TUGAS AKHIR TF 141581

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* (AFTC) PADA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR *SUPERHEATER* PLTU PT PJB GRESIK DENGAN KESALAHAN SENSOR

Achmad Rizky Karuniawan
NRP 02311440000121

Dosen Pembimbing

Dr. Bambang L. Widjiantoro, ST, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

FINAL PROJECT TF 141581

DESIGN ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC) AT SUPERHEATER TEMPERATURE CONTROL SYSTEM PT PJB GRESIK POWER PLANT WITH SENSOR FAULT

Achmad Rizky Karuniawan
NRP 02311440000121

Supervisor
Dr. Bambang L. Widjiantoro, ST, MT.

ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Achmad Rizky Karuniawan

NRP : 0231440000121

Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul **"*PERANCANGAN ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC) PADA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR SUPERHEATER PLTU PT PJB GRESIK DENGAN KESALAHAN SENSOR*"** adalah bebas plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 23 Juli 2018
Yang membuat pernyataan,

Achmad Rizky Karuniawan

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* (AFTC) PADA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR *SUPERHEATER* PLTU PT PJB GRESIK DENGAN KESALAHAN SENSOR

Oleh:

Achmad Rizky Karuniawan
NRP. 02311440000121

Surabaya, 23 Juli 2018
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing

Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T, M.T.
NIP. 19690507 199512 1 001

Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* (AFTC) PADA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR *SUPERHEATER* PLTU PT PJB GRESIK DENGAN KESALAHAN SENSOR

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Achmad Rizky Karuniawan
NRP. 0231144000121

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang Lelono W., ST, MT. ..... Pembimbing
2. Ir. Ya'umar, MT. ..... Ketua Penguji
3. Dr. Katherin Indriawati, ST, MT. ..... Penguji I
4. Ir. Zulkifli, MSc. ..... Penguji II

SURABAYA
2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* (AFTC) PADA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR *SUPERHEATER* PLTU PT PJB GRESIK DENGAN KESALAHAN SENSOR

Nama Mahasiswa : Achmad Rizky Karuniawan
NRP : 02311440000121
Departemen : Teknik Fisika
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang L. Widjiantoro, ST, MT.

Abstrak

Superheater berfungsi mengubah uap jenuh menjadi uap kering dengan proses pemanasan. Pada *superheater* terdapat suatu sistem pengendalian temperatur untuk menjaga temperatur *output finally superheater* agar sesuai dengan *setpoint* yaitu dengan cara memanipulasi variabel laju aliran *water spray* agar dapat menurunkan temperatur *output finally superheater*. Tak jarang pada sistem pengendalian temperatur terjadi kesalahan pada sensor sehingga kontroler akan mengirim sinyal yang salah kepada *control valve*. Pada Tugas Akhir ini dilakukan perancangan *Active Fault Tolerant Control (AFTC)* yang mampu bekerja ketika terdapat kesalahan pada sensor dan dapat mempertahankan performansi sistem. Langkah awal yang dilakukan adalah pemodelan dari proses yang terjadi pada *finally superheater*. Langkah kedua adalah merancang sistem kontrol PID. Langkah terakhir adalah merancang sistem AFTC dimana terdapat dua tahap yaitu perancangan *observer* dan rekonfigurasi kontrol. Uji performansi yang diberikan berupa kesalahan sensitivitas dan kesalahan bias. Pada sistem AFTC dengan kesalahan sensitivitas 8% didapatkan nilai *maximum overshoot* 4,0583%, *settling time* 75 detik dan *error steady state* 0,0019%. Sedangkan sistem tanpa AFTC didapatkan nilai *maximum overshoot* 9,5796%, *settling time* 13 detik dan *error steady state* 8,6944%.

Kata kunci: *active fault tolerant control*, *finally superheater*, kontrol PID, sensor.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC) AT SUPERHEATER TEMPERATURE CONTROL SYSTEM PT PJB GRESIK POWER PLANT WITH SENSOR FAULT

Name	***: Achmad Rizky Karuniawan***
Student Number	***: 02311440000121***
Department	***: Engineering Physics***
Supervisor	***: Dr. Bambang L. Widjiantoro, ST, MT.***

Abstract

Superheater works to change saturated steam into superheated steam with heating process. In the superheater there is a temperature control system to keep the temperature of the finally superheater output stay at setpoint by manipulating variable water flow rate of the spray in order to decrease the temperature of the finally superheater output. Not infrequently the temperature control system occurs on the sensor error so that the controller will send the wrong signal to the control valve. In this Final Project is designed Active Fault Tolerant Control (AFTC) which is able to work when there is a mistake on the sensor and still can keep the system performance. The first step is the modeling of the processes in the finally superheater. The second step is to design a PID control system. The final step is to design an AFTC system where there are two stages of designing the observer and reconfiguration control. Performance tests are given in the form of error sensitivity and error of bias. AFTC system with 8% sensitivity error obtained maximum overshoot 4.0583%, settling time 75 seconds, and error steady state 0.0019%. While the system without AFTC obtained maximum overshoot 9.5796%, settling time 13 seconds, and error steady state 8.6944%.

Key Words: *active fault tolerant control, finally superheater, control PID, sensor.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukut penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul: "**Perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada Sistem Pengendalian Temperatur *Superheater* PLTU PT PJB Gresik dengan Kesalahan Sensor**"

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. Orang tua, yang senantiasa tiada hentinya memberikan doa, semangat, serta motivasi kepada penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
2. Bapak Agus Muhammad Hatta ST, Msi, Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
3. Bapak Dr. Bambang L. Widjiantoro, ST, MT selaku dosen pembimbing yang dengan sabar membimbing, memberikan saran dan kritiknya.
4. Bapak Ir. Ya'umar, MT, ibu Dr. Katherin Indriawati, ST, MT dan bapak Ir. Zulkifli, MSc selaku penguji yang telah memberikan masukan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
5. Bapak Imam Abadi, ST, MT selaku dosen wali penulis yang telah memberikan wawasan kehidupan kampus.
6. Segenap jajaran teknisi PT PJB Gresik Unit 3&4, bapak Akhidin dan bapak Udin yang telah membimbing dan memfasilitasi selama pengambilan data lapangan.
7. Teman-teman asisten laboratorium rekayasa instrumentasi dan kontrol dan teman-teman Teknik Fisika 2014 yang senantiasa memberikan dukungan dan fasilitas laboratorium.
8. Khusnul Khotimah yang selalu mendukung dan memberikan motivasi bagi penulis.

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

Surabaya, 11 Juli 2018
Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN vii
ABSTRAK xi
ABSTACT xiii
KATA PENGANTAR xv
DAFTAR ISI xvii
DAFTAR GAMBAR xix
DAFTAR TABEL xxi
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan 3
1.4 Batasan Masalah 3
1.5 Sistematika Laporan 4
BAB II TEORI PENUNJANG 5
2.1 *Superheater* 5
2.2 Sistem Pengendalian *Temperature Finally Superheater* 6
2.3 Pemodelan Matematis *Finally Superheater* 7
2.4 *Fault Tolerant Control* (FTC) 9
2.5 *Observer State* 11
2.6 Penentuan *Gain* Matriks *Observer* 14
2.7 Skema Rekonfigurasi Kontrol 14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 17
3.1 Pengambilan Data 21
3.2 Pemodelan 21
3.3 Validasi Model 26
3.4 Perancangan Kontroler PID 28
3.5 Perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) 29
3.6 Uji Performansi 36
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN 37
4.1 Uji Kesalahan Bias 37
4.2 Uji Kesalahan Sensitivitas 42

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 53
5.1 Kesimpulan.....53
5.2 Saran.....54
DAFTAR PUSTAKA..... 55
LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Proses *Superheater* 5
Gambar 2.2 Diagram Blok Sistem Pengendalian *Finally Superheater* 7
Gambar 2.3 Kesetimbangan Energi.....7
Gambar 2.4 Skema Umum *Fault Tolerant Control* 9
Gambar 2.5 Struktur Umum *Active Fault Tolerant Control* 10
Gambar 2.6 Skema Rekonfigurasi Kontrol 15
Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian.....19
Gambar 3.2 Skema Validasi Model.....26
Gambar 3.3 Grafik Respon Hasil Uji Validasi Temperatur *Finally Superheater*.....27
Gambar 3.4 Skema Diagram Blok Perancangan Kontroler PID 28
Gambar 3.5 Grafik Respon Perancangan Kontroler PID 29
Gambar 3.6 Skema Perancangan Rekonfigurasi Kontrol.....36
Gambar 4.1 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Bias +0,32%.....38
Gambar 4.2 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Bias +0,32% 38
Gambar 4.3 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Bias -0,32%.....40
Gambar 4.4 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Bias -0,32% 40
Gambar 4.5 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 1%.....42
Gambar 4.6 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 1% 43
Gambar 4.7 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 2%.....44
Gambar 4.8 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 2% 45
Gambar 4.9 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 5%.....46

Gambar 4.10 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 5%.....47
Gambar 4.11 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 8% 48
Gambar 4.12 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 8%.....49
Gambar 4.13 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 15% 50
Gambar 4.14 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 15%.....51

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Pemodelan *Plant Finally Superheater* 21
Tabel 3.2 Hasil Uji Validasi Temperatur *Finally Superheater* ... 26
Tabel 4.1 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias +0,32% 39
Tabel 4.2 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias -0,32% 41
Tabel 4.3 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 1% 43
Tabel 4.4 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 2% 45
Tabel 4.5 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 5% 47
Tabel 4.6 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 8% 49
Tabel 4.7 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 15% 51

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan sumber energi yang sangat penting bagi kehidupan manusia baik untuk kegiatan industri, kegiatan komersial maupun untuk kehidupan sehari-hari. Salah satu sumber energi listrik yaitu pembangkit listrik tenaga uap. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) memiliki beberapa komponen yang sangat penting salah satunya adalah *boiler*. *Boiler* berfungsi untuk mengubah air menjadi uap melalui proses pemanasan. Uap hasil pemanasan akan digunakan untuk menggerakkan *turbine*. Putaran *turbine* akan menggerakkan *generator* sehingga dapat menghasilkan listrik [1]. Di dalam *boiler* terdapat salah satu bagian penting yakni *superheater*, yang berperan sebagai mengubah uap jenuh menjadi uap kering. Di dalam *superheater* sendiri terdapat sistem pengendalian temperatur untuk menjaga temperatur *output superheater* agar sesuai dengan *set point*. Hal ini bertujuan untuk menjaga kualitas uap kering, menjaga kerusakan pada sudu-sudu turbin dan juga menjamin proses berjalan pada kondisi normal dan kontinyu [2].

Sistem pengendalian temperatur pada *superheater* sangatlah dibutuhkan karena jika terjadi sedikit kesalahan pada komponen sistem, maka akan berdampak besar. Salah satu komponen yang berpotensi terjadi kesalahan pada sistem pengendalian temperatur pada *superheater* adalah sensor temperatur. Hal ini dapat dikarenakan letak sensor temperatur yang terletak dilapangan dan langsung bersentuhan dengan lingkungan. Berbeda dengan kontroler yang berada di tempat terlindung yang tidak bersentuhan dengan lingkungan secara langsung [3]. Adapun hal lain yang dapat menyebabkan kesalahan pembacaan sensor yaitu *lifetime* dari sensor tersebut dan adanya gangguan saat pengiriman sinyal ke kontroler. Jika terjadi suatu kesalahan pembacaan pada sensor, maka kontroler akan memberikan sinyal kontrol yang salah kepada aktuator yakni *control valve* dari *water spray* yang berfungsi untuk

menurunkan temperatur *superheater* agar sesuai dengan *set point*, sehingga apabila temperatur *output* terlalu tinggi maka akan berdampak *overheat* atau panas berlebih pada *superheater*. Selain dapat merusak peralatan turbin akibat melebihi batas maksimal temperatur uap yang diijinkan memutar sudu-sudu turbin, *overheat* pada *superheater* juga dapat merusak *superheater tube* (Pipa *Superheater*). Akibatnya pipa *superheater* dapat pecah atau meledak yang dapat menyebabkan kegagalan pengoperasian *boiler* dan juga mempengaruhi pengoperasian keseluruhan suatu pembangkit [2]. Sedangkan apabila temperatur *output superheater* terlalu rendah maka dapat menyebabkan korosi pada sudu-sudu turbin dan juga dapat menurunkan kualitas uap kering sehingga menyebabkan efisiensi dari turbin juga menurun. Maka dari itu untuk meningkatkan performansi dan kebutuhan *safety* dibutuhkan sistem kontrol yang mampu menoleransi kesalahan pada komponen ini.

Teknologi yang mampu menoleransi kesalahan sensor atau aktuator secara otomatis terus dikembangkan dengan desain *Fault Tolerant Control* (FTC). Desain toleransi kesalahan ini memungkinkan untuk mempertahankan kestabilan sistem, serta menghindari kondisi operasi *abnormal* yang dapat menyebabkan *trip* pada saat terjadi kesalahan pada komponen sensor atau aktuator. Sistem *Fault Tolerant Control* terdiri dari 2 tipe, yaitu *Pasive Fault Tolerant Control* (PFTC) dirancang untuk mempertahankan sistem dari kegagalan yang terjadi. Sedangkan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) bereaksi terhadap kegagalan/kesalahan komponen dengan cara merekonfigurasi aksi kontrol sehingga mampu mepertahankan kestabilan sistem ketika terjadi kesalahan [4]. Pada Tugas akhir ini akan dilakukan perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada sistem pengendalian temperatur *finally superheater* PLTU PT PJB Gresik dengan kesalahan sensor. Sehingga diharapkan AFTC mampu menolererir kesalahan yang terjadi pada sensor sistem pengendalian temperatur *superheater*, agar kestabilan sistem tetap terjaga.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang sebelumnya, maka rumusan masalah yang diambil pada tugas akhir ini adalah:

a. Bagaimana merancang *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada sistem pengendalian temperatur *superheater* PLTU PT PJB Gresik dengan kesalahan sensor?
b. Bagaimana perbandingan performansi respon sistem pengendali dengan dan tanpa menggunakan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) ketika terjadi kesalahan pada sensor?

1.3 Tujuan

Berdasarkan permasalahan yang telah disebutkan di atas, maka tujuan tugas akhir ini adalah:

a. Untuk merancang *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada sistem pengendalian temperatur *superheater* yang dapat mentoleransi kesalahan pada sensor sehingga kestabilan sistem tetap terjaga.
b. Untuk mengetahui perbandingan performansi respon sistem kontroler dengan dan tanpa menggunakan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) ketika terjadi kesalahan pada sensor.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

a. Proses yang ditinjau adalah pengendalian temperatur pada *Finally Superheater* PLTU PT PJB Gresik Unit 4.
b. Kesalahan yang terjadi adalah kesalahan pembacaan sensor *thermocouple* pada *finally superheater* berupa kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas.
c. Pengambilan data dilakukan di PLTU PT PJB Gresik Unit 4 pada tanggal 1-18 Maret 2018 pada kondisi beban maksimum 200 MW.
d. Validasi model *plant* dilakukan dengan menggunakan data proses pada tanggal 2 Maret 2018, selama selang 1x24 Jam.

e. Sistem kontrol yang digunakan pada proses pengendalian temperatur di *superheater* menggunakan algoritma PID.
f. Perancangan *Active Fault Tolerant Control* dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB 2014a.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika laporan yang digunakan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian dan sistematika laporan.

BAB II TEORI PENUNJANG

Berisi tentang pengertian dan proses *superheater*, sistem kontrol pada *finally superheater*, *active fault tolerant control* dan perancangannya.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisi tentang langkah-langkah perancangan pengendali PID dan *active fault tolerant control* dengan simulasi pada program MATLAB 2014a.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang analisis hasil perancangan sistem dengan *active fault tolerant control* dibandingkan dengan hasil sistem tanpa *active fault tolerant control* ketika diberi kesalahan sensitivitas dan kesalahan bias.

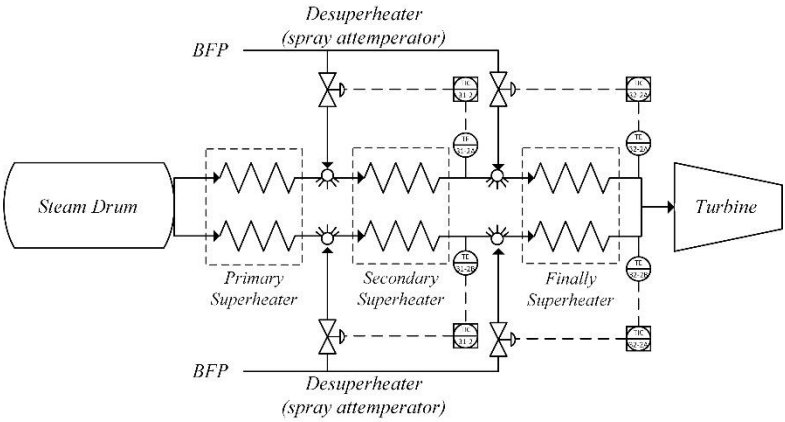
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan hasil yang didapatkan setelah dilakukan perancangan *active fault tolerant control* dan saran.

BAB II
TEORI PENUNJANG

2.1 *Superheater*

Superheater merupakan suatu penukar panas yang berfungsi untuk memanaskan uap jenuh *(saturated steam)* menjadi uap kering *(superheated steam)* dengan cara memanfaatkan gas panas hasil pembakaran. Hal tersebut dapat meningkatkan efisiensi siklus secara keseluruhan dan mengurangi kadar air agar tidak merusak sudu-sudu turbin [2]. Skema P&ID dari proses pada *superheater* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 P&ID Proses *Superheater*

Pada umumnya susunan pemanas uap lanjut *(superheater)* ini dibuat bertingkat yakni *primary superheater*, *secondary superheater* dan *finally superheater* adalah dengan tujuan untuk memudahkan dalam pengontrolan temperatur keluarannya dengan menggunakan cara di*spray* dengan air *(Desuperheater)* yang berasal dari *BFP (Boiler Feed Pump)* [5].

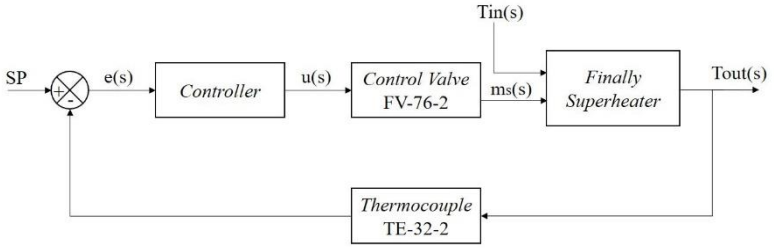
Sistem Pengendalian temperatur pada *superheater* menggunakan sistem *feed back close loop*. *Superheater* dilengkapi beberapa komponen pelengkap untuk menurunkan temperatur

yaitu *desuperheater* yang berbentuk seperti *spray*. *Desuperheater* berfungsi untuk mengurangi temperatur uap dengan mendinginkan uap agar sesuai dengan *set point* [6]. *Primary superheater* menerima *input* berupa uap jenuh dari *steam drum*, lalu uap tersebut dipanaskan dengan memanfaatkan gas panas hasil pembakaran, kemudian uap akan keluar melalui *primary superheater outlet* melalui pipa transfer yang dilengkapi dengan pipa *spray* tipe *attempator* untuk megatur temperatur uap yang keluar dari *secondary superheater*. Selanjutnya uap yang telah dipanaskan pada *secondary superheater* akan keluar melalui *secondary superheater outlet* melalui pipa transfer yang dilengkapi juga dengan pipa *spray* tipe *attemperator* untuk mengatur temperatur uap yang keluar dari *finally superheater*. Temperatur yang keluar dari *secondary superheater* memiliki *set point* sebesar $\pm 457^0$C sedangkan temperatur yang keluar dari *finally superheater* memiliki *set point* sebesar $\pm 540^0$C, namun temperatur tersebut selalu melebihi dari *set point* sehingga diberikan *desuperheater* untuk menurunkan temperatur [7]. Setelah itu uap yang keluar melalui *finally superheater outlet* akan digunakan untuk memutar *high pressure turbine.*

2.2 Sistem Pengendalian *Temperature Finally Superheater*

Sistem pengendalian temperatur pada *superheater* PLTU PT PJB Gresik diperlukan untuk menjaga temperatur keluaran uap *(T_{out})* dari *finally superheater outlet* yaitu sebesar 540^0C. Maka dari itu temperatur *inlet* pada *finally superheater* harus dijaga agar tidak melebihi dari $\pm 410^0$C dengan cara disemprotkan *water spray*, sehingga dalam sistem pengendalian temperatur *superheater* diperlukan sebuah sensor temperatur yang menggunakan *thermocouple* (TE-32-2). Sensor tersebut digunakan untuk mengukur besaran temperatur pada *finally superheater outlet*, selanjutnya diperlukan pula kontroler yakni berupa PID untuk mengendalikan sistem. Kontroler PID berguna untuk menjaga temperatur tetap pada *set point* dengan memanipulasi laju aliran *spray water* yang berasal dari *Boiler Feed Pump* (BFP), sehingga dibutuhkan *final control element* berupa *control valve* (FV-76-2)

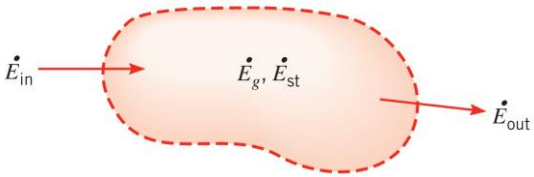
sebagai *manipulated variable*. Jika temperatur yang terukur melebihi *set point*, maka laju aliran *water spray* akan ditambah dan sebaliknya [5]. Berikut adalah diagram blok sistem pengendalian *superheater*.



Gambar 2.2 Diagram Blok Sistem Pengendalian *Finally Superheater*

2.3 Pemodelan Matematis *Finally Superheater*

Hukum yang digunakan untuk memodelkan *finally superheater* adalah hukum pertama termodinamika yaitu menggunakan kesetimbangan energi *(energy balance)*. Hukum ini menyatakan bahwa jumlah energi yang masuk ke dalam sistem sebanding dengan jumlah energi yang keluar dari sistem serta energi yang terakumulasi dalam sistem itu sendiri [8].



Gambar 2.3 Kesetimbangan Energi [8]

Hukum kesetimbangan energi yang berlaku sesuai dengan kondisi masukan dan keluaran dari *finally superheater* adalah sebagai berikut.

$$E_{in} + E_g = E_{st} + E_{out} \tag{2.1}$$

$$E_{st} = E_{in} - E_{out} \tag{2.2}$$

Dikarenakan energi *input* terdapat 2 variabel yaitu energi *water spray* dan energi *steam input*, dengan demikian persamaan *energy balance* diatas bisa dijabarkan sebagai berikut.

$$E_{st} = E_{in} - E_{out} + E_{spray} \tag{2.3}$$

Sehingga dapat dituliskan dalam bentuk *rate* (laju), persamaan *energy balance* diatas bisa dinyatakan sebagai berikut.

$$\frac{\left[\frac{akumulasi}{energi\ total}\right]}{waktu} = \frac{\left[\frac{Energi\ total}{steam\ input}\right]}{waktu} - \frac{\left[\frac{Energi\ total}{steam\ output}\right]}{waktu} + \frac{\left[\frac{Energi\ total}{input\ spray}\right]}{waktu} \tag{2.4}$$

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \dot{E_{in}} - \dot{E_{out}} + \dot{E_{spray}} \tag{2.5}$$

$$m.C_v\frac{dT_o}{dt} = \dot{m}_{in}.C_{vin}.T_{in} - \dot{m}_{out}.C_{vout}.T_{out} + \dot{m}_{spray}.C_p.T_{spray} \tag{2.6}$$

$$V.\rho_v.C_v\frac{dT_o}{dt} = \dot{m}_{in}.C_{vin}.T_{in} - \dot{m}_{out}.C_{vout}.T_{out} + \dot{m}_{spray}.C_p.T_{spray} \tag{2.7}$$

Dimana:

V	= *Volume finally superheater* (m^3)
ρ_v	= Densitas *steam* (kg/m^3)
$\dot{m}_{in}$	= *Mass flowrate steam in* (kg/s)
$\dot{m}_{out}$	= *Mass flowrate steam out* (kg/s)
$\dot{m}_{spray}$	= *Mass flowrate water spray* (kg/s)
C_v	= Kalor spesifik *finally superheater* (kJ/kgK)
C_{vin}	= Kalor spesifik *steam in* (kJ/kgK)
C_{vout}	= Kalor spesifik *steam out* (kJ/kgK)
C_p	= Kalor spesifik *water spray* (kJ/kgK)
T_{in}	= Temperatur *inlet* (K)
T_{out}	= Temperatur *outlet* (K)
T_{spray}	= Temperatur *water spray* (K)

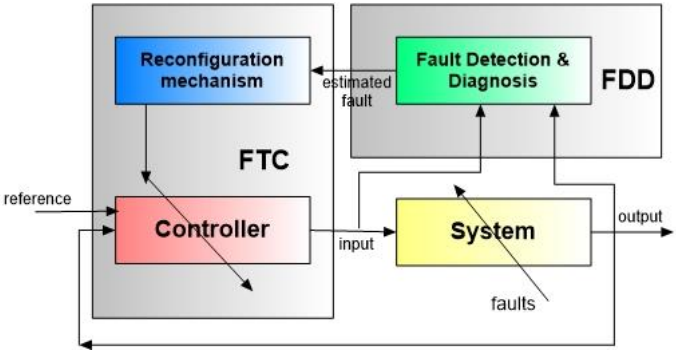
2.4 *Fault Tolerant Control* (FTC)

Fault Tolerant Control merupakan suatu sistem yang akan bekerja ketika suatu sensor maupun aktuator mengalami suatu kegagalan atau *failure*. Sistem kontrol ini dapat mempertahankan stabilitas dan kinerja yang diinginkan dari suatu sistem ketika mengalami kegagalan. Kontrol sistem ini sering juga disebut dengan *Fault Tolerant Control System* (FTCS) [4].

FTCS dapat diklasifikasikan pada 2 tipe yaitu *passive fault tolerant control system* (PFTCS) dan *Active Fault Tolerant Control system* (AFTCS). PFTCS dirancang untuk mempertahankan sistem dari kegagalan yang terjadi. Sedangkan AFTCS bereaksi terhadap kegagalan komponen dengan merekonfigurasi aksi kontrol sehingga kestabilan dan kinerja pada sistem dapat dijaga. AFTCS dapat juga disebut *Fault Detection and Identification (Diagnosis)*. Sehingga tujuan utama dari FTCS adalah merancang kontroler dengan struktur yang cocok untuk mencapai kestabilan dan kinerja. Tidak hanya ketika kontrol komponen berfungsi secara normal tetapi ketika terjadi kegagalan pada suatu komponen yang lain [9].

Menurut Zhang dan Jiang (2008), *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) terdiri atas empat sub sistem yaitu:

a. *Reconfigurable Controller* (RC)
b. *Fault Detection Diagnosis* (FDD) *Scheme*
c. Mekanisme RC
d. *Command Reference Actuator*.



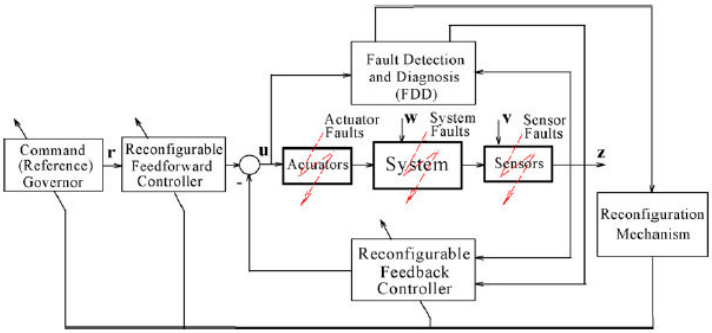
Gambar 2.4 Skema Umum *Fault Tolerant Control* [10]

Berdasarkan Gambar 2.4**,** Perbedaan AFTC dan PFTC adalah terletak pada perancangan *fault detection and diagnosis* (FDD) dan *reconfigurable controller* (RC). Sehingga kunci utama pada AFTC adalah merancang kontroler yang dapat direkonfigurasi, skema FDD dengan sensitivas yang tinggi terhadap kesalahan dan mekanisme rekonfigurasi yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan walaupun terdapat ketidakpastian dan *time delay* pada FDD [4].

Tahapan dalam perancangan *active fault tolerant kontrol* adalah sebagai berikut [10]:

a. Merancang kontroler yang dapat direkonfigurasi
b. Dilakukan perancangan *observer* untuk mengestimasi kesalahan aktuator dan/atau sensor
c. Merancang skema FDD dengan sensitivas yang tinggi terhadap kegagalan dan *robust* terhadap ketidakpastian model, kondisi operasi yang variatif serta gangguan eksternal, FDD digunakan untuk mengetahui besarnya kesalahan yang terjadi pada sistem tersebut
d. Merancang mekanisme rekonfigurasi yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan meskipun terdapat ketidakpastian dan *delay time* pada *fault detection*.

Struktur umum dari *Active Fault Tolerant Control system* dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Struktur Umum *Active Fault Tolerant Control* [4]

2.5 *Observer State*

Observer adalah suatu algoritma yang digunakan mengestimasi keadaan *(state)* sistem berdasarkan model matematis sistem. Selain itu *observer* juga digunakan untuk mengestimasi kesalahan *(fault)* yang terjadi pada sistem. Mengingat bahwa multivariabel linier *plant* dengan *output* hasil pengukuran direpresentasikan sebagai berikut [11]:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{2.8}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \tag{2.9}$$

Dimana:
$\dot{x}$ = Perubahan *state* terhadap waktu
y = *output* sistem
A = matriks *state* sistem
B = matriks *input* sistem
C = matriks *output* sistem
D = matriks *noise* sistem
x = vektor *state*
u = vektor kontrol *input*

Model matematis *observer* sama seperti model matematis pada sistem sehingga *observer* dapat mengestimasi keadaan sistem dalam bentuk persamaan ruang keadaan. Untuk mengkompensasi kesalahan aktuator dan kesalahan sensor pada waktu yang sama diperlukan modifikasi algoritma *observer* baru. Sehingga jika di dalam sistem atau plant terjadi kesalahan, maka persamaan 2.8 dan 2.9 akan menjadi persamaan berikut [12].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \tag{2.10}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \tag{2.11}$$

Dimana:
F_a= matriks kesalahan aktuator
F_s= matriks kesalahan sensor

f_a= vektor kesalahan aktuator
f_s= vektor kesalahan sensor

Kemudian *state* baru $\dot{z}(t)$ ditambahkan untuk memindahkan kesalahan sensor dari persamaan keluaran ke persamaan keadaan, persamaan tersebut dapat didefinisikan persamaan baru sebagai berikut:

$$\dot{z}(t) = Az(y(t) - z(t)) \tag{2.12}$$

$$\dot{z}(t) = Az(Cx(t)+F_s f_s(t) - z(t)) \tag{2.13}$$

$$\dot{z}(t) = Az.Cx(t) + Az.F_s f_s(t) - Az.z(t) \tag{2.14}$$

Untuk *Az* merupakan matriks identitas (*I*) untuk $Az \in I^q$, sedangkan matriks dari kesalahan sensor dan aktuator didefinisikan sebagai $f = \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix}$

Dari persamaan di atas, maka dapat didefiniskan matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan matriks yang sudah di ekspansi sebagai berikut.

$$\begin{cases} \dot{X_a}(t) = A_a x_a(t) + B_a u(t) + E_a f(t) \\ y(t) = C_a x_a(t) \end{cases} \tag{2.15}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ Az.C & -Az \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & Az.F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_s(t) \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

$$y(t) = \dot{z}(t) = [0 \quad C] \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

Dimana:

$$Aa = \begin{bmatrix} A & 0 \\ Az.C & -Az \end{bmatrix}, Ba = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, Ca = [0 \quad C], Ea = \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & Az.F_s \end{bmatrix}$$

Untuk memperoleh nilai dari *gain observer* maka ditambahkan *state* yang mengandung *gain* agar dapat mengestimasi kesalahan sensor, sehingga ekspansi matriks melalui persamaan ruang keadaan baru yang ditunjukan pada persamaan berikut.

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}}(t) = A_a \hat{X} + B_a u + E_a \begin{bmatrix} \hat{f}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + L_x (Y - \hat{Y}) \\ \begin{bmatrix} \hat{f}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} = L_f (Y - \hat{Y}) \\ \hat{Y} = C_a \hat{X} \end{cases} \quad (2.18)$$

Dimana $\hat{X}$, $\hat{f}$, $\hat{Y}$ merupakan *state estimate*, *fault estimate* dan *output estimate*. L_x adalah *gain propotional* dari *observer* dan L_f adalah *gain integral* dari *observer*. Sehingga dari persamaan diatas akan menjadi sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{\hat{f}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Aa & Ea \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Ba \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} L_x \\ L_f \end{bmatrix} [Ca \quad 0](Y - \hat{Y}) \quad (2.19)$$

$$\hat{Y} = [Ca \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Dari bentuk (2.19) dan (2.20) dapat diubah menjadi persamaan keadaan dan persamaan keluaran *observer*, sebagai berikut.

$$\dot{\tilde{\hat{x}}}(t) = \tilde{A}_a \tilde{\hat{x}}(t) + \tilde{B}_a u(t) + \tilde{K}_e (\tilde{y}(t) - \tilde{\hat{y}}(t)) \quad (2.21)$$

$$\tilde{\hat{y}}(t) = \tilde{C}_a \tilde{\hat{x}}(t) \quad (2.22)$$

Sehingga matriks yang sudah diekspansi ditunjukan seperti berikut ini:

$$\tilde{A}_a = \begin{bmatrix} Aa & Ea \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \; \tilde{C}_a = [Ca \quad 0]$$

2.6 Penentuan *Gain* Matriks *Observer*

Perbedaaan kondisi *steady* merupakan perbedaan antara keadaan awal dan keadaan awal estimasi, didefinisikan pada persamaan (2.23).

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x} + Bu + K_e(Y - C\tilde{x}) \tag{2.23}$$

Dimana:
$\tilde{x}$ =keadaan estimasi
$C\tilde{x}$ =keadaan estimasi keluaran
K_e =*Gain* matriks *Observer*

Solusi pendekatan untuk medapatkan nilai *gain matriks observer* adalah dengan menggunakan solusi *Pole Placement* dimana *Pole Placement* adalah metode uji coba peletakan nilai *Pole* (μ_n) yang sesuai. Dengan mensubtitusikan K_e menjadi bentuk polinomial maka akan didapatkan persamaan berikut ini [12].

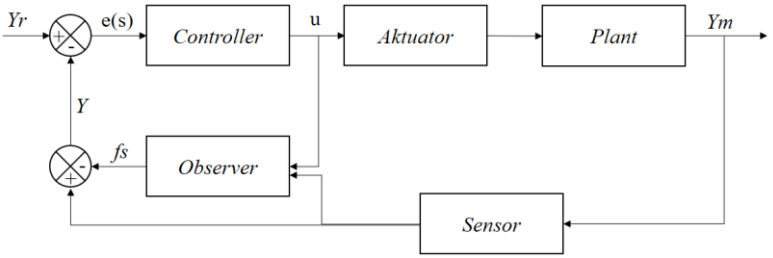
$$|sI - CA - K_eC| = (s - \mu_1)(s - \mu_{n+1})(s - \mu_{n+\dots}) \tag{2.24}$$

$$K = [0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad 1][C^T \vdots A^TC^T \vdots \cdots \vdots C^T \vdots (A^T)^{n-1}C^T]^{-1}\emptyset(A^T) \tag{2.25}$$

$$K_e = K^T = \emptyset(A^T)^T \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \cdots \\ CA^{n-2} \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.26}$$

2.7 Skema Rekonfigurasi Kontrol

Desain rekonfigurasi dari sinyal kontrol akan bekerja secara otomatis agar dapat mengakomodir kesalahan sehingga *plant* tetap beroperasi. Mekanisme rekonfigurasi dirancang yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan meskipun terdapat ketidakpastian dan waktu tunda pada *fault detection.* Berikut merupakan skema rekonfigurasi kontrol [13].



Gambar 2.6 Skema Rekonfigurasi Kontrol [13]

Pada Gambar 2.6, menunjukkan bahwa *observer* adalah bagian dari *fault detection diagnosis* dan *estimation compensation. Fault detection diagnosis* (FDD) bertujuan untuk mendefinisikan kesalahan dengan mendapatkan informasi dari sinyal hasil pengukuran *(Ym)*. Selanjutnya informasi diteruskan menuju *estimation compensation* untuk mengestimasi kesalahan dengan mendapat sinyal referensi dari sinyal control *(u)*. Dengan demikian *estimation compensation* dan *fault detection diagnosis* (FDD) akan mendapat *input* berupa sinyal kontrol *(u)* dan sinyal hasil pengukuran *(Ym).*

Rekonfigurasi kontrol ini dilakukan dengan menambahkan sinyal kontrol berupa *Y*. Nilai *Y* ini didapatksn dari perhitungan sebagai berikut:

$$Y = Y_m - f_s \tag{2.27}$$

Dimana:
Y = Nilai sebenarnya
Y_m = Nilai hasil pengukuran
f_s = Nilai hasil estimasi *fault*

Dengan adanya penambahan sinyal kontrol tersebut, maka didapatkan nilai *error* dengan perumusan yang baru sebagai berikut:

$$e = Y_r - Y \tag{2.28}$$

Dimana:
e = *error*
Y_r = Nilai *setpoint*
Y = Nilai sebenarnya

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan untuk mencpai tujuan dari tugas akhir ini dijelaskan melalui diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 yang mendeskripsikan tahap-tahap penelitian sebagai berikut.

a. Perumusan masalah

Perumusan masalah merupakan tahap pertama dalam pengerjaan tugas akhir dengan tujuan untuk menentukan permasalahan yang akan diangkat dengan topik mengenai AFTC.

b. Studi literatur

Studi literatur merupakan tahapan untuk membangun pemahaman awal hingga detail mengenai topik tugas akhir yang diselesaikan. Sehingga, diperlukan studi literatur yang berhubungan erat dengan pengendalian temperatur pada *superheater* dan perancangan AFTC pada suatu sistem.

c. Pengambilan data *plant*

Pengambilan data spesifikasi *finally superheater*, sensor dan aktuator meliputi data besaran *input* dan *output*, *Piping and Instrument Diagram (P&ID)*, data riwayat keterawatan dari instrumen sistem *superheater* dan data kalibrasi instrumen sistem *superheater* yang menunjukan adanya riwayat kesalahan pada sensor temperatur *superheater*. Pengambilan data dilakukan di PLTU PT PJB Gresik Unit 4 pada kondisi beban maksimum 200 MW.

d. Pemodelan *finally superheater*, sensor dan aktuator

Pemodelan *finally superheater*, sensor dan aktuator didapatkan dari data spesifikasi yang telah diambil. Pemodelan *finally superheater* menggunakan hukum kesetimbangan energi seperti pada persamaan (2.1-2.7).

e. Validasi Pemodelan

Validasi dilakukan dengan uji open loop fungsi transfer *finally superheater* dengan memberikan besar laju aliran *water spray* yang berubah-ubah terhadap temperatur *steam input finally superheater*. Validasi model dilakukan dengan cara membandingkan hasil *real plant* dengan hasil uji simulasi menggunakan *simulink* Matlab R2014a. Model dapat dikatakan *valid* apabila *error* yang terjadi ≤ 2%, maka dapat diasumsikan permodelan sudah merpresentasikan *plant*.

f. Perancangan kontroler PID

Pada tahap ini dilakukan tuning kontroler PID yang mampu memberikan respon yang baik untuk *plant* yang telah dimodelkan. Tuning Kontroler PID menggunakan metode *trial and error* menggunakan fitur *simulink* di perangkat lunak Matlab R2014a. Respon sistem dapat dikatakan baik apabila parameter-parameter seperti *maximum overshoot*, *setling time* dan *error steady state* sesuai dengan kriteria yang telah ditentukan. Salah satu kriterianya adalah *error steady state (ess)* $\leq \pm 2^{o}$C (0,37%) dimana nilai tersebut merupakan nilai *ess* yang diperbolehkan dari PT PJB Gresik.

g. Perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC)

Tahap pertama adalah perancangan *observer* yaitu dengan mengubah fungsi transfer *laplace model* menjadi *state space model* sehingga didapatkan matriks A, B, C, D yang digunakan untuk mendapatkan *gain observer*. Tahap kedua adalah rekonfigurasi kontrol, dimana perancangan ini bertujuan untuk mengembalikan stabilitas kontrol yang tidak stabil akibat kesalahan pada sensor termperatur dengan mengubah perhitungan sinyal kontrolnya.

h. Analisis respon

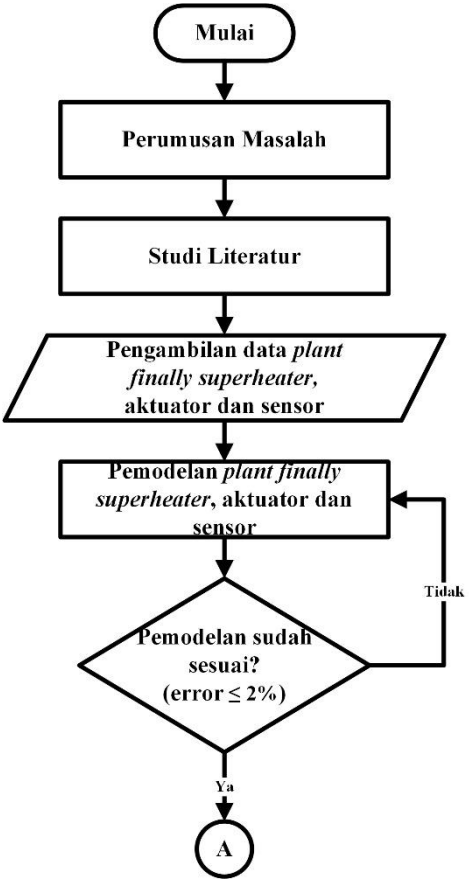
Analisis respon dilakukan berdasarkan uji performansi sistem dengan memberikan kesalahan berupa kesalahan bias dan sensitivitas pada sensor pengendalian temperatur. Sehingga

didapatkan grafik respon sistem dengan menggunakan dan tanpa menggunakan AFTC.

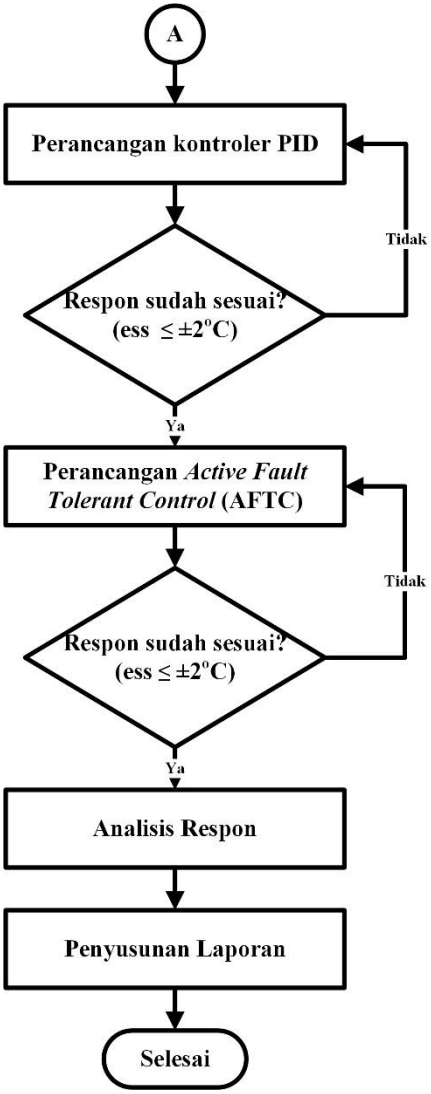
i. Penyusunan laporan tugas akhir

Pada tahap ini dilakukan penulisan laporan mengenai tugas akhir yang telah dilakukan.

Flowchart pengerjaan tugas akhir ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian



Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian (lanjutan)

3.1 Pengambilan Data

Data yang digunakan untuk pemodelan *plant* berupa *volume finally superheater, flow steam in, flow steam out,* dll. Data didapat dari ruang CCR (*Central Control Room*) PLTU PT PJB Gresik Unit 4. Variabel yang dikendalikan pada obyek tugas akhir ini adalah temperatur *steam output* pada *finally superheater*. Variabel yang dimanipulasi adalah laju aliran *water spray* terhadap temperatur *steam input* melalui operasi *control valve*.

Tabel 3.1 Data Pemodelan *Plant Finally Superheater*

Notasi	Keterangan	Nilai dan Satuan
V	*Volume Finally Superheater*	40,2984 m^3
$\dot{m}_{in}$	*Mass Flowrate Steam in*	157,0581 kg/s
$\dot{m}_{out}$	*Mass Flowrate Steam out*	160,8853 kg/s
ρ_v	*Massa* Jenis Uap *Finally Superheater*	49,7601 kg/m^3
C_v	Kalor Spesifik *Finally Superheater*	1,9279 kJ/kgK
C_{vin}	Kalor Spesifik *Steam in*	2,1203 kJ/kgK
C_{vout}	Kalor Spesifik *Steam out*	1,9279 kJ/kgK
C_p	Kalor Spesifik *Water Spray*	4,2995 kJ/kgK
T_{spray}	Temperatur *Water Spray*	444,88 ^{0}K
P_{in}	*Pressure inlet*	168.78 Kg/cm^2
P_{out}	*Pressure outlet*	168.78 Kg/cm^2
P_{spray}	*Pressure water spray*	216.8 Kg/cm^2

3.2 Pemodelan

3.2.1 Pemodelan Matematis *Plant Finally Superheater*

Untuk memodelkan *finally superheater* digunakam hukum kesetimbangan energi. Hukum ini menyatakan bahwa jumlah energi yang masuk kedalam sistem sebanding dengan jumlah energi yang keluar dari sistem serta energi yang terakumulasi dalam sistem itu sendiri [8].

Dengan menggunakan persamaan hukum kesetimbangan energi, maka model matematis pada *finally superheater* dapat dimodelkan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} Laju\ Perubahan \\ energi\ dalam \\ finally\ superheater \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Laju \\ Energi \\ input \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} laju \\ Energi \\ output \end{bmatrix}$$

Karena laju energi *input* terdapat 2 variabel yaitu laju energi *water spray* dan laju energi *steam input* maka persamaannya menjadi:

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \dot{E_{in}} - \dot{E_{out}} + \dot{E_{spray}} \tag{3.1}$$

$$V.\rho_v.C_v\frac{dT_o}{dt} = \dot{m}_{in}.C_{vin}.T_{in} - \dot{m}_{out}.C_{vout}.T_{out} + \dot{m}_{spray}.C_p.T_{spray} \tag{3.2}$$

Dimana:

V = *Volume finally superheater* (m^3)
ρ_v = Densitas *steam* (kg/m^3)
$\dot{m}_{in}$ = *Mass flowrate steam in* (kg/s)
$\dot{m}_{out}$ = *Mass flowrate steam out* (kg/s)
$\dot{m}_{spray}$ = *Mass flowrate water spray* (kg/s)
C_v = Kalor spesifik *finally superheater* (kJ/kgK)
C_{vin} = Kalor spesifik *steam in* (kJ/kgK)
C_{vout} = Kalor spesifik *steam out* (kJ/kgK)
C_p = Kalor spesifik *water spray* (kJ/kgK)
T_{in} = Temperatur *inlet* (K)
T_{out} = Temperatur *outlet* (K)
T_{spray} = Temperatur *water spray* (K)

Dari tabel 3.1 data pemodelan *plant finally superheater*, maka dapat disubtitusikan ke persamaan (3.2), sehingga persamaan tersebut menjadi seperti berikut:

$$40{,}30\ .\ 49{,}76\ .\ 1{,}93\frac{dT_o}{dt} = 157{,}06\ .\ 2{,}12\ .\ T_{in} - 160{,}89\ .\ 1{,}93\ .\ T_{out} + \dot{m}_{spray}.\ 4{,}30\ .\ 444{,}88 \tag{3.3}$$

$$3865{,}923\,\frac{dT_o}{dt} = 333{,}012\,T_{in} - 310{,}171\,T_{out} + 1912{,}762\,\dot{m}_{spray} \quad (3.4)$$

Kemudian persamaan diatas didekati dengan transformasi *Laplace*, sehingga menjadi:

$$3865{,}923\,s\,T_{out}(s) = 333{,}012\,T_{in}(s) - 310{,}171\,T_{out}(s) + 1912{,}762\,\dot{m}_{spray}(s) \quad (3.5)$$

$$3865{,}923\,s\,T_{out}(s) + 310{,}171\,T_{out}(s) = 333{,}012\,T_{in}(s) + 1912{,}762\,\dot{m}_{spray}(s) \quad (3.6)$$

$$12{,}4639\,s\,T_{out}(s) + 1\,T_{out}(s) = 1{,}0736\,T_{in}(s) + 6{,}1668\,\dot{m}_{spray}(s) \quad (3.7)$$

$$[12{,}4639\,s + 1]\,T_{out}(s) = 1{,}0736\,T_{in}(s) + 6{,}1668\,\dot{m}_s(s) \quad (3.8)$$

Maka fungsi transfer *plant* yang menggambarkan perubahan temperatur *output finally superheater* terhadap perubahan laju aliran *waterspray* dan perubahan temperatur *input finally superheater* dapat dituliskan sebagai berikut.

$$T_{out}(s) = \left[\frac{1{,}0736}{12{,}4639s+1}\right] T_{in}(s) + \left[\frac{6{,}1668}{12{,}4639s+1}\right] \dot{m}_s(s) \quad (3.9)$$

3.2.2 Pemodelan Matematis Aktuator (FV-76-2)

Aktuator yang digunakan dalam sistem ini adalah *Control Valve* yang berfungsi untuk mengatur laju aliran dari *water spray* agar temperatur *output finally superheater* sesuai dengan *setpoint*. Model matematis *Control Valve* diperoleh dengan persamaan:

$$\frac{\dot{m}_s(S)}{U(S)} = \frac{K_v}{\tau S+1} \quad (3.10)$$

Dimana:

$\dot{m}_s$ (s) = Manipulated variable berupa *flow water spray* (kg/s)

K_v = Gain *Control valve*
U(s) = sinyal kontrol
τ = *Time constant*

Untuk menghitung *gain control valve* dengan menggunakan persamaan:

$$K_v = K_{i/p} \times K_{aktuator} \quad (3.11)$$

$$K_{i/p} = \left(\frac{Span\ Output}{Span\ Input}\right) \quad (3.12)$$

$$K_{aktuator} = \left(\frac{\dot{m}_b\ max - \dot{m}_b\ min}{Span\ Output}\right) \quad (3.13)$$

Adapun dari *data sheet* dari *control valve FV-76-2* didapatkan beberapa nilai seperti berikut. *Span input* adalah arus yang masuk dari kontroler yakni sinyal elektrik sebesar 4-20 mA, sedangkan *span output* adalah sinyal pneumatik 0,4-2 kg/cm^2. Dalam hal ini, *control valve* memiliki masukkan sinyal berupa arus listrik lalu di ubah oleh I/P *converter* untuk menjadi tekanan pneumatik agar dapat menggerakkan *stem control valve.*

Fluida yang mengalir melalui *control valve* memiliki laju aliran minimum sebesar 0,6139 kg/s sedangkan untuk laju aliran maksimum sebesar 8,8889 kg/s. Maka perhitungan gain *control valve* adalah sebagai berikut.

$$K_{i/p} = \frac{(2-0{,}4)\ kg/cm^2}{(20-4)\ mA} = 0{,}1\ kg/cm^2.mA \quad (3.14)$$

$$K_{aktuator} = \frac{(8{,}8889-0{,}6139)\ kg/s}{(2-0{,}4)\ kg/cm^2} = 5{,}1719\ cm^2/s \quad (3.15)$$

$$K_v = 0{,}1\frac{kg}{cm^2.mA} \times 5{,}1719\frac{cm^2}{s} = 0{,}5172\ \text{kg/s.mA} \quad (3.16)$$

Nilai waktu konstan pada *control valve* adalah:
$\tau = Tv(\Delta V + Rv)$ (3.17)

Dimana ΔV berupa fraksi perubahan *control valve*

$$\Delta V = \left(\frac{\dot{m}_b\ max - \dot{m}_b\ min}{\dot{m}_b\ max}\right) = \frac{(8{,}8889 - 0{,}6139)\ kg/s}{8{,}8889\ kg/s} = 0{,}93 \quad (3.18)$$

Sedangkan *Rv* merupakan perbandingan waktu konstan inheren dengan *time stroke*, bernilai 0,03 untuk aktuator diafragma. Untuk $Tv = \frac{Yc}{CV}$, *Yc* merupakan faktor *stroking time control valve* dimana nilainya adalah 0,68 menurut Lee dan Choi 1999. Sedangkan dari data *sheet* nilai Cv sebesar 11,8 maka nilai waktu konstan aktuator adalah:

$$\tau = \frac{0{,}68}{11{,}8}(0{,}93 + 0{,}03) = 0{,}0554 \quad (3.19)$$

Sehingga, fungsi transfer *Control Valve* FV-76-2 adalah seperti berikut.

$$\frac{\dot{m}_s(s)}{U(s)} = \frac{0{,}5172}{0{,}0554\ s + 1} \quad (3.20)$$

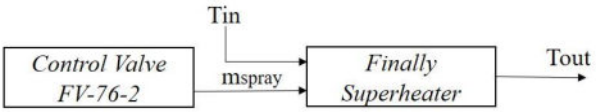
3.2.3 Pemodelan Matematis Sensor (TE-32-2)

Untuk *plant* pengendalian temperatur pada *finally superheater*, sensor dari *plant* adalah *thermocouple type E*, yaitu suatu alat yang berfungsi untuk mengukur temperatur pada *superheater* dengan memanfaatkan perbedaan tegangan yang terdiri dari dua kawat konduktor yang berbeda jenis dan digabungkan ujungnya. Satu jenis logam konduktor yang terdapat pada *thermocouple* akan berfungsi sebagai referensi dengan temperatur konstan (tetap) sedangkan yang satunya lagi sebagai logam konduktor yang mendeteksi temperatur panas.

Pemodelan pada sensor menggunakan nilai 1 agar nilai keluaran dari sensor menuju unit pengendali merepresentasikan nilai temperatur yang terukur [14].

3.3 Validasi Model

Validasi pemodelan dilakukan bertujuan untuk menguji model *plant* yang telah dibuat pada *simulink* di matlab R2014b untuk mengetahui apakah pemodelan tersebut sudah merepresentasikan keadaan plant yang sebenarnya di PLTU PT PJB Gresik Unit 4. Validasi dilakukan pada tanggal 2 Maret 2018 tiap satu jam dengan uji open loop fungsi transfer *finally superheater* terhadap laju aliran *water spray* yang diberikan dan temperatur yang masuk kedalam *finally superheater*. Diagram blok *open loop* validasi model akan ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Skema Validasi Model

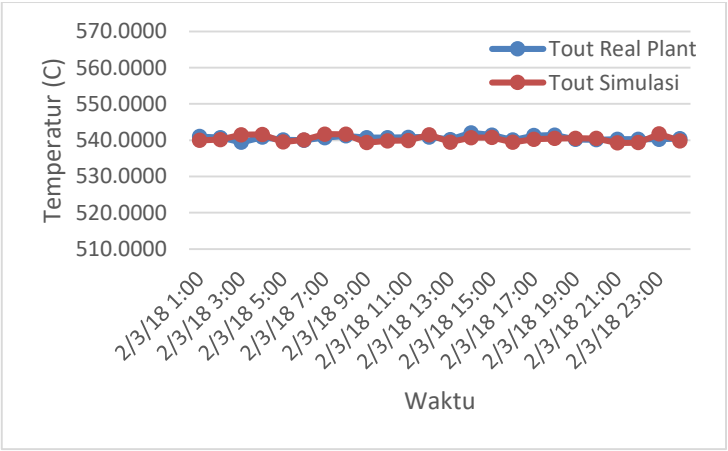
Pengujian dilakukan dengan memberikan besar laju aliran *water spray* yang berubah-ubah terhadap temperatur *input finally superheater*. Hasil pengujian akan di bandingkan dengan hasil *real plant* sehingga akan didapatkan hasil pengujian seperti pada tabel berikut ini.

Tabel 3.2 Hasil Uji Validasi Temperatur *Finally Superheater*

Tgl Jam	Tout *real plant* (C)	Tout Simulasi (C)	*error* %
2/3/18 1:00	541.0178	539.9273	1.0903%
2/3/18 2:00	540.7061	540.1740	0.5337%
2/3/18 3:00	539.4280	541.4818	2.0866%
2/3/18 4:00	540.8299	541.5964	0.7678%
2/3/18 5:00	540.0936	539.4880	0.6112%
2/3/18 6:00	539.9809	540.0964	0.1167%
2/3/18 7:00	540.6862	541.6853	1.0022%
2/3/18 8:00	541.1883	541.6413	0.4522%
2/3/18 9:00	540.6862	539.3435	1.3469%

Tabel 3.2 Hasil Uji Validasi Temperatur *Finally Superheater* (lanjutan)

Tgl Jam	Tout *real plant* (C)	Tout Simulasi (C)	*error* %
2/3/18 10:00	540.6908	539.8324	0.8611%
2/3/18 11:00	540.7851	539.8922	0.8948%
2/3/18 12:00	540.8685	541.4862	0.6185%
2/3/18 13:00	540.1854	539.4819	0.7092%
2/3/18 14:00	542.0054	540.6742	1.3180%
2/3/18 15:00	541.3929	540.7545	0.6359%
2/3/18 16:00	540.0342	539.4347	0.6054%
2/3/18 17:00	541.2748	540.2348	1.0372%
2/3/18 18:00	541.4186	540.4608	0.9538%
2/3/18 19:00	540.1890	540.5302	0.3440%
2/3/18 20:00	540.1119	540.4865	0.3780%
2/3/18 21:00	540.2556	539.2582	1.0048%
2/3/18 22:00	540.2468	539.3368	0.9169%
2/3/18 23:00	540.2579	541.7316	1.4847%
3/3/18 0:00	540.4216	539.8074	0.6178%

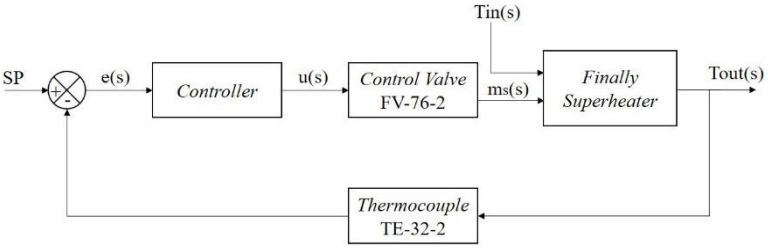


Gambar 3.3 Grafik Respon Hasil Uji Validasi Temperatur *Finally Superheater*

Grafik respon validasi model ditunjukkan pada Gambar 3.3. Hasil uji validasi tersebut dapat diperoleh rata-rata *error* pemodelan tersebut ≤ 2%, sehingga pemodelan tersebut sudah dapat dikatakan *valid*. Untuk skema perancangan *open loop* dapat dilihat di Lampiran C.

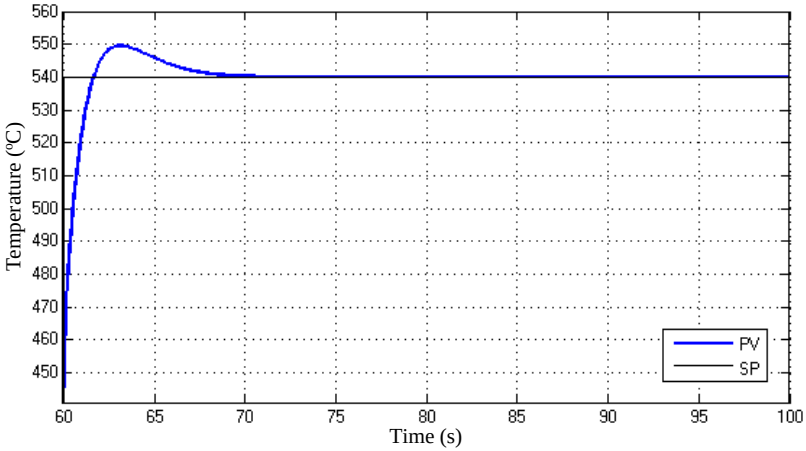
3.4 Perancangan Kontroler PID

Pengendalian temperatur pada *finally superheater* menggunakan pengendalian *feedback* dengan algoritma PID. Pada pengendalian jenis *feedback* digunakan *thermocouple* untuk mengukur nilai proses yang dikendalikan sebagai pembanding dengan *setpoint*. Untuk menentukan *gain* pengendali PID menggunakan metode *trial and error* hingga memenuhi kriteria *error steady state* $\leq \pm 2^{o}C$ (0,37%). Pada sistem ini didapatkan bahwa nilai Kp sebesar 6.0035, Ki sebesar 2.3263 dan Kd sebesar 1.1173. Setelah itu sistem disimulasikan dengan menggunakan *software* Matlab (2014a) dengan skema seperti Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Skema Diagram Blok Perancangan Kontroler PID

Berdasarkan Gambar 3.4 *setpoint* yang digunakan adalah besaran temperatur dalam derajat celcius. *Output* dari *finally superheater* berupa temperatur *output* dalam derajat celcius. Berikut merupakan respon sistem ketika diberikan *setpoint* sebesar 540 ^{o}C.



Gambar 3.5 Grafik Respon Perancangan Kontroler PID

Dari grafik respon sistem tersebut dapat diketahui karakteristik respon sistem yakni *settling time* sebesar 12 detik, *maximum overshoot* sebesar 9.64% serta *error steady state* sistem sebesar 0.0057%. Hasil ini sudah memenuhi kriteria performansi kontrol yang diinginkan yaitu *ess* $\leq \pm 2^{o}$C (0,37%) dan respon sudah stabil di *setpoint.* Untuk skema perancangan *close loop* dengan *software* Matlab dapat dilihat di Lampiran D.

3.5 Perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC)

Perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) terdiri dari dua tahap, yakni perancangan *observer* dan rekonfigurasi kontrol.

3.5.1 Perancangan *Observer*

Observer berfungsi untuk mendeteksi perubahan akibat kesalahan yang terjadi pada sensor *thermocouple*. Langkah pertama dalam merancang *observer* adalah merubah fungsi transfer sistem ke dalam bentuk matriks ruang keadaan, persamaan hasil representasi perhitungan dari Gambar 3.5 dijelaskan pada persamaan (3.21) dan (3.22).

$$T_{out}(s) = \left[\frac{1{,}0736}{12{,}4639s+1}\right] T_{in}(s) + \left[\frac{6{,}1668}{12{,}4639s+1}\right] \dot{m}_s(s) \quad (3.21)$$

$$\frac{\dot{m}_s(s)}{U(s)} = \frac{0{,}5172}{0{,}0554\ s+1} \quad (3.22)$$

Pada persamaan (3.21) dan (3.22) di *invers laplace* sehingga hasilnya dapat berubah ke domain waktu seperti yang tertera pada persamaan (3.23) dan (3.24) agar bisa didapatkan nilai dari persamaan ruang keadaan.

- Fungsi transfer *plant*

$$T_{out}(s) = \left[\frac{1{,}0736}{12{,}4639s+1}\right] T_{in}(s) + \left[\frac{6{,}1668}{12{,}4639s+1}\right] \dot{m}_s(s)$$

$$T_{out}(s)(12{,}4639s + 1) = 1{,}0736\ T_{in}(s) + 6{,}1668\ \dot{m}_s(s)$$

$$12{,}4639s\ T_{out}(s) + T_{out}(s) = 1{,}0736\ T_{in}(s) + 6{,}1668\ \dot{m}_s(s)$$

$$12{,}4639s\ T_{out}(s) = 1{,}0736\ T_{in}(s) + 6{,}1668\ \dot{m}_s(s) - T_{out}(s)$$

$$s\ T_{out}(s) = \frac{1{,}0736}{12{,}4639} T_{in}(s) + \frac{6{,}1668}{12{,}4639}\ \dot{m}_s(s) - \frac{1}{12{,}4639} T_{out}(s)$$

$$\frac{dT_{out}(t)}{dt} = 0{,}0861\ T_{in}(t) + 0{,}4948\ \dot{m}_s(t) - 0{,}0802\ T_{out}(t) \quad (3.23)$$

- Fungsi transfer aktuator

$$\frac{\dot{m}_s(s)}{U(s)} = \frac{0{,}5172}{0{,}0554\ s + 1}$$

$$\dot{m}_s(s)(0{,}0554\ s + 1) = 0{,}5172\ U(s)$$

$$0{,}0554\ s\ \dot{m}_s(s) + \dot{m}_s(s) = 0{,}5172\ U(s)$$

$$0{,}0554\ s\ \dot{m}_s(s) = 0{,}5172\ U(s) - \dot{m}_s(s)$$

$$s\,\dot{m}_s(s) = \frac{0{,}5172}{0{,}0554}\,U(s) - \frac{1}{0{,}0554}\dot{m}_s(s)$$

$$\frac{d\dot{m}_s(t)}{dt} = 9{,}3357\,u(t) - 18{,}0505\,\dot{m}_s(t) \tag{3.24}$$

Dari kedua persamaan diatas (3.23) dan (3.24) dibuat kedalam bentuk matriks ruang keadaan seperti berikut ini.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{3.25}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \tag{3.26}$$

Sehingga,

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_{out}(t)}{dt} \\ \frac{d\dot{m}_s(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0{,}0802 & 0{,}4948 \\ 0 & -18{,}0505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out}(t) \\ \dot{m}_s(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0{,}0861 & 0 \\ 0 & 9{,}3357 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{in}(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

$$\begin{bmatrix} T_{out}(t) \\ \dot{m}_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out}(t) \\ \dot{m}_s(t) \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

Dari Persamaan diatas (3.25) dan (3.26) dapat diketahui nilai matriks A, B, C, D. Matriks A merupakan matriks yang menyatakan *state* sistem. Berdasarkan penjabaran dari fungsi transfer *plant* dan aktuator tersebut, maka matriks A bernilai:

$$A = \begin{bmatrix} -0{,}0802 & 0{,}4948 \\ 0 & -18{,}0505 \end{bmatrix}$$

Matriks B merupakan matriks yang menyatakan *input* kontrol sistem. sehingga matriks B bernilai:

$$B = \begin{bmatrix} 0{,}0861 & 0 \\ 0 & 9{,}3357 \end{bmatrix}$$

Matriks C merupakan matriks *output* sistem dan merupakan matriks identitas sehingga matriks C bernilai:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriks D merupakan matriks yang menyatakan *noise* sistem, jika diasumsikan tidak terjadi *noise* maka matriks D bernilai:

$$D = 0$$

Matriks kesalahan terdapat dua macam, yakni kesalahan aktuator (*Fa*) dan keslahan sensor (*Fs*). Dalam tugas akhir ini hanya dianalisa kesalahan sensor, sehingga matriks *Fs* bernilai:

$$Fs = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Untuk mengkompensasi kesalahan sensor maka diperlukan modifikasi algoritma *observer* baru, seperti pada persamaan berikut ini.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{3.29}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \tag{3.30}$$

Kemudian *state* baru $\dot{z}(t)$ ditambahkan untuk memindahkan kesalahan sensor dari persamaan keluaran ke persamaan keadaan, persamaan tersebut dapat didefinisikan persamaan baru sebagai berikut.

$$\dot{z}(t) = Az(y(t) - z(t)) \tag{3.31}$$

$$\dot{z}(t) = Az(Cx(t) + F_s f_s(t) - z(t)) \tag{3.32}$$

$$\dot{z}(t) = Az.Cx(t) + Az.F_s f_s(t) - Az.z(t) \tag{3.33}$$

Untuk *Az* merupakan matriks identitas (*I*), $Az \in I^q$. Agar dapat mendefinisikan matriks kesalahan sensor, maka bentuk dari matriks ruang keadaan dapat diekspansi menjadi seperti berikut.

$$\begin{cases} \dot{X_a}(t) = A_a x_a(t) + B_a u(t) + E_a f_s(t) \\ y(t) = C_a x_a(t) \end{cases} \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ Az.C & -Az \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ Az.F_s \end{bmatrix} f_s(t) \quad (3.35)$$

$$y(t) = [0 \quad C] \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Sehingga didapatkan,

$$Aa = \begin{bmatrix} A & 0 \\ Az.C & -Az \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0{,}0802 & 0{,}04948 & 0 & 0 \\ 0 & -18{,}0505 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$Ba = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}0861 & 0 \\ 0 & 9{,}3357 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Ca = [0 \quad C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Ea = \begin{bmatrix} 0 \\ Az.F_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Untuk memperoleh nilai *gain observer*, maka ditambahkan *state* yang mengandung *gain* agar dapat mengestimasi kesalahan sensor, sehingga ekspansi matriks ruang keadaan baru yang ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}}(t) = A_a\hat{X} + B_a u + E_a\ \hat{f}_s + L_x(Y - \hat{Y}) \\ \hat{f}_s = L_f(Y - \hat{Y}) \\ \hat{Y} = C_a\hat{X} \end{cases} \quad (3.37)$$

Sehingga dari persamaan diatas jika diubah kedalam bentuk yang lebih ringkas akan menjadi sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{\hat{f}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Aa & Ea \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Ba \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} L_x \\ L_f \end{bmatrix}[Ca \quad 0](Y - \hat{Y}) \quad (3.38)$$

$$\hat{Y} = [Ca \quad 0]\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Dari bentuk (3.38) dan (3.39) dapat diubah menjadi persamaan keadaan dan persamaan keluaran *observer*, sebagai berikut.

$$\dot{\tilde{\hat{x}}}(t) = \tilde{A}_a\tilde{\hat{x}}(t) + \tilde{B}_a u(t) + \tilde{K}_e(\tilde{y}(t) - \tilde{\hat{y}}(t)) \quad (3.40)$$

$$\tilde{\hat{y}}(t) = \tilde{C}_a\tilde{\hat{x}}(t) \quad (3.41)$$

Dengan mensubtitusikan nilai matriks *Aa*, *Ca* dan *Ea*, diperoleh nilai matriks $\tilde{A}_a$ dan $\tilde{C}_a$ sebagai berikut.

$$\tilde{Aa} = \begin{bmatrix} Aa & Ea \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0{,}0802 & 0{,}4948 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -18{,}0505 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{C}_a = [Ca \quad 0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Untuk dapat menyelesaikan *Observer* maka diperlukan pemilihan dari nilai *pole*, nilai *pole* sistem yang dipakai adalah

p1 = -17.1562 + 0.0000i
p2 = -0.6413 + 1.7785i
p3 = -0.6413 - 1.7785i
p4 = -0.0728 + 0.0000i
p5 = -0.9847 + 0.0000i

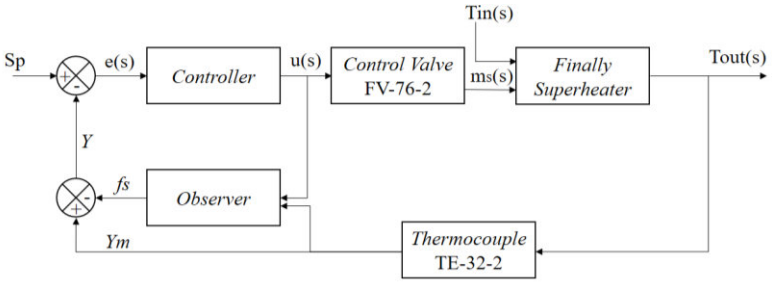
Dari nilai *pole placement* diatas secara otomatis dengan menggunakan perangkat lunak *Matlab R2014b* dengan *syntax* "*place*" didapatkan nilai *gain observer* bernilai sebgai berikut.

$$Ke = \begin{bmatrix} 0{,}2780 & -0{,}3502 \\ 0{,}1374 & 15{,}2963 \\ 0{,}3130 & 0{,}5296 \\ -0{,}6233 & -0{,}9474 \\ 2{,}9692 & 0{,}5918 \end{bmatrix}$$

Untuk skema perancangan *observer* dapat dilihat di Lampiran G dan untuk *syntax* perancangan *observer* di Lampiran F.

3.5.2 Perancangan Rekonfigurasi Kontrol

Rekonfigurasi kontrol merupakan tahap akhir untuk merancang AFTC yang bertujuan untuk mengembalikan kestabilan sistem ketika terjadi kesalahan sehingga plant tetap dapat beroperasi dalam kondisi normal. Perancangan skema AFTC dibentuk dari *gain observer* yang telah didapatkan dari sub-bab 3.5.1 dan skema rekonfigurasi kontrol ditunjukkan pada gambar berikut ini. Untuk skema perancangan rekonfigurasi kontrol dapat dilihat di Lampiran H.



Gambar 3.6 Skema Perancangan Rekonfigurasi Kontrol

Rekonfigurasi kontrol ini dilakukan dengan menambahkan sinyal kontrol berupa Y. Nilai Y ini didapatksn dari perhitungan sebagai berikut:

$$Y = Y_m - f_s \tag{3.42}$$

Dimana:
Y = Nilai sebenarnya
Y_m = Nilai hasil pengukuran
f_s = Nilai hasil estimasi *fault*

3.6 Uji Perfomansi

Uji performansi dilakukan untuk menguji algoritma AFTC yang telah dibuat dapat berjalan dengan baik atau tidak. Uji ini dilakukan dengan memberikan suatu kesalahan pada sensor. Kesalahan yang diberikan berupa kesalahan bias dan sensitivitas. Kesalahan bias disimulasikan sebesar ±0,32% sedangkan kesalahan sensitivitas disimulasikan sebesar 1%, 2%, 5%, 8% dan 15%.

BAB IV
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

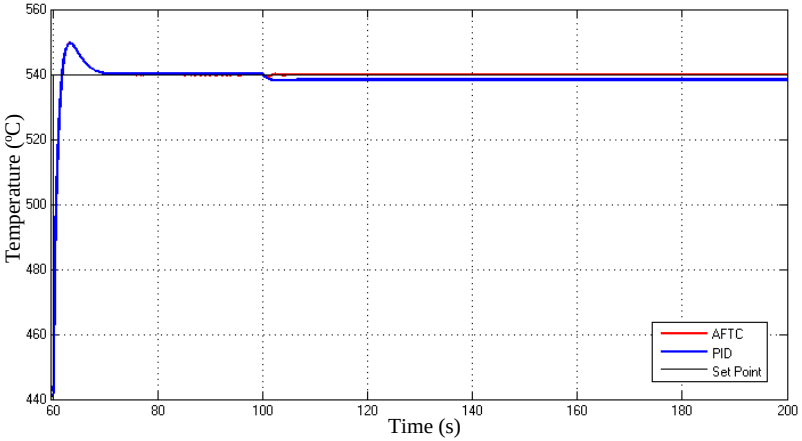
Pada bab ini akan dijabarkan hasil perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada sistem pengendalian temperatur pada *finally superheater* yang telah dilakukan dan disimulasikan dengan software MATLAB R2014a untuk selanjutnya dilakukan uji performansi sistem. Uji performansi sistem dilakukan guna mengetahui algoritma AFTC yang telah dibuat dapat bekerja dengan baik atau tidak untuk menolerir kesalahan pada sensor *thermocouple*. Kesalahan sensor yang diberikan berupa kesalahan bias dan sensitivitas. Parameter yang digunakan untuk menilai performansi sistem pengendalian diantaranya adalah *maximum overshoot, settling time dan error steady state.* Penilaian terhadap uji dilakukan pada kondisi saat diberikan kesalahan yakni pada detik ke-100.

4.1 Uji Kesalahan Bias

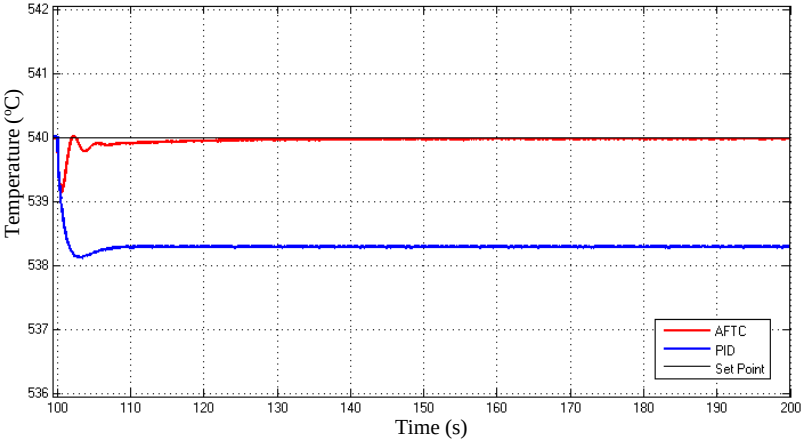
Untuk menguji performansi dari sistem pengendalian temperatur maka diberikan kesalahan pada sensor *thermocouple* berupa kesalahan bias. Bias merupakan penyimpangan nilai dari nilai tetapan yang telah ditentukan. Bias dalam pengukuran juga bisa disebut dengan nilai *error* sistematik. *Error* sistematik mendeskripsikan *error* pada pembacaan *output* sistem pengukuran yang secara konsisten *(error steady state)* pada satu sisi pembacaan yang benar, yaitu seluruh *error* adalah positif atau seluruh *error* adalah negatif [15]. Semakin kecil nilai biasnya maka nilai *error steady state* juga semakin kecil begitupun sebaliknya. Nilai bias yang diberikan pada uji ini adalah ±0,32% dari span pengukuran *thermocouple*. Nilai tersebut merupakan standar nilai kesalahan bias yang diperbolehkan pada PLTU PT PJB Gresik. Kesalahan Bias diberikan pada detik ke-100. Hasil respon sistem dengan kesalahan bias dapat dilihat pada gambar berikut.

4.1.1 Uji Kesalahan Bias +0,32%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan *(fault)* pada detik ke-100.



Gambar 4.1 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Bias +0,32%



Gambar 4.2 Perbesaran Respon Pengendalian Sistem dengan Kesalahan Bias +0,32%

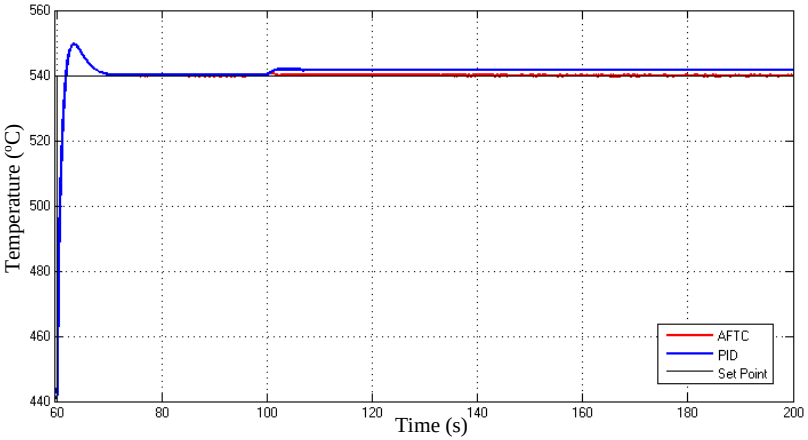
Tabel 4.1 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias +0,32%

No	Parameter	AFTC	PID
1	*Maximum undershoot*	0,1574 %	0,3463 %
2	*Settling Time*	15 detik	10 detik
3	*Error steady state*	0,0035 %	0,3155 %

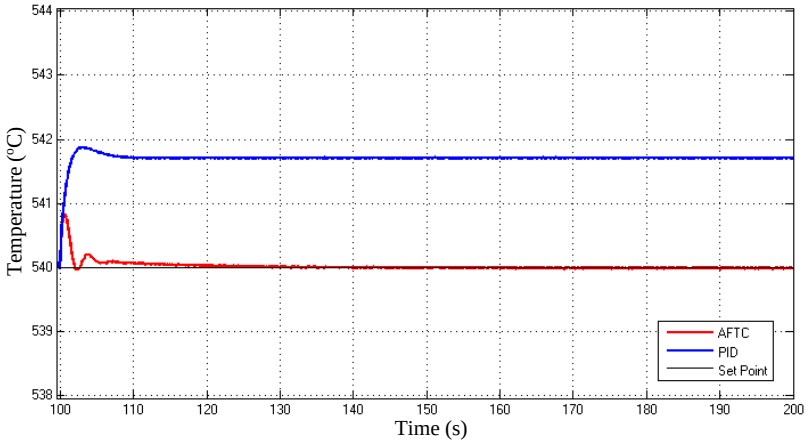
Pada Gambar 4.1 dan 4.2 serta parameter performansi pada tabel 4.1, terlihat bahwa dalam mengatasi kesalahan bias sebesar +0,32% respon sistem pengendali dengan algoritma AFTC lebih baik daripada respon sistem pengendali PID tanpa algoritma AFTC. Dari segi parameter performansi sistem, *maximum undershoot* saat dikenai kesalahan bias +0,32% dengan algoritma AFTC sebesar 0,1574% sedangkan dengan algoritma PID saja tanpa AFTC sebesar 0,3463%. Untuk waktu menuju *steady (settling time)* saat dikenai kesalahan bias +0,32% memiliki *settling time* sebesar 15 detik dengan algoritma AFTC dan memiliki *error steady state* sebesar 0,0035%. Sedangkan tanpa algoritma AFTC memiliki *settling time* lebih cepat yaitu sebesar 10 detik tetapi tidak dapat menolerir kesalahan yang terjadi dan memiliki *error steady state* yang lebih besar dibandingkan dengan algoritma AFTC yakni sebesar 0,3155%.

4.1.2 Uji Kesalahan Bias -0,32%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan akan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan *(fault*) pada detik ke-100.



Gambar 4.3 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Bias -0,32%



Gambar 4.4 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Bias -0,32%

Tabel 4.2 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias -0,32%

No	Parameter	AFTC	PID
1	*Maximum overshoot*	0,1550 %	0,3481 %
2	*Settling Time*	20 detik	10 detik
3	*Error steady state*	0,0024 %	0,3151 %

Pada Gambar 4.3 dan 4.4 serta parameter performansi pada tabel 4.2, terlihat bahwa dalam mengatasi kesalahan bias sebesar -0,32% respon sistem pengendali dengan algoritma AFTC lebih baik daripada respon sistem pengendali PID tanpa algoritma AFTC. Dapat dilihat pada tabel 4.2, *maximum overshoot* saat dikenai kesalahan bias -0,32% dengan algoritma AFTC sebesar 0,1550% sedangkan dengan algoritma PID tanpa AFTC sebesar 0,3481%. Untuk waktu menuju *steady (settling time)* saat dikenai kesalahan bias -0,32% memiliki *settling time* sebesar 20 detik dengan algoritma AFTC yang memiliki *error steady state* sebesar 0,0024%. Sedangkan tanpa algoritma AFTC lebih cepat yaitu sebesar 10 detik tetapi memiliki *error steady state* yang lebih besar yaitu 0,3151% dan tidak bisa menolerir kesalahan yang terjadi.

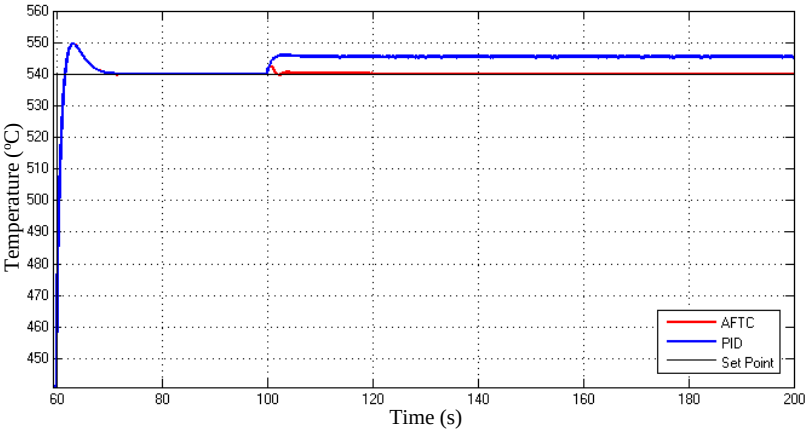
Dari segi parameter performansi sistem diatas saat dikenai kesalahan bias ±0,32%, sistem pengendalian dengan algoritma AFTC memiliki rata-rata *settling time* yang lebih lama dibandingkan tanpa algoritma AFTC, tetapi dengan algoritma AFTC dapat menolerir kesalahan sensor dibandingkan dengan PID tanpa algoritma AFTC tidak dapat mentolerir kesalahan dari sensor, dan juga dapat dilihat bahwa rata-rata nilai *maximum undershoot, maximum overshoot* maupun *error steady state* memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan sistem pengendali tanpa algoritma AFTC. Hal ini dapat dikarenakan oleh adanya rekonfigurasi kontrol untuk mengatasi kesalahan yang disebabkan oleh kesalahan sensor temperatur. Maka dari itu, sistem pengendali yang menggunakan algoritma AFTC memiliki performansi yang lebih baik dan dapat menolerir kesalahan sensor dibandingkan dengan sistem pengendalian tanpa menggunakan algoritma AFTC.

4.2 Uji Kesalahan Sensitivitas

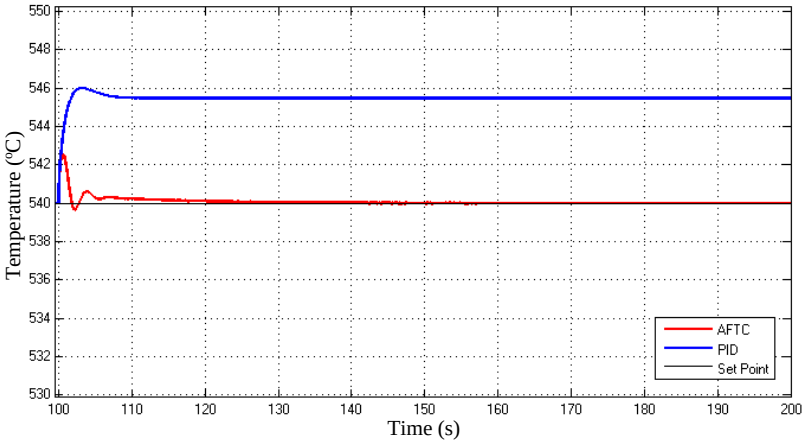
Sensitivitas berkaitan dengan seberapa peka sebuah sensor menanggapi *input* berupa variabel fisis untuk dikeluarkan dalam rupa nilai yang dapat diolah. Semakin besar nilai sensitivitas sensor, maka semakin baik kinerja sensor tersebut. Kesalahan sensitivitas adalah kesalahan nilai keluaran sensor karena kurang sensitifnya sensor sehingga sensor tidak memberikan sinyal keluaran sebesar yang seharusnya dikeluarkan [3]. Untuk uji kesalahan sensitivitas ini diberikan kesalahan sebesar 1%, 2%, 5%, 8% dan 15% dari *output* sensor temperatur.

4.2.1 Uji Kesalahan Sensitivitas 1%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan *(fault)* pada detik ke-100.



Gambar 4.5 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 1%



Gambar 4.6 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 1%

Tabel 4.3 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 1%

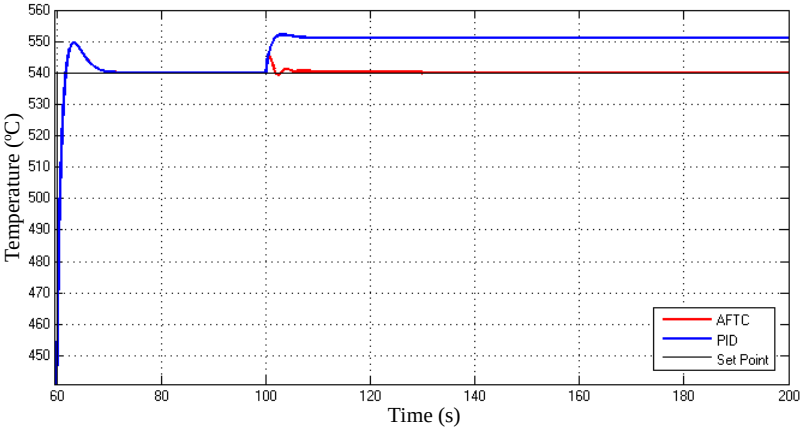
No	Parameter	AFTC	PID
1	*Maximum overshoot*	0,4630 %	1,1111 %
2	*Settling Time*	38 detik	11 detik
3	*Error steady state*	0,0037 %	1,0185 %

Pada gambar 4.5 dan 4.6 serta tabel 4.3 menunjukkan respon sistem ketika diberi kesalahan sensitivitas 1%, dimana kesalahan sensitivitas 1% berarti sensor kehilangan 1% dari sinyal *output*nya. Dari parameter performansi diatas, *maximum overshoot* yang terjadi pada pengendali dengan algoritma AFTC lebih kecil dari pengendali PID tanpa menggunakan AFTC saat dikenai kesalahan yakni sebesar 0,4630% lebih kecil dari PID biasa sebesar 1,1111%. Waktu untuk mencapai keadaann *steady (settling time)* dengan algoritma AFTC yakni sebesar 38 detik untuk mencapai temperatur yang diinginkan ±540ºC saat terjadi kesalahan sensitivitas 1%, dibandingkan dengan algoritma PID tanpa AFTC memiliki *settling time* yang lebih cepat, yaitu sebesar 11 detik tetapi tidak dapat menolerir kesalahan sehingga

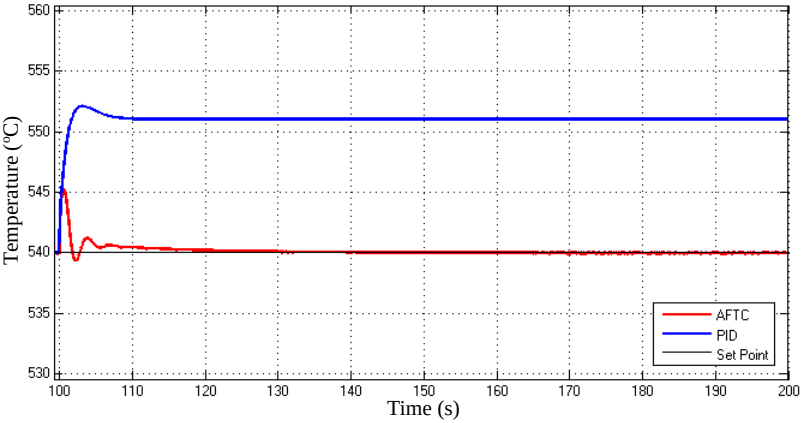
respon sistem *steady* pada temperatur ±545,5ºC maka didapatkan *error steady state* sebesar 1,0185%. Hasil tersebut lebih besar dari pengendali dengan algoritma AFTC yang hanya memiliki *error steady* sebesar 0,0037%. Hal ini membuktikan bahwa pengendali PID tanpa algoritma AFTC tidak mampu kembali menuju *setpoint* semula sedangkan dengan algoritma AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

4.2.2 Uji Kesalahan Sensitivitas 2%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan *(fault)* pada detik ke-100.



Gambar 4.7 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 2%



Gambar 4.8 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 2%

Tabel 4.4 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 2%

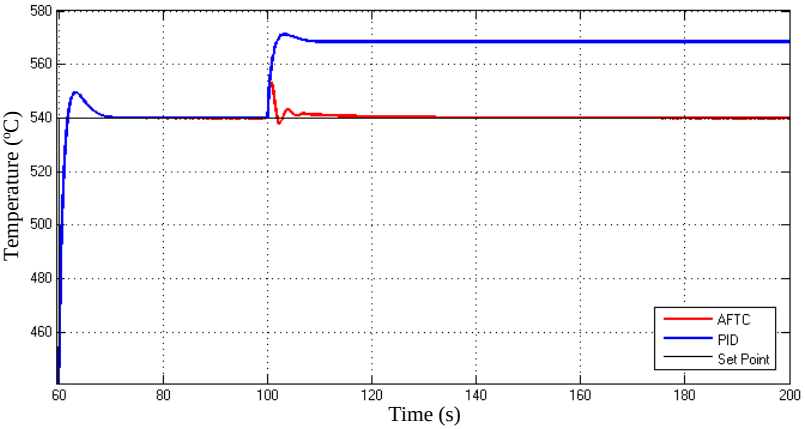
No	Parameter	AFTC	PID
1	*Maximum overshoot*	0,9907 %	2,2593 %
2	*Settling Time*	55 detik	11 detik
3	*Error steady state*	0,0014 %	2,0370 %

Pada gambar 4.7 dan 4.8 serta tabel 4.4 menunjukkan respon sistem ketika diberi kesalahan sensitivitas 2%, dimana kesalahan sensitivitas 2% berarti sensor kehilangan 2% dari sinyal *output*nya. Dari parameter performansi diatas, *maximum overshoot* yang terjadi pada pengendali dengan algoritma AFTC lebih kecil dari pengendali PID tanpa menggunakan AFTC saat dikenai kesalahan yakni sebesar 0,9907% lebih kecil dari PID biasa sebesar 2,2593%. Waktu untuk mencapai keadaann *steady (settling time)* dengan algoritma AFTC yakni sebesar 55 detik untuk mencapai temperatur yang diinginkan ±540ºC saat terjadi kesalahan sensitivitas 2%, dibandingkan dengan algoritma PID tanpa AFTC memiliki *settling time* yang lebih cepat, yaitu sebesar 11 detik tetapi tidak dapat menolerir kesalahan sehingga

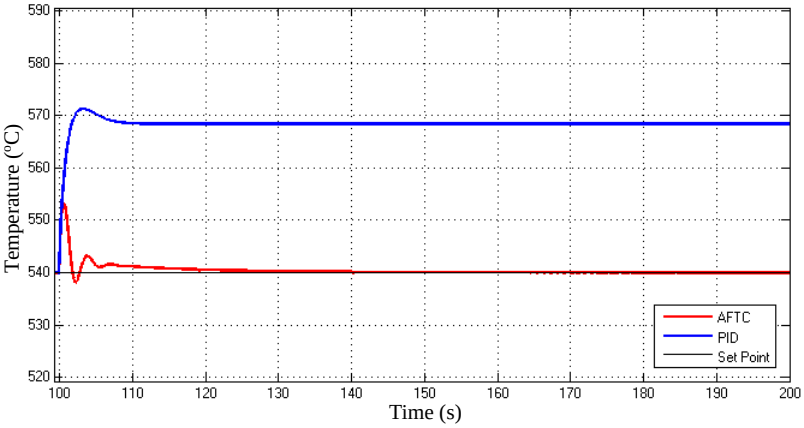
respon sistem *steady* pada temperatur ±551ºC maka didapatkan *error steady state* sebesar 2,0370%. Hasil tersebut lebih besar dari pengendali dengan algoritma AFTC yang hanya memiliki *error steady* sebesar 0,0014%. Hal ini membuktikan bahwa pengendali PID tanpa algoritma AFTC tidak mampu kembali menuju *setpoint* semula sedangkan dengan algoritma AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

4.2.3 Uji Kesalahan Sensitivitas 5%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan *(fault)* pada detik ke-100.



Gambar 4.9 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 5%



Gambar 4.10 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 5%

Tabel 4.5 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 5%

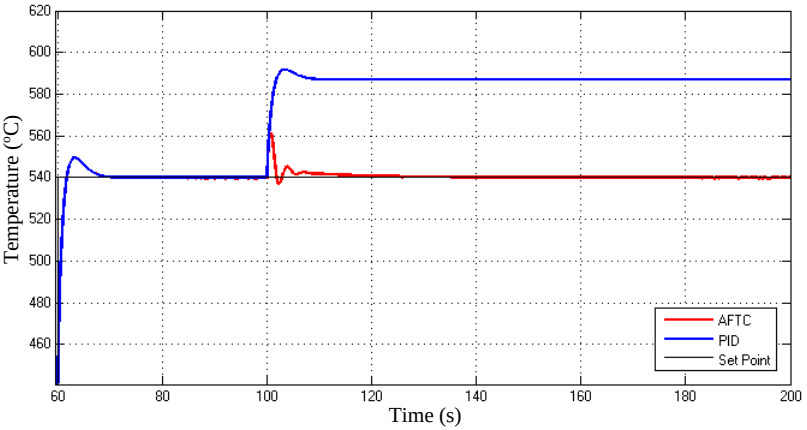
No	Parameter	AFTC	PID
1	*Maximum overshoot*	2,5006 %	5,7870 %
2	*Settling Time*	71 detik	12 detik
3	*Error steady state*	0,0037 %	5,2630 %

Pada gambar 4.9 dan 4.10 serta tabel 4.5 menunjukkan respon sistem ketika diberi kesalahan sensitivitas 5%, dimana kesalahan sensitivitas 5% berarti sensor kehilangan 5% dari sinyal *output*nya. Dari parameter performansi diatas, *maximum overshoot* yang terjadi pada pengendali dengan algoritma AFTC lebih kecil dari pengendali PID tanpa menggunakan AFTC saat dikenai kesalahan yakni sebesar 2,5006% lebih kecil dari PID biasa sebesar 5,7870%. Waktu untuk mencapai keadaann *steady (settling time)* dengan algoritma AFTC yakni sebesar 71 detik untuk mencapai temperatur yang diinginkan ±540ºC saat terjadi kesalahan sensitivitas 5%, dibandingkan dengan algoritma PID tanpa AFTC memiliki *settling time* yang lebih cepat, yaitu sebesar 12 detik tetapi algoritma PID tanpa AFTC tidak dapat

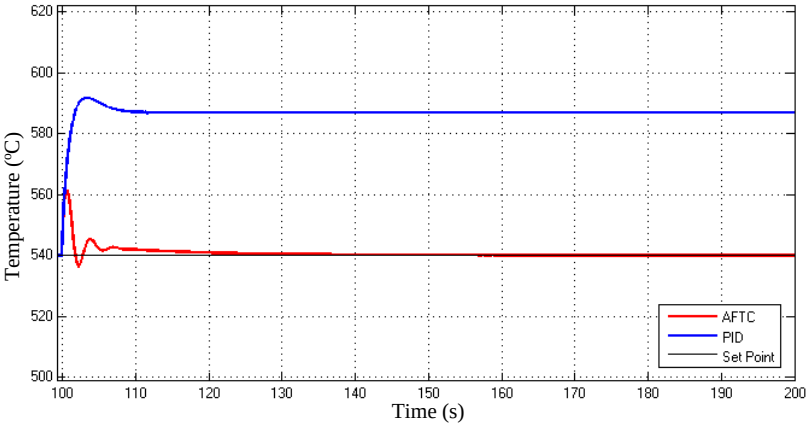
menolerir kesalahan sensor sehingga respon sistem *steady* pada temperatur ±568,4ºC maka didapatkan *error steady state* sebesar 5,2630%. Hasil tersebut lebih besar dari pengendali dengan algoritma AFTC yang hanya memiliki *error steady* sebesar 0,0037%. Hal ini membuktikan bahwa pengendali PID tanpa algoritma AFTC tidak mampu kembali menuju *setpoint* semula sedangkan dengan algoritma AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

4.2.4 Uji Kesalahan Sensitivitas 8%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan *(fault)* pada detik ke-100.



Gambar 4.11 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 8%



Gambar 4.12 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 8%

Tabel 4.6 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 8%

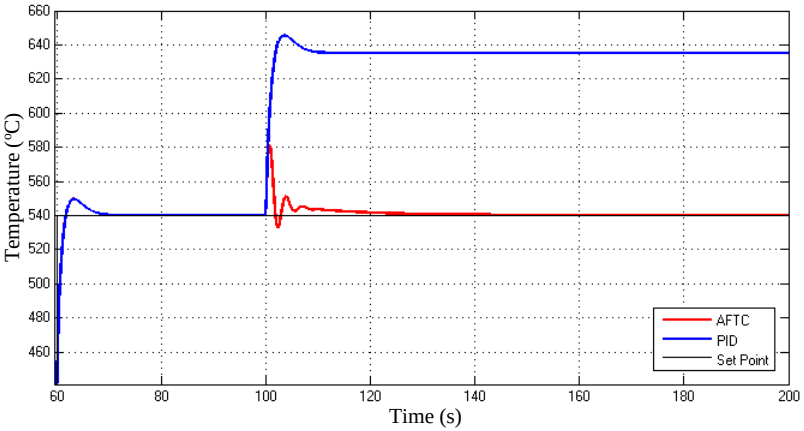
No	Parameter	AFTC	PID
1	*Maximum overshoot*	4,0583 %	9,5796 %
2	*Settling Time*	75 detik	13 detik
3	*Error steady state*	0,0019 %	8,6944 %

Pada gambar 4.11 dan 4.12 serta tabel 4.6 menunjukkan respon sistem ketika diberi kesalahan sensitivitas 8%, dimana kesalahan sensitivitas 8% berarti sensor kehilangan 8% dari sinyal *output*nya. Dari parameter performansi diatas, *maximum overshoot* yang terjadi pada pengendali dengan algoritma AFTC jauh lebih kecil dari pengendali PID tanpa menggunakan AFTC saat dikenai kesalahan yakni sebesar 4,0583% lebih kecil dari PID biasa sebesar 9,5796%. Waktu untuk mencapai keadaann *steady (settling time)* dengan algoritma AFTC yakni sebesar 75 detik untuk mencapai temperatur yang diinginkan ±540ºC saat terjadi kesalahan sensitivitas 8%, dibandingkan dengan algoritma PID tanpa AFTC memiliki *settling time* yang lebih cepat, yaitu sebesar 13 detik tetapi algoritma PID

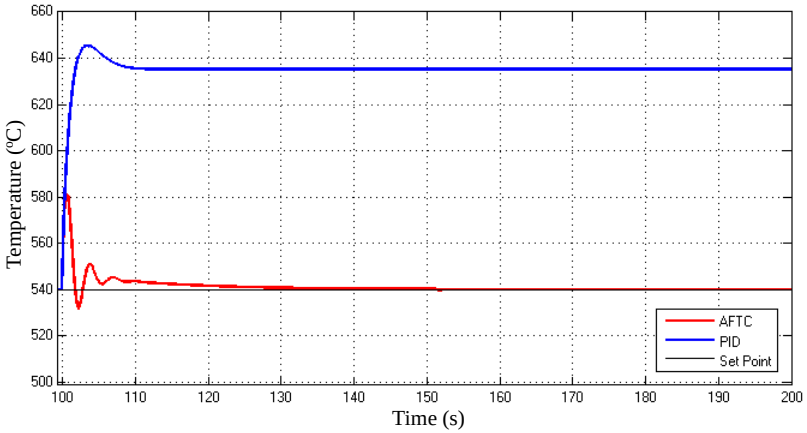
tanpa AFTC tidak dapat menolerir kesalahan sensor sehingga respon sistem *steady* pada temperatur ±586,9ºC maka didapatkan *error steady state* yang cukup besar yaitu sebesar 8,6944%. Hasil tersebut lebih besar dari pengendali dengan algoritma AFTC yang hanya memiliki *error steady* sebesar 0,0019%. Hal ini membuktikan bahwa pengendali PID tanpa algoritma AFTC tidak mampu kembali menuju *setpoint* semula sedangkan dengan algoritma AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

4.2.5 Uji Kesalahan Sensitivitas 15%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan *(fault)* pada detik ke-100.



Gambar 4.13 Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 15%



Gambar 4.14 Perbesaran Respon Sistem Pengendalian dengan Kesalahan Sensitivitas 15%

Tabel 4.7 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 15%

No	Parameter	AFTC	PID
1	*Maximum overshoot*	7,8704 %	19,5333 %
2	*Settling Time*	83 detik	16 detik
3	*Error steady state*	0,0019 %	17,6463 %

Pada gambar 4.13 dan 4.14 serta tabel 4.7 menunjukkan respon sistem ketika diberi kesalahan sensitivitas 15%, dimana kesalahan sensitivitas 15% berarti sensor kehilangan 15% dari sinyal *output*nya. Dari parameter performansi diatas, *maximum overshoot* yang terjadi pada pengendali dengan algoritma AFTC jauh lebih kecil dari pengendali PID tanpa menggunakan AFTC saat dikenai kesalahan yakni sebesar 7,8704% lebih kecil dari PID biasa sebesar 19,5333 %. Waktu untuk mencapai keadaann *steady (settling time)* dengan algoritma AFTC yakni sebesar 83 detik untuk mencapai temperatur yang diinginkan ±540ºC saat terjadi kesalahan sensitivitas 15%, dibandingkan dengan algoritma PID tanpa AFTC memiliki *settling time* yang lebih cepat, yaitu sebesar 16 detik tetapi algoritma PID

tanpa AFTC tidak dapat menolerir kesalahan sensor sehingga respon sistem *steady* pada temperatur ±635,3ºC maka didapatkan *error steady state* yang cukup besar yaitu sebesar 17,6463%. Hasil tersebut lebih besar dari pengendali dengan algoritma AFTC yang hanya memiliki *error steady* sebesar 0,0019%. Hal ini membuktikan bahwa pengendali PID tanpa algoritma AFTC tidak mampu kembali menuju *setpoint* semula sedangkan dengan algoritma AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

Dari segi parameter performansi sistem diatas saat dikenai kesalahan sensitivitas 1%, 2%, 5%, 8% dan 15%, baik *maximum overshoot, setling time* dan *error steady state*, sistem pengendalian dengan algoritma AFTC memiliki rata-rata *settling time* yang lebih lama dibandingkan tanpa algoritma AFTC, dikarenakan dengan algoritma AFTC respon sistem pengendalian tersebut dapat *tracking* menuju ke *setpoint* dan dapat menolerir kesalahan sensor dibandingkan dengan PID tanpa algoritma AFTC yang tidak mampu *tracking* menuju ke *setpoint* maupun mentolerir kesalahan dari sensor, dan juga dapat dilihat bahwa rata-rata nilai *maximum overshoot* maupun *error steady state* memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan sistem pengendali tanpa algoritma AFTC. Semakin kecil nilai parameter tersebut, maka semakin baik performa sistem tersebut dan juga sebaliknya. Hal ini dapat dikarenakan oleh adanya rekonfigurasi kontrol untuk mengatasi kesalahan yang disebabkan oleh kesalahan sensor temperatur. Maka dari itu, sistem pengendali yang menggunakan algoritma AFTC memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem pengendalian tanpa menggunakan algoritma AFTC.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan dari tugas akhir ini mengenai perancangan *Active Fault Tolerant Control* pada Sistem Pengendaian Temperatur *Superheater* PLTU PT PJB Gresik dengan Kesalahan Sensor adalah sebagai berikut:

a. Perancangan AFTC pada sistem pengendalian temperatur *superheater* tahap pertama dilakukan perancangan *observer* dan tahap kedua adalah rekonfigurasi kontrol. Perancangan AFTC yang telah dilakukan mampu menolerir kesalahan sensor, yakni kesalahan bias ±0,32% dan kesalahan sensitivitas 1%-15%, sehingga mampu menjaga kestabilan sistem.
b. Performa sistem pengendali dengan algoritma AFTC lebih baik daripada sistem pengendali PID tanpa AFTC dalam menolerir adanya kesalahan sensor yang terjadi. Hal ini ditunjukkan dari hasil uji kesalahan sensor sebagai berikut:
    - Pada uji kesalahan bias -0,32%, sistem pengendali dengan AFTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 0,1550%, *settling time* 20 detik dan *error steady state* sebesar 0,0024%, sedangkan sistem pengendali tanpa AFTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 0,3481%, *settling time* sebesar 10 detik dan *error steady state* sebesar 0,3151%.
    - Pada uji kesalahan sensitivitas 8%, sistem pengendali dengan AFTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 4,0583%, *settling time* 75 detik dan *error steady state* sebesar 0,0019%, sedangkan sistem pengendali tanpa AFTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 9,5796%, *settling time* sebesar 13 detik dan *error steady state* sebesar 8,6944%.

5.2 Saran

Dalam proses tugas akhir ini terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya adalah:

a. Dalam skala industri, AFTC dapat digunakan sebagai suatu sistem keamanan yang juga dapat meningkatkan keandalan suatu komponen untuk meningkatkan produktivitas kinerja dari suatu sistem.
b. Dalam penelitian selanjutnya seharusnya meninjau tidak hanya kesalahan pada sensor, melainkan kesalahan pada aktuator agar sistem pengendali AFTC tersebut mampu menolerir kesalahan baik yang terjadi pada sensor maupun pada aktuator.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. J. Moran and H. N. Saphiro, Fundamental of Engineering Thermodynamics, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc, 2000.

[2] P. K. Nag, Power Plant Engineering, New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2008.

[3] A. Ardhiantama, "Perancangan Active Fault Tolerat Control pada Sistem Pengendalian Temperature Fuel Gas Superheater Burner PT Petrokimia Gresik dengan Kesalahan Sensor Temperature," Teknik Fisika ITS, Surabaya, 2016.

[4] Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control System," *Annual Review in Control,* vol. 32, no. 2, pp. 229-252, 2008.

[5] A. Setyawan, "Perancangan Sistem Pengendalian Temperature Pada Superheater Dengan Metode Fuzzy Logic Di PLTU Unit II PT PJB Unit Pembangkitan Gresik," Teknik Fisika ITS, Surabaya, 2010.

[6] M. K. Gupta, Power Plant Engineering, New Delhi: PHI Learning, 2012.

[7] PT. PJB, "Boiler & Alat Bantunya," Unit Bisnis Pemeliharaan PT PJB, Jakarta, 1971.

[8] Incropera, DeWitt, Bergman and Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed., John Wiley & Sons, 2011.

[9] K. Indriawati, T. Agustinah and A. Jazidie, "Reconfigurable Fault-Tolerant Control of Linear System with Actuator and Sensor Faults," in *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, Penang, Malaysia, 2013.

[10] H. Noura, D. Theilliol, J. Ponsart and A. Chamseddine, Fault-tolerance Control Systems: Design and Practical Applications, London: Springer Verlag, 2009.

[11] K. Ogata, Modern Control Engineering, 3rd ed., New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1997.

[12] K. Indriawati, N. Sebe, T. Agustinah and A. Jazidie, "Robust Fuzzy *Observer*-Based Fault Tolerant Tracking Control for Nonlinear System with Simultaneous Actuator and Sensor Faults: Application to a DC Series Motor Speed Drive," *International Review of Automatic Control (I.RE.A.CO.)*, vol. 8, no. 6, pp. 375-385, 2015.

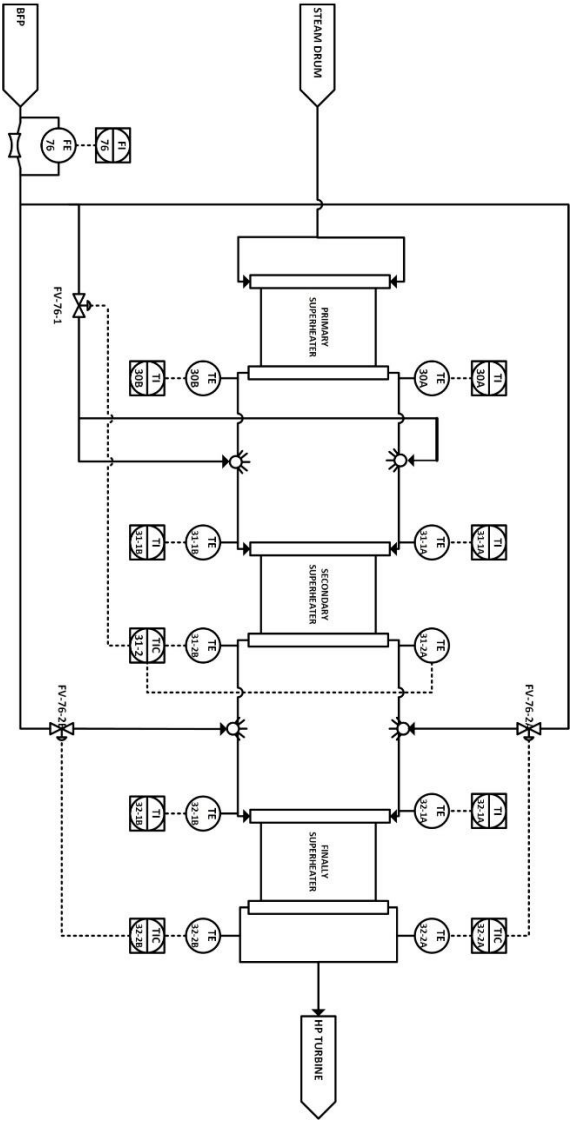
[13] K. Indriawati, A. Jazidie and T. Agustinah, "Reconfigurable Controller Based on Fuzzy Descriptor *Observer* for Nonlinear Systems with Sensor Faults," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 771, pp. 59-62, 2015.

[14] A. W. Harsono, "Perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada Sistem Pengendalian Level Steam Drum Boiler PLTU Paiton dengan Kesalahan Sensor," Teknik Fisika ITS, Surabaya, 2017.

[15] A. Musyafa', "Sistem Pengukuran dan Kalibrasi: Kesalahan Pengukuran," Teknik Fisika ITS, Surabaya, 2012.

LAMPIRAN A

P&ID SUPERHEATER PT PJB PAITON UNIT 4



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B

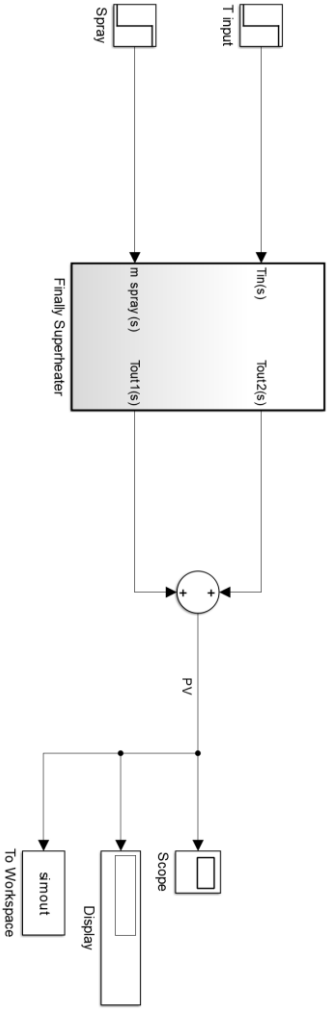
DATA PENGUKURAN SENSOR TE-32-2

Tanggal	Jam	Temperatur *Output* (ºC)	Set Point (ºC)	Control Valve (%)	Laju Spray (kg/s)
12/3/2018	0:00	540.2766	540	66.53%	7.3934
12/3/2018	1:00	539.6840	540	63.23%	6.9971
12/3/2018	2:00	540.9509	540	65.88%	7.3160
12/3/2018	3:00	540.8890	540	66.05%	7.3359
12/3/2018	4:00	540.3916	540	68.59%	7.6401
12/3/2018	5:00	541.0903	540	71.05%	7.9350
12/3/2018	6:00	540.3806	540	64.39%	7.1372
12/3/2018	7:00	540.2766	540	66.53%	7.3934
12/3/2018	8:00	540.2567	540	64.04%	7.0943
12/3/2018	9:00	540.9310	540	65.96%	7.3254
12/3/2018	10:00	540.3607	540	68.30%	7.6056
12/3/2018	11:00	541.0041	540	68.39%	7.6161
12/3/2018	12:00	539.7482	540	65.65%	7.2878
12/3/2018	13:00	540.9932	540	68.19%	7.5921
12/3/2018	14:00	540.5508	540	65.45%	7.2638
12/3/2018	15:00	541.1147	540	67.59%	7.5200
12/3/2018	16:00	539.8057	540	63.11%	6.9836
12/3/2018	17:00	540.5309	540	65.77%	7.3025
12/3/2018	18:00	541.1633	540	68.51%	7.6307
12/3/2018	19:00	541.1323	540	68.22%	7.5962
12/3/2018	20:00	540.4866	540	68.34%	7.6109
12/3/2018	21:00	541.0926	540	68.79%	7.6642
12/3/2018	22:00	539.4982	540	53.33%	5.8103
12/3/2018	23:00	540.6525	540	58.38%	6.4157
13/3/2018	0:00	540.5928	540	56.53%	6.1941
13/3/2018	1:00	540.1661	540	56.29%	6.1659
13/3/2018	2:00	540.7056	540	56.54%	6.1951

Tanggal	Jam	Temperatur *Output* (ºC)	Set Point (ºC)	Control Valve (%)	Laju Spray (kg/s)
13/3/2018	3:00	548.2649	540	82.22%	9.2755
13/3/2018	4:00	540.3983	540	68.22%	7.5962
13/3/2018	5:00	540.4579	540	67.95%	7.5639
13/3/2018	6:00	541.0505	540	67.94%	7.5628
13/3/2018	7:00	539.8588	540	65.66%	7.2889
13/3/2018	8:00	541.0640	540	66.07%	7.3381
13/3/2018	9:00	539.8168	540	61.59%	6.8006
13/3/2018	10:00	539.7350	540	63.97%	7.0860
13/3/2018	11:00	541.6851	540	73.91%	8.2790
13/3/2018	12:00	540.5421	540	66.70%	7.4133
13/3/2018	13:00	540.4579	540	66.63%	7.4049
13/3/2018	14:00	540.3697	540	68.24%	7.5984
13/3/2018	15:00	540.9135	540	67.91%	7.5586
13/3/2018	16:00	540.2280	540	65.82%	7.3077
13/3/2018	17:00	540.3408	540	66.17%	7.3505
13/3/2018	18:00	540.4094	540	66.42%	7.3798
13/3/2018	19:00	541.0727	540	67.99%	7.5680
13/3/2018	20:00	541.0727	540	65.21%	7.2345
13/3/2018	21:00	540.4004	540	65.45%	7.2638
13/3/2018	22:00	540.4071	540	68.18%	7.5910
13/3/2018	23:00	540.2479	540	66.09%	7.3411

LAMPIRAN C

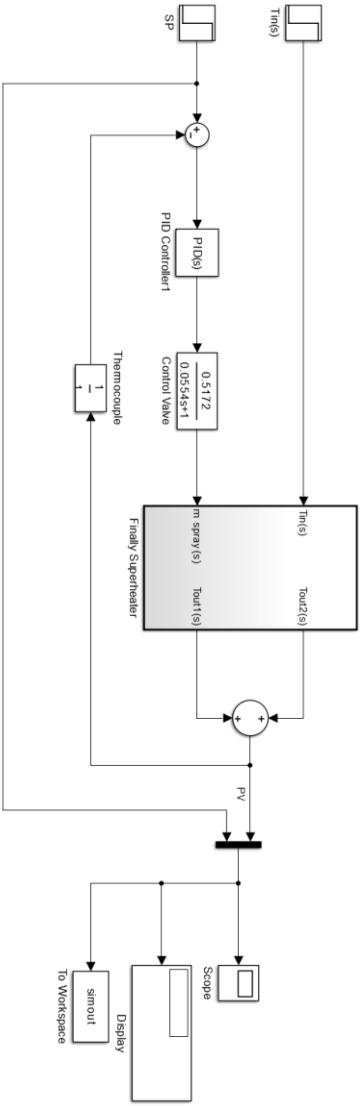
SIMULINK MATLAB R2014a SKEMA OPEN LOOP



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN D

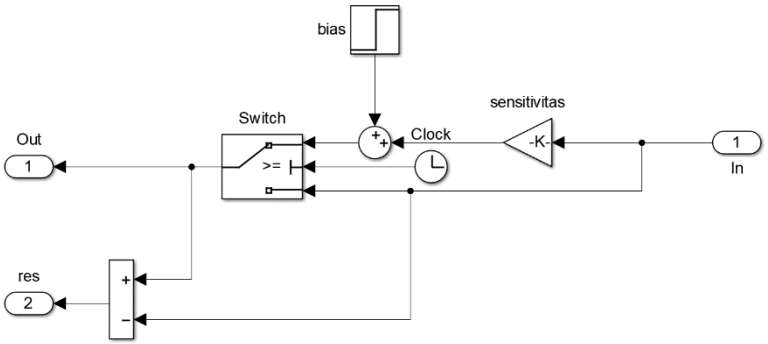
SIMULINK MATLAB R2014a SKEMA CLOSE LOOP



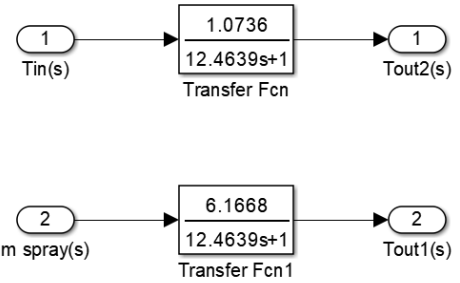
Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN E

SIMULINK MATLAB R2014a SKEMA *FAULT* SENSOR & VARIABEL *FINALLY SUPERHEATER*



Gambar diatas merupakan skema perancangan *fault* sensor saat diberi kesalahan bias atau sensitivas.



Gambar diatas merupakan fungsi transfer dari *finally superheater* yang terdiri dari dua *variable input* yaitu Tin(s) *temperature steam input* dan ms(s) laju aliran *water spray*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN F

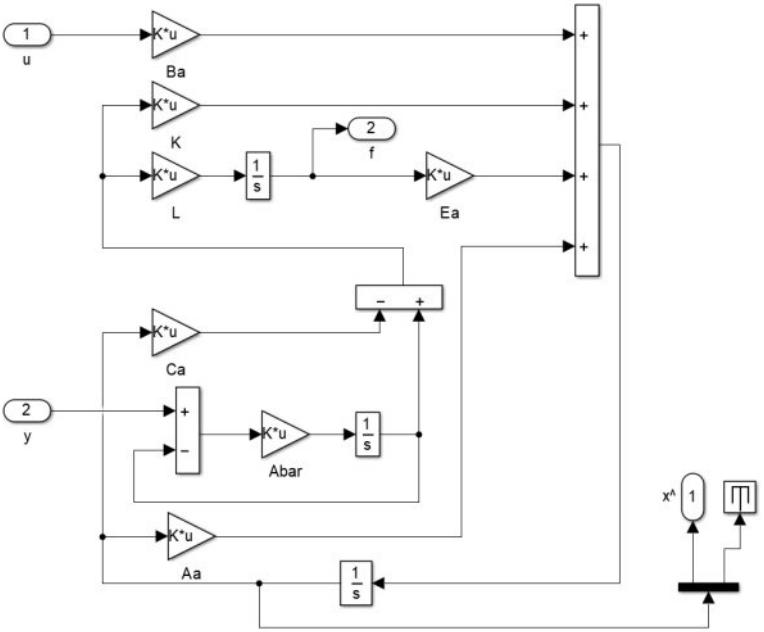
LISTING PROGRAM MATLAB R2014a m.file

```
A=[-0.0802 0.4948;0 -18.0505]; %Matriks A
B=[0.0861 0; 0 9.3357];%Matriks B
C=[1 0;0 1];%Matriks C
n = length(A)
p = size(C,1)
m = size(B,2)
Fs=[1;0];
fs = size(Fs,2);
Abar = 1*eye(p);
Aa = [A zeros(n,p); Abar*C -Abar]
Ba = [B;zeros(p,m)]
Ea = [zeros(n,fs); Abar*Fs]
Ca = [zeros(p,n) eye(p)]
Atild = [Aa Ea; zeros(fs,n+p) zeros(fs)];
Ctild = [Ca zeros(p,fs)];
rank(Atild);
obs= rank(obsv(Atild,Ctild));

%mendapatkan gain observer dari nilai 'pole'
p1 = -17.1562 + 0.0000i;
p2 = -0.6413 + 1.7785i;
p3 = -0.6413 - 1.7785i;
p4 = -0.0728 + 0.0000i;
p5 = -0.9847 + 0.0000i;

Ktild = place(Atild',Ctild',[p1 p2 p3 p4 p5]);
K = Ktild(:,1:n+p)
L = Ktild(:,n+p+1:n+p+fs)
```

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN G

SIMULINK MATLAB R2014a SKEMA *OBSERVER*

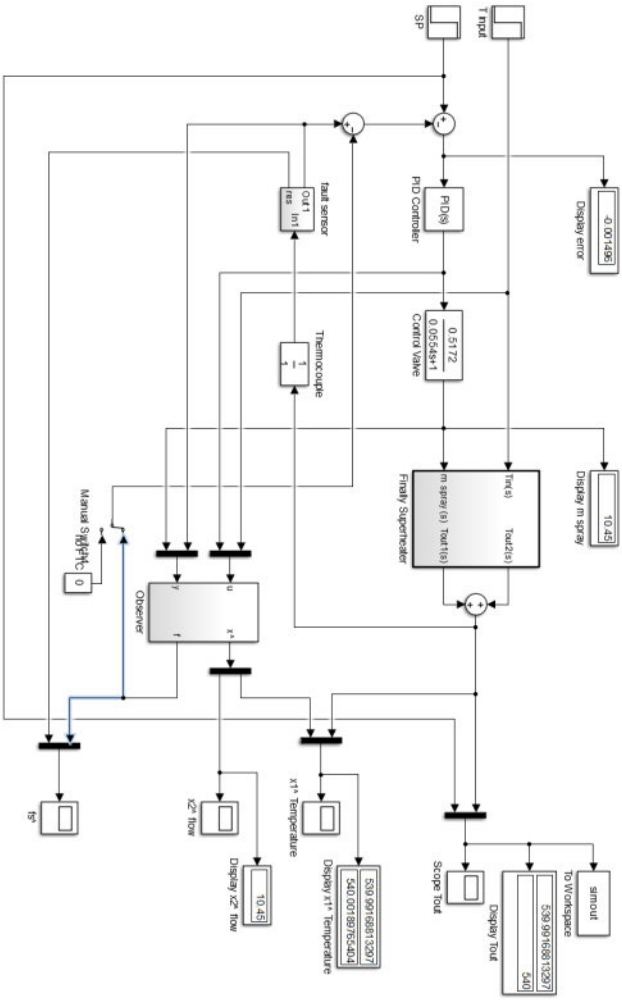


Gambar diatas merupakan skema perancangan *observer* yang berdasarkan persamaan (2.18)

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN H

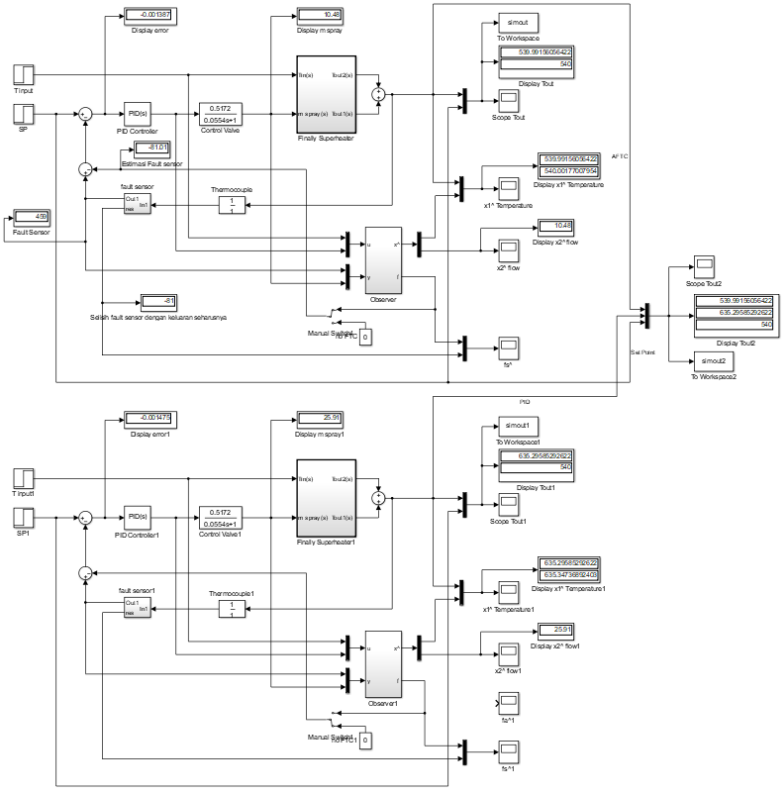
SIMULINK MATLAB R2014a SKEMA REKONFIGURASI KONTROL



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN I

SIMULINK MATLAB R2014a SKEMA PERANCANGAN AFTC DAN PID



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN J
DATA SHEET FCV-76-2

(25/)

Fisher Controls **Control Valve Specification**

FISHER

Customer: IHI
Reference: GRESIK POWER PLANT #3+4
Order No.
Quote No.
Date MAR·28 '85 Page of

Item		5			Style	Diaph. X	Piston
Quantity		2 x 2			Size	667 (70)	
Application		A/B - SH SECONDARY SPRAY FLOW CONTROL VALVE		Actuator	Actuator Spring No.	IN1278	
Tag		FV-76-2A, 2B			Bench Set	1.32 ~ 2.0 K	
Serial No.		J56191~194			Air to Actuator	0.2-1.0	0.4-2.0
Size and Type		2", 667 - DBQ		#1	Air Fails Valve to	Lock /64A X	Open / Close X
Body	Style	Angle / Globe X			Handjack	Top	Side X
	End Connections	SWE / Scrd. / Flg. ANSI class / RF / BWE Sched. / Casting Rating ANSI CLASS 2500		Positioner	Type	3570 / 3582 / 3577 X	
	Material	WCB Steel / CS X / Iron			Input Signal	4-20mA X / 10-50mA / 0.2-1.0 / 0.4-2.0	
	Number of Ports	Two / One X			Output Signal	0.2-1.0 / 0.4-2.0 X	
	Push Down to	Open / Close X			Supply Pressure	2.4 K	
	Flow Direction	Up X / Down			Accessories	Bypass / Gauges X / Airset 67AFR X	
Trim	Trim Number				Increase Signal Valve	X Opens / Closes	
	Cage and/or Bushing Material	410 SST Cr. PL. Std. X		Accessories	1. BOOSTER IL100 "/167AFR "/GAUGE: 1 SET		
	Seat Ring Material	440C SST Std. X			2. LIMIT SWITCH (F.C.) SPDT 1 pc		
	Valve Plug Material	440C SST Std. X			BAFI - 2RN - R1 - J (0.5A - 125V DC)		
	Valve Plug Guiding	Post / Top / Cage X; Top & Bottom / Port			3. REDUCERS (2"BWE x 3"BWE) 2 pc		
	Valve Plug Balance	X Unbalanced / Balanced			ASTM A182 F12		
	Port Size	3/4" Full					
	Plug or Cage	Linear / (Equal Percent X) / Q.O. / Whisper / M·FORM X					
	Stem	3/4" Std. X					
	Shutoff Class	ANSI CLASS 4 Std. X					
Bonnet	Style	Ext. / Std. X					
	Boss Size	3 3/16" Std. X					
	Packing	Lam. Graphite / Lubr. & Iso. Valve / TFE Asb. X / TFE					
	Bolting Bonnet	Std. X					
	Bolting Pack. Flg.	Std. X					
Valve Travel		19 mm					

Design conditions	Temp: 203 °C	Press: 299 Kg/cm²G		
Service Conditions				
Throttling X	On-Off	PRV	Relief	
Flowing Media	FEED WATER			
	Minimum #2	Normal #3	Maximum #4	
	100% FLOW	75% FLOW	WATER CUT	
Specific Gravity	0.904	0.930	0.928	0.801
Inlet Temperature °C	176.5	150.4	180	
Inlet Pressure Kg/cm²G	216.8	249.3	218.4	227.4
Outlet Inlet Vapor Pressure Kg/cm²G	177.6	172.1		182.7
△P Sizing				
Actual △P Kg/cm²	39.2	77.2	46.3	45.2
△P Shutoff Kg/cm²	299			
Flow Rate, Give Units Kg/h	2210	5900		32000
Req'd Flow Coeff., Cv X Cg Cs	0.43	0.92	1.21	5.87
Valve Coefficient Cv		11.8		
Recovery Coeff., K=X C/1		0.95		
Noise Level (dBA)				
Line Size (In.) / Pipe Schedule		3" sch XXS, STPT 42		
VALVE OPENING %	10	27	33	74
P1 P2 Kg/cm²a	8.48	4.47		9.06

Notes and / or Special Constructions

+1. LOCK VALVE SET PRESS. : 2.0 Kg/cm²G

+2. COLOUR : NF STD
BODY : SILVER
ACTUATOR : MUNSELL 10GY 4/6

△3. TWO BFPS operating condition

△4. One BFP Operating Condition

△5.

△		
△		
△	AUG. 5. 86	REV. 3 (WAD)
△	JUL. 12. 86	REV. 2 (WAD)
△	JUN 9. 86	REV. 1 (WAD)
ORD.		90025-1
QUOT	APR·25 '86	SE-1155-005
	DATE	NO.

RECORDS

Form S-1017

Nippon Fisher Co., Ltd.

BC 856

59.3.100×50(1.1)

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN K
DATA SHEET THERMOCOUPLE TYPE E

MAXIMUM TEMPERATURE RANGE

Thermocouple Grade
– 328 to 1652°F
– 200 to 900°C

Extension Grade
32 to 392°F
0 to 200°C

LIMITS OF ERROR
(whichever is greater)
Standard: 1.7°C or 0.5% Above 0°C
1.7°C or 1.0% Below 0°C
Special: 1.0°C or 0.4%

COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT:
Oxidizing or Inert; Limited Use in Vacuum or Reducing; Highest EMF Change per Degree

TEMPERATURE IN DEGREES °C
REFERENCE JUNCTION AT 0°C

Thermocouple Grade

Nickel-Chromium
vs.
Copper-Nickel

Extension Grade

Revised Thermocouple Reference Tables

TYPE E

Reference Tables
N.I.S.T. Monograph 175
Revised to ITS-90

Z

Thermoelectric Voltage in Millivolts

°C	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	°C
-260	-9.835	-9.833	-9.831	-9.828	-9.825	-9.821	-9.817	-9.813	-9.808	-9.802	-9.797	-260
-250	-9.719	-9.716	-9.714	-9.711	-9.709	-9.706	-9.702	-9.754	-9.746	-9.738	-9.718	-250
-240	-9.718	-9.709	-9.698	-9.688	-9.677	-9.666	-9.654	-9.642	-9.630	-9.617	-9.604	-240
-230	-9.604	-9.591	-9.577	-9.563	-9.548	-9.534	-9.519	-9.503	-9.487	-9.471	-9.455	-230
-220	-9.455	-9.438	-9.421	-9.404	-9.386	-9.368	-9.350	-9.331	-9.313	-9.293	-9.274	-220
-210	-9.274	-9.254	-9.234	-9.214	-9.192	-9.172	-9.151	-9.129	-9.107	-9.085	-9.063	-210
-200	-9.063	-9.040	-9.017	-8.994	-8.971	-8.947	-8.923	-8.899	-8.874	-8.850	-8.825	-200
-190	-8.825	-8.799	-8.774	-8.748	-8.722	-8.696	-8.669	-8.643	-8.616	-8.588	-8.561	-190
-180	-8.561	-8.533	-8.505	-8.477	-8.449	-8.420	-8.391	-8.362	-8.333	-8.303	-8.273	-180
-170	-8.273	-8.243	-8.213	-8.183	-8.152	-8.121	-8.090	-8.059	-8.027	-7.995	-7.963	-170
-160	-7.963	-7.931	-7.899	-7.866	-7.833	-7.800	-7.767	-7.733	-7.700	-7.666	-7.633	-160
-150	-7.633	-7.597	-7.563	-7.528	-7.493	-7.458	-7.423	-7.387	-7.351	-7.315	-7.279	-150
-140	-7.279	-7.243	-7.206	-7.170	-7.133	-7.096	-7.058	-7.021	-6.983	-6.945	-6.907	-140
-130	-6.907	-6.869	-6.831	-6.792	-6.753	-6.714	-6.675	-6.636	-6.596	-6.556	-6.516	-130
-120	-6.516	-6.476	-6.436	-6.396	-6.355	-6.314	-6.273	-6.232	-6.191	-6.149	-6.107	-120
-110	-6.107	-6.065	-6.023	-5.981	-5.939	-5.896	-5.853	-5.810	-5.767	-5.724	-5.681	-110
-100	-5.681	-5.637	-5.593	-5.549	-5.505	-5.461	-5.417	-5.372	-5.327	-5.282	-5.237	-100
-90	-5.237	-5.192	-5.147	-5.101	-5.055	-5.009	-4.963	-4.917	-4.871	-4.824	-4.777	-90
-80	-4.777	-4.731	-4.684	-4.636	-4.589	-4.542	-4.494	-4.446	-4.398	-4.350	-4.302	-80
-70	-4.302	-4.254	-4.205	-4.156	-4.107	-4.058	-4.009	-3.960	-3.911	-3.861	-3.811	-70
-60	-3.811	-3.761	-3.711	-3.661	-3.611	-3.561	-3.510	-3.459	-3.408	-3.357	-3.306	-60
-50	-3.306	-3.255	-3.204	-3.152	-3.100	-3.048	-2.996	-2.944	-2.892	-2.840	-2.787	-50
-40	-2.787	-2.735	-2.682	-2.629	-2.576	-2.523	-2.469	-2.416	-2.362	-2.309	-2.255	-40
-30	-2.255	-2.201	-2.147	-2.093	-2.038	-1.984	-1.929	-1.874	-1.820	-1.765	-1.709	-30
-20	-1.709	-1.654	-1.599	-1.543	-1.488	-1.432	-1.376	-1.320	-1.264	-1.208	-1.152	-20
-10	-1.152	-1.095	-1.039	-0.982	-0.925	-0.868	-0.811	-0.754	-0.697	-0.639	-0.582	-10
0	-0.582	-0.524	-0.466	-0.408	-0.350	-0.292	-0.234	-0.176	-0.117	-0.059	0.000	0
0	0.000	0.059	0.118	0.176	0.235	0.294	0.354	0.413	0.472	0.532	0.591	0
10	0.591	0.651	0.711	0.770	0.830	0.890	0.950	1.010	1.071	1.131	1.192	10
20	1.192	1.252	1.313	1.373	1.434	1.495	1.556	1.617	1.678	1.740	1.801	20
30	1.801	1.862	1.924	1.986	2.047	2.109	2.171	2.233	2.295	2.357	2.420	30
40	2.420	2.482	2.545	2.607	2.670	2.733	2.795	2.858	2.921	2.984	3.048	40
50	3.048	3.111	3.174	3.238	3.301	3.365	3.429	3.492	3.556	3.620	3.685	50
60	3.685	3.749	3.813	3.877	3.942	4.006	4.071	4.136	4.200	4.265	4.330	60
70	4.330	4.395	4.460	4.526	4.591	4.656	4.722	4.788	4.853	4.919	4.985	70
80	4.985	5.051	5.117	5.183	5.249	5.315	5.382	5.448	5.514	5.581	5.648	80
90	5.648	5.714	5.781	5.848	5.915	5.982	6.049	6.117	6.184	6.251	6.319	90
100	6.319	6.386	6.454	6.522	6.590	6.658	6.726	6.794	6.862	6.930	6.998	100
110	6.998	7.066	7.135	7.203	7.272	7.341	7.409	7.478	7.547	7.616	7.685	110
120	7.685	7.754	7.823	7.892	7.962	8.031	8.101	8.170	8.240	8.309	8.379	120
130	8.379	8.449	8.519	8.589	8.659	8.729	8.799	8.869	8.940	9.010	9.081	130
140	9.081	9.151	9.222	9.292	9.363	9.434	9.505	9.576	9.647	9.718	9.789	140
150	9.789	9.860	9.931	10.003	10.074	10.145	10.217	10.288	10.360	10.432	10.503	150
160	10.503	10.575	10.647	10.719	10.791	10.863	10.935	11.007	11.080	11.152	11.224	160
170	11.224	11.297	11.369	11.442	11.514	11.587	11.660	11.733	11.805	11.878	11.951	170
180	11.951	12.024	12.097	12.170	12.243	12.317	12.390	12.463	12.537	12.610	12.684	180
190	12.684	12.757	12.831	12.904	12.978	13.052	13.126	13.199	13.273	13.347	13.421	190
200	13.421	13.495	13.569	13.644	13.718	13.792	13.866	13.941	14.015	14.090	14.164	200
210	14.164	14.239	14.313	14.388	14.463	14.537	14.612	14.687	14.762	14.837	14.912	210
220	14.912	14.987	15.062	15.137	15.212	15.287	15.362	15.438	15.513	15.588	15.664	220
230	15.664	15.739	15.815	15.890	15.966	16.041	16.117	16.193	16.269	16.344	16.420	230
240	16.420	16.496	16.572	16.648	16.724	16.800	16.876	16.952	17.028	17.104	17.181	240
250	17.181	17.257	17.333	17.409	17.486	17.562	17.639	17.715	17.792	17.868	17.945	250
260	17.945	18.021	18.098	18.175	18.252	18.328	18.405	18.482	18.559	18.636	18.713	260
270	18.713	18.790	18.867	18.944	19.021	19.098	19.175	19.252	19.330	19.407	19.484	270
280	19.484	19.561	19.639	19.716	19.794	19.871	19.948	20.026	20.103	20.181	20.259	280
290	20.259	20.336	20.414	20.492	20.569	20.647	20.725	20.803	20.880	20.958	21.036	290
300	21.036	21.114	21.192	21.270	21.348	21.426	21.504	21.582	21.660	21.739	21.817	300
310	21.817	21.895	21.973	22.051	22.130	22.208	22.286	22.365	22.443	22.522	22.600	310
320	22.600	22.678	22.757	22.835	22.914	22.993	23.071	23.150	23.228	23.307	23.386	320
330	23.386	23.464	23.543	23.622	23.701	23.780	23.858	23.937	24.016	24.095	24.174	330
340	24.174	24.253	24.332	24.411	24.490	24.569	24.648	24.727	24.806	24.885	24.964	340
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
350	24.964	25.044	25.123	25.202	25.281	25.360	25.440	25.519	25.598	25.678	25.757	350
360	25.757	25.836	25.916	25.995	26.075	26.154	26.233	26.313	26.392	26.472	26.552	360
370	26.552	26.631	26.711	26.790	26.870	26.950	27.029	27.109	27.189	27.268	27.348	370
380	27.348	27.428	27.507	27.587	27.667	27.747	27.827	27.907	27.986	28.066	28.146	380
390	28.146	28.226	28.306	28.386	28.466	28.546	28.626	28.706	28.786	28.866	28.946	390
400	28.946	29.026	29.106	29.186	29.266	29.346	29.427	29.507	29.587	29.667	29.747	400
410	29.747	29.827	29.908	29.988	30.068	30.148	30.229	30.309	30.389	30.470	30.550	410
420	30.550	30.630	30.711	30.791	30.871	30.952	31.032	31.112	31.193	31.273	31.354	420
430	31.354	31.434	31.515	31.595	31.676	31.756	31.837	31.917	31.998	32.078	32.159	430
440	32.159	32.239	32.320	32.400	32.481	32.562	32.642	32.723	32.803	32.884	32.965	440
450	32.965	33.045	33.126	33.207	33.287	33.368	33.449	33.529	33.610	33.691	33.772	450
460	33.772	33.852	33.933	34.014	34.095	34.175	34.256	34.337	34.418	34.498	34.579	460
470	34.579	34.660	34.741	34.822	34.902	34.983	35.064	35.145	35.226	35.307	35.387	470
480	35.387	35.468	35.549	35.630	35.711	35.792	35.873	35.954	36.034	36.115	36.196	480
490	36.196	36.277	36.358	36.439	36.520	36.601	36.682	36.763	36.843	36.924	37.005	490
500	37.005	37.086	37.167	37.248	37.329	37.410	37.491	37.572	37.653	37.734	37.815	500
510	37.815	37.896	37.977	38.058	38.139	38.220	38.300	38.381	38.462	38.543	38.624	510
520	38.624	38.705	38.786	38.867	38.948	39.029	39.110	39.191	39.272	39.353	39.434	520
530	39.434	39.515	39.596	39.677	39.758	39.839	39.920	40.001	40.082	40.163	40.243	530
540	40.243	40.324	40.405	40.486	40.567	40.648	40.729	40.810	40.891	40.972	41.053	540
550	41.053	41.134	41.215	41.296	41.377	41.457	41.538	41.619	41.700	41.781	41.862	550
560	41.862	41.943	42.024	42.105	42.185	42.266	42.347	42.428	42.509	42.590	42.671	560
570	42.671	42.751	42.832	42.913	42.994	43.075	43.156	43.236	43.317	43.398	43.479	570
580	43.479	43.560	43.640	43.721	43.802	43.883	43.963	44.044	44.125	44.206	44.286	580
590	44.286	44.367	44.448	44.529	44.609	44.690	44.771	44.851	44.932	45.013	45.093	590
600	45.093	45.174	45.255	45.335	45.416	45.497	45.577	45.658	45.738	45.819	45.900	600
610	45.900	45.980	46.061	46.141	46.222	46.302	46.383	46.463	46.544	46.624	46.705	610
620	46.705	46.785	46.866	46.946	47.027	47.107	47.188	47.268	47.349	47.429	47.509	620
630	47.509	47.590	47.670	47.751	47.831	47.911	47.992	48.072	48.152	48.233	48.313	630
640	48.313	48.393	48.474	48.554	48.634	48.715	48.795	48.875	48.955	49.035	49.116	640
650	49.116	49.196	49.276	49.356	49.436	49.517	49.597	49.677	49.757	49.837	49.917	650
660	49.917	49.997	50.077	50.157	50.238	50.318	50.398	50.478	50.558	50.638	50.718	660
670	50.718	50.798	50.878	50.958	51.038	51.118	51.197	51.277	51.357	51.437	51.517	670
680	51.517	51.597	51.677	51.757	51.837	51.916	51.996	52.076	52.156	52.236	52.316	680
690	52.316	52.396	52.475	52.555	52.634	52.714	52.794	52.873	52.953	53.033	53.112	690
700	53.112	53.192	53.272	53.351	53.431	53.510	53.590	53.670	53.749	53.829	53.908	700
710	53.908	53.988	54.067	54.147	54.226	54.306	54.385	54.465	54.544	54.624	54.703	710
720	54.703	54.782	54.862	54.941	55.021	55.100	55.179	55.259	55.338	55.417	55.497	720
730	55.497	55.576	55.655	55.734	55.814	55.893	55.972	56.051	56.131	56.210	56.289	730
740	56.289	56.368	56.447	56.526	56.606	56.685	56.764	56.843	56.922	57.001	57.080	740
750	57.080	57.159	57.238	57.317	57.396	57.475	57.554	57.633	57.712	57.791	57.870	750
760	57.870	57.949	58.028	58.107	58.186	58.265	58.343	58.422	58.501	58.580	58.659	760
770	58.659	58.738	58.816	58.895	58.974	59.053	59.131	59.210	59.289	59.367	59.446	770
780	59.446	59.525	59.604	59.682	59.761	59.839	59.918	59.997	60.075	60.154	60.232	780
790	60.232	60.311	60.390	60.468	60.547	60.625	60.704	60.782	60.860	60.939	61.017	790
800	61.017	61.096	61.174	61.253	61.331	61.409	61.488	61.566	61.644	61.723	61.801	800
810	61.801	61.879	61.958	62.036	62.114	62.192	62.271	62.349	62.427	62.505	62.583	810
820	62.583	62.662	62.740	62.818	62.896	62.974	63.052	63.130	63.208	63.286	63.364	820
830	63.364	63.442	63.520	63.598	63.676	63.754	63.832	63.910	63.988	64.066	64.144	830
840	64.144	64.222	64.300	64.377	64.455	64.533	64.611	64.689	64.766	64.844	64.922	840
850	64.922	65.000	65.077	65.155	65.233	65.310	65.388	65.465	65.543	65.621	65.698	850
860	65.698	65.776	65.853	65.931	66.008	66.086	66.163	66.241	66.318	66.396	66.473	860
870	66.473	66.550	66.628	66.705	66.782	66.860	66.937	67.014	67.092	67.169	67.246	870
880	67.246	67.323	67.400	67.478	67.555	67.632	67.709	67.786	67.863	67.940	68.017	880
890	68.017	68.094	68.171	68.248	68.325	68.402	68.479	68.556	68.633	68.710	68.787	890
900	68.787	68.863	68.940	69.017	69.094	69.171	69.247	69.324	69.401	69.477	69.554	900
910	69.554	69.631	69.707	69.784	69.860	69.937	70.013	70.090	70.166	70.243	70.319	910
920	70.319	70.396	70.472	70.548	70.625	70.701	70.777	70.854	70.930	71.006	71.082	920
930	71.082	71.159	71.235	71.311	71.387	71.463	71.539	71.615	71.692	71.768	71.844	930
940	71.844	71.920	71.996	72.072	72.147	72.223	72.299	72.375	72.451	72.527	72.603	940
950	72.603	72.678	72.754	72.830	72.906	72.981	73.057	73.133	73.208	73.284	73.360	950
960	73.360	73.435	73.511	73.586	73.662	73.738	73.813	73.889	73.964	74.040	74.115	960
970	74.115	74.190	74.266	74.341	74.417	74.492	74.567	74.643	74.718	74.793	74.869	970
980	74.869	74.944	75.019	75.095	75.170	75.245	75.320	75.395	75.471	75.546	75.621	980
990	75.621	75.696	75.771	75.847	75.922	75.997	76.072	76.147	76.223	76.298	76.373	990
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN L
CALIBRATION REPORT TE-32-2

PT PEMBANGKITAN JAWA-BALI

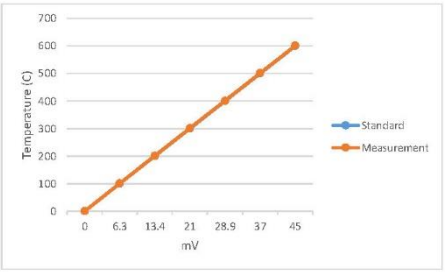
CALIBRATION REPORT

INSTRUMENT	Thermocouple	**CAL. RANGE**	0 – 45 mV
TAG. No.	TE-32-2A/B	**OUT. RANGE**	0 – 600 °C
EQUIPMENT No.	TE-32-2A/B	**P&ID No.**	
MODEL/TYPE	Z-206 / Type E	**PROCESS**	Finally Superheater
SERIAL No.		**POWER SUPPLY**	
MANUFACTURE	OMEGA	**AIR SUPPLY**	
STROKE		**ROOM TEMP.**	± 23.1°C
TOLERANCE	1.7°C or 0.32% (accuracy 99.68%)	**INS. STD. CALIBRATOR**	Fluke 724 Temperature Calibrator

Calibration Data:

Calibration Date: 14-04-2017 (Revised)								
No.	Standard A (°C)	Before			After			
		Measurement B (°C)	Deviation D = A-B (°C)	Tolerance (±) (°C)	Measurement B (°C)	Deviation D = A-B (°C)	Tolerance (±) (°C)	Note
1	100	102.5	+2.5	1.7	100.5	+ 0.5	1.7	√
2	200	202.7	+ 2.7	1.7	200.8	+ 0.8	1.7	√
3	300	302.4	+ 2.4	1.7	300.6	+ 0.6	1.7	√
4	400	402.9	+ 2.9	1.7	400.6	+ 0.6	1.7	√
5	500	503.1	+ 3.1	1.7	500.9	+ 0.9	1.7	√
6	600	602.9	+ 2.9	1.7	600.8	+ 0.8	1.7	√

Calibration Curve:



Calibrated by:

T.515071

Approved by:

T.294538

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS

Achmad Rizky Karuniawan merupakan nama lengkap penulis dengan nama panggilannya, Rizky. Penulis dilahirkan di Gresik pada tanggal 15 Desember 1994 sebagai anak kedua dari dua bersaudara dari ayahanda Achmad Indra Subchan dan ibunda Hari Murtiningsih. Riwayat pendidikan penulis adalah SD Negeri Pongangan 2 Manyar-Gresik pada tahun (2001–2007), SMP Negeri 1 Gresik pada tahun (2007–2010), SMA Negeri 1 Gresik pada tahun (2010–2013). Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Fisika ITS pada tahun 2014. Semasa perkuliahan, Penulis aktif organisasi kemahasiswaan di Laboraturium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol Teknik Fisika ITS, penulis fokus pada bidang minat rekayasa instrumentasi dan kontrol untuk menyelesaikan tugas akhirnya. Penulis dapat dihubungi melalui *email*: rizkykaruniawan@gmail.com.