemudian akan dicapai dengan menggunakan kontroler PID ANFIS.
- c) **Desain Kontroler PID ANFIS**  
Setelah model didapat dari tahap pemodelan, selanjutnya adalah mendesain atau merancang kontroler agar keluaran kecepatan turbin uap *multistage* sesuai dengan kriteria yang kita inginkan. Pada penelitian ini akan digunakan Kontroler PID ANFIS.
- d) **Pengujian dan Simulasi**  
Tahap pengujian bertujuan untuk mengetahui kinerja dari sistem yang diinginkan. Pengujian dilakukan dengan menjalankan keseluruhan sistem dan memastikan tiap komponen bekerja sesuai dengan keinginan.
- e) **Analisa dan Evaluasi**  
Pada tahap ini, akan dilakukan analisa terhadap respon output yang didapatkan. Analisa dilakukan untuk mengetahui apakah respon output sudah memenuhi kriteria karakteristik yang sudah ditetapkan. Lalu dilakukan evaluasi serta revisi parameter pada kontroler apabila diperlukan.
- f) **Penyusunan Laporan**  
Pada tahap ini akan dilakukan penyusunan laporan terkait hasil proses Tugas Akhir yang telah dilakukan. Penyusunan buku tugas akhir dilakukan sebagai bentuk laporan tertulis dari proses dan hasil kerja terkait topik yang diusulkan.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Penulisan laporan penelitian ini dapat dijelaskan dengan sistematika sebagai berikut:

### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Bab ini membahas tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan penelitian, metodologi, sistematika penulisan serta relevansi penelitian yang dilakukan

### **BAB 2 SISTEM PENGATURAN KECEPATAN PUTAR TURBIN UAP *MULTISTAGE***

Dalam bab ini dibahas tentang permodelan sistem turbin uap multistage dengan identifikasi parameter-parameter yang diberikan. Dijelaskan juga hal-hal penting dalam desain sistem dan desain kontroler, seperti turbin uap, cara kerja turbin uap, kontroler PID, Kontroler ANFIS, model fuzzy Takagi-Sugeno, dan sebagainya.

### **BAB 3 PERANCANGAN SISTEM**

Perancangan sistem dilakukan dalam menentukan inisiasi bobot pada kontroler ANFIS agar memiliki keluaran respon yang diinginkan, tanpa adanya overshoot dan memiliki ketahanan sistem yang tinggi. Dalam implementasinya, sistem bekerja dengan mengontrol bukaan katup turbin dengan sinyal pengaturan pada actuator. Aktuator yang digunakan adalah servomotor yang menerima sinyal bukaan hasil selisih setpoint dengan sinyal kontrol keluaran kontroler PID-ANFIS. Pada akhirnya didesainlah kontroler PID ANFIS untuk mengatur kecepatan putar turbin pada sistem.

### **BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS METODE PENGATURAN**

Bab ini membahas tentang hasil simulasi sistem dengan kontroler PID-ANFIS, setelah itu dianalisis performa sistem terhadap variasi pembebanan

## **BAB 5 KESIMPULAN**

Bab ini membahas tentang kesimpulan yang didapatkan dari hasil penelitian yang dilakukan, lalu dihubungkan dengan tujuan penelitian untuk dilihat relevansinya.

### **1.7 Relevansi**

Setelah dilakukan simulasi pada MATLAB, kontroler fuzzy robust mampu menangani permasalahan yang ada, yaitu mempertahankan respon transien sistem, serta mempertahankan nilai steady state ketika diberi variasi pembebanan.

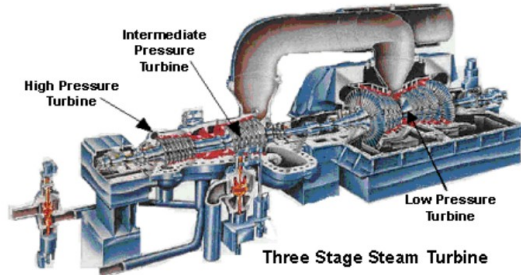
*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB 2 TEORI PENUNJANG

### 2.1 *Multistage Steam Turbine*

*Multistage Steam Turbine* bekerja pada torsi yang lebih besar karena terdiri dari tiga susunan, seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2.1** *Multistage Steam Turbine* [8]

Cara kerja *multistage steam turbine* adalah menggunakan sistem aliran uap panas yang didapatkan dari boiler. Uap panas bergerak dan memutar gigi-gigi pada turbin uap yang mengubah uap panas menjadi gaya, setelah itu disambungkan pada beban listrik dan menjadi fraksi daya-daya listrik tiap turbinnya. Uap panas yang telah digunakan untuk memutar turbin diubah wujudnya menjadi air melalui proses kondensasi untuk dipanaskan kembali. Siklus tersebut berlangsung terus-menerus sehingga membentuk siklus tertutup. *Multistage steam turbine* dibagi menjadi 3 bagian turbin dan 2 katup utama:

1. *High Pressure Turbine* ( $H_{HP}$ )
2. *Medium Pressure Turbine* ( $H_{MP}$ )
3. *Low Pressure Turbine* ( $H_{LP}$ )
4. *High Pressure Valve* (HPV)
5. *Re-Heat Valve* (RHV)

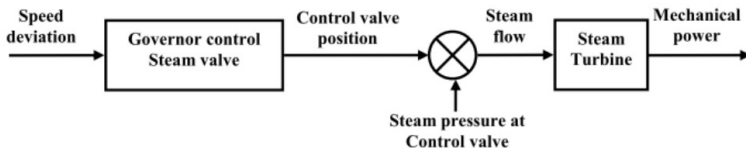
Tiap satuan turbinnya terdiri dari beberapa komponen mekanik utama, yaitu

1. *Power Shaft Turbine*
2. *Compressor*

3. *Combustion Chamber*
4. *Turbine Gears*

## 2.2 Dasar Sistem Pengaturan Kecepatan Turbin

Energi listrik yang dibangkitkan oleh sistem turbin uap bergantung pada aliran uap yang dihasilkan boiler dan bukaan katup pada HPV dan RHV. Dengan asumsi banyaknya aliran uap panas yang dihasilkan pada kondisi ideal, maka sistem pengaturan kecepatan turbin berfokus pada pengendalian bukaan katup. Bukaan katup diatur oleh *control valve position* untuk mendapatkan kecepatan yang diinginkan sesuai dengan kriteria kinerja turbin. Ilustrasi pengaturan kecepatan putar turbin dapat dilihat pada gambar 2.2



**Gambar 2.2** Pengaturan Kecepatan Turbin [1]

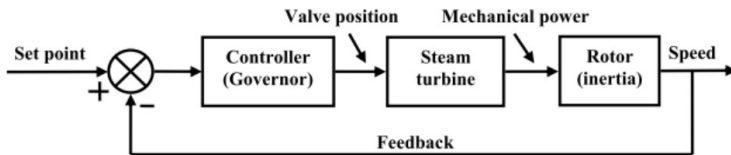
Kontrol turbin pada umumnya dilakukan oleh *governor valve* yang merupakan *mechanical hydraulic* dan atau *electrical hydraulic*. *Governor valve* melakukan kontrol berdasarkan pembacaan deviasi kecepatan pada turbin yang dipantau melalui computer. Bukaan *valve* dipengaruhi oleh tekanan uap panas, dimana aliran uap tersebut adalah produk dari sirkulasi pada area *valve* dan tekanan yang terdapat pada *valve*.

Pengaturan kecepatan turbin dilakukan untuk menjaga putaran turbin agar tetap menghasilkan frekuensi yang dibutuhkan yaitu sebesar 50Hz. Apabila dikonversikan ke kecepatan putar, maka kecepatan turbin harus dijaga sebesar 3000 rpm. Jika kecepatan turbin melebihi batas, maka akan terjadi *overshoot* tinggi pada turbin yang dapat menyebabkan kerusakan pada komponen turbin.

Jika kecepatan turbin terlalu rendah, maka turbin tidak dapat menghasilkan frekuensi listrik yang sesuai kebutuhan, yakni 50Hz. Dan jika kecepatan turbin terlalu tinggi, maka turbin akan berpotensi untuk berhenti bekerja (*trip*) atau berputar melebihi batas yang akhirnya akan menciptakan kerusakan fatal pada struktur turbin uap.

### 2.2.1 Sistem Pengaturan Kecepatan Turbin

Sistem pengaturan kecepatan turbin menggunakan sistem loop tertutup (*closed loop*). Penggunaan sederhana dari sistem ini salah satunya adalah pada turbin yang digunakan untuk mengoperasikan rotor pada kecepatan konstan. Kontroler menerima data kecepatan poros, lalu kecepatan poros dibandingkan dengan respon yang diinginkan. Jika terdapat perbedaan antara kecepatan actual dengan kecepatan yang diinginkan, kontroler mengirim sinyal kontrol ke actuator yang mengoperasikan *steam valve*, yang akan mengatur kecepatan sampai kedua kecepatan tersebut bernilai sama. Berikut adalah gambar sistem pengaturan kecepatan turbin.



**Gambar 2.3** Sistem Pengaturan Kecepatan Turbin [1]

Perubahan beban yang disebabkan oleh putaran poros atau variasi dari suplai tekanan, mempengaruhi keseimbangan antara energi yang disuplai ke turbin dari sistem uap dan energi yang keluar dari turbin. Jika energi yang tersedia lebih banyak dibanding energi yang terpakai, maka kecepatan poros akan naik. Kontroler akan mendeteksi kenaikan kecepatan ini dan akan memberikan respon untuk mengurangi energi berlebih, dilakukan dengan cara mengurangi energi yang masuk ke turbin dengan menutup katup turbin.

Pada turbin uap terdapat dua tipe pengaturan, yaitu: [1]

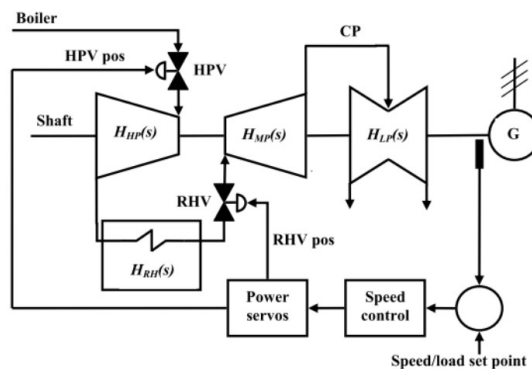
1. *Droop Control* atau *Proportional-Only Control* (P). Didefinisikan sebagai penurunan kecepatan dengan kenaikan beban, terjadi perubahan pada posisi katup proporsional terhadap sinyal antara kecepatan *setpoint* dengan kecepatan actual. Kekurangan utama dari kontrol proporsional adalah kontrol ini tidak dapat sepenuhnya menghilangkan *error* yang diakibatkan oleh perubahan beban.
2. *Isochronous Control*. Didefinisikan sebagai kenaikan beban tanpa adanya penurunan kecepatan. Kecepatan pada kondisi konstan tanpa pembebanan dipertahankan untuk menghilangkan *error* dan meminimalisir *overshoot*. Kontrol ini dapat diperoleh dengan

kontroler proporsional dan integrative (PI), pada umumnya dengan kontroler derivative (D), sehingga menghasilkan kontroler uap tipe PID.

### 2.2.2 Konfigurasi Turbin dengan Kontrol Kecepatan

Pada konfigurasi sistem yang diberikan, pada turbin uap terdapat katup *High Pressure* (HPV), katup *Re-Heater* (RHV), dan turbin uap sendiri terdiri dari bagian *High Pressure* (HP), *Medium Pressure* (MP), dan *Low Pressure* (LP). Pada setiap unit turbin, fungsi pengaturan kecepatan dan beban diperoleh melalui kendali dari HPV. Selain HPV, dibutuhkan juga katup lainnya yang digunakan untuk mengendalikan aliran uap yang diekstrak dari bagian HP turbin dan uap tersebut dikirim menuju bagian MP dan LO serta *crossover pipe* (CP). Integrasi turbin mampu mengatur dan membatasi kecepatan dengan melibatkan bukaan katup *re-heat* (RHV). *Re-heater* menyimpan uap dalam jumlah yang besar, sehingga kontrol dari HPV saja tidak cukup untuk membatasi kecepatan berlebih.

Pengaturan kecepatan berlebih melibatkan kontrol cepat dari HPV dan RHV, dikarenakan RHV mengontrol sekitar 60% sampai 80% dari total daya. Keluaran dari sensor kecepatan yang dibandingkan dengan kecepatan yang ingin dicapai (*setpoint*), menghasilkan pembacaan *error* oleh *speed control*. Sinyal kontrol tersebut lalu digunakan untuk menggerakkan servomotor sebagai aktuator untuk menggerakkan katup uap untuk mengatur aliran uap panas. Berikut adalah konfigurasi turbin uap multistage.



**Gambar 2.4** Konfigurasi *Multistage Steam Turbine* dengan Pengaturan Kecepatan [1]

### 2.2.3 Komponen Sistem Pengaturan Kecepatan Turbin

Dalam menjalankan sistem pengaturan kecepatan turbin, terdapat beberapa komponen utama, yaitu:

1. Blok Turbin

Pada sistem ini digunakan tiga buah turbin yang terdiri dari *High Pressure Turbine* (HP), *Medium Pressure Turbine* (MP), dan *Lower Pressure Turbine* (LP). Ketiga turbin tersebut digunakan bersamaan untuk meningkatkan kapasitas kerja dari turbin. Masukan dari turbin adalah laju aliran uap panas ( $m^3/s$ ) dan keluarannya adalah torsi turbin ( $Nm$ ) dan kecepatan putar turbin ( $rpm$ ).

2. *Governor/Speed Control*

*Governor* atau *speed control* pada sistem berfungsi untuk mengatur besarnya aliran uap yang masuk ke turbin melalui bukaan katup turbin. *Governor* yang biasa digunakan adalah *Electronic Hydraulic Control* yang menggunakan komponen elektronik untuk membaca perubahan kecepatan putar ( $\Delta rpm$ ) terhadap setpoint. Keluaran dari *governor* adalah sinyal kontrol berupa sinyal listrik yang digunakan untuk mengatur bukaan katup turbin.

3. Servomotor

Servomotor digunakan sebagai aktuator dalam menjalankan sistem, lebih tepatnya untuk mengatur bukaan katup. Servomotor bekerja secara otomatis tanpa menggunakan tenaga manusia. Masukan dari servomotor adalah sinyal kontrol dari *governor*, dan keluarannya adalah pengaturan bukaan katup turbin yang digunakan untuk menjaga kecepatan turbin agar sesuai dengan kecepatan yang ingin dicapai.

4. Katup Turbin

Katup turbin yang digunakan adalah *High Pressure Valve* (HPV) dan *Re-Heat Valve* (RHV). Dalam sistem ini, HPV berperan sebagai pintu masuk awal dari uap panas yang dihasilkan oleh boiler yang digunakan untuk memutar gigi-gigi turbin. Torsi turbin yang dihasilkan dari putaran tersebut nantinya akan menghasilkan energi listrik. HPV bekerja pada 0% dan 100% saja, artinya HPV hanya bekerja secara buka dan tutup, sedangkan katup RHV bekerja pada rentang bukaan 0% sampai 100%.

5. Beban Listrik (Generator)

Beban listrik berupa generator yang disambungkan dalam satu poros yang tetap dan sejajar dengan putaran turbin. Setiap kenaikan dari beban listrik akan menghasilkan penurunan kecepatan turbin dan

memberatkan torsi turbin. Keluaran dari generator sebagai beban listrik berupa frekuensi (Hz) dan daya listrik (MW) yang dihasilkan.

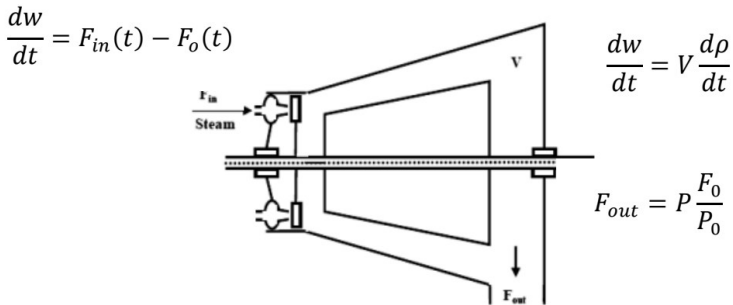
## 2.3 Pemodelan Multistage Steam Turbine

### 2.3.1 Model Blok Turbin

*Multistage steam turbine* dinyatakan dalam besaran fisika yang didapatkan dari pemodelan matematis dari turbin uap. Dinyatakan dalam beberapa besaran fisika, mulai dari berat uap turbin per unit, volume, kerapatan, laju aliran uap, perubahan tekanan, dan laju tekanan dalam detik. Beberapa besaran serta struktur blok turbin dinyatakan dalam tabel dan gambar di bawah ini:

**Tabel 2.1** Besaran pada Satuan Turbin

Simbol	Keterangan	Satuan
$W$	Berat uap per unit	$kg$
$V$	Volume keseluruhan uap per unit	$m^3$
$\rho$	Kerapatan dari aliran uap	$kg/m^3$
$F_{in}$	Laju masuk massa uap per detik	$kg/s$
$F_{out}$	Laju keluar massa uap per detik	$kg/s$
$t$	Waktu	$s$
$P$	Tekanan uap	$kPa$
$P_0$	Laju tekanan uap per detik	$kPa/s$
$T_t$	Perubahan kerapatan terhadap tekanan	Konstanta



**Gambar 2.5** Struktur Blok Turbin [2]

Saat temperatur turbin konstan:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dP}{dt} \cdot \frac{d\rho}{dP} \quad (2.1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{d\rho}{dt} \cdot \frac{dP}{d\rho} \quad (2.2)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dF_{out}}{dt} \cdot \frac{P_0}{F_0} \quad (2.3)$$

Lakukan substitusi  $\frac{dw}{dt}$  pada selisih aliran  $F_{in}(t) - F_{out}(t)$  dengan perubahan  $\frac{dw}{dt}$  pada turunan kerapatan terhadap waktu:

$$V \frac{d\rho}{dt} = F_{in}(t) - F_{out}(t) \quad (2.4)$$

Saat  $\frac{d\rho}{dt} = \frac{dP}{dt} \cdot \frac{d\rho}{dP}$ , maka persamaan 2.4 menjadi:

$$V \frac{dP}{dt} \cdot \frac{d\rho}{dP} = F_{in}(t) - F_{out}(t) \quad (2.5)$$

Didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dP}{d\rho} \cdot \frac{1}{V} \cdot F_{in}(t) - F_{out}(t) \quad (2.6)$$

Melihat persamaan 2.3, maka model matematika blok turbin adalah:

$$\frac{dF_{out}}{dt} \cdot \frac{P_0}{F_0} = \frac{dP}{d\rho} \cdot \frac{1}{V} \cdot F_{in}(t) - F_{out}(t) \quad (2.7)$$

$$\frac{dF_{out}}{dt} \cdot \frac{P_0}{F_0} \cdot \frac{dP}{d\rho} \cdot V = F_{in}(t) - F_{out}(t) \quad (2.8)$$

Dengan konstata perubahan kerapatan terhadap tekanan:

$$T_t = \frac{d\rho}{dP} \cdot \frac{P_0}{F_0} \cdot V \quad (2.9)$$

Maka persamaan diferensial turbin adalah:

$$\frac{dF_{out}}{dt} \cdot T_t + F_{out}(t) = F_{in}(t) \quad (2.10)$$

Lakukan transformasi Laplace dengan kondisi awal  $F_{in}(0) = 0$ :

$$F_{in}(s) = F_{out}(s) + T_t \cdot s \cdot F_{out}(s) \quad (2.11)$$

Dalam bentuk fungsi alih  $H_T$ :

$$\frac{F_{out}(s)}{F_{in}(s)} = \frac{1}{1+s \cdot T_t} \quad (2.12)$$

$$H_T(s) = \frac{F_{out}}{F_{in}} \quad (2.13)$$

$$F_{in}(s) = F_{out}(s)(1 + s \cdot T_t) \quad (2.14)$$

### 2.3.2 Fungsi Alih Servomotor dan Beban

Skema sistem pengaturan kecepatan turbin memerlukan dua komponen pendukung, yaitu servomotor dan beban turbin. Selain itu juga diperlukan adanya *magnetic brake* sewaktu-waktu jika ada perubahan pembebanan. Servomotor bekerja diluar sambungan turbin, berfungsi sebagai aktuator dalam mengoperasikan bukaan katup pada sistem pengaturan kecepatan turbin. Fungsi alih dari servomotor dinyatakan sebagai berikut: [1]

$$H_{SM}(s) = \frac{1}{T_{SM}s+1} \quad (2.15)$$

Beban turbin berbentuk integrator yang mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan, dengan asumsi bahwa *multistage steam turbine* berputar secara ideal tanpa adanya umpan balik dan gesekan antara ruas-ruasnya. Beban turbin tidak terhubung secara langsung dalam satu sambungan rotor, melainkan bekerja sebagai pengali torsi turbin untuk diubah menjadi kecepatan putar turbin. Beban turbin dihubungkan dengan beban listrik untuk menghasilkan daya listrik dalam satuan per unit 1 MW. Beban turbin dinyatakan dalam fungsi alih sebagai berikut: [3]

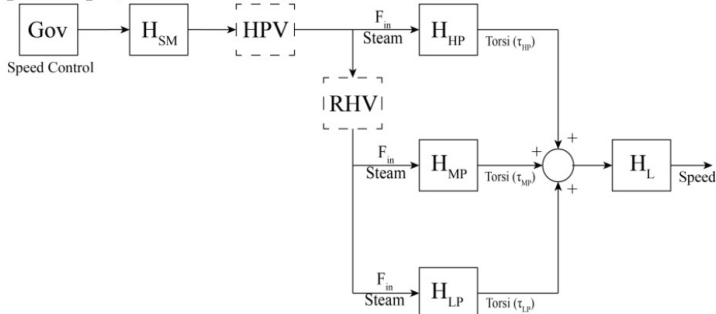
$$H_L(s) = \frac{1}{T_Ls+1} \quad (2.16)$$



### 2.3.3 Model Sederhana Sistem

Model sederhana dari sistem pengaturan secara keseluruhan didefinisikan dengan adanya turbin bertingkat berupa  $H_{HP}$ ,  $H_{MP}$ ,  $H_{LP}$  yang terhubung dalam satu poros putar yang sama. Konsekuensi dari konstruksi ini adalah setiap turbin memiliki torsi yang sama besar. Didefinisikan pula katup turbin sebagai instrument utama untuk mengatur laju aliran uap menuju turbin yang bertujuan untuk mempercepat atau memperlambat putaran turbin. Katup turbin berupa *High Pressure Valve* (HPV) dan *Re-Heat Valve* (RHV). Karakteristik dari tiap-tiap katup ini berbeda, HPV, atau yang dapat disebut *Main Stop Valve* (MSV), bekerja dalam sistem biner, hanya 0 dan 1 yang artinya hanya buka dan tutup saja. RHV bekerja dalam rentang 0% sampai 100%, yang artinya aliran masuk uap banyak dipengaruhi oleh RHV yang pada umumnya bekerja pada rentan 60%-80%.

Governor bertindak sebagai pengatur dari aktuator untuk mengatur kecepatan turbin. Governor bekerja dalam sistem komputer, dan tugasnya adalah membaca selisih kecepatan turbin dengan kecepatan yang diinginkan. Terdapat servomotor yang bertindak sebagai aktuator untuk mengatur bukaan katup turbin. Servomotor tidak terhubung dalam satu poros yang sama dengan turbin. Sebagai keluaran utama dari sistem, beban turbin berfungsi untuk mengubah torsi turbin menjadi kecepatan putar (rpm). Berikut adalah model sederhana dari sistem.



**Gambar 2.6** Model Sederhana Sistem

### 2.3.4 Persamaan Matematis Sistem

Masing-masing turbin memiliki parameter khusus, khususnya fraksi daya dan konstanta waktu turbin. Pembagian fraksi daya turbin dinyatakan dalam  $K_{HP}$ ,  $K_{MP}$ ,  $K_{LP}$ , sedangkan konstanta waktu turbin

dinyatakan dalam  $T_{HP}, T_{MP}, T_{LP}$ . Apabila dinyatakan dalam suatu persamaan, maka persamaan *multistage steam turbine* secara keseluruhan adalah:

$$G_T = H_{HP} + H_{MP} + H_{LP} \quad (2.18)$$

$$G_T(s) = \frac{K_{HP}}{sT_{HP}+1} + \frac{K_{MP}}{sT_{MP}+1} + \frac{K_{LP}}{sT_{LP}+1} \quad (2.19)$$

Untuk menyatakan persamaan matematis sistem keseluruhan, diperlukan hubungan servomotor dan beban turbin dengan turbin itu sendiri. Maka didapatkan hubungan sebagai berikut:

$$H_{SM} = \frac{1}{T_{SM}S+1} \quad (2.20)$$

$$G_T(s) = \frac{K_{HP}}{T_{HPS}+1} + \frac{K_{MP}}{T_{MPS}+1} + \frac{K_{LP}}{T_{LPS}+1} \quad (2.21)$$

$$H_L = \frac{1}{T_{LS}+K} \quad (2.22)$$

Apabila dilakukan operasi matematis, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{1}{T_{SMS}+1} \cdot \left( \frac{K_{HP}}{T_{HPS}+1} + \frac{K_{MP}}{T_{MPS}+1} + \frac{K_{LP}}{T_{LPS}+1} \right) \cdot \frac{1}{T_{LS}+K} \quad (2.23)$$

## 2.4 Algoritma Kontroler PID

Kontroler PID merupakan salah satu kontroler yang banyak digunakan untuk memperbaiki performa sistem di industri. Struktur kontroler PID yang sederhana menjadi salah satu faktor kontroler tersebut diminati. Parameter kontroler PID adalah penguatan proporsional  $K_p$ , waktu integral  $\tau_i$ , dan waktu derivatif  $\tau_d$ . Algoritma kontroler PID dapat dijelaskan pada Persamaan (2.22). [5]

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

$u(t)$  merupakan sinyal kontrol dan  $e(t)$  adalah sinyal kesalahan. Sinyal kontrol dari kontroler tersebut merupakan penjumlahan dari 3 aksi yaitu, aksi proporsional ( $P$ ), integral ( $I$ ) dan derivatif ( $D$ ). Kontroler PID memiliki fungsi untuk memperbaiki kesalahan melalui aksi proporsional,

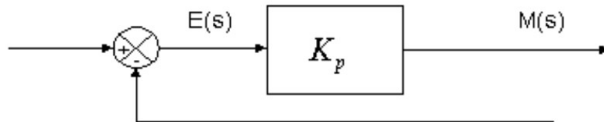
menghilangkan kesalahan pada keadaan tunak melalui aksi integral dan mengantisipasi kesalahan akan datang melalui aksi derivatif.

### 2.4.1 Kontroler Proporsional (P)

Seperti tercermin dari namanya, besar output unit kontrol P selalu sebanding dengan besarnya input. Kendali proporsional memiliki 2 parameter, pita proporsional (proportional band) dan konstanta proporsional. Hubungan antara pita proporsional ( $P_B$ ) dengan konstanta proporsional ( $K_p$ ) ditunjukkan secara presentasi oleh persamaan,

$$K_p = \frac{100\%}{P_B}$$

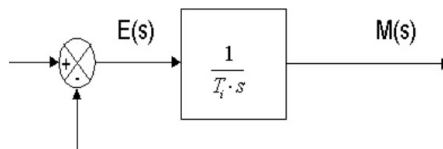
Dengan :  $P_B$  = Proportional Band ,  $K_p$  = Gain Proses



**Gambar 2.7** Diagram Blok Pengendali Proporsional

### 2.4.2 Kontroler Integral (I)

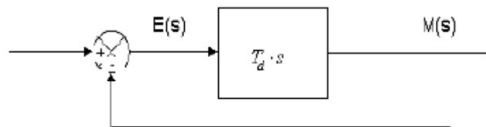
Pengendali integral memiliki karakteristik seperti halnya sebuah integral. Keluaran kendali sangat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Keluaran kendali ini merupakan jumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Kalau sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan.



**Gambar 2.8** Diagram Blok Pengendali Integral

### 2.4.3 Kontroler Diferensial (D)

Keluaran pengendali differensial memiliki sifat seperti halnya suatu operasi derivatif. Perubahan yang mendadak pada masukan kendali, akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat.



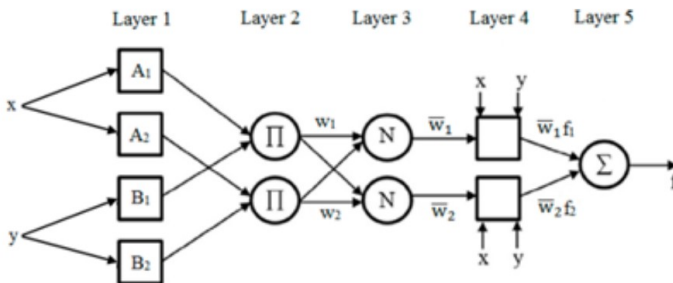
Gambar 2.9 Diagram Blok Pengendali Diferensial

## 2.5 ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)

Metode adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) merupakan metode yang menggunakan jaringan syaraf tiruan untuk mengimplementasikan system inferensi fuzzy. Keunggulan system inference fuzzy adalah dapat menerjemahkan pengetahuan dari pakar dalam bentuk aturan-aturan, namun biasanya dibutuhkan waktu yang lama untuk menetapkan fungsi keanggotaannya. Oleh sebab itu dibutuhkan teknik pembelajaran dari jaringan syaraf tiruan untuk mengotomatisasi proses tersebut sehingga dapat mengurangi waktu pencarian, hal tersebut menyebabkan metoda ANFIS sangat baik diterapkan dalam berbagai bidang.

### 2.5.1 Arsitektur ANFIS

Salah satu bentuk struktur yang sudah sangat dikenal adalah seperti terlihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Struktur ANFIS

Pembelajaran ANFIS adalah perubahan parameter fungsi keanggotaan masukan dan keluaran dengan menggunakan algoritma perambatan balik atau algoritma hybrid. Algoritma hybrid adalah gabungan antara algoritma backpropagation dan RLSE (*Recursive Least Squares Estimator*) yang digunakan untuk memperbaharui parameter.

Jaringan ANFIS pada gambar 8 terdiri dari lapisan-lapisan sebagai berikut

- Lapisan 1 : Tiap tiap neuron  $i$  pada lapisan pertama adaptif terhadap parameter suatu fungsi aktivasi. Keluaran dari tiap neuron berupa derajat keanggotaan yang diberikan oleh fungsi keanggotaan masukan, yaitu:  $\mu_{A_1}(x)$ ,  $\mu_{B_1}(y)$ ,  $\mu_{A_2}(x)$ , atau  $\mu_{B_2}(y)$ . Fungsi simpul pada lapisan ini adalah :

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \text{ untuk } i = 1,2$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_i}(y) \text{ untuk } i = 1,2$$

Sebagai contoh, misalkan fungsi keanggotaan yang digunakan adalah *generalized bell* berikut :

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}$$

{a,b,c} adalah parameter-parameter, biasanya  $b=1$ . Jika nilai parameter-parameter ini berubah, maka bentuk kurva yang terjadi pun akan ikut berubah. Parameter-parameter pada lapisan ini biasanya dikenal dengan nama *premise parameters*.

- Lapisan 2 : Pada tahap ini berlaku operasi perkalian (AND) antara nilai fuzzifikasi dari titik yang ada sebelumnya sebagai proses implikasi *fuzzy*. Persamaan keluaran pada simpul tetap ini adalah :

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y) \text{ untuk } i = 1,2$$

- Lapisan 3 : Setiap neuron pada lapisan ini adalah simpul tetap yang merupakan hasil perhitungan rasio dari aturan derajat keanggotaan ke- $i$  dengan jumlah dari seluruh aturan derajat keanggotaan, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{1}{w_1 + w_2}, \quad i = 1,2$$

- Lapisan 4 : Setiap neuron pada lapisan ini merupakan simpul adaptif terhadap suatu keluaran :

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}(p_i x + q_i y + r_i)$$

dengan  $\bar{w}_i$  adalah *normalized firing strength* pada lapisan ke-3 dan  $(p_i, q_i, r_i)$  adalah parameter-parameter pada neuron tersebut.

Parameter-parameter pada lapisan tersebut disebut dengan nama *consequent parameters*.

- Lapisan 5 : Output layer

Setiap neuron pada lapisan ini merupakan simpul tunggal tetap yang menghitung keluaran dengan cara menjumlahkan semua masukan.

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i \bar{w}_i f_i}{\sum_i \bar{w}_i}$$

Proses adaptasi yang terjadi dalam sistem ANFIS dikenal juga dengan proses pembelajaran, yaitu parameter-parameter ANFIS (baik *premise* maupun *consequent*) akan diperbaharui selama proses pembelajaran. Pada saat parameter-parameter tersebut ditemukan, keluaran yang terjadi merupakan kombinasi linier dari *consequent parameters*, yaitu

:

$$\begin{aligned} f &= \frac{w_1}{w_1+w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1+w_2} f_2 \\ &= \bar{w}_1(p_{11}x + q_{12}y + r_{10}) + \bar{w}_2(p_{21}x + q_{22}y + r_{20}) \\ &= (\bar{w}_1x)p_{11} + (\bar{w}_1y)q_{12} + (\bar{w}_1x)p_{21} + \bar{w}_1r_{10} + (\bar{w}_2x)p_{11} \\ &\quad + (\bar{w}_2y)q_{22} + \bar{w}_2r_{20} \end{aligned}$$

Algoritma pembelajaran ANFIS akan mengatur parameter-parameter *output*  $p_{ij}$ ,  $q_{ij}$ , dan  $r_{ij}$  secara maju (*forward*) dan akan mengatur parameter-parameter himpunan *fuzzy* ( $a_i, b_i, c_i$ ) secara mundur (*backward*). Pada langkah maju, masukan jaringan akan merambat maju sampai pada lapisan ke empat, dimana parameter-parameter  $p_{ij}$  akan diidentifikasi menggunakan metode *least square*. Sedangkan pada langkah mundur, galat / *error* akan merambat mundur dan parameter-parameter ( $a_i, b_i, c_i$ ) akan diperbaiki dengan menggunakan metode *backpropagation gradient descent*.

### 2.5.2 Fuzifikasi

Fuzifikasi adalah proses pemetaan input dan output sistem agar sesuai dengan himpunan fuzzy. Pemetaan dilakukan dengan cara mencocokkan input dengan fungsi keanggotaan (*membership function*) yang telah dipilih. Ada banyak jenis fungsi keanggotaan yang dapat digunakan dalam proses fuzifikasi, tetapi bentuk *triangular* dan *trapezoidal* adalah metode yang paling banyak digunakan dalam pembentukan fungsi keanggotaan fuzzy dikarenakan metode tersebut

lebih mudah diimplementasikan pada kontroler. Persamaan fungsi keanggotaan untuk bentuk *triangular* adalah sebagai berikut: [5]

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{x-b}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.24)$$

Sedangkan untuk fungsi keanggotaan bentuk *trapezoidal* adalah sebagai berikut:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & (x < a) \text{ or } (x > d) \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \end{cases} \quad (2.25)$$

### 2.5.3 Inferensi Takagi Sugeno

Model fuzzy Takagi-Sugeno diperkenalkan oleh Tomohiro Takagi dan Michio Sugeno pada tahun 1985. Model fuzzy Takagi-Sugeno ini banyak digunakan pada sistem SISO nonlinear.

Model fuzzy Takagi-Sugeno menggunakan rule base dengan format IF-THEN. Berikut adalah rule base pada fuzzy Takagi-Sugeno:

$$\begin{aligned} & \text{IF } x(t) \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } x^{n-1}(t) \text{ is } F_n^i \\ & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \quad (i = 1, 2, q) \end{aligned} \quad (2.29)$$

dimana  $F_j^i$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) adalah set fuzzy,  $x(t) \in R^n$  adalah vector state,  $u(t) \in R^1$  adalah input kontrol,  $A_i \in R^{n \times n}$ ,  $B_i \in R^{n \times 1}$ ,  $q$  adalah jumlah dari rule IF-THEN, dan matrix konstanta yang digunakan memiliki bentuk seperti berikut:

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_1^i & a_2^i & a_3^i & \dots & a_n^i \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_i \end{bmatrix}$$

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

### 3.1 Perancangan Sistem Keseluruhan

Perancangan sistem dilakukan untuk menguji dinamika sistem terhadap beban. Program MATLAB digunakan untuk perancangan dan simulasi sistem. Dipaparkan juga diagram blok sistem secara keseluruhan untuk melakukan pemodelan, pengujian, dan analisa hasil yang akan digunakan dalam pengaturan kecepatan putaran turbin.

Dalam penelitian kali ini, digunakan metode pengaturan dengan menggunakan kontroler PID-ANFIS yang merupakan gabungan dari kontroler PID dan ANFIS. ANFIS akan digunakan untuk melakukan evaluasi terhadap nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  melalui proses learning. Hasil learning akan terus berlangsung hingga sistem dapat mempertahankan kondisi steady statenya sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan.

#### 3.1.1 Model Matematis Sistem

Sebelumnya telah diketahui model matematika dari sistem pengaturan kecepatan putaran turbin uap, yang dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$G(s) = H_{SM}(s) + G_T(s) + H_L(s) \quad (3.1)$$

$$H_{SM} = \frac{1}{T_{SMs+1}}, G_T = \frac{K_{HP}}{T_{HPS}+1} + \frac{K_{MP}}{T_{MPS}+1} + \frac{K_{LP}}{T_{LPS}+1}, H_L = \frac{1}{T_{LS}+K} \quad (3.2)$$

$$G(s) = \frac{1}{T_{SMs+1}} \left( \frac{K_{HP}}{T_{HPS}+1} + \frac{K_{MP}}{T_{MPS}+1} + \frac{K_{LP}}{T_{LPS}+1} \right) \left( \frac{1}{T_{LS}+K} \right) \quad (3.3)$$

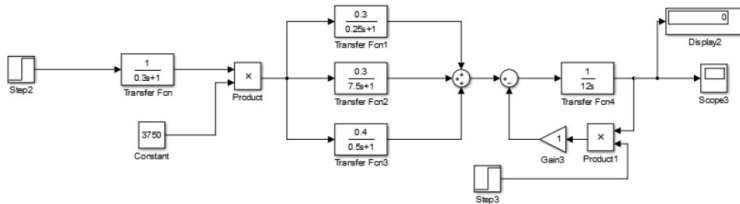
Parameter yang ditentukan adalah fraksi daya turbin serta konstanta waktu tiap tingkat turbin uap *multistage*. Parameter sistem yang digunakan dinyatakan dalam table berikut:

**Tabel 3.1** Parameter Turbin Uap *Multistage* [2]

Parameter	Turbin Uap HP	Turbin Uap MP	Turbin Uap LP
<b>Fraksi Daya</b>	$K_{HP} = 0.3$	$K_{MP} = 0.3$	$K_{LP} = 0.4$
<b>Konstanta Waktu</b>	$T_{HP} = 0.25$	$T_{MP} = 7.5$	$T_{LP} = 0.5$

Untuk parameter konstanta waktu pada *servomotor* dan beban turbin, secara berturut-turut adalah  $T_{SM} = 0.3$  dan  $T_L = 12$ .

Untuk menentukan nilai  $K$ , yaitu konstanta beban, dilakukan simulasi dengan memvariasikan nilai  $K$  agar kecepatan yang dihasilkan masih dalam standar operasi. Standart operasi frekuensi dengan perubahan beban listrik pada 50 Hz terjadi pada rentang 49.75 sampai 50.25 yang apabila di konversi menjadi kecepatan adalah pada rentang 2985 sampai 3015. Berikut adalah blok diagram yang digunakan untuk mendapatkan nilai  $K$ .



**Gambar 3.1** Blok Diagram Sistem

Input step merupakan bukaan katup dengan kecepatan nominal yaitu 80%. Konstanta bernilai 3750 menyatakan kecepatan maksimal turbin yang dihasilkan oleh uap yang masuk ke turbin. Melalui proses ini didapatkan nilai  $K$  dengan rentang 0.9945 sampai 1,0045.

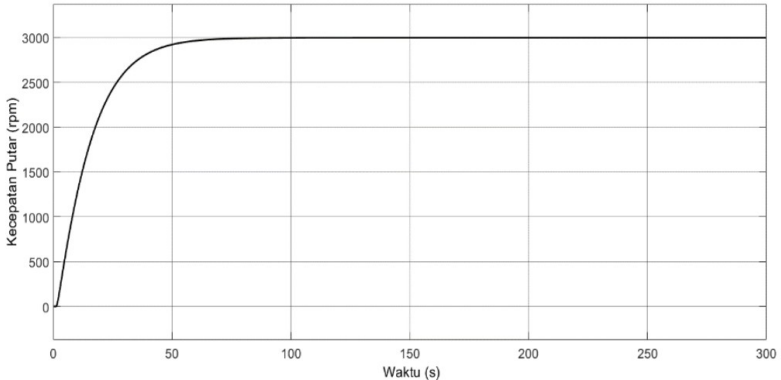
Setelah didapatkan seluruh parameter, maka persamaan matematis sistem secara keseluruhan adalah sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{10687.5s^2 + 36000s + 5625}{0.28125s^4 + 2.6625s^3 + 8.225s^2 + 8.55s + 1} \left( \frac{1}{12s + K} \right) \quad (3.4)$$

Dari persamaan matematis diatas, bisa didapatkan persamaan matematis yang berbeda yang dipengaruhi oleh nilai dari  $K$ .

### 3.1.2 Uji Respon Sistem

Selanjutnya akan dilakukan uji respon sistem pada sistem state space yang telah dibuat pada Simulink. Akan digunakan nilai  $K = 1$  yang menyatakan kondisi beban nominal. Berikut adalah hasil simulasi tersebut:



**Gambar 3.2** Respon Sistem dengan  $K = 1$

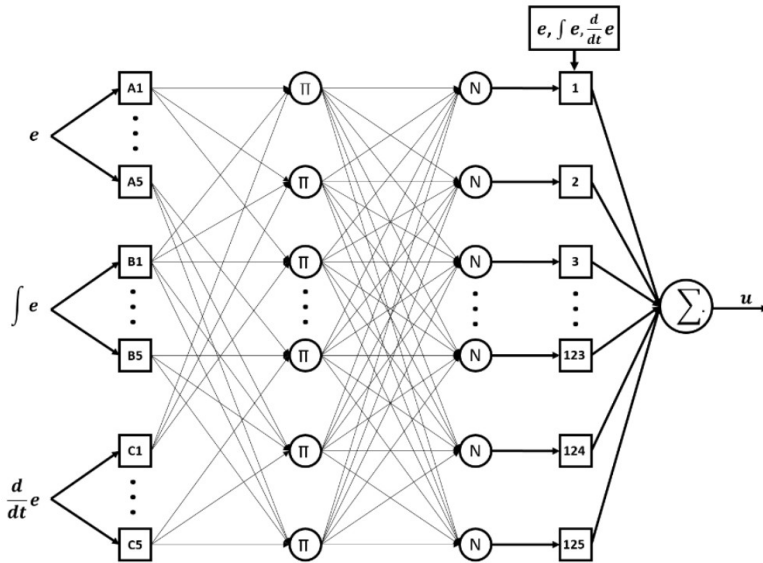
Dari respon sistem ini, bisa diperoleh spesifikasi kerja yang diinginkan. Untuk konstanta waktu  $\tau$ , akan diambil data ketika respon memiliki nilai  $\pm 95\%$ . Respon memiliki nilai steady state sebesar 5630, sehingga 95% dari steady state adalah  $\pm 5348.5$ . Nilai tersebut dicapai ketika sistem telah berjalan selama kurang lebih 40 detik. Sehingga, nilai konstanta waktu yang diinginkan adalah:

$$\begin{aligned} 3\tau &= 40s \\ \tau &= \frac{40}{3} = 13.33s \end{aligned} \quad (3.5)$$

### 3.2 Desain Kontroler PID-ANFIS

ANFIS adalah penggabungan mekanisme sistem inferensi fuzzy yang digambarkan dalam arsitektur jaringan syaraf. Sistem inferensi fuzzy yang digunakan adalah sistem inferensi fuzzy model Tagaki-Sugeno-Kang (TSK) orde satu dengan pertimbangan kesederhanaan dan kemudahan komputasi. Input dari ANFIS merupakan error, integral error dan diferensial error dari sistem sehingga disebut PID-ANFIS.

### 3.2.1 Struktur Kontroler PID-ANFIS



**Gambar 3.3** Struktur PID-ANFIS

Jaringan ANFIS pada gambar 3.3 terdiri dari lapisan-lapisan sebagai berikut

- Lapisan 1 :

Keluaran dari tiap neuron berupa derajat keanggotaan yang diberikan oleh fungsi keanggotaan masukan. Fungsi keanggotaan yang digunakan adalah segitiga. Fungsi keanggotaan tiap-tiap masukan berjumlah 5 sehingga layer 2 memiliki 15 node. Fungsi simpul pada lapisan ini adalah :

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(e) \text{ untuk } i = 1,2,4,3,5$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_i}(ie) \text{ untuk } i = 1,2,3,4,5$$

$$O_{1,i} = \mu_{C_i}(de) \text{ untuk } i = 1,2,3,4,5$$

- Lapisan 2 :

Pada tahap ini berlaku operasi perkalian (AND) antara nilai fuzzifikasi dari titik yang ada sebelumnya sebagai proses implikasi *fuzzy*. Persamaan keluaran pada simpul tetap ini adalah :

$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_j}(e), \mu_{B_j}(ie), \mu_{C_j}(de)$ , untuk  $i = 1,2,3,\dots,125$   $j=1,2,3,4,5$   
 Sehingga layer 3 akan memiliki 125 node.

- Lapisan 3 :

Setiap neuron pada lapisan ini adalah simpul tetap yang merupakan hasil perhitungan rasio dari aturan derajat keanggotaan ke- $i$  dengan jumlah dari seluruh aturan derajat keanggotaan, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{125} w_i}, \quad i = 1,2,3, \dots, 125$$

- Lapisan 4 :

Setiap neuron pada lapisan ini merupakan simpul adaptif terhadap suatu keluaran. Pada lapisan ini terjadi proses inferensi takagi sugeo yang dikalikan dengan output dari layer sebelumnya.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}(a_i e + b_i ie + c_i de + d_i)$$

dengan  $\bar{w}_i$  adalah *normalized firing strength* pada lapisan ke-3 dan  $(a_i, b_i, c_i, d_i)$  adalah parameter-parameter pada neuron tersebut. Parameter-parameter pada lapisan tersebut disebut dengan nama *consequent parameters*.

- Lapisan 5 :

Setiap neuron pada lapisan ini merupakan simpul tunggal tetap yang menghitung keluaran dengan cara menjumlahkan semua masukan.

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i \bar{w}_i f_i}{\sum_i \bar{w}_i}$$

Proses adaptasi yang terjadi dalam sistem ANFIS dikenal juga dengan proses pembelajaran, yaitu parameter-parameter ANFIS (baik *premise* maupun *consequent*) akan diperbaharui selama proses pembelajaran. Untuk kesederhanaan pada perancangan kontroler ini yang akan mengalami proses learning merupakan parameter consequent sedangkan parameter premise akan dibuat tetap. Parameter-parameter  $(a_i, b_i, c_i, d_i)$  akan diperbaiki dengan menggunakan metode back propagation gradient descent.

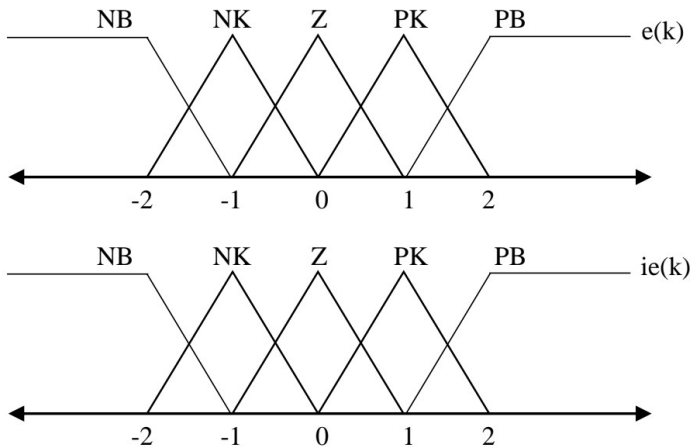
### 3.2.2 Fuzzifikasi

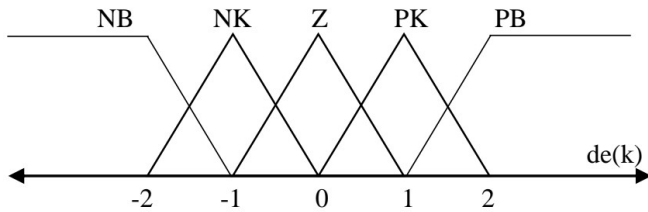
Fuzzifikasi dilakukan untuk mendapatkan definisi awal dari struktur fuzzy. Dalam proses fuzzifikasi, diperlukan proses pemetaan input sistem agar sesuai dengan himpunan fuzzy. Pemetaan digunakan dengan membuat fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan yang akan digunakan dalam kontroler ini adalah bentuk triangular dengan 5 fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan dinyatakan dalam partisi variabel input terdiri dari deskripsi linguistik dan adanya nilai indeks. Berikut adalah partisi dari variabel *input* :

**Tabel 3.2** Partisi variabel input

Deskripsi Linguistik	Indeks
<b>Negatif Besar (NB)</b>	1
<b>Negatif Kecil (NK)</b>	2
<b>Zero (Z)</b>	3
<b>Positif Kecil (PK)</b>	4
<b>Positif Besar (PB)</b>	5

Diketahui bahwa fungsi keanggotaan memiliki nilai yang ternormalisasi  $[-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2]$ . Hal tersebut dilakukan untuk tetap membuat nilai keanggotaan tetap pada referensinya pada nilai 0. Lalu deskripsi linguistik dan nilai keanggotaan dinyatakan dalam fungsi tiga input sebagai berikut

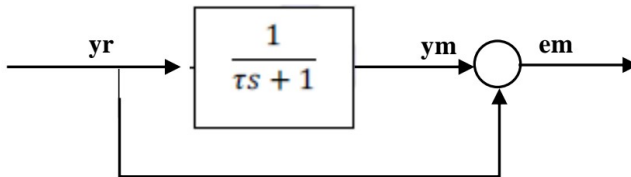




**Gambar 3.4** Fungsi Keanggotaan input

### 3.2.3 Error Model

Error model berfungsi untuk mendapatkan nilai error yang akan digunakan dalam proses learning untuk merevisi nilai dari parameter inferensi Takagi Sugeno. Parameter tersebut mewakili nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$



**Gambar 3.5** Diagram blok error model

Untuk mendapatkan persamaan error model, lakukan penurunan sebagai berikut :

$$y_m(s) = \frac{1}{\tau s + 1} y_r$$

$$e_m(s) = y_r - \frac{1}{\tau s + 1} y_r$$

$$e_m(s) = \frac{\tau s}{\tau s + 1} y_r$$

$$e_m(s) \cdot \tau s + e_m(s) = \tau s \cdot y_r$$

Karena  $y_r$  = step (syarat regulator)

$$\tau s \cdot y_r = 0$$

$$e_m(s) \cdot \tau s + e_m(s) = 0$$

$$\tau \frac{de_m}{dt} + e_m = 0$$

Diubah dalam bentuk diskrit dengan domain k :

$$\tau \frac{e_m(k) - e_m(k-1)}{T_s} + e_m(k) = 0$$

$$e_m(k) = \frac{\tau}{\tau + T_s} e_m(k-1)$$

Agar sistem mengikuti error model maka :

$$\varepsilon = e_m(k) - e(k); \quad \varepsilon = \text{nilai error}$$

$$e_m(k) = \frac{\tau}{\tau + T_s} e_m(k-1) - e(k)$$

### 3.2.4 Metode Back Propagation Gradient Descent

Algoritma pelatihan backpropagation atau yang sering disebut dengan propagasi balik termasuk metode pelatihan supervisi dimana terdapat pasangan input-target serta didesain untuk operasi jaringan feed forward multilapis. Algoritma gradient descent mencari derivasi dari E terhadap vektor bobot untuk melakukan update bobot, dimana E merupakan error dari perbedaan antara output dengan target yang diinginkan.

Error pada layer 5 (e) merupakan output dari model error

Error pada layer 4 berasal dari error layer 5 yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$ex_i = \frac{O_{4i}}{\sum O_{4i} \cdot O_{3i}} \cdot e$$

Error yang didapatkan pada masing-masing node di layer 4 dapat digunakan untuk melakukan revisi bobot pada parameter inferensi Takagi Sugeno. Revisi parameter dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$a_i(k+1) = a_i(k) + \lambda \cdot ex_i(k) \cdot 1 \cdot e(k)$$

$$b_i(k+1) = b_i(k) + \lambda \cdot ex_i(k) \cdot 1 \cdot ie(k)$$

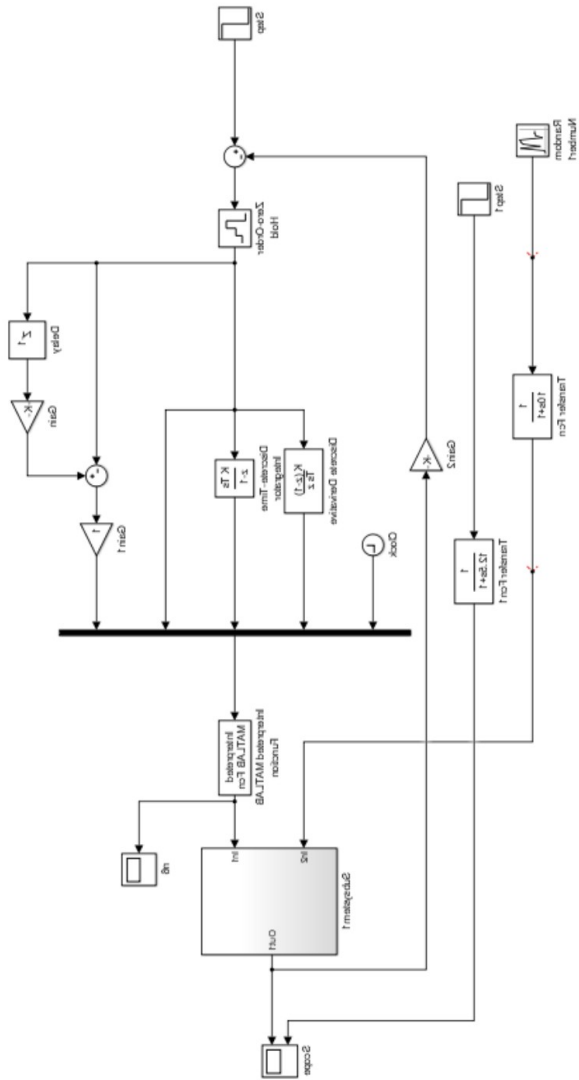
$$c_i(k+1) = c_i(k) + \lambda \cdot ex_i(k) \cdot 1 \cdot de(k)$$

$$d_i(k+1) = d_i(k) + \lambda \cdot ex_i(k) \cdot 1 \cdot 1$$

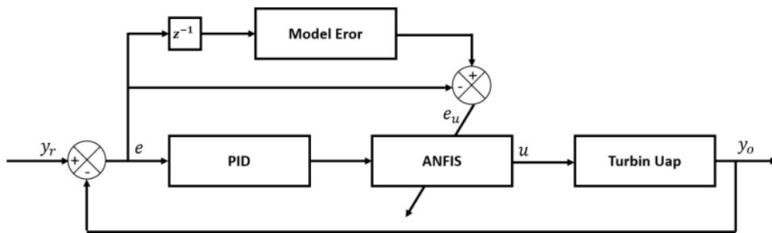
### 3.2.5 Blok Diagram Sistem Secara Keseluruhan

Secara keseluruhan, sistem terdiri dari persamaan plant, kontroler ANFIS dengan input berupa error, diferensial error dan integral, error model yang digunakan untuk mendapatkan nilai error sebagai acuan revisi bobot parameter serta variasi input untuk proses learning. Berikut adalah gambaran sistem secara keseluruhan.





**Gambar 3.6** Blok Diagram Simulink



**Gambar 3.7** Blok Digram Keseluruhan

### 3.2.6 Proses Pembelajaran

Proses pembelajaran bertujuan untuk mendapatkan bobot parameter  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  yang sesuai terhadap berbagai perubahan beban yang terjadi. Variasi beban yang diberikan pada proses pembelajaran memiliki nilai dengan rentang beban minimum hingga beban maksimum yaitu ketika nilai  $K$  antara 0.75 hingga 1.25. Variasi beban dilakukan dengan cara memberikan sinyal random  $K$  dengan mean 0, varian 0.25 dan interval 100 detik sebanyak 500 data. Proses learning dikatakan selesai apabila output yang dihasilkan telah sesuai dengan kriteria yaitu settling time yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan steady state ketika terjadi perubahan beban tidak lebih dari 50 detik dan sistem tidak mengalami overshoot lebih dari 5%.

## BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS

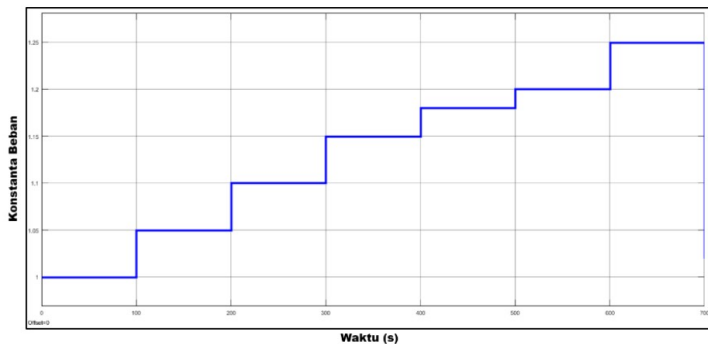
Pengujian dan analisis pada bab ini dilakukan untuk melihat performa sistem ketika menggunakan kontroler PID-ANFIS. Variasi pembebanan dilakukan untuk menguji kemampuan kontroler untuk mempertahankan steady state. Pengujian sistem dengan kontroler PID-ANFIS dilakukan untuk menganalisis performa sistem ketika terjadi perubahan beban, yang kemudian akan dilakukan analisa sinyal kontrol untuk melihat perilaku actuator yang digunakan, yaitu servomotor.

### 4.1 Jenis Beban

Terdapat tiga jenis variasi beban yang akan diimplementasikan, yaitu beban naik, beban turun, dan beban fluktuatif. Variasi beban naik adalah ketika beban terus bertambah secara bertahap mulai dari beban minimal, nominal, ke maksimal. Sebaliknya dengan beban turun, bebannya akan terus menurun. Sedangkan beban pada variasi beban fluktuatif tidak teratur namun masih dalam batas beban minimal dan maksimal. Tujuan dilakukannya variasi pembebanan pada sistem adalah supaya dapat melihat kemampuan kontroler untuk mempertahankan steady state serta melihat kecepatan kontroler untuk mengembalikan output ke steady state ketika terjadi perubahan beban.

Untuk membuat variasi beban, digunakan simulasi pada MATLAB. Pengujian dilakukan dengan menggunakan blok Repeating Sequence Stair pada Simulink. Berikut adalah variasi beban yang digunakan.

#### A. Variasi Beban Naik



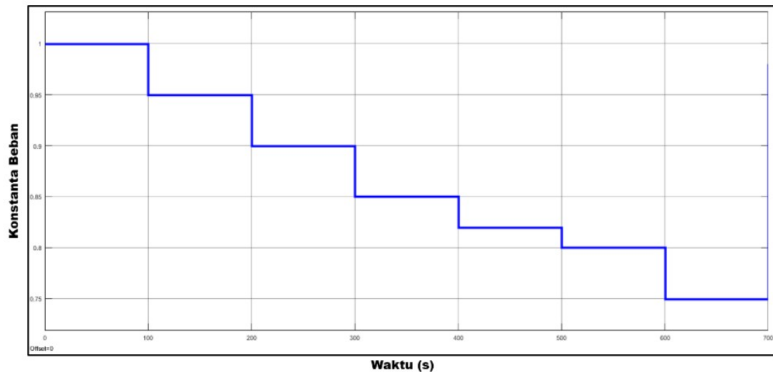
**Gambar 4.1** Grafik Variasi Beban Naik

Pada variasi beban naik, digunakan konstanta beban sebagai berikut.:

**Tabel 4.1** Konstanta Beban Variasi Beban Naik

Waktu	Konstanta Beban
0	1
100	1.02
200	1.05
300	1.10
400	1.15
500	1.18
600	1.20
700	1.25

#### B. Variasi Beban Turun



**Gambar 4.2** Grafik Variasi Beban Turun

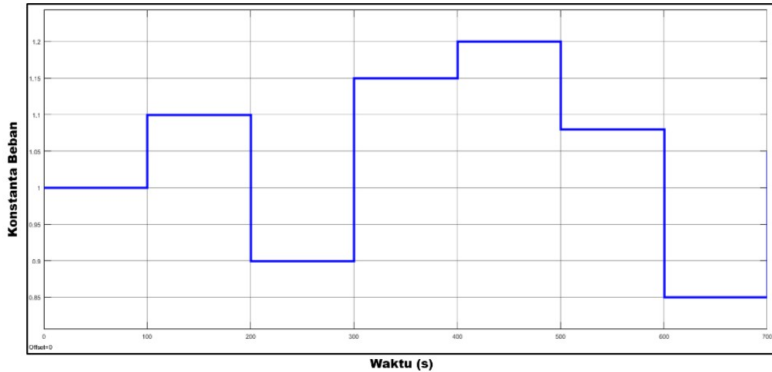
Pada variasi beban turun, digunakan beban sebagai berikut.

**Tabel 4.2** Konstanta Beban Variasi Beban Turun

Waktu	Konstanta Beban
0	1
100	0.98
200	0.95
300	0.90

400	0.85
500	0.82
600	0.80
700	0.75

### C. Variasi Beban Fluktuatif



**Gambar 4.3** Grafik Variasi Beban Fluktuatif

Pada variasi beban fluktuatif, digunakan beban sebagai berikut.

**Tabel 4.3** Konstanta Beban Variasi Beban Fluktuatif

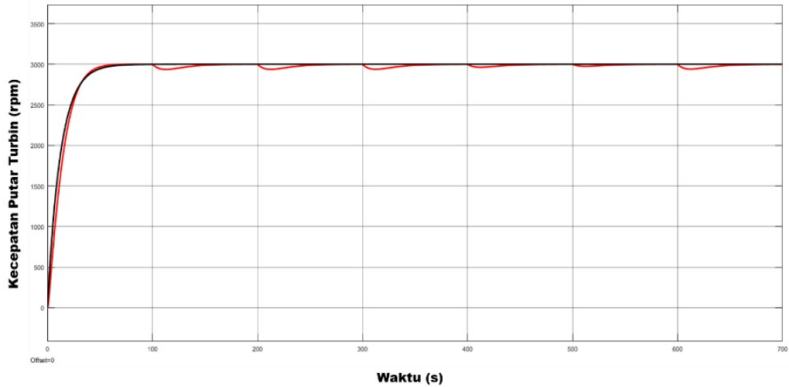
Waktu	Konstanta Beban
0	1
100	1.05
200	1.10
300	0.90
400	1.15
500	1.20
600	1.08
700	0.85

## 4.2 Respon Sistem dengan Kontroler PID

Pertama akan dilakukan pengendalian sistem hanya dengan menggunakan kontroler PID biasa untuk menguji kemampuan output untuk mempertahankan steady state ketika terjadi perubahan variasi beban. Dilakukan perhitungan RMSE untuk mengukur performansi output. Pada

kontroler PID proses tuning dilakukan secara otomatis menggunakan MATLAB.

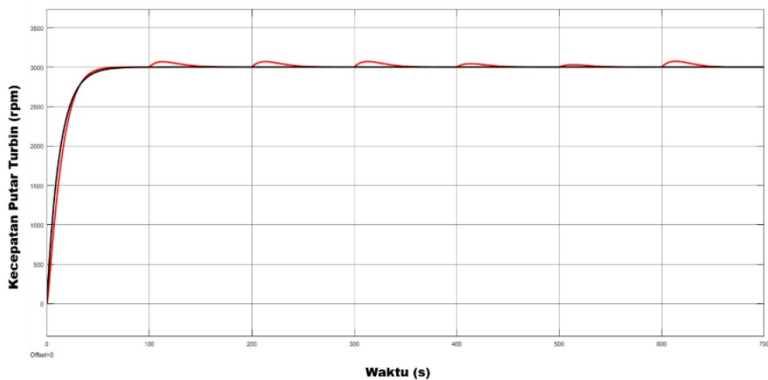
#### 4.2.1 Respon Sistem dengan Kontroler PID pada Variasi Beban Naik



**Gambar 4.4** Respon Kontroler PID pada Variasi Beban Naik

Pada respon sistem terlihat bahwa kontroler mampu mempertahankan kecepatan pada 3000 rpm namun terjadi penurunan kecepatan setiap 100 detik. Penurunan terbesar terjadi pada pembebanan pertama yang mengakibatkan kecepatan menurun hingga 2946 rpm. Selanjutnya didapatkan perhitungan nilai RMSE dari output terhadap referensi sebesar 3,63%.

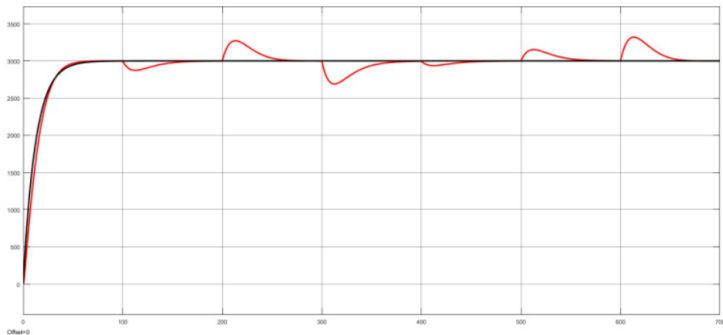
#### 4.2.2 Respon Sistem dengan Kontroler PID pada Variasi Beban Turun



**Gambar 4.5** Respon Kontroler PID pada Variasi Beban Turun

Pada respon sistem terlihat bahwa kontroler mampu mempertahankan kecepatan pada 3000 rpm namun terjadi kenaikan kecepatan setiap 100 detik. Kenaikan terbesar terjadi pada pembebanan pertama yang mengakibatkan kecepatan naik hingga 3085 rpm. Selanjutnya didapatkan perhitungan nilai RMSE dari output terhadap referensi sebesar 1.68%.

#### 4.2.3 Respon Sistem dengan Kontroler PID pada Variasi beban Fluktuatif



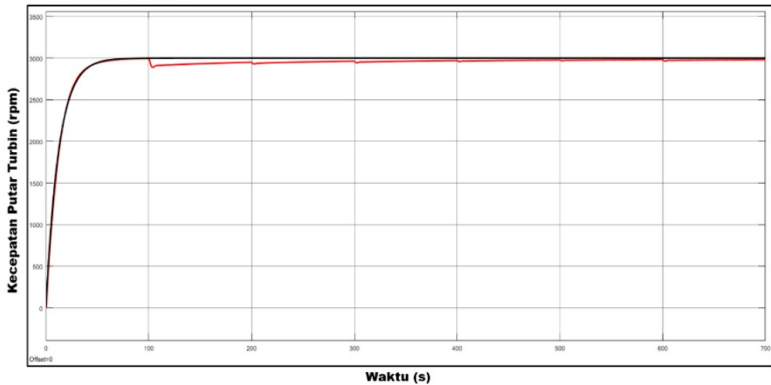
**Gambar 4.6** Respon Kontroler PID pada Variasi Beban Fluktuatif

Pada respon sistem terlihat bahwa kontroler mampu mempertahankan kecepatan pada 3000 rpm namun terjadi peningkatan kecepatan saat beban turun dan penurunan kecepatan saat beban naik yang cukup signifikan. Kenaikan terbesar terjadi pada pembebanan keenam yang mengakibatkan kecepatan naik hingga 3351 rpm. Penurunan terbesar terjadi pada pembebanan ketiga yang mengakibatkan kecepatan turun hingga 2705 rpm. Selanjutnya didapatkan perhitungan nilai RMSE dari output terhadap referensi sebesar 3.06%.

#### 4.3 Respon Sistem dengan Kontroler PID-ANFIS

Selanjutnya akan digunakan kontroler PID-ANFIS yang telah didesain sebelumnya untuk mengontrol sistem. Kontroler PID-ANFIS sendiri memiliki tiga input berupa error, integral error dan diferensial error. Gain dari PID akan dituning melalui proses learning dengan berbagai variasi pembebanan.

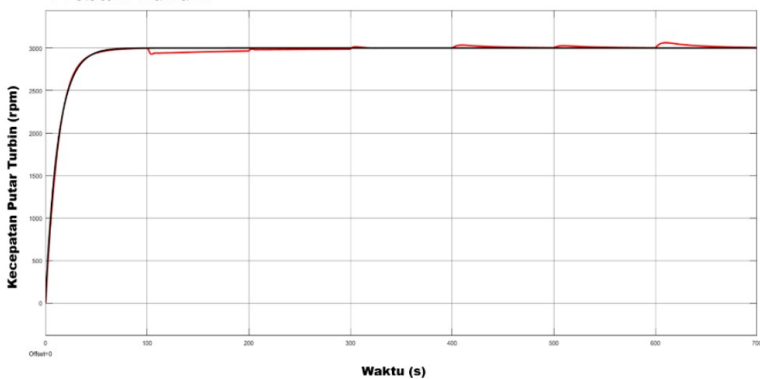
### 4.3.1 Respon Sistem dengan Kontroler PID-ANFIS pada Variasi Beban Naik



**Gambar 4.7** Respon Kontroler PID-ANFIS pada Variasi Beban Naik

Pada respon sistem terlihat bahwa kontroler mampu mempertahankan kecepatan pada 3000 rpm.. Penurunan terbesar terjadi pada pembebanan pertama yang mengakibatkan kecepatan menurun hingga 2950 rpm.. Namun pada peningkatan beban selanjutnya sistem tidak mengalami penurunan kecepatan dan cenderung stabil. Kontroler Selanjutnya didapatkan perhitungan nilai RMSE dari output terhadap referensi sebesar 0.87%. Kontroler PID-ANFIS mampu mengatasi peningkatan kecepatan secara berthap dengan baik.

### 4.3.1 Respon Sistem dengan Kontroler PID-ANFIS pada Variasi Beban Turun

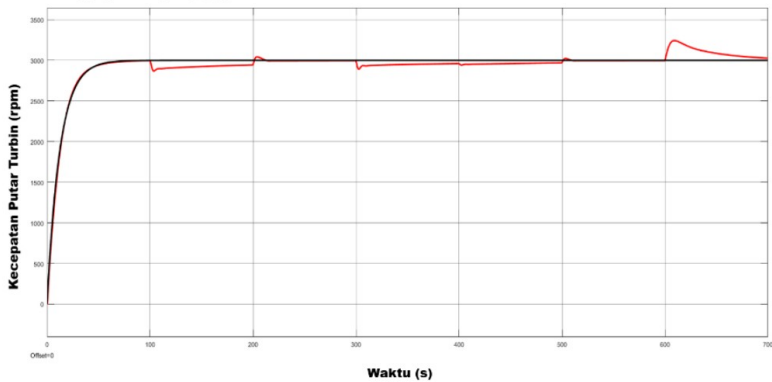


**Gambar 4.8** Respon Kontroler PID-ANFIS pada Variasi Beban Turun



Pada respon sistem terlihat bahwa kontroler mampu mempertahankan kecepatan pada 3000 rpm namun terjadi kenaikan kecepatan setiap 100 detik. Kenaikan terbesar terjadi pada pembebanan keenam yang mengakibatkan kecepatan naik hingga 3082 rpm.. Selanjutnya didapatkan perhitungan nilai RMSE dari output terhadap referensi sebesar 1.34%. Performasinya tidak sebaik pada variasi beban naik karena turbin tidak memiliki sistem pengeraman sehingga tetap membutuhkan waktu untuk kembali ke steady state

#### 4.3.1 Respon Sistem dengan Kontroler PID-ANFIS pada Variasi Beban Fluktuatif



**Gambar 4.9** Respon Kontroler PID-ANFIS pada Variasi Beban Fluktuatif

Pada respon sistem terlihat bahwa kontroler mampu mempertahankan kecepatan pada 3000 rpm namun terjadi peningkatan kecepatan saat beban turun dan penurunan kecepatan saat beban naik. Kenaikan terbesar terjadi pada pembebanan keenam yang mengakibatkan kecepatan naik hingga 3207 rpm. Penurunan terbesar terjadi pada pembebanan pertama yang mengakibatkan kecepatan turun hingga 2845 rpm. Berdasarkan simpangan maksimal dan minimal PID-ANFIS memiliki performansi yang lebih baik daripada PID biasa. Selanjutnya didapatkan perhitungan nilai RMSE dari output terhadap referensi sebesar 2.06%.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

- a. Desain kontroler PID-ANFIS mampu menjaga kecepatan putar turbin pada setpoint yang diinginkan yaitu 3000 rpm dengan perubahan konstanta beban pada kisaran 0.75 sampai dengan 1.25 unit, tanpa adanya overshoot pada pembangkitan awal.
- b. Kontroler PID-ANFIS memiliki kemampuan meredam pembebanan lebih baik dari pada kontroler PID dengan nilai RMSE berturut-turut dari variasi beban naik, turun, dan fluktuatif adalah 0.87%, 1.34%, dan 2.06%.
- c. Kontroler PID-ANFIS memiliki waktu yang lebih lama untuk menstabilkan perubahan beban naik karena turbin uap tidak memiliki sistem pengereman

#### **5.2 Saran**

Penelitian ini perlu dilanjutkan untuk mendapatkan perbaikan, diberikan beberapa saran sebagai berikut:

- a. Untuk permodelan sistem pengaturan kecepatan putar turbin uap multistage, dilakukan dengan memodelkan tiap-tiap unit secara individual, mulai dari servomotor, katup HPV dan RHV, turbin uap, dan beban listrik.
- b. Menambahkan variasi pada input untuk memperkaya proses learning.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

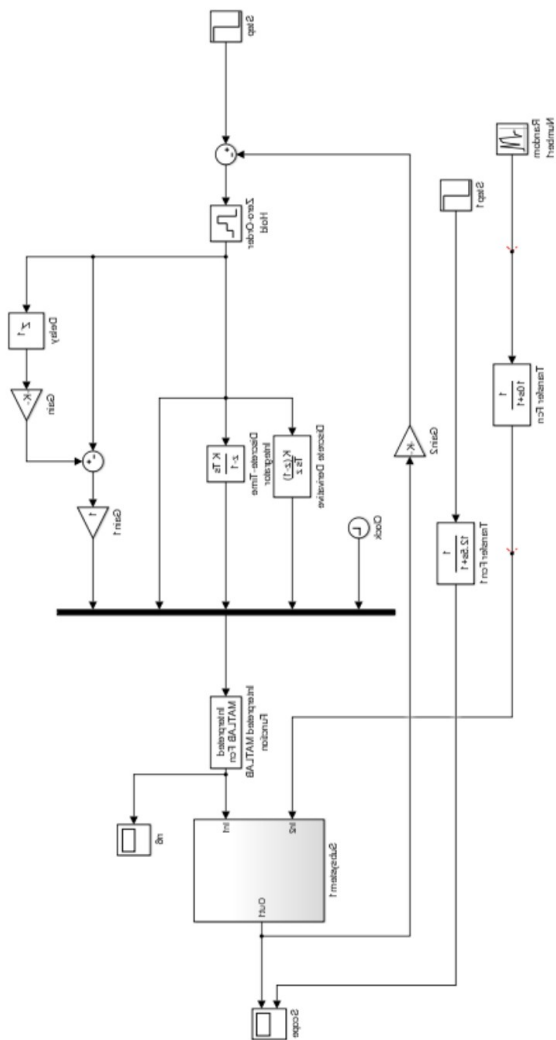
## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dulau, Mircea. Bica, Dorin, "Simulation of Speed Steam Turbine Control System", *The 7<sup>th</sup> International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, Romania, 2014.
- [2] Kochummen, Sherrin A. Nasar A, "Model Reference Adaptive Control Based PID Controller Designs for Steam Turbine Speed", *International Journal of Science and Research*, India, 2013.
- [3] Dulau, Mircea. Bica, Dorin, "Simulation of Speed Steam Turbine Control System", *The 7<sup>th</sup> International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, Romania, 2014.
- [4] Chapman. Stephen J, "Electric Machinery Fundamental: Fifth Edition", Americas, New York, NY: McGraw-Hill, 2012
- [5] Jang, Sun & Mizutani, "Neuro-fuzzy and Soft Computing", Prentice Hall, 1997.
- [6] Triyatno, Aris, "Desain Kontroler PID Adaptif Berbasis ANFIS untuk Pengaturan Rasio Perbandingan Udara dan Bakar (AFR) pada Model Mesin Bensin 4 Langkah", UNDIP, 2016.
- [7] Ogata, Katsuhiko, "Modern Control Engineering Fifth Edition", 2010..
- [8] Syuhudi, Irfan, "Studi dan Desain Kontroler *Self-Adaptive PID-Fuzzy* pada Pengaturan Kecepatan Putar Turbin Uap *Multistage*", ITS, 2018..

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# LAMPIRAN

## Lampiran 1. Desain Kontoler PID-ANFIS pada Simulink MATLAB



## Lampiran 2. Program

```
%=====
% FUNGSI PID ANFIS
%=====
function [u]=anfisi(x)
global n3 n4 n5 n6 wo ep Kp Ki Kd D

eu=x(1);
ee=x(2);
ie=x(3);
de=x(4);
tt=x(5);
alp=0.0001;

ek=[ee ie de 1];
fee=fuz_error(ee);
fie=fuz_error(ie);
fde=fuz_error(de);

if tt==0
    Ki=evalin('base','Ki');
    Kp=evalin('base','Kp');
    Kd=evalin('base','Kd');
    D=evalin('base','D');

    wo=[Kp*ones(1,125);
        Ki*ones(1,125);
        Kd*ones(1,125);
        D*ones(1,125)];
%    wo=wo;
    n3=rand(5,5,5);
    n4=rand(5,5,5);
    n5=rand(1,125);
    n6=0;
    ep=ones(1,125);
end

%Layer 3
```



```

n3=zeros(125,1);
l=0;
for i=1:5
    for j=1:5
        for k=1:5
            l=l+1;
            n3(l)=fee(i)*fde(j)*fie(k);
        end
    end
end
%Layer 4
n4=n3/sum(n3);

%Layer 5
for i=1:125
    n5(i)=n4(i)*(ek*wo(1:4,i));
end

%Layer 6
n6=sum(n5);

% backpro
for i=1:125
    p46=n6*n4(i);
    if p46~=0
        ep(i)=(n5(i)*eu)/(n6*n4(i));
        wo(1:4,i)=wo(1:4,i)+alp*ep(i)*ek';
    end
end
if tt/200==ceil(tt/200)
    assignin('base','wo',wo);
end
u=n6;
end

```

```

%=====
% Fungsi Keanggotaan Fuzzy
%=====
function xe=fuz_error(kxe)
xe=[0 0 0 0 0];
mf=[-2 -1 0 1 2];
if kxe<mf(1)
    xe(1)=1;
elseif kxe<mf(2)
    xe(1)=mf(1)-kxe;
    xe(2)=kxe-mf(1);
elseif kxe<mf(3)
    xe(2)=mf(3)-kxe;
    xe(3)=kxe-mf(2);
elseif kxe<mf(4)
    xe(3)=mf(4)-kxe;
    xe(4)=kxe-mf(3);
elseif kxe<mf(5)
    xe(4)=mf(5)-kxe;
    xe(5)=kxe-mf(4);
else
    xe(5)=1;
end

```

## RIWAYAT PENULIS



Penulis yang dilahirkan dengan nama Aulia Tri Buana lahir di Kabupaten Trenggalek, Jawa Timur pada tanggal 6 November 1996 dari orang tua Talkah Harianto dan Endang Susilowati. Penulis merupakan bungsu dari tiga bersaudara. Setelah menyelesaikan pendidikan di SDN 1 Sukorame, SMPN 1 Pogalan, dan SMAN 1 Trenggalek, pada tahun 2015 penulis lolos seleksi dan dapat melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Semasa kuliah, penulis sempat aktif sebagai asisten Lab.Sistem dan Sibernetika (B405). Penulis memiliki hobi merakit gunpla dan penulis juga merupakan penggemar berat klub sepakbola Manchester United. Penulis ingin bermanfaat untuk lingkungan sekitar, menaikkan derajat orang tua, serta membantu perekonomian keluarga.

*E-mail* : auliatribuana@gmail.com