



TUGAS AKHIR TF 181801

PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEM* (FTCS) AKIBAT KESALAHAN SENSOR PADA SISTEM PENGENDALIAN TEKANAN *SCRUBBER* DI PT. PERTADAYA GAS SEMARANG

Putri Merlisa Wahyuningrum
NRP 0231 1745 000039

Dosen Pembimbing
Ir. Ya'umar, M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT TF 181801

**DESIGN FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEM
(FTCS) DUE TO SENSOR FAULT IN PRESSURE
CONTROL SYSTEM SCRUBBER PT. PERTADAYA
GAS SEMARANG**

**Putri Merlisa Wahyuningrum
NRP 0231 1745 00039**

**Supervisor
Ir. Ya'umar, M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC**

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Putri Merlisa Wahyuningrum

NRP : 02311745000039

Departemen : Teknik Fisika – FTI ITS

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul ***“PERANCANGAN FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEM (FTCS) AKIBAT KESALAHAN SENSOR PADA SISTEM PENGENDALIAN TEKANAN SCRUBBER DI PT. PERTADAYA GAS SEMARANG”*** 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, 1 Juli 2019

Yang membuat pernyataan,


METERAI
TEMPEL
TGL 20
63666AFF919610349
6000
ENAM RIBURUPIAH
Putri Merlisa Wahyuningrum

LEMBAR PENGESAHAN

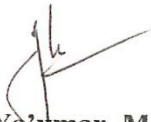
PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEM* (FTCS) AKIBAT KESALAHAN SENSOR PADA SISTEM PENGENDALIAN TEKANAN SCRUBBER DI PT. PERTADAYA GAS SEMARANG

Oleh:

Putri Merlisa Wahyuningrum
NRP. 0231 1745 000039

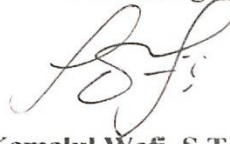
Surabaya, Mei 2019
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I



Ir. Ya'umar, M.T
NIP. 19540406 198103

Pembimbing II



Moh. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC



Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



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

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEM* (FTCS) AKIBAT KESALAHAN SENSOR PADA SISTEM PENGENDALIAN TEKANAN *SCRUBBER* DI PT. PERTADAYA GAS SEMARANG


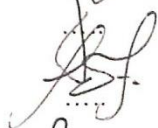
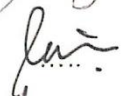
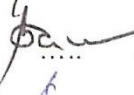

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

Putri Merlisa Wahyuningrum
NRP. 0231 1745 000039

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Ya'umar, M.T  Pembimbing I
2. Moh. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC  Pembimbing II
3. Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T  Ketua Penguji
4. Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T, M.T  Penguji I
5. Lizda Johar Mawarani, S.T, M.T  Penguji II

SURABAYA
2019

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEM*
(FTCS) AKIBAT KESALAHAN SENSOR PADA SISTEM
PENGENDALIAN TEKANAN *SCRUBBER* DI PT.
PERTADAYA GAS SEMARANG**

Nama Mahasiswa : Putri Merlisa Wahyuningrum
NRP : 0231 1745 000039
Departemen : Teknik Fisika
Dosen Pembimbing : Ir. Ya'umar, M.T
Moh. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC

Abstrak

Sebagai bagian dari suatu proses pemisahan gas dari cairan, sehingga *scrubber* merupakan tahapan penting dalam industri gas yang menentukan kualitas suatu produk. Sistem kontrol pada *scrubber* harus memiliki performansi yang tinggi. Performansi sistem pengendali tidak lepas dari kinerja instrumennya seperti sensor. Kesalahan pada sensor seringkali terjadi, sehingga kontroler akan mengirim sinyal yang salah kepada aktuatur. Pada Tugas Akhir ini dilakukan perancangan *Fault Tolerant Control (FTC)* yang mampu bekerja ketika terdapat kesalahan pada sensor dan dapat mempertahankan performansi sistem. Langkah awal yang dilakukan adalah pemodelan dari *scrubber*. Selanjutnya perancangan observer menggunakan metode *pole placement*. Terakhir merekonfigurasi sinyal kontrol. Dilakukan pengujian kesalahan untuk melihat performansi rancangan FTC yaitu kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa FTC memiliki performansi jauh lebih baik dalam mengatasi kesalahan dibandingkan dengan kontrol PI. Pada sistem FTC dengan kesalahan sensitivitas 2% didapatkan nilai *maximum overshoot* 8,477%, *settling time* 38 detik, dan *error steady state* 0,023%. Sedangkan sistem tanpa FTC didapatkan nilai *maximum overshoot* 8,621%, *settling time* 45 detik, dan *error steady state* 2,069%.

Kata kunci: *fault tolerant control, observer, scrubber*

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESIGN FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEM (FTCS)
DUE TO SENSOR FAULT IN PRESSURE CONTROL
SYSTEM SCRUBBER PT. PERTADAYA GAS SEMARANG**

Name : Putri Merlisa Wahyuningrum
Student Number : 0231 1745 000039
Department : Engineering Physics
Supervisor : Ir. Ya'umar, M.T
Moh. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC

Abstract

As part of a process of separating gas from liquids, the scrubber is an important stage in the gas industry that determines the quality of a product. The control system on the scrubber must have high performance. Control system performance can not be separated from the performance of the instrument such as sensors. Often a sensor error occurs so the controller will send the wrong signal to the actuator. In this Final Project is designed Fault Tolerant Control (FTC) which is able to work when there is a mistake on the sensor and still can keep the system performance. The first step is modeling the scrubber. Next, an observer was designed using the pole placement method. Finally, reconfigure the control signal. Fault test is given to see the performance of the FTC design, namely bias error and sensitivity error. From the simulation results show that FTC has a better performance in dealing with errors compared to PI controls. In the FTC system with a sensitivity error of 2%, the maximum overshoot is 8.477%, the settling time is 38 seconds, and the error steady state is 0.023%. Whereas the system without FTC has the maximum overshoot is 8.621%, the settling time is 45 seconds, and the error steady state is 2.069%.

Keywords: fault tolerant control, observer, scrubber

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur 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 *Fault Tolerant Control System (FTCS)* Akibat Kesalahan Sensor Pada Sistem Pengendalian Tekanan *Scrubber* Di PT. Pertadaya Gas Semarang”. Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Orang tua, yang senantiasa memberikan dukungan moril dan material.
2. Bapak Agus Muhamad Hatta ST, Msi, Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS sekaligus dosen wali penulis.
3. Bapak Ir. Yaumar M.T, Bapak Moh. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC dan Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T selaku dosen pembimbing yang dengan sabar membimbing, memberikan saran dan kritiknya.
4. Segenap jajaran teknisi PT. Pertadaya Gas yang telah membimbing dan memfasilitasi selama pengambilan data lapangan.
5. Teman-teman laboratorium Fisika Rekayasa, dan teman-teman Lintas Jalur Teknik Fisika 2017 yang senantiasa memberikan fasilitas laboratorium dan dukungannya.
6. Seluruh dosen karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika atas segala bantuan dan kerjasamanya.
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu atas bantuannya.

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

Surabaya, Juni 2019
Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
BAB II. TEORI PENUNJANG	
2.1 <i>Scrubber</i>	5
2.2 Sistem Pengendalian Tekanan <i>Scrubber</i>	6
2.3 Sistem Pengendalian Proportional-Integral	7
2.4 Pemodelan Matematis	9
2.5 <i>Fault Tolerant Control</i>	10
2.6 <i>Observer</i>	13
2.7 Skema Rekonfigurasi Kontrol	17
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Prosedur Umum Penelitian	19
3.2 Pengambilan Data	22
3.3 Pemodelan	23
3.4 Validasi Model.....	30
3.5 Perancangan Kontroler PI.....	32
3.6 Perancangan <i>Fault Tolerant Control (FTC)</i>	34
3.7 Uji Performansi.....	39
BAB IV. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Uji Kesalahan Bias.....	41
4.2 Uji Kesalahan Sensitivitas	45
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	57
5.2 Saran.....	57

DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN
BIOGRAFI PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Scrubber</i>	8
Gambar 2.2	Sistem Pengendalian Tekanan Pada Scrubber PT. Pertadaya Gas Semarang	9
Gambar 2.3	Skema Umum <i>Fault Tolerant Control</i>	13
Gambar 2.4	Struktur Umum <i>Active Fault Tolerant Control</i>	15
Gambar 2.5	<i>Observer State</i>	16
Gambar 2.6	Skema Rekonfigurasi Kontrol	20
Gambar 3.1	Diagram Alir Metodologi Penelitian	21
Gambar 3.2	Diagram Blok <i>Open Loop</i>	31
Gambar 3.3	Grafik Respon <i>Open Loop</i>	32
Gambar 3.4	Diagram Blok Perancangan Pengendali PI	33
Gambar 3.5	Grafik Respon Pengendali PI	33
Gambar 3.6	Skema Rekonfigurasi Kontrol	39
Gambar 4.1	Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Bias $-0,15\%$	42
Gambar 4.2	Perbesaran Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Bias $-0,15\%$	42
Gambar 4.3	Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Bias $+0,15\%$	44
Gambar 4.4	Perbesaran Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Bias $+0,15\%$	44
Gambar 4.5	Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Sensitivitas 1%	46
Gambar 4.6	Perbesaran Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Sensitivitas 1%	46
Gambar 4.7	Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Sensitivitas 2%	48
Gambar 4.8	Perbesaran Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Sensitivitas 2%	48
Gambar 4.9	Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Sensitivitas 5%	50
Gambar 4.10	Perbesaran Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Sensitivitas 5%	50
Gambar 4.11	Respon Sistem Pengendalian Dengan	

	Kesalahan Sensitivitas 8%	52
Gambar 4.12	Perbesaran Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Sensitivitas 8%	52
Gambar 4.13	Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Sensitivitas 15%	54
Gambar 4.14	Perbesaran Respon Sistem Pengendalian Dengan Kesalahan Sensitivitas 15%	54

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Pemodelan Plant Scrubber Berdasarkan Data Lapangan	22
Tabel 3.2	Komposisi Fluida yang masuk <i>Scrubber V-100</i>	23
Tabel 3.3	Data Proses Perusahaan PT. Pertadaya Gas Semarang	30
Tabel 3.4	Data Perbandingan Antara <i>Real Plant</i> dengan Simulasi	31
Tabel 4.1	Parameter Performansi Dengan Kesalahan Bias -0,15%	43
Tabel 4.2	Parameter Performansi Dengan Kesalahan Bias +0,15%	45
Tabel 4.3	Parameter Performansi Dengan Kesalahan Sensitivitas 1%	47
Tabel 4.4	Parameter Performansi Dengan Kesalahan Sensitivitas 2%	49
Tabel 4.5	Parameter Performansi Dengan Kesalahan Sensitivitas 5%	51
Tabel 4.6	Parameter Performansi Dengan Kesalahan Sensitivitas 8%	53
Tabel 4.7	Parameter Performansi Dengan Kesalahan Sensitivitas 15%	55

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan tugas akhir ini, dijelaskan mengenai latar belakang dalam melakukan perancangan sistem, rumusan masalah, tujuan, dan batasan masalah yang digunakan.

1.1 Latar Belakang

Populasi dan pertumbuhan pendapatan adalah pendorong utama di balik meningkatnya permintaan energi dunia. Pada tahun 2030 mendatang, populasi dunia diproyeksikan akan tumbuh sebesar 8,3 miliar yang berarti 1,3 miliar tambahan orang akan membutuhkan energi. Berbagai usaha telah dilakukan untuk memperoleh sumber energi pengganti yang dapat memenuhi kebutuhan energi dalam jumlah besar dan jangka waktu yang lama, serta ramah terhadap lingkungan. Salah satu sumber energi yang saat ini mulai diminati adalah gas alam. Gas alam merupakan gas yang sebagian besar diperoleh langsung dari perut bumi (dari dalam tanah atau dari sumur minyak dan gas bumi) atau dari alam (Siyuan Wang, 2000). Gas alam mentah dari perut bumi mengandung gas-gas hidrokarbon yang masih terkontaminasi dengan senyawa yang bersifat asam seperti gas CO_2 dan H_2S serta zat pengotor lain yang tidak diinginkan. Gas CO_2 akan membeku pada temperatur yang sangat rendah sehingga menyebabkan pemampatan pada pipa-pipa atau tube-tube yang terdapat pada alat pencairan gas alam. Sedangkan gas H_2S merupakan gas berbau dan beracun yang sangat korosif terhadap peralatan perpipaan di pabrik. Sehingga kedua komponen ini harus dihilangkan dari dalam gas umpan agar menghasilkan produk yang berkualitas (A Dr. A.H Younger P. Eng, 2004)

Salah satu produk dari gas alam adalah *Liquefied Natural Gas* (LNG). LNG merupakan gas alam yang dicairkan dengan cara didinginkan pada temperatur sekitar -160°C dan pada tekanan atmosfer. Dengan pencairan gas alam tersebut, volume spesifik gas alam dapat mengecil hingga 1/600 kali lipat dibandingkan kondisi awalnya. Gas alam cair tersebut dapat disimpan dalam tangki

atmosferik serta mudah diangkut dalam jumlah yang besar menuju tempat yang jauh dengan menggunakan kapal tanker LNG (Pradnya A. Putri, Shinta S. Hajar, dkk, 2013). Proses yang digunakan untuk menghasilkan gas cair atau LNG dengan cara menghilangkan zat pengotor dan hidrokarbon berat dari gas alam terjadi pada *Scrubber*. *Scrubber* adalah salah satu *plant* terpenting dalam industri minyak dan gas. Peran *scrubber* adalah memisahkan gas dari cairan yang terkondensasi dengan cara menyemprotkan cairan ke dalam gas atau dengan diberikan tekanan melalui cairan atau dengan cara kontak lainnya sehingga dapat menghilangkan polutan yang berada dalam gas. Tujuan dari proses ini adalah membuat gas lebih murni sehingga dapat dijual atau digunakan untuk bahan bakar pembangkit listrik (Joga Dharma Setiawan, Yuhanes Dedy Setiawan, 2012).

Karena *scrubber* merupakan tahapan penting dalam industri minyak dan gas, sehingga peranan sistem pengendalian pada *scrubber* sangat dibutuhkan. Proses pengendalian yang terpenting adalah menjaga kestabilan tekanan gas pada *Scrubber* untuk mencegah terjadinya fluktuasi tekanan yang terlalu tinggi atau terlalu rendah. Kesalahan pada pembacaan sensor merupakan permasalahan yang dapat menimbulkan terjadinya fluktuasi tekanan. Fluktuasi tekanan yang tinggi akan mengakibatkan kerusakan pada *Scrubber* yang berdampak terjadinya ledakan sedangkan fluktuasi tekanan yang terlalu rendah akan mengakibatkan gas yang masih mengandung liquid sehingga produk dari gas akan rusak mutunya. Permasalahan ini dapat berdampak pada kerugian waktu untuk melakukan replacing sensor serta berdampak pada kerugian biaya bagi perusahaan. Oleh karena itu, perlu adanya sistem pengendalian yang mampu menjaga performansi sensor tekanan pada *Scrubber*.

Layaknya penerapan sistem kontrol dapat dilihat apabila sistem kontrol tersebut mampu mempertahankan proses pada kondisi operasi yang diinginkan, mampu menghindari kondisi operasi abnormal yang dapat menyebabkan trip dan dapat meningkatkan profitabilitas suatu proses serta dapat memenuhi persyaratan kualitas lingkungan. Agar dapat menangani kondisi

operasi abnormal secara otomatis, maka dibutuhkan suatu sistem yang dapat mendeteksi dan mengidentifikasi kesalahan yang terjadi pada kondisi abnormal tersebut untuk kemudian merekonfigurasi sinyal kontrol sesuai dengan kebutuhan. Sistem pengendalian yang memiliki kemampuan untuk mempertahankan kestabilan dan performansi sistem pada saat terjadi kesalahan disebut *Fault Tolerant Control System* (FTCS). Menurut Zhang dan Jin (2008), *Fault Tolerant Control System* (FTCS) merupakan suatu pengembangan teknologi pengendalian untuk kebutuhan keamanan (*safety*) dan perbaikan unjuk kerja. FTCS dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe, yaitu *Passive Fault Tolerant Control System* (PFTCS) dan *Active Fault Tolerant Control System* (AFTCS). Pada *Active Fault Tolerant Control System* terdiri dari dua tahapan, yaitu tahapan *Fault Detection and Identification* (FDI) dan *Reconfigurable Controller*. *Reconfigurable Controller* digunakan agar respon sistem menjadi lebih baik dengan parameter *maximum overshoot* yang rendah, *settling time* yang cepat, *error steady state* yang mendekati nol, dan kestabilan tinggi (Youmin Zhang, Jin Jiang, 2008).

Sebelumnya telah dilakukan penelitian oleh Katherin Indriwati, dkk yang berhasil merancang AFTC untuk sistem yang non-linier dengan kesalahan pada aktuator dan sensor yang di aplikasikan pada sistem motor DC (Katherin, 2015). Oleh karena itu pada tugas akhir ini akan dilakukan perancangan sistem pengendalian yang mampu mengatasi kesalahan pada sensor dan aktuator dengan judul Perancangan *Fault Tolerant Control System* (FTCS) Akibat Kesalahan Sensor Pada Sistem Pengendalian Tekanan *Scrubber* Di PT. Pertadaya Gas Semarang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang dijelaskan diatas, maka rumusan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah :

- a. Bagaimana merancang sistem observer akibat kesalahan sensor pada sistem pengendalian tekanan *scrubber* di PT. Pertadaya Gas Semarang?

- b. Bagaimana melakukan kompensasi kesalahan akibat kesalahan sensor pada sistem pengendalian tekanan *scrubber* di PT. Pertadaya Gas Semarang?

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah dapat merancang *Fault Tolerant Control System (FTCS)* Akibat Kesalahan Sensor Pada Sistem Pengendalian Tekanan *Scrubber* Di PT. Pertadaya Gas Semarang.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Kesalahan sensor yang ditinjau adalah ketidaksesuaian pembacaan (bias) dan sensitivitas pada sensor tekanan.
- b. Pemodelan *plant* hanya meninjau satu proses di bagian atas *scrubber*.
- c. Kontroler yang terpasang pada *plant scrubber* yaitu pengendali PI.

BAB II TEORI PENUNJANG

Pada bab teori penunjang dijelaskan mengenai *scrubber*, sistem pengendalian tekanan pada *scrubber*, sistem pengendali PI, pemodelan matematis *scrubber*, *fault tolerant control* (FTC), *observer* dan skema rekonfigurasi kontrol.

2.1 *Scrubber*

Scrubber didefinisikan sebagai alat pemisahan suatu partikel solid (debu) yang ada di gas atau udara yang berfungsi untuk mengurangi polutan udara yang dihasilkan oleh gas buang suatu industri. Ada beberapa jenis dari *scrubber* salah satunya adalah *Dry scrubber*. *Dry scrubber* adalah salah satu jenis *scrubber* yang digunakan untuk menghilangkan bahan berbahaya dari gas buangan industri sebelum dilepaskan ke lingkungan. *Dry scrubber* digunakan terutama untuk menghilangkan gas asam dari sumber pembakaran. Pada gambar 2.1 merupakan *plant dry scrubber* pada umumnya. Secara umum, proses ini dilakukan dengan menyemprotkan reaktan kering ke gas buang pada kecepatan tinggi untuk menetralkan polutan dalam gas. Proses tersebut dilakukan dalam tiga langkah, yaitu:

a. Pendinginan gas

Dalam sistem pendingin gas, gas emisi didinginkan agar lebih mudah untuk menghilangkan polutan dan racun lain dari gas. Gas buang diencerkan menggunakan pendingin evaporatif.

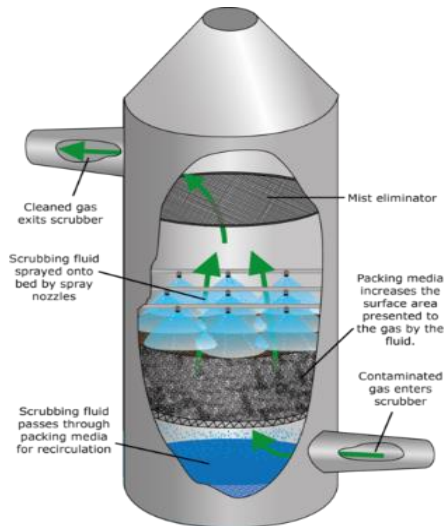
b. Injeksi reagen

Setelah gas didinginkan secara signifikan, dilakukan injeksi reagen. Komponen - komponen berbahaya dikeluarkan dari gas. Komponen reagen kering umumnya dipilih karena sifat penetralannya, natrium bikarbonat merupakan reagen kering yang sering dimasukkan dalam proses ini. Berbagai macam serbuk dicampur bersama dan ditembakkan dengan tekanan tinggi ke dalam gas buang sehingga terjadi reaksi kimia yang mengurangi keasaman gas dan menghilangkan polutan berbahaya.

c. Penyaringan

Langkah terakhir adalah menggunakan filter berupa kain untuk menangkap bubuk *scrubbing* yang digunakan saat gas yang dibersihkan keluar dari ruang *scrubbing* (ENI Saipem Indonesia, 2013).

Skema P&ID dari proses *scrubber* dapat dilihat pada Lampiran A. Prinsip kerja *scrubber* terdapat pada Gambar 2.1 berikut ini.

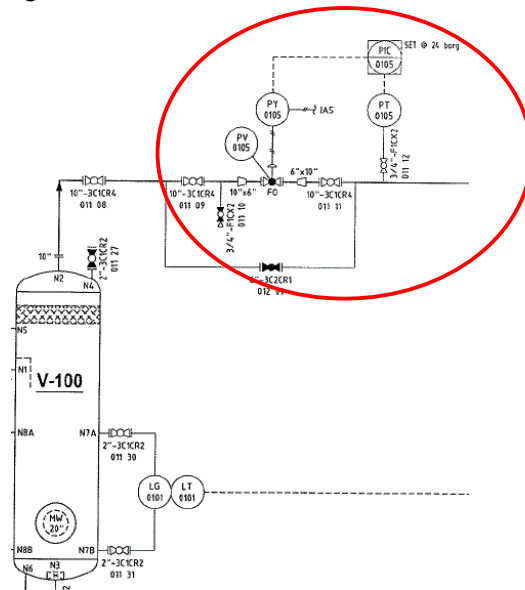


Gambar 2.1 *Scrubber* (ENI Saipem Indonesia, 2013)

2.2 Sistem Pengendalian Tekanan *Scrubber*

Sistem pengendalian tekanan pada *scrubber* PT. Pertadaya Gas Semarang menjaga nilai tekanan keluaran gas (Pout) yaitu sebesar 24 bar sebagai variabel proses, sehingga dalam sistem pengendalian tekanan *scrubber* diperlukan sebuah sensor tekanan yang menggunakan *Pressure Transmitter* (PT 0105). Sensor tersebut digunakan untuk mengukur besaran tekanan pada *scrubber* outlet, selanjutnya diperlukan kontroler berupa PI (*Proportional Integral*) untuk mengendalikan sistem. Kontroler PI

berguna untuk menjaga tekanan tetap pada *set point*. Tekanan di dalam *scrubber* harus dijaga 24 bar dengan memanipulasi laju aliran gas yang keluar dari *scrubber*. Gas produk yang keluar dari *scrubber* menuju *inlet metering system* untuk diproses ke proses selanjutnya. Jika tekanan yang terukur melebihi *set point*, maka laju aliran akan dikurangi dan sebaliknya. Pada Gambar 2.2 merupakan sistem pengendalian tekanan *scrubber* di PT. Pertadaya Gas Semarang.



Gambar 2.2 Sistem pengendalian tekanan *scrubber* di PT.Pertadaya Gas Semarang

2.3 Sistem Pengendalian Proportional – Integral

Sistem pengendali adalah kombinasi dari instrumen dan komponen yang dihubungkan oleh sebuah interaksi untuk melakukan kerjasama dengan tujuan tertentu. Sistem pengendalian dapat berupa sistem fisika, biologi, ekonomi, dan sebagainya. Sistem pengendali dapat diaplikasikan pada berbagai bidang, contohnya pada pengendali temperatur, posisi, aliran, tekanan,

level, dan lain sebagainya. Pada dasarnya pengendali terbentuk dari empat fungsi dasar, yaitu pengukuran (*measurement*), perbandingan (*comparison*), koreksi (*correction*) dan hasil (*judgement*) (F F. Gunterus, 1997).

- **Pengendali *Proportional***

Pengendali *proportional* memiliki keluaran yang sebanding dengan besarnya sinyal kesalahan. Secara lebih sederhana dapat dikatakan bahwa keluaran pengendali *proportional* merupakan perkalian antara konstanta *proportional* dengan masukannya. Perubahan pada sinyal masukan menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya. Pengendali *proportional* memiliki dua parameter, yaitu pita *proportional* dan konstanta *proportional*. Daerah kerja pengendali efektif dicerminkan oleh pita *proportional*, sedangkan konstanta *proportional* menunjukkan nilai faktor penguatan terhadap sinyal kesalahan (K_p) (F F. Gunterus, 1997).

- **Pengendali *Integral***

Pengendali *integral* menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap (*steady state*) nol. Jika sebuah *plant* tidak memiliki unsur *integrator*, maka pengendali *proportional* tidak mampu menjamin keluaran sistem memiliki *error steady state* nol. Pengendali *integral* memiliki karakteristik seperti sebuah *integral*. Keluaran pengendali sangat dipengaruhi oleh perubahan sinyal kesalahan. Keluaran pengendali ini merupakan penjumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Jika sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan. Sinyal keluaran pengendali integral merupakan luas bidang yang dibentuk oleh kurva kesalahan penggerak. Sinyal keluaran akan berharga sama dengan harga sebelumnya ketika sinyal kesalahan berharga nol (F F. Gunterus, 1997).

2.4 Pemodelan Matematis

Hukum yang digunakan untuk memodelkan *scrubber* adalah sebagai berikut :

Hukum kesetimbangan massa

Hukum ini menyatakan bahwa jumlah massa yang masuk ke dalam sistem sebanding dengan jumlah massa yang keluar dari sistem serta massa yang terakumulasi dalam sistem itu sendiri. Masukan untuk *scrubber* adalah laju massa campuran antara gas dan liquid hasil dari gundih block dan keluarannya adalah laju massa gas yang menuju inlet metering system. Hukum kesetimbangan massa yang berlaku sesuai dengan kondisi masukan dan keluaran dari *scrubber* adalah sebagai berikut.

$$\frac{d}{dt} [\rho g V g + \rho l V l] = q_{in} - q_{0(l)} - q_{0(g)} \quad (2.1)$$

$$\frac{d(\rho g V g)}{dt} + \frac{d(\rho l V l)}{dt} = q_{in} - q_{out} - q_{0(g)} \quad (2.2)$$

$$V g \frac{d\rho g}{dt} + \rho g \frac{dV g}{dt} + V l \frac{d\rho l}{dt} + \rho l \frac{dV l}{dt} = q_{in} - q_{out} - q_{0(g)} \quad (2.3)$$

Keterangan :

- ρg : Massa jenis gas dalam scrubber (kg/m^3)
- $V g$: Volume gas dalam scrubber (m^3)
- ρl : Massa jenis liquid dalam scrubber (kg/m^3)
- $V l$: volume liquidi dalam scrubber (m^3)
- q_{in} : laju aliran masuk (kg/s)
- $q_{0(l)}$: laju aliran liquid keluar (kg/s)
- $q_{0(g)}$: laju aliran keluar gas (kg/s)

Hukum kesetimbangan energi :

Dalam termodinamika perubahan energi terdiri dari tiga komponen yaitu: energi potensial (berkaitan dengan posisi sistem dalam medan gravitasi bumi), energi kinetik (berkaitan dengan pergerakan sistem terhadap kerangka koordinat eksternal) dan

energi dalam, sehingga perubahan energi total sistem diberikan dengan persamaan: (Moran, 1998)

$$E_2 - E_1 = (EK_2 - EK_1) + (EP_2 - EP_1) + (U_2 - U_1) \quad (2.4)$$

Atau,

$$\Delta E = \Delta EK + \Delta EP + \Delta U \quad (2.5)$$

Sehingga persamaan (2.5) dapat dituliskan dalam bentuk,

$$Q - W = \Delta EK + \Delta EP + \Delta U \quad (2.6)$$

Dan kesetimbangan energi yang didasarkan pada laju perubahan waktu adalah :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dEK}{dt} + \frac{dEP}{dt} + \frac{dU}{dt} \quad (2.7)$$

Dengan demikian laju kesetimbangan energi yang menyertai perpindahan massa pada volume kontrol adalah :

$$\begin{aligned} \frac{dE_{cv}}{dt} = & \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) \\ & - \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

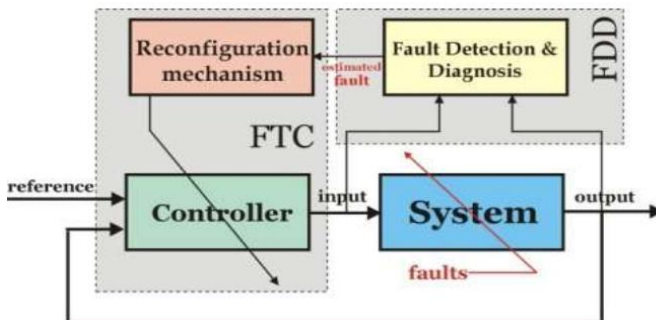
2.5 Fault Tolerant Control

Suatu perkembangan mengenai peningkatan performansi dan kebutuhan *safety* sangat dibutuhkan dalam suatu sistem pengendalian. Desain sistem pengendalian umpan balik (*feedback control design*) yang diperuntukkan bagi sistem yang kompleks mungkin dapat menghasilkan kinerja yang kurang stabil, apabila terjadi beberapa kerusakan pada aktuator, sensor, ataupun komponen penyusun sistem tersebut. Telah dilakukan penelitian terkait dengan desain sistem pengendalian yang mampu memberikan toleransi terhadap kerusakan yang terjadi dengan

tetap menjaga stabilitas sistem yang diinginkan. *Fault Tolerant Control* adalah sebuah sistem pengendalian modern yang mampu mengakomodasi kegagalan secara otomatis untuk *maintenance* kestabilan dan kinerja saat terjadi kegagalan atau *failure*. Sistem pengendalian ini sering disebut dengan *fault tolerance control system* (FTCS) (Noura, Hassan, dkk, 2009).

FTCS dapat diklasifikasikan pada dua tipe yaitu *active fault tolerance control system* (AFTCS) dan *passive fault tolerance control system* (PFTCS). AFTCS bereaksi terhadap kesalahan yang terjadi pada suatu komponen dengan merekonfigurasi aksi pengendalian sehingga kestabilan dan kinerja pada sistem dapat dijaga, sedangkan PFTCS didesain untuk menjadi sistem pengendalian yang *robust* dari kesalahan suatu komponen.

Gambar 2.3 merupakan gambaran skema FTCS. Tujuan utama dari FTCS adalah merancang kontroler dengan struktur yang cocok untuk mencapai kestabilan dan kinerja yang diinginkan. Tidak hanya ketika pengendalian komponen berfungsi secara normal tetapi ketika terjadi kesalahan pada suatu komponen tersebut (Noura, Hassan, dkk, 2009).



Gambar 2.3 Skema umum *fault tolerant control* (Noura, Hassan, dkk, 2009)

Berdasarkan Gambar 2.3, Perbedaan AFTC dan PFTC adalah terletak pada perancangan *fault detection and diagnosis* (FDD) dan *reconfigurable controller* (RC). Sehingga kunci utama pada AFTC

adalah merancang kontroller yang dapat direkonfigurasi, skema FDD dengan sensitivitas yang tinggi terhadap kesalahan dan *robust* terhadap ketidakpastian, dan mekanisme rekonfigurasi yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan walaupun terdapat ketidakpastian dan *time delay* pada FDD (Noura, Hassan, dkk, 2009).

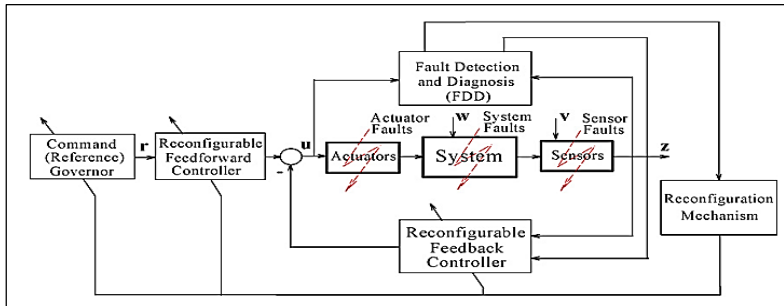
Menurut Zhang dan Jiang (2008), *active fault tolerant control* (AFTC) terdiri atas empat sub sistem, yaitu:

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

FDD dan RC pada keseluruhan struktur sistem adalah perbedaan utama dari *active fault tolerant control* dibandingkan dengan *passive fault tolerant control*. Tahapan dalam perancangan *active fault tolerant control* adalah sebagai berikut:

- a. Merancang kontroler yang dapat direkonfigurasi
- b. Dilakukan perancangan *observer* untuk mengestimasi kesalahan aktuator dan/atau sensor
- c. Merancang skema FDD dengan sensitivitas 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 2.4 berikut.



Gambar 2.4. Struktur umum *active fault tolerant control*
(Youmin Zhang, Jin Jiang, 2008)

2.6 Observer

Observer adalah suatu algoritma yang digunakan mengestimasi keadaan (state) sistem berdasarkan model matematis sistem. Selain itu observer juga digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sistem. Mengingat bahwa multivariabel linier plant dengan output hasil pengukuran direpresentasikan sebagai berikut (Katsuhiko, Ogata, 2010):

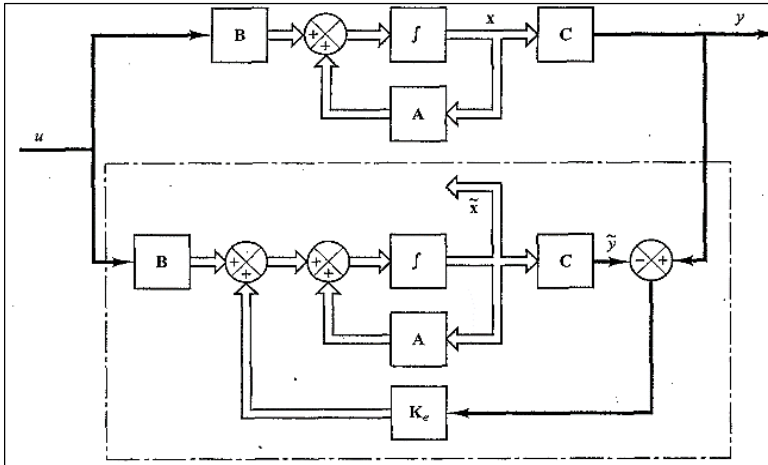
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.9)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.10)$$

Dimana:

- \dot{x} = perubahan state terhadap waktu
- y = output sistem
- A = matriks pada state
- B = matriks pada kontrol input
- C = matriks pada hasil pengukuran
- x = state
- u = kontrol input
- D = *measurement output noise*

Pada Gambar 2.5 merupakan diagram blok observer.



Gambar 2.5 *Observer state* (K. Ogata, 1997)

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 (2.9) dan (2.10) akan menjadi persamaan berikut (K. Indriawati, N. Sebe, T. Agustinah, A. Jazidie, 2015).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (2.11)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (2.12)$$

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:

$$\dot{z}(t) = Az(y(t) - z(t)) \quad (2.13)$$

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

$$\dot{z}(t) = Az.Cx(t) + Az.F_s f_s(t) - Az.z(t) \quad (2.15)$$

Untuk Az merupakan matriks identitas (I), sedangkan matriks dari kesalahan sensor didefinisikan

sebagai $f = [f_s]$

Dari persamaan (2.11) sampai dengan (2.14), maka dapat diubah *menjadi state space* seperti berikut :

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

$$\dot{y}(t) = z(t) = [0 \ 1] \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Dari persamaan *state space* (2.16) dan (2.17), persamaan tersebut dapat didefinisikan dalam bentuk standart *state space* sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \dot{X}_a(t) &= A_a X_a(t) + B_a u(t) + E_a f(t) \\ \dot{y}(t) &= C_a X_a(t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Dengan, $X_a = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}$

Dimana:

$$A_a = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z.C & -A_z \end{bmatrix}, B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_a = [0 \quad 1],$$

$$E_a = \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z.F_s \end{bmatrix}$$

Untuk memperoleh nilai dari *gain observer* maka dipakai ekspansi matrik melalui persamaan ruang keadaan baru yang ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}_a(t) &= A_a \hat{X}_a + B_a u + E_a \hat{f}_s + L_x (y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{f}}_s &= L_f (y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C_a \hat{X}_a \end{aligned} \quad (2.19)$$

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.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{X}}_a(t) \\ \dot{\hat{f}}_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a & E_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{X}_a(t) \\ \hat{f}_s(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} L_x \\ L_f \end{bmatrix} [C_a \quad 0] (Y - \hat{Y}) \quad (2.20)$$

$$\hat{y} = [C_a \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Dari bentuk (2.20) dan (2.21) dapat diubah menjadi persamaan keadaan dan persamaan keluaran *observer*, sebagai berikut.

$$\dot{\hat{x}}(t) = \tilde{A}_a \hat{x}(t) + \tilde{B}_a u(t) + \tilde{K}_e (\tilde{y}(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.22)$$

$$\hat{y}(t) = \tilde{C}_a \hat{x}(t) \quad (2.23)$$

Dengan,

$$\hat{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\tilde{X}}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix}$$

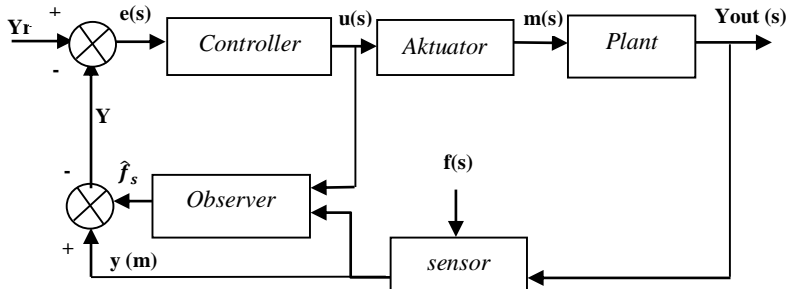
Sehingga didapatkan,

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

Kemudian untuk mendapatkan nilai gain matriks observer dengan menggunakan solusi *pole placement* dimana *pole placement* adalah metode uji coba peletakan nilai *pole* yang sesuai.

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 *delay time* pada *fault detection* (K. Indriawati, A. Jazidie, T. Agustinah, 2015)



Gambar 2.6 Skema Rekonfigurasi Kontrol K. Indriawati, A. Jazidie, T. Agustinah, 2015)

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 (Y_m). 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 (Y_m).

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

$$Y = Y_m - f_s \quad (2.24)$$

Dimana:

- Y = Nilai sebenarnya
- Y_m = Nilai hasil pengukuran
- f_s = Nilai hasil estimasi *fault*

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab metodologi penelitian dalam tugas akhir ini, dijelaskan mengenai prosedur umum penelitian dari pengambilan data hingga uji performansi.

3.1 Prosedur Umum Penelitian

Metodologi yang digunakan untuk mencapai tujuan dari tugas akhir ini dijelaskan melalui diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 yang mendeskripsikan tahap – tahap penelitian sebagai berikut :

- a. Pengambilan data spesifikasi *scrubber* dan sensor tekanan
Pengambilan data meliputi spesifikasi *scrubber*, sensor tekanan, data proses meliputi masukan dan keluaran dari *scrubber*, process flow diagram (PFD), Piping and Instrument Diagram (P&ID) dari area letak *scrubber*, data riwayat keterawatan dari instrumen sistem *scrubber* dan data kalibrasi instrumen sistem *scrubber* yang menunjukkan adanya riwayat kesalahan pada sensor tekanan *scrubber*.
- b. Pemodelan *scrubber* dan sensor tekanan
Pemodelan didapatkan dari data yang telah diambil. Pemodelan *scrubber* dan sensor tekanan di simulasikan pada fitur simulink pada perangkat lunak Matlab R2014a. Untuk memastikan model yang dibuat merepresentasikan plant yang sesungguhnya. Jika validasi proses sudah mencapai *error* <5% maka dapat diasumsikan bahwa pemodelan sudah merepresentasikan plant, jika *error* masih kurang lebih dari 5% maka perbaikan model dilakukan jika hasil yang dibuat tidak merepresentasikan plant yang sesungguhnya. Pemodelan *scrubber* menggunakan hukum kesetimbangan energi seperti pada persamaan (2.4) – (2.7)
- c. Validasi Pemodelan
Validasi dilakukan dengan uji *open loop* fungsi transfer *scrubber* dengan memberikan besar laju aliran gas yang berubah-ubah terhadap tekanan gas output *scrubber*. 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 $\leq 5\%$, maka dapat diasumsikan permodelan sudah merepresentasikan *plant*.

d. Perancangan Kontroler PI

Simulasi sistem pengendalian *loop* tertutup pada fitur simulink di perangkat lunak MATLAB R2014a, dengan menggunakan algoritma PI pada kontroler. Pada kontroler diberikan nilai parameter P dan I. Nilai parameter P dan I didapatkan dengan menggunakan metode trial and error untuk mendapatkan hasil respon dari kontroler, dengan mendapatkan parameter K_p dan T_i dengan maksimum *overshoot* sebesar 10%, *error steady state* sebesar 0%, dan *settling time* sebesar 500 sekon.

e. Perancangan Observer

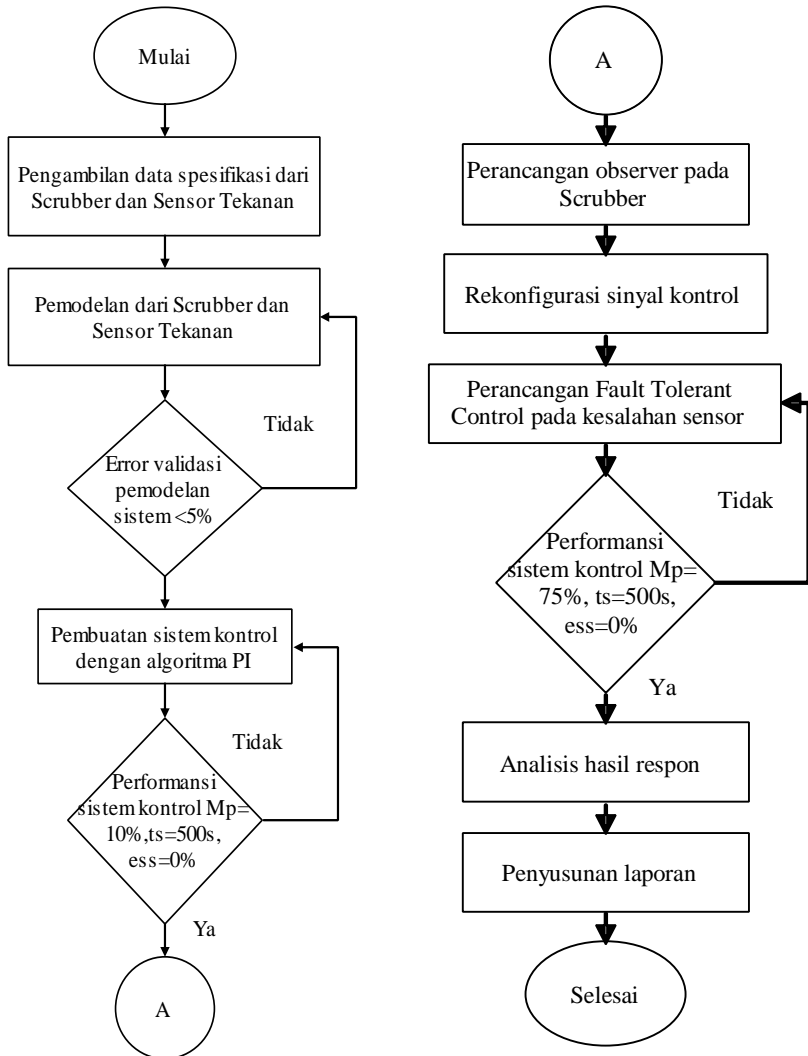
Perancangan Observer, dilakukan dengan menerjemahkan matriks ruang keadaan dari persamaan differensial matematis dari rekonfigurasi sinyal kontrol untuk meninjau kesesuaian apakah matriks persamaan ruang keadaan yang sudah dihasilkan oleh observer sudah merepresentasikan plant yang akan dirancang.

f. Perancangan *Fault Tolerant Control*

FTC dirancang dengan memberikan kesalahan pada sensor sekaligus mengkompensasi sinyal pada sistem sehingga FTC dapat memperbaiki sinyal kesalahan yang diberikan secara otomatis. Perbaikan observer dilakukan apabila respon tidak sesuai yang ditinjau dari ketidakstabilan respon sistem dengan maksimum *overshoot* sebesar 75%, *error steady state* sebesar 0%, dan *settling time* sebesar 500 sekon.

g. Analisis Respon

Analisis respon berdasarkan uji performansi sistem dengan kontrol menggunakan algoritma FTC dan tanpa algoritma FTC dengan memberikan simulasi kesalahan pada sensor berupa kesalahan bias dan sensitivitas untuk sensor.



Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian

3.2 Pengambilan Data

Pengambilan data untuk memodelkan sebuah plant *scrubber* merupakan pengambilan data sekunder karena diperoleh melalui teknisi PT. Pertadaya Gas Semarang.

3.2.1 Data Spesifikasi *Scrubber*

Data yang digunakan untuk pemodelan *plant* berupa massa yang masuk dan massa yang keluar *scrubber* serta spesifikasi dan dimensi *scrubber*. Data didapat dari PT. Pertadaya Gas Semarang. Variabel yang dikendalikan pada obyek tugas akhir ini adalah tekanan gas *output* pada *scrubber*. Variabel yang dimanipulasi adalah laju aliran gas *output* melalui operasi *control valve*. Data lapangan dari sistem *scrubber* V-100 yang diambil saat melakukan observasi lapangan yang disajikan dalam Tabel 3.1

Tabel 3.1. Data pemodelan *plant scrubber* berdasarkan data lapangan

Notasi	Keterangan	Nilai dan Satuan
V_t	Volume <i>Scrubber</i>	2,5 m ³
D	Diameter <i>scrubber</i>	1,07 m
H	Tinggi total <i>scrubber</i>	2,4 m
P_{set}	Tekanan <i>set point</i>	24 bar
γ_L	<i>specific gravity</i> dari cairan	0,726
γ_G	<i>specific gravity</i> dari gas	1,173

Dalam tugas akhir ini, komposisi data gas umpan yang digunakan adalah data dari lapangan gas Pertadaya. Tabel 3.2 memperlihatkan komposisi gas umpan dari lapangan Pertadaya.

Tabel 3.2 Komposisi fluida yang masuk *scrubber* V-100

Komposisi gas	Unit	Unit Input
Methane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,7331
Ethane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0631
Propane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0396
i - Butane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0087
n - Butane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0068
i - Pentane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0038
n - Pentane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0033
n - Hexane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0042
n - Heptane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0052
n - Octane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0048
n - Nonane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0021
n - Decane	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0011
n - C11	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0004
n - C12	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0003
CO2	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0127
H2O	<i>Comp Mole Frac</i>	0,1105
Nitrogen	<i>Comp Mole Frac</i>	0,0003

Setelah data – data yang dibutuhkan untuk pemodelan tersedia, maka langkah selanjutnya adalah memasukkan data ini ke dalam pemodelan sistem yang telah ditetapkan.

3.3 Pemodelan

3.3.1 Pemodelan Matematis *Scrubber*

Berdasarkan persamaan pada (2.1) yang disubstitusikan sampai persamaan (2.4) maka pemodelan matematis pada *scrubber* dapat didekati dengan persamaan sebagai berikut.

$$\left[\frac{\text{Energi control Volume}}{\text{Waktu}} \right] = \left[\frac{\text{Energi masuk}}{\text{Waktu}} \right] - \left[\frac{\text{Energi keluar}}{\text{Waktu}} \right] + \left[\frac{\text{Perubahan panas dalam sistem}}{\text{Waktu}} \right]$$

$$\frac{dE}{dt} = E_{in} - E_{out} + Q \quad (3.1)$$

$$\frac{d}{dt} [\rho_g h_g V_g + \rho_l h_l V_l] = q_{in} h_{in} - q_{o(l)} h_{o(l)} - q_{o(g)} h_{o(g)} \quad (3.2)$$

Untuk liquid dalam *scrubber*

$$\frac{d}{dt} [\rho_l h_l V_l] = \rho_l h_l \dot{m}_{win} - \rho_{o(l)} h_{o(l)} \dot{m}_{wo(l)} \quad (3.3)$$

Untuk vapor atau gas dalam *scrubber*

$$\frac{d}{dt} [\rho_g h_g V_g] = \rho_g h_g \dot{m}_{win} - \rho_{o(g)} h_{o(g)} \dot{m}_{wo(g)} \quad (3.4)$$

Berdasarkan kesetimbangan tekanan

$$\frac{dP}{dt} = \left(\frac{\rho h g}{A} (\dot{m}_{win} - \dot{m}_{wout}) \right) \quad (3.5)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho_{in} h_{in} g \dot{m}_{win}}{A} - \frac{\rho_{o(g)} h_{o(g)} \dot{m}_{wo(g)}}{A} \quad (3.6)$$

Dengan

$$\dot{m}_{wout(g)} = k\sqrt{P} \quad (3.7)$$

Sehingga

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho_{in} h_{in} g \dot{m}_{win}}{A} - \frac{\rho_{o(g)} h_{o(g)} k\sqrt{P}}{A} \quad (3.8)$$

Linearisasi dengan menggunakan Deret Taylor

$$\begin{aligned} k\sqrt{P} &= k\sqrt{P_o} + \left[\frac{d(k\sqrt{P})}{dP} \right]_{P=P_o} (P - P_o) \\ &+ \left[\frac{d^2(k\sqrt{P})}{dP^2} \right]_{P=P_o} \frac{(P-P_o)^2}{2!} + \dots \end{aligned}$$

$$k\sqrt{P} = k\sqrt{P_0} + \frac{P}{2\sqrt{P_0}}(P - P_0) - \frac{k}{8^3\sqrt{P_0^2}}(P - P)^2 \quad (3.9)$$

Hilangkan orde dua dan orde tinggi sehingga menjadi :

$$k\sqrt{P} = k\sqrt{P_0} + \frac{k}{2\sqrt{P_0}}(P - P_0) \quad (3.10)$$

Sehingga

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho_{in}h_{in}g\dot{m}_{win}}{A} - \frac{\rho_{o(g)}h_{o(g)}k\sqrt{P}}{A} \quad (3.11)$$

$$\frac{dP}{dt} + \frac{\rho_{o(g)}h_{o(g)}g}{A} \left[k\sqrt{P_0} + \frac{k}{2\sqrt{P_0}}(P - P_0) \right] = \frac{\rho_{in}h_{in}g\dot{m}_{win}}{A} \quad (3.12)$$

$$\frac{dP}{dt} + \frac{\rho_{o(g)}h_{o(g)}g}{A} \frac{k}{2\sqrt{P_0}} P = \frac{\rho_{in}h_{in}g\dot{m}_{win}}{A} \quad (3.13)$$

Melaplace kan fungsi (3.13) sehingga menjadi :

$$s.P(s) + \frac{\rho_{o(g)}h_{o(g)}g}{A} \frac{k}{2\sqrt{P_0}}.P(s) = \frac{\rho_{in}h_{in}g}{A}\dot{m}_{win}(s) \quad (3.14)$$

$$P(s) \left[s + \frac{\rho_{o(g)}h_{o(g)}g}{A} \frac{k}{2\sqrt{P_0}} \right] = \frac{\rho_{in}h_{in}g}{A}\dot{m}_{win}(s) \quad (3.15)$$

Kemudian persamaan diatas dibagi dengan

$$\frac{\rho_{o(g)}h_{o(g)}g}{A} \frac{k}{2\sqrt{P_0}} \quad (3.16)$$

Sehingga menjadi

$$P(s) \left[\frac{s}{\frac{\rho_{o(g)}h_{o(g)}g}{A} \frac{k}{2\sqrt{P_0}}} + 1 \right] = \frac{\frac{\rho_{in}h_{in}g}{A}\dot{m}_{win}(s)}{\frac{\rho_{o(g)}h_{o(g)}g}{A} \frac{k}{2\sqrt{P_0}}} \quad (3.17)$$

Sehingga

$$\tau = \frac{s}{\frac{\rho_{o(g)} h_{o(g)} g}{A} \frac{k}{2\sqrt{P_0}}} = \frac{A 2\sqrt{P_0}}{\rho_{o(g)} h_{o(g)} g k} \quad (3.18)$$

$$P_{(s)} \cdot [\tau s + 1] = \frac{\frac{\rho_{in} h_{in} g}{A}}{\frac{\rho_{o(g)} h_{o(g)} g}{A} \frac{k}{2\sqrt{P_0}}} \dot{m}_{win}(s) \quad (3.19)$$

$$K = \frac{\frac{\rho_{in} h_{in} g}{A}}{\frac{\rho_{o(g)} h_{o(g)} g}{A} \frac{k}{2\sqrt{P_0}}} \quad (3.20)$$

$$P_{(s)} = \frac{K}{[\tau s + 1]} \dot{m}_{win}(s) \quad (3.21)$$

$$\frac{P(s)}{\dot{m}_w(s)} = \frac{K}{[\tau s + 1]} \quad (3.22)$$

Keterangan :

P_{in} : Pressure Input (Psi)

$P_{o(g)}$: Pressure output gas/vapor (Psi)

$P_{o(l)}$: Pressure output liquid (Psi)

ρ_g : Massa jenis gas dalam scrubber (kg/m^3)

h_g : Entalpi gas (J/kg)

V_g : Volume gas dalam scrubber (m^3)

ρ_l : Massa jenis liquid dalam scrubber (kg/m^3)

V_l : Volume liquid dalam scrubber (m^3)

q_{in} : Laju aliran masuk (kg/s)

h_{in} : Entalpi gas masuk (J/kg)

$q_{o(l)}$: Laju aliran liquid keluar (kg/s)

$h_{o(l)}$: Entalpi liquid keluar (J/kg)

$q_{o(g)}$: Laju aliran gas keluar (kg/s)

$h_{o(g)}$: Entalpi gas keluar (J/kg)

Dengan memasukkan nilai parameter yang didapat pada tabel 3.1 dan 3.2 untuk τ dan K maka didapat,

$$\tau = \frac{A2\sqrt{P_0}}{\rho_{o(g)}h_{o(g)}gk} \quad (3.23)$$

$$\tau = \frac{0,898 \cdot 2 \sqrt{348,091}}{4,2 \cdot 4,1 \cdot 9,8 \cdot 1} \quad (3.24)$$

$$\tau = \frac{33,508}{168,756} \quad (3.25)$$

$$\tau = 0,1986 \quad (3.26)$$

Sedangkan untuk nilai K didapatkan,

$$K = \frac{\frac{\rho_{in}h_{in}g}{A}}{\frac{\rho_{o(g)}h_{o(g)}g}{A} \frac{k}{2\sqrt{P_0}}} \quad (3.27)$$

$$K = \frac{\rho_{in}h_{in}g}{A} \chi \frac{A}{\rho_{o(g)}h_{o(g)}g} \frac{2\sqrt{P_0}}{k} \quad (3.28)$$

$$K = \frac{\rho_{in}h_{in}2\sqrt{P_0}}{\rho_{o(g)}h_{o(g)}gk} \quad (3.29)$$

$$K = \frac{5,2 \cdot 4,9 \cdot 2\sqrt{348,091}}{4,2 \cdot 4,1 \cdot 1} \quad (3.30)$$

$$K = \frac{950,771}{17,22} \quad (3.31)$$

$$K = 55,213 \quad (3.32)$$

Jadi,

$$\frac{P_{(s)}}{\dot{m}_w(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.33)$$

$$\frac{P_{(s)}}{\dot{m}_w(s)} = \frac{55,213}{0,199s + 1} \quad (3.34)$$

3.3.2 Pemodelan Matematis Aktuator (PV-0105)

Aktuator yang digunakan dalam sistem ini adalah *Control Valve* yang berfungsi untuk mengatur laju aliran dari *scrubber* agar tekanan *output scrubber* sesuai dengan *setpoint*. Model matematik *control valve* diperoleh dengan persamaan (3.35) berikut :

$$\frac{\dot{m}_w(S)}{U(S)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.35)$$

Dimana:

\dot{m}_w (s) = *Manipulated variable* berupa *flow scrubber* (kg/s)

K = *Gain control valve*

$U(s)$ = sinyal kontrol (mA)

τ = *Time constant*

Untuk menghitung *Gain control valve* dengan menggunakan persamaan (3.36) berikut :

$$K_v = K_{i/p} \times K_{aktuator} \quad (3.36)$$

$$K_{i/p} = \frac{(\text{span Output})}{(\text{Span Input})} \quad (3.37)$$

$$K_{aktuator} = \frac{\dot{m}_{bmax} - \dot{m}_{bmin}}{\text{Span Output}} \quad (3.38)$$

Adapun dari *data sheet* dari *control valve* PV-0105 didapatkan beberapa nilai seperti berikut. Untuk *control valve* dengan tipe *I/P Converter* yang mengubah sinyal input 4 - 20 mA menjadi sinyal *pneumatic* 3 -15 psig. Dalam hal ini, *control valve* memiliki masukan sinyal berupa arus listrik kemudian diubah menjadi tekanan untuk menggerakkan stem *control valve*. Gas yang mengalir pada kolom atas *scrubber* dengan laju aliran maksimum sebesar 16 mmscfd dan laju aliran minimum sebesar 12 mmscfd. Maka perhitungan gain *control valve* adalah sebagai berikut.

$$K_{i/p} = \frac{(15-3)psi}{(20-4)mA} = 0,75 \text{ psi/mA} \quad (3.39)$$

$$K_{aktuator} = \frac{(16-12)mmscfd}{(15-3)psi} = 0,33 \text{ mmscfd/psi} \quad (3.40)$$

$$K_v = 0,75 \frac{psi}{mA} \cdot 0,33 \frac{mmscfd}{psi} = 0,25 \text{ mmscfd/mA} \quad (3.41)$$

Nilai waktu konstan pada *control valve* dapat dilihat pada persamaan (3.42) berikut.

$$\tau = T_v (\Delta V + Rv) \quad (3.42)$$

Dimana ΔV berupa fraksi perubahan *control valve*

$$\Delta V = \frac{\dot{m}_b \text{ max} - \dot{m}_b \text{ min}}{\dot{m}_b \text{ max}} = \frac{(16-12) \text{ mmscfd}}{16 \text{ mmscfd}} = 0,25 \quad (3.43)$$

Sedangkan Rv adalah perbandingan waktu konstan inheren dengan time stroke, bernilai 0.03 untuk aktuator diafragma dan 0.3 untuk aktuator piston, untuk $T_v = \frac{Yc}{CV}$, Yc merupakan faktor *stroking time control valve* dimana nilainya adalah 0.68 menurut Lee dan Choi 1999 . Sedangkan dari data desain nilai Cv adalah 117, maka nilai waktu konstan aktuator adalah :

$$\tau = \frac{0,68}{117} (0,25 + 0,03) = 0,252 \quad (3.44)$$

Sehingga fungsi transfer *control valve* PV – 0105 adalah seperti berikut.

$$\frac{\dot{m}_w(s)}{U(s)} = \frac{0,25}{0,252s+1} \quad (3.45)$$

3.3.3 Pemodelan Matematis Sensor (PT-0105)

Untuk sensor tekanan, sensor dari plant adalah *Pressure Trasmmitter*, yaitu suatu alat yang berfungsi untuk mengukur tekanan pada *scrubber* dengan memanfaatkan perbedaan tekanan yang didapat masing-masing *tube transmitter*. Untuk memodelkan sensor diperlukan nilai *time constant* sensor sedangkan nilai *time constant* sensor pada perusahaan tidak diketahui sehingga pemodelan pada sensor menggunakan nilai 1 agar nilai keluaran dari sensor menuju unit pengendali merepresentasikan nilai tekanan yang terukur. (Achmad Rizky Karuniawan, 2018).

3.4 Validasi Model

Setelah mendapatkan pemodelan matematis sistem, maka pemodelan tersebut divalidasi menggunakan *software* Matlab R2014a untuk mengetahui apakah pemodelan tersebut sudah menggambarkan keadaan plant yang sebenarnya di PT. Pertadaya Gas Semarang. Tabel 3.3 merupakan tabel data proses perusahaan dengan beberapa macam bukaan *valve* yang berbeda. OP menunjukkan bukaan *valve*, sedangkan PV menunjukkan *process variable* yang dalam hal ini adalah tekanan dalam satuan psi.

Tabel 3.3 Data Proses Perusahaan PT. Pertadaya Gas Semarang

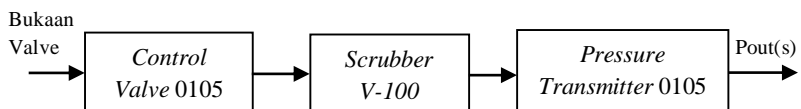
Waktu, Tanggal	OP (%)	PV (psi)
4/4/2019 06.00	25,33	346,113
4/4/2019 10.00	25,42	347,235
4/4/2019 14.00	25,5	348,091
4/4/2019 16.00	25,37	346,702
4/4/2019 19.00	25,2	344,805
4/4/2019 22.00	25,35	345,921
5/4/2019 05.00	25,4	347
5/4/2019 08.00	25,28	345,065
5/4/2019 12.00	25	342,186
5/4/2019 15.00	25,19	344,237
6/4/2019 09.00	25,26	344,989

Dari Tabel 3.3 berupa data *real plant* yang didapatkan dari perusahaan maka dibuat perbandingan antara *process variable* asli dengan *process variable* hasil simulasi beserta hasil nilai perhitungan *error* antara keduanya yang ditunjukkan pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Data Perbandingan antara *Real plant* dengan simulasi

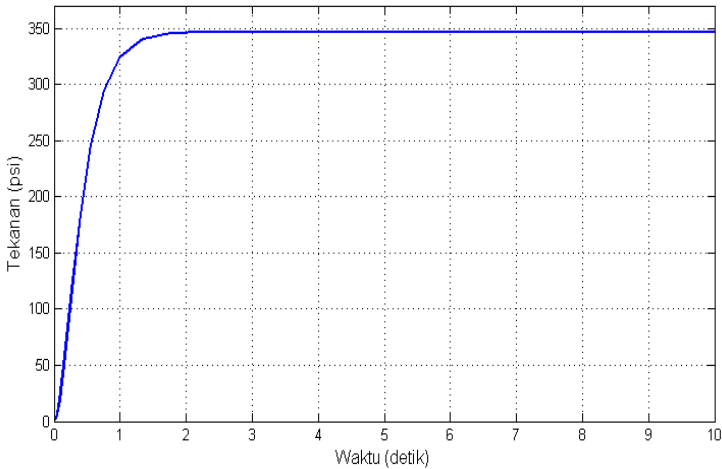
OP (%)	PV real (psi)	Simulasi (psi)	Error (%)
25,33	346,113	349,6	1,01
25,42	347,235	351	1,08
25,5	348,091	352,1	1,15
25,37	346,702	350,2	1,01
25,2	344,805	347,9	0,90
25,35	345,921	349,9	1,15
25,4	347	350,7	1,07
25,28	345,065	349	1,14
25	342,186	345,1	0,85
25,19	344,237	347,7	1,01
25,26	344,989	348,7	1,08

Validasi model dilakukan dengan menggunakan sistem pengendalian *open loop*. Pada Gambar 3.3 merupakan diagram blok sistem pengendalian *open loop*. Sedangkan untuk validasi model fungsi transfer *scrubber* terhadap besarnya bukaan *valve* yang diberikan menggunakan software Matlab R2014a dapat dilihat pada (Lampiran C).



Gambar 3.2 Diagram blok *open loop*

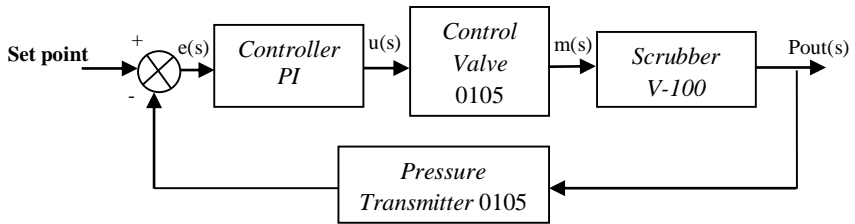
Grafik respon validasi model ditunjukkan pada Gambar 3.4. Pengujian dilakukan dengan memberikan bukaan *valve* sebesar 25%. Pada grafik tersebut terlihat bahwa tekanan yang terbaca pada plant adalah 345,1 psi. Nilai tersebut mendekati dengan tekanan scrubber pada kondisi real yakni sebesar 342,186 psi dengan *error* sebesar 0,85 %. Besar nilai *error* tersebut $\leq 2\%$ sehingga model tersebut dapat dikatakan valid.



Gambar 3.3. Grafik respon *open loop*

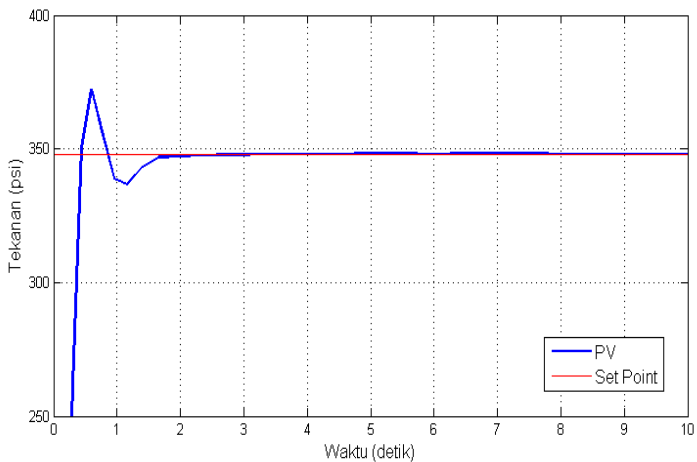
3.5 Perancangan Kontroler PI

Pengendalian tekanan pada *scrubber* menggunakan algoritma kontrol PI. Untuk menentukan *gain* pengendali PI menggunakan metode *trial and error*. Nilai parameter PI untuk K_p sebesar 0,1396 s dan T_i sebesar 0,32947 s. Setelah itu sistem disimulasikan dengan menggunakan *software* Matlab R2014a dengan skema seperti Gambar 3.5



Gambar 3.4 Diagram blok perancangan pengendali PI

Dari Gambar 3.5 dibuat pemodelan perancangan pengendali PI menggunakan *software* matlab R2014a yang dapat dilihat pada (Lampiran D). Didapatkan hasil grafik pada gambar 3.6 yaitu *maximum overshoot* sebesar 7,07%, *settling time* sebesar 1,32 detik, dan *error steady state* sebesar 0,0005%.



Gambar 3.5 Grafik respon pengendali PI

3.6 Perancangan *Fault Tolerant Control* (FTC)

Perancangan *fault tolerance control* (FTC) terdiri dari dua tahap, yakni perancangan *observer*, dan rekonfigurasi kontrol.

3.6.1 Perancangan Observer

Observer berfungsi untuk mendeteksi perubahan akibat kesalahan yang terjadi pada sensor *Pressure Transmitter*. Langkah pertama dalam merancang *observer* adalah merubah fungsi transfer sistem ke dalam bentuk matriks ruang keadaan. Berdasarkan persamaan (2.5) dan (2.6) maka fungsi transfer sistem dapat digambarkan menjadi bentuk matriks seperti pada persamaan (3.46) dan (3.47) berikut.

$$\begin{bmatrix} \frac{dP(t)}{dt} \\ \frac{d\dot{m}_w(t)}{dt} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} P(t) \\ \dot{m}_w(t) \end{bmatrix} + [B][u(t)] \quad (3.46)$$

$$\begin{bmatrix} P(t) \\ \dot{m}_w(t) \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} P(t) \\ \dot{m}_w(t) \end{bmatrix} + [D][u(t)] \quad (3.47)$$

Untuk mencari nilai A didapatkan dari fungsi transfer plant dan aktuator seperti pada persamaan (3.34) dan persamaan (3.45) kemudian di *invers laplace* sehingga hasilnya dapat berubah ke domain waktu seperti yang tertera pada persamaan (3.48) dan (3.49) agar bisa didapatkan nilai dari persamaan ruang keadaan.

- Fungsi transfer *plant*

$$\frac{P(s)}{\dot{m}_w(s)} = \frac{55,213}{0,199s+1}$$

$$P(s)(0,199s + 1) = 55,213 \dot{m}_w(s)$$

$$0,199 P(s) + P(s) = 55,213 \dot{m}_w(s)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{55,213}{0,199} \dot{m}_w(t) - \frac{1}{0,199} P(t)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = 277,45 \dot{m}_w(t) - 5,025 P(t) \quad (3.48)$$

- Fungsi transfer aktuator

$$\frac{\dot{m}_w(s)}{U(s)} = \frac{0,25}{0,252 s + 1}$$

$$\dot{m}_w(s)(0,252 s + 1) = 0,25 U(s)$$

$$0,252 s \dot{m}_w(s) + \dot{m}_w(s) = 0,25 U(s)$$

$$0,252 s \dot{m}_w(s) = 0,25 U(s) - \dot{m}_w(s)$$

$$s \dot{m}_w(s) = 0,992 U(s) - 3,968 \dot{m}_w(s)$$

$$\frac{d\dot{m}_w(t)}{dt} = 0,992 u(t) - 3,968 \dot{m}_w(t) \quad (3.49)$$

Matriks A adalah matriks yang menyatakan state sistem. Berdasarkan penjabaran dari fungsi transfer plant dan aktuator tersebut, maka matriks A bernilai:

$$A = \begin{bmatrix} -5,025 & 277,45 \\ 0 & -3,968 \end{bmatrix}$$

Matriks B merupakan matriks yang menyatakan *input* kontrol sistem. Untuk mencari nilai matriks B didapatkan dari fungsi transfer aktuator, sehingga matriks B bernilai:

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,992 \end{bmatrix}$$

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 sensor (F_s). Dalam tugas akhir ini hanya dianalisa kesalahan sensor, sehingga matriks F_s bernilai:

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

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

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.50)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (3.51)$$

Kemudian *state* baru $z(t)$ ditambahkan, terdapat pada persamaan (2.13) – (2.15). Untuk A_z merupakan matriks identitas (I). Agar dapat mendefinisikan matriks kesalahan sensor, maka bentuk dari matriks ruang keadaan dapat diekspansi menjadi seperti berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z C & -A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ A_z F_s \end{bmatrix} f_s(t) \quad (3.52)$$

$$\dot{y}(t) = [0 \ I] \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Sehingga didapatkan,

$$\begin{aligned}
 Aa &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ Az. C & -Az \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -5.0250 & 277.4500 & 0 & 0 \\ 0 & -3.9680 & 0 & 0 \\ 1.0000 & 0 & -1.0000 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 & -1.0000 \end{bmatrix} \\
 Ba &= \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.9920 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 Ca &= \begin{bmatrix} 0 \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 Ea &= \begin{bmatrix} 0 \\ Az. Fs \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Dari persamaan *state space* (3.55) dan (3.56), persamaan tersebut dapat didefinisikan persamaan baru yang sudah di ekspansi sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{X}}_a(t) &= A_a \hat{X}_a(t) + B_a u(t) + E_a f_s(t) \\
 \dot{y}(t) &= C_a \hat{X}_a(t)
 \end{aligned} \tag{3.54}$$

Untuk memperoleh nilai *gain observer*, maka ditambahkan *state* yang mengandung *gain* agar dapat mengestimasi kesalahan sensor, sehingga ekspansi matriks ruang keadaan baru seperti pada persamaan (2.18). Sehingga dari persamaan (2.18) jika diubah kedalam bentuk yang lebih ringkas akan menjadi seperti persamaan (2.19) dan (2.20). Dari bentuk (2.19) dan (2.20) dapat

diubah menjadi persamaan keadaan dan persamaan keluaran *observer* seperti pada persamaan (2.21) dan (2.22). Dengan mensubstitusikan nilai matriks Aa , Ca dan Ea yang didapat dari persamaan (2.19) sampai dengan (2.22) maka, diperoleh nilai matriks \tilde{A}_a dan \tilde{C}_a sebagai berikut.

$$\tilde{A}_a = \begin{bmatrix} Aa & 0 \\ Az.C & -Az \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -5.0250 & 277.4500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3.9680 & 0 & 0 & 0 \\ 1.0000 & 0 & -1.0000 & 0 & 1.0000 \\ 0 & 1.0000 & 0 & -1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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

Untuk dapat menyelesaikan *Observer* maka diperlukan pemilihan dari nilai *pole* yang didapatkan dengan menggunakan metode *pole placement* pada software Matlab R2014a, nilai *pole* sistem yang dipakai adalah

$$\begin{aligned} p1 &= -54,4047 + 33,5101i \\ p2 &= -54,4047 - 33,5101i \\ p3 &= -2,7588 + 0,0000i \\ p4 &= -0,1951 + 0,0000i \\ p5 &= -0,5291 + 0,0000i \end{aligned}$$

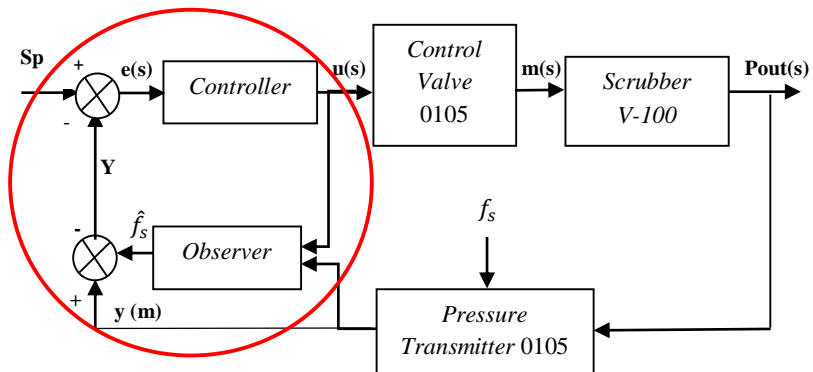
Didapatkan nilai *gain observer* dari nilai *pole placement* tersebut secara otomatis dengan menggunakan perangkat lunak Matlab R2014a dengan *syntax* “*place*” bernilai sebagai berikut.

$$Ke = \begin{bmatrix} -80.0016 & 0.6563 & 8.4656 & -0.2843 & 0.2234 \\ 18.9379 & -0.2651 & 3.4306 & 0.0377 & 0.0301 \end{bmatrix}$$

Setelah nilai gain observer didapatkan maka langkah selanjutnya adalah menyusun skema perancangan observer. Untuk skema perancangan *observer* dapat dilihat di (Lampiran G) dan untuk *syntax* perancangan *observer* di (Lampiran F).

3.6.2 Perancangan Rekonfigurasi Kontrol

Rekonfigurasi kontrol merupakan tahap akhir untuk merancang FTC yang bertujuan untuk mengembalikan kestabilan sistem ketika terjadi kesalahan sehingga plant tetap dapat beroperasi dalam kondisi normal. Skema rekonfigurasi kontrol akibat kesalahan sensor ditunjukkan oleh lingkaran merah pada gambar 3.8 berikut. Untuk skema perancangan rekonfigurasi kontrol menggunakan software Matlab R2014a dapat dilihat di (Lampiran H).



Gambar 3.6 Skema rekonfigurasi kontrol

3.7 Uji Performansi

Uji performansi dilakukan untuk mengetahui apakah algoritma FTC yang telah dibuat dapat berjalan dengan baik atau tidak. Uji ini dilakukan dengan memberikan suatu kesalahan pada sensor berupa uji kesalahan bias dan kesalahan sentivitas.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

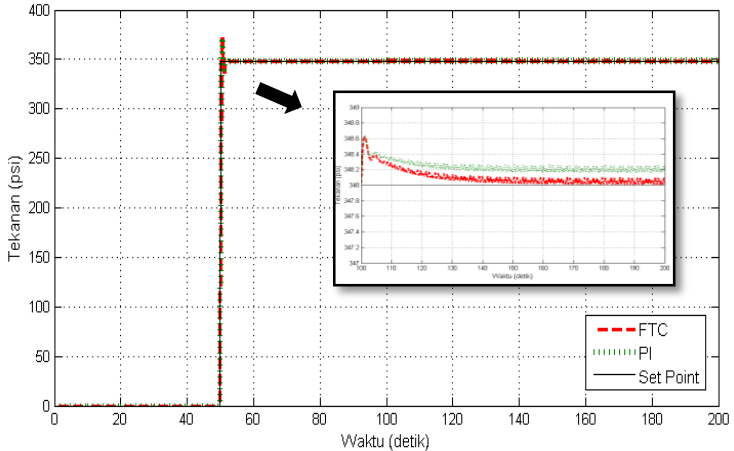
Pada bab ini dijelaskan mengenai hasil dan analisa dari perancangan FTC (*Fault Tolerant Control*) pada sistem pengendalian tekanan di *scrubber* selanjutnya dilakukan uji performansi sistem. Hal ini bertujuan untuk mengetahui algoritma FTC (*Fault Tolerant Control*) yang telah dirancang dapat bekerja dengan baik atau tidak jika dikenai kesalahan pada sensor *pressure transmitter*. Kesalahan sensor yang dikenai berupa kesalahan sensitivitas, dan bias. 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 dikenai kesalahan yakni pada detik ke-100.

4.1 Uji Kesalahan Bias

Untuk menguji performansi dari sistem pengendalian tekanan maka dikenai kesalahan pada sensor *pressure transmitter* berupa kesalahan bias. Bias merupakan penyimpangan nilai dari nilai tetapan yang telah ditentukan. Bias dalam pengukuran juga bisa disebut dengan nilai *Error Sistematis*. *Error Sistematis* 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 (Achmad Rizky Karuniawan, 2018). Semakin kecil nilai biasnya maka nilai *error steady state* juga semakin kecil begitupun sebaliknya. Berdasarkan data kalibrasi PT. Pertadaya Gas Semarang selama setahun belakangan yang tertera pada lampiran (H) ditunjukkan bahwa akurasi dari *pressure transmitter* sebesar $\pm 0,15\%$, hal tersebut menunjukkan bahwa bias dari *pressure transmitter* berpotensi mencapai angka 0% - 0,15%. Dalam uji kesalahan sensor pengujian dilakukan dengan memberikan bias maksimalnya yaitu -0,15% dan +0,15%. Kesalahan bias dikenai pada detik ke- 100.

4.1.1 Uji Kesalahan Bias -0,15%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-100 ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Respon sistem pengendalian dengan kesalahan bias -0,15%

Tabel 4.1 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias -0,15%

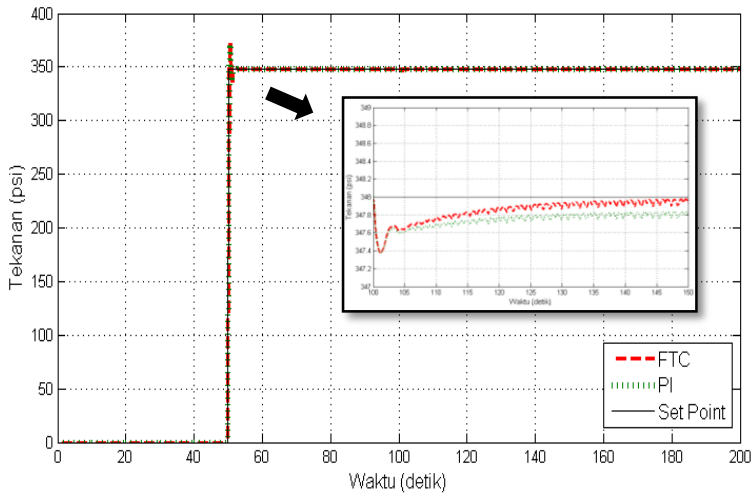
No	Parameter	PI dengan FTC	PI tanpa FTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	0,147 %	0,180 %
2	<i>Settling Time</i>	14 detik	17 detik
3	<i>Error steady state</i>	0,003 %	0,046 %

Pada Gambar 4.1 serta penjabaran nilai parameter performansi sistem yang tampak pada tabel 4.1, terlihat bahwa performansi dalam sistem pengendalian FTC dapat mengatasi

kesalahan bias $-0,15\%$ lebih baik daripada sistem pengendalian tanpa FTC. Dari segi parameter performansi sistem yaitu *maximum overshoot* saat diberi kesalahan bias $-0,15\%$ dengan algoritma FTC sebesar $0,147\%$ sedangkan dengan algoritma PI saja tanpa FTC sebesar $0,180\%$. Untuk waktu menuju *steady* saat diberi kesalahan bias $-0,15\%$ memiliki *settling time* sebesar 14 detik dengan algoritma FTC dan memiliki *error steady state* sebesar $0,003\%$. Sedangkan tanpa algoritma FTC memiliki *settling time* yaitu sebesar 17 detik dan tidak dapat menolerir kesalahan yang terjadi dan memiliki *error steady state* yang lebih besar dibandingkan dengan algoritma FTC yakni sebesar $0,046\%$.

4.1.2 Uji Kesalahan Bias $+0,15\%$

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-100 ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.2 Respon sistem pengendalian dengan kesalahan bias $+0,15$ psi

Tabel 4.2 Parameter Performansi dengan Kesalahan Bias +0,15%

No	Parameter	PI dengan FTC	PI tanpa FTC
1	<i>Maximum undershoot</i>	0,178 %	0,201 %
2	<i>Settling Time</i>	18 detik	25 detik
3	<i>Error steady state</i>	0,006 %	0,049 %

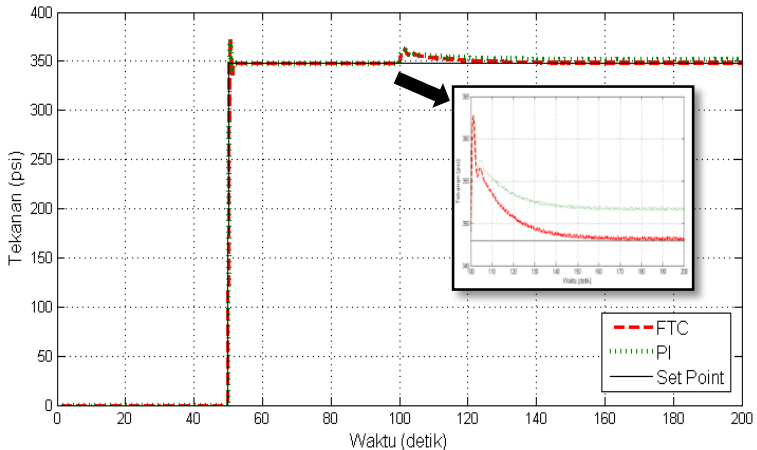
Pada Gambar 4.2 serta penjabaran nilai parameter performansi sistem yang tampak pada tabel 4.2, terlihat bahwa performansi dalam sistem pengendalian FTC dapat mengatasi kesalahan bias +0,15% lebih baik daripada sistem pengendalian tanpa FTC. Dari segi parameter performansi sistem yaitu *maximum undershoot* saat diberi kesalahan bias -0,15 psi dengan algoritma FTC sebesar 0,178% sedangkan dengan algoritma PI saja tanpa FTC sebesar 0,201%. Untuk waktu menuju *steady* saat diberi kesalahan bias -0,15% memiliki *settling time* sebesar 18 detik dengan algoritma FTC dan memiliki *error steady state* sebesar 0,006%. Sedangkan tanpa algoritma FTC memiliki *settling time* yaitu sebesar 25 detik dan tidak dapat menolerir kesalahan yang terjadi dan memiliki *error steady state* yang lebih besar dibandingkan dengan algoritma FTC yakni sebesar 0,049%.

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. Nilai sensitivitas yang dikenai pada uji ini adalah 1%, 2%, 5%, 8% dan 15%.

4.2.1 Uji Kesalahan Sensitivitas 1%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-100 ditunjukkan pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Respon sistem pengendalian dengan kesalahan sensitivitas 1%

Tabel 4.3 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 1%

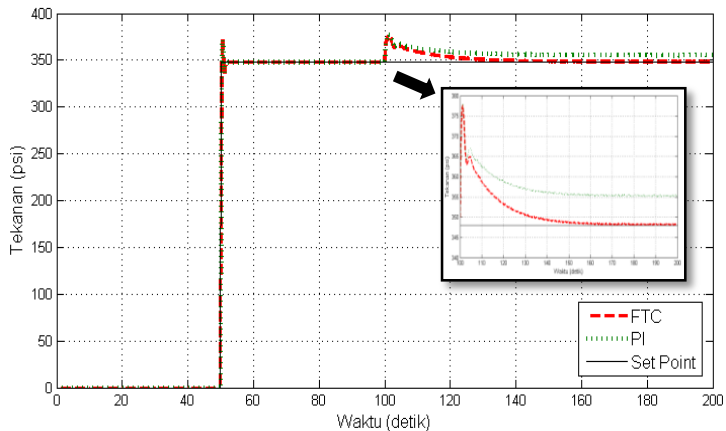
No	Parameter	PI dengan FTC	PI tanpa FTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	4,224 %	4,310 %
2	<i>Settling Time</i>	32 detik	40 detik
3	<i>Error steady state</i>	0,009 %	0,871 %

Pada Gambar 4.3 serta penjabaran nilai parameter performansi sistem yang tampak pada tabel 4.3, terlihat bahwa performansi dalam sistem pengendalian FTC dapat mengatasi

kesalahan sensitivitas 1% lebih baik daripada sistem pengendalian tanpa FTC. Kesalahan sensitivitas tersebut berarti sensor kehilangan 1% dari sinyal *output*-nya. Dari segi parameter performansi sistem yaitu *maximum overshoot* saat dikenai kesalahan sensitivitas 1% dengan algoritma FTC sebesar 4,224 % sedangkan dengan algoritma PI saja tanpa FTC sebesar 4,310 %. Untuk waktu menuju keadaan *steady* saat dikenai kesalahan sensitivitas 1% dengan algoritma FTC memiliki *settling time* sebesar 32 detik dan memiliki *error steady state* sebesar 0,009% yang menunjukkan bahwa FTC mampu menolerir kesalahan dan dapat kembali menuju set point semula. Sedangkan tanpa algoritma FTC memiliki *settling time* yaitu sebesar 40 detik dan tidak dapat menolerir kesalahan yang terjadi dikarenakan sistem tidak mampu kembali menuju *setpoint* semula dan memiliki *error steady state* yang lebih besar dibandingkan dengan algoritma FTC yakni sebesar 0,871%.

4.2.2 Uji Kesalahan Sensitivitas 2%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-100 ditunjukkan pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Respon sistem pengendalian dengan kesalahan sensitivitas 2%

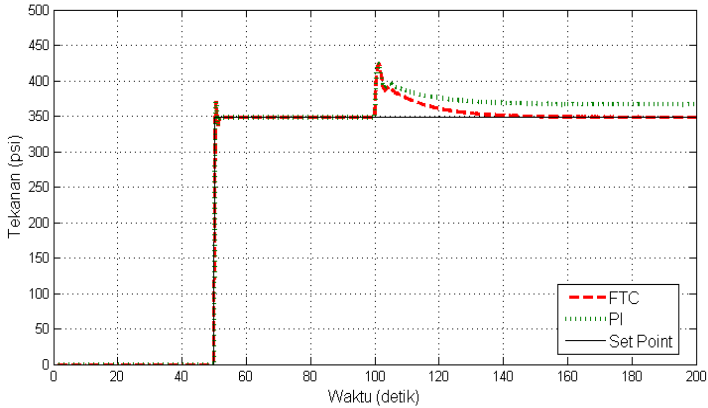
Tabel 4.4 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 2%

No	Parameter	PI dengan FTC	PI tanpa FTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	8,477 %	8,621 %
2	<i>Settling Time</i>	38 detik	45 detik
3	<i>Error steady state</i>	0,023 %	2,069 %

Pada Gambar 4.4 serta penjabaran nilai parameter performansi sistem yang tampak pada tabel 4.4, terlihat bahwa performansi dalam sistem pengendalian FTC dapat mengatasi kesalahan sensitivitas 2% lebih baik daripada sistem pengendalian tanpa FTC. Kesalahan sensitivitas tersebut berarti sensor kehilangan 2% dari sinyal *output*-nya. Dari segi parameter performansi sistem yaitu *maximum overshoot* saat dikenai kesalahan sensitivitas 2% dengan algoritma FTC sebesar 8,477 % sedangkan dengan algoritma PI saja tanpa FTC sebesar 8,621 %. Untuk waktu menuju keadaan *steady* saat dikenai kesalahan sensitivitas 2% dengan algoritma FTC memiliki *settling time* sebesar 38 detik dan memiliki *error steady state* sebesar 0,023% yang menunjukkan bahwa FTC mampu menolerir kesalahan dan dapat kembali menuju set point semula. Sedangkan tanpa algoritma FTC memiliki *settling time* yaitu sebesar 45 detik dan tidak dapat menolerir kesalahan yang terjadi dikarenakan sistem tidak mampu kembali menuju *setpoint* semula dan memiliki *error steady state* yang lebih besar dibandingkan dengan algoritma FTC yakni sebesar 2,069%.

4.2.3 Uji Kesalahan Sensitivitas 5%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-100 ditunjukkan pada Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4.5 Respon sistem pengendalian dengan kesalahan sensitivitas 5%

Tabel 4.5 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 5%

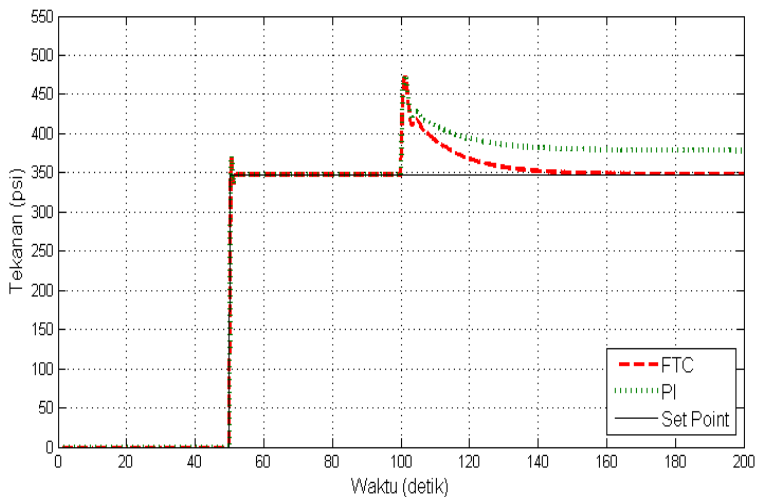
No	Parameter	PI dengan FTC	PI tanpa FTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	21,839 %	22,270 %
2	<i>Settling Time</i>	44 detik	50 detik
3	<i>Error steady state</i>	0,023 %	5,316 %

Pada Gambar 4.5 serta penjabaran nilai parameter performansi sistem yang tampak pada tabel 4.5, terlihat bahwa performansi dalam sistem pengendalian FTC dapat mengatasi kesalahan sensitivitas 5% lebih baik daripada sistem pengendalian tanpa FTC. Kesalahan sensitivitas tersebut berarti sensor

kehilangan 5% dari sinyal *output-nya*. Dari segi parameter performansi sistem yaitu *maximum overshoot* saat dikenai kesalahan sensitivitas 5% dengan algoritma FTC sebesar 21,839 % sedangkan dengan algoritma PI saja tanpa FTC sebesar 22,270 %. Untuk waktu menuju keadaan *steady* saat dikenai kesalahan sensitivitas 5% dengan algoritma FTC memiliki *settling time* sebesar 44 detik dan memiliki *error steady state* sebesar 0,023% yang menunjukkan bahwa FTC mampu menolerir kesalahan dan dapat kembali menuju set point semula. Sedangkan tanpa algoritma FTC memiliki *settling time* yaitu sebesar 50 detik dan tidak dapat menolerir kesalahan yang terjadi dikarenakan sistem tidak mampu kembali menuju *setpoint* semula dan memiliki *error steady state* yang lebih besar dibandingkan dengan algoritma FTC yakni sebesar 5,316%.

4.2.4 Uji Kesalahan Sensitivitas 8%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-100 ditunjukkan pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 Respon sistem pengendalian dengan kesalahan sensitivitas 8%

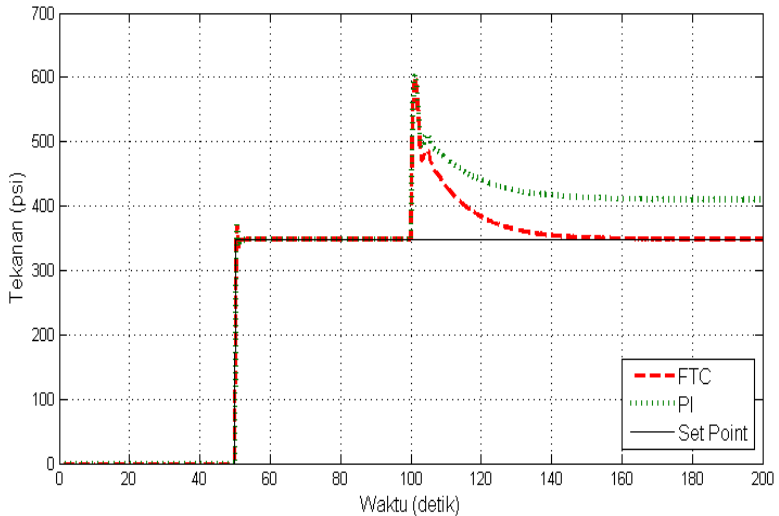
Tabel 4.6 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 8%

No	Parameter	PI dengan FTC	PI tanpa FTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	36,063 %	37,213 %
2	<i>Settling Time</i>	47 detik	52 detik
3	<i>Error steady state</i>	0,023 %	8,707 %

Pada Gambar 4.6 serta penjabaran nilai parameter performansi sistem yang tampak pada tabel 4.6, terlihat bahwa performansi dalam sistem pengendalian FTC dapat mengatasi kesalahan sensitivitas 8% lebih baik daripada sistem pengendalian tanpa FTC. Kesalahan sensitivitas tersebut berarti sensor kehilangan 8% dari sinyal *output*-nya. Dari segi parameter performansi sistem yaitu *maximum overshoot* saat dikenai kesalahan sensitivitas 8% dengan algoritma FTC sebesar 36,063 % sedangkan dengan algoritma PI saja tanpa FTC sebesar 37,213 %. Untuk waktu menuju keadaan *steady* saat dikenai kesalahan sensitivitas 8% dengan algoritma FTC memiliki *settling time* sebesar 47 detik dan memiliki *error steady state* sebesar 0,023% yang menunjukkan bahwa FTC mampu menolerir kesalahan dan dapat kembali menuju set point semula. Sedangkan tanpa algoritma FTC memiliki *settling time* yaitu sebesar 52 detik dan tidak dapat menolerir kesalahan yang terjadi dikarenakan sistem tidak mampu kembali menuju *setpoint* semula dan memiliki *error steady state* yang lebih besar dibandingkan dengan algoritma FTC yakni sebesar 8,707%.

4.2.5 Uji Kesalahan Sensitivitas 15%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-100 ditunjukkan pada Gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7 Respon sistem pengendalian dengan kesalahan sensitivitas 15%

Tabel 4.7 Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 15%

No	Parameter	PI dengan FTC	PI tanpa FTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	72,845 %	74,138 %
2	<i>Settling Time</i>	50 detik	55 detik
3	<i>Error steady state</i>	0,026 %	17,672 %

Pada Gambar 4.7 serta penjabaran nilai parameter performansi sistem yang tampak pada tabel 4.7, terlihat bahwa performansi dalam sistem pengendalian FTC dapat mengatasi kesalahan sensitivitas 15% lebih baik daripada sistem pengendalian tanpa FTC. Kesalahan sensitivitas tersebut berarti sensor kehilangan 15% dari sinyal *output-nya*. Dari segi parameter performansi sistem yaitu *maximum overshoot* saat dikenai kesalahan sensitivitas 15% dengan algoritma FTC sebesar 72,845% sedangkan dengan algoritma PI saja tanpa FTC sebesar 74,138%. Untuk waktu menuju keadaan *steady* saat dikenai kesalahan sensitivitas 15% dengan algoritma FTC memiliki *settling time* sebesar 50 detik dan memiliki *error steady state* sebesar 0,026% yang menunjukkan bahwa FTC mampu menolerir kesalahan dan dapat kembali menuju set point semula. Sedangkan tanpa algoritma FTC memiliki *settling time* yaitu sebesar 55 detik dan tidak dapat menolerir kesalahan yang terjadi dikarenakan sistem tidak mampu kembali menuju *setpoint* semula dan memiliki *error steady state* yang lebih besar dibandingkan dengan algoritma FTC yakni sebesar 17,672%.

Dari segi parameter, baik *maximum overshoot*, *maximum undershoot*, *settling time* dan *error steady state* ketika dikenai kesalahan bias sebesar $\pm 0,15\%$ ataupun kesalahan sensitivitas sebesar 1%, 2%, 5%, 8% dan 15% sistem pengendalian dengan algoritma FTC memiliki nilai lebih kecil daripada sistem pengendalian tanpa algoritma FTC. Semakin kecil nilai parameter tersebut, maka semakin baik performansinya. Hal ini disebabkan oleh adanya rekonfigurasi pengendali yang bekerja untuk mengatasi kesalahan tersebut. Maka dari itu, sistem pengendalian yang menggunakan algoritma FTC memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem pengendalian tanpa menggunakan algoritma FTC.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa data yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan dari tugas akhir ini mengenai perancangan *Fault Tolerant Control (FTC)* pada *Scrubber*, yaitu sebagai berikut :

- a. Perancangan FTC pada sistem pengendalian tekanan *scrubber* yang telah dilakukan mampu menolerir kesalahan sensor, yakni kesalahan sensitivitas 2%-15% dan kesalahan bias $\pm 0,15\%$.
- b. Performa sistem pengendali PI yang dilengkapi algoritma FTC lebih baik daripada sistem pengendali PI tanpa FTC dalam menolerir adanya kesalahan sensor yang terjadi. Hal ini ditunjukkan dari hasil uji kesalahan sensor sebagai berikut:
 - Pada uji kesalahan sensitivitas 2%, sistem pengendali PI yang dilengkapi FTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 8,477%, *settling time* 38 detik, dan *error steady state* sebesar 0,023%, sedangkan sistem pengendali PI tanpa FTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 8,621%, *settling time* 45 detik, dan *error steady state* sebesar 2,069%.
 - Pada uji kesalahan bias -0,15%, sistem pengendali PI yang dilengkapi FTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 0,147%, *settling time* 14 detik, dan *error steady state* sebesar 0,003%, sedangkan sistem pengendali PI tanpa FTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 0,180%, *settling time* 17 detik, dan *error steady state* sebesar 0,46%.

5.2 Saran

Saran yang diberikan penulis untuk penelitian selanjutnya mengenai FTC adalah dalam skala industri, FTC dapat digunakan sebagai suatu sistem keamanan yang juga dapat meningkatkan keandalan suatu komponen untuk meningkatkan produktivitas kerja sistem.

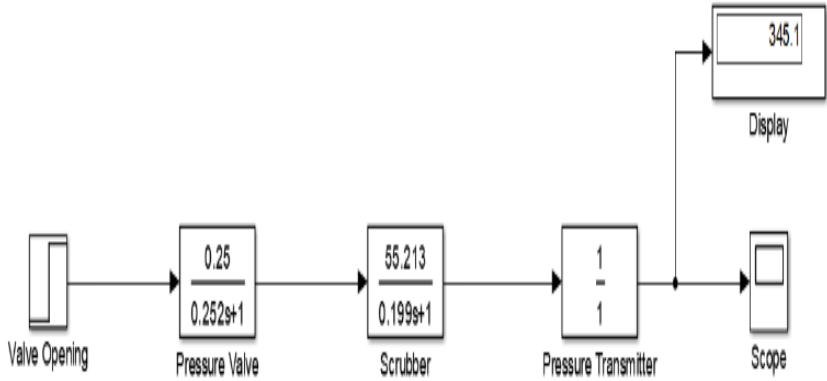
Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

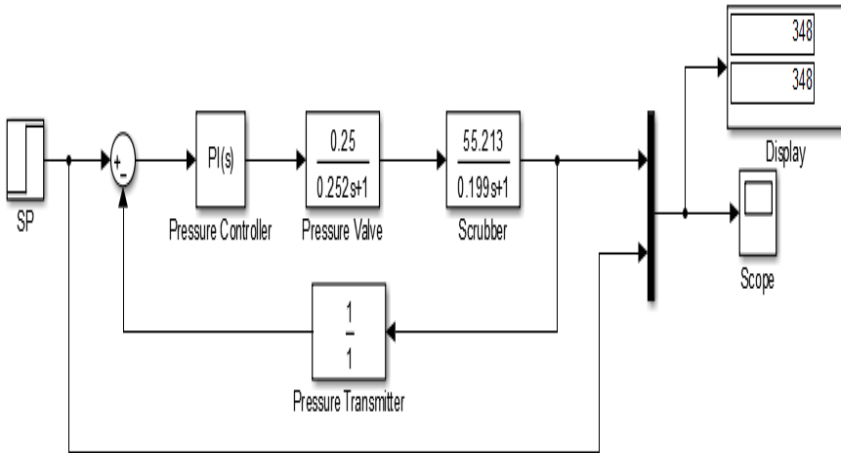
- Achmad Rizky Karuniawan. (2018). Perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) Pada Sistem Pengendalian Temperatur Superheater PLTU PJB Gresik Dengan Kesalahan Sensor. ITS: Teknik Fisika.
- A Dr. A.H Younger P. Eng. (2004). *Natural Gas Processing Principles and Technology – Part 1*. University Of Calgary.
- ENI Saipem Indonesia. (2013). Separator Selection and Processing Sizing. CR-COR-ENG_PRC-001-E.
- F F. Gunterus. (1997). Falsafah Dasar : Sistem Pengendalian Proses, Elex Media Komputindo. Jakarta
- Joga Dharma Setiawan, Yuhanes Dedy Setiawan. (2012). *Modeling And Simulation Of Scrubber System Dynamic In Gas Refinery Plant*. Semarang: Univeristas Diponegoro
- Katsuhiko, Ogata. (2010). *Modern Control Engineering*. New Delhi
- K. Indriawati, A. Jazidie, and T. Agustinah. (2015). *Reconfigurable Controller Based On Fuzzy Descriptor Observer for Nonlinear Systems With Sensor Faults, Applied Mechanics and Materials*. vol. 771, pp.59-62.
- K. Indriawati, N. Sebe, T. Agustinah and A. Jazidie. (2015). *Robust Fuzzy Observer-Based Fault Tolerant Tracking Control For Nonlinear System With Simultaneous Actuator and Sensor Faults: Application to DC Series Motor Speed Drive*. vol. 8, no. 6, pp. 375-385.
- K. Ogata. (1997). *Modern Control Engineering*, 3rd ed. New Jersey: Prentice-Hall Inc
- Noura, Hassan; Theilliol, Didier; Ponsart, Jean Christophe; Chamseddin, Abbas. (2009). *Fault-Tolerant Control System*. London
- Pradnya A. Putri, Shinta S. Hajar,dkk. (2013). *Plant Design of Cluster LNG (Liquefied Natural Gas) in Bukit Tua Well, Gresik*. ITS: Teknik Kimia

- Siyuan Wang. (2000). *The Adoption of Liquefied Natural Gas (LNG) as a Ship Fuel: a Systematic Review of Perspectives and Challenges*. Belgium: University of Antwerp.
- Youmin Zhang, Jin Jiang. (2008). *Bibliographical Review on Reconfigurable Fault Tolerant Control System*. *Annual Reviews in Control*, vol. 32 , issue 2, pp. 229-252

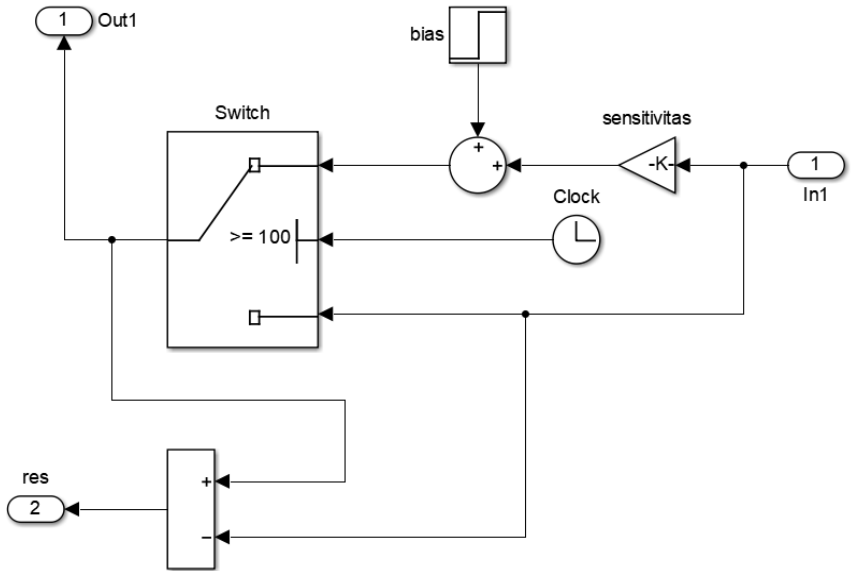
LAMPIRAN C
Simulink Matlab R2014a Skema



LAMPIRAN D
Simulink Matlab R2014a Skema Closed Loop

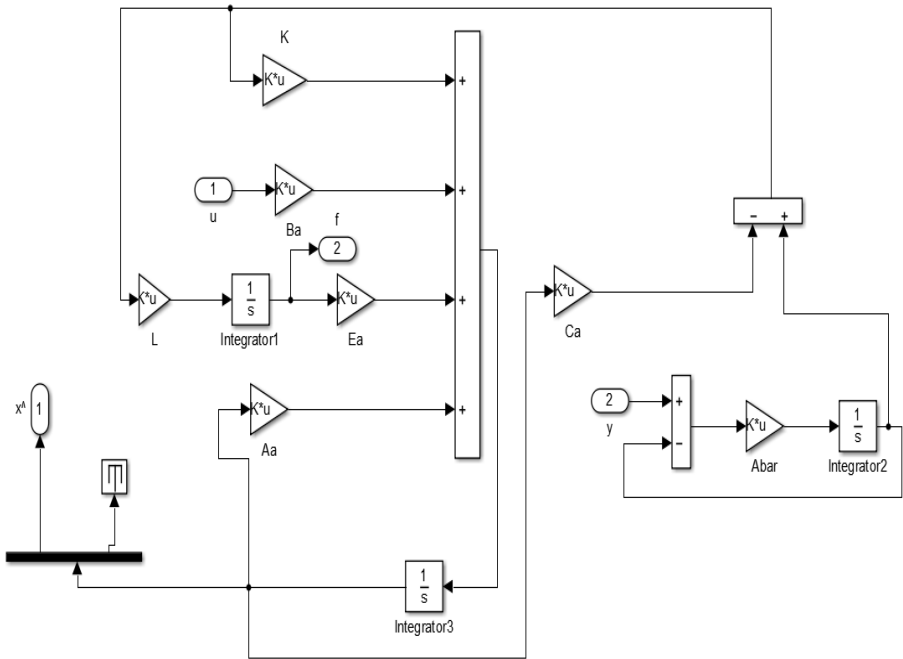


LAMPIRAN E
Simulink Matlab R2014a Skema *Fault Sensor*



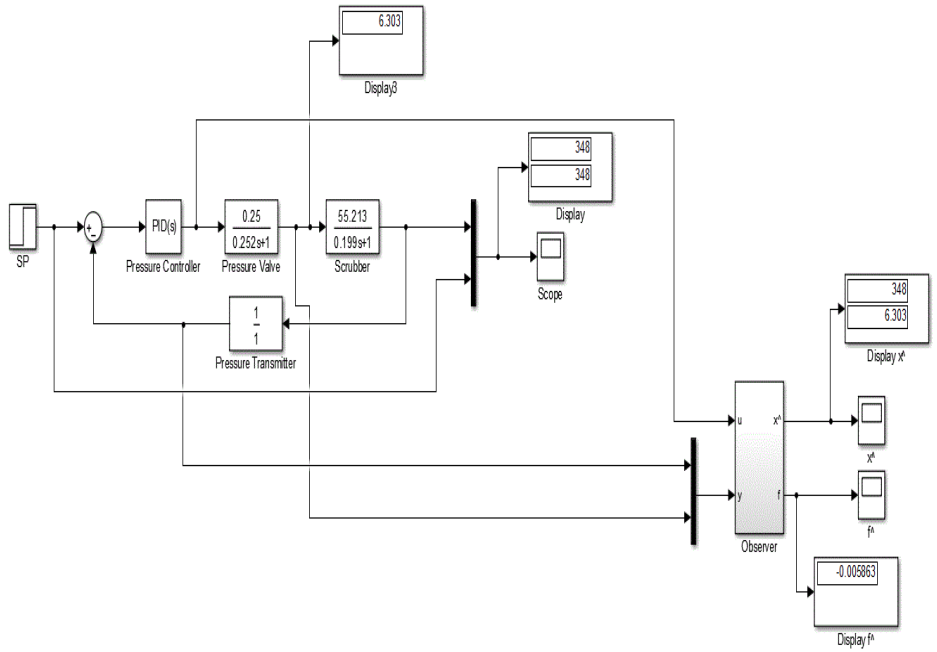
LAMPIRAN G

Simulink Matlab R2014a Skema Observer



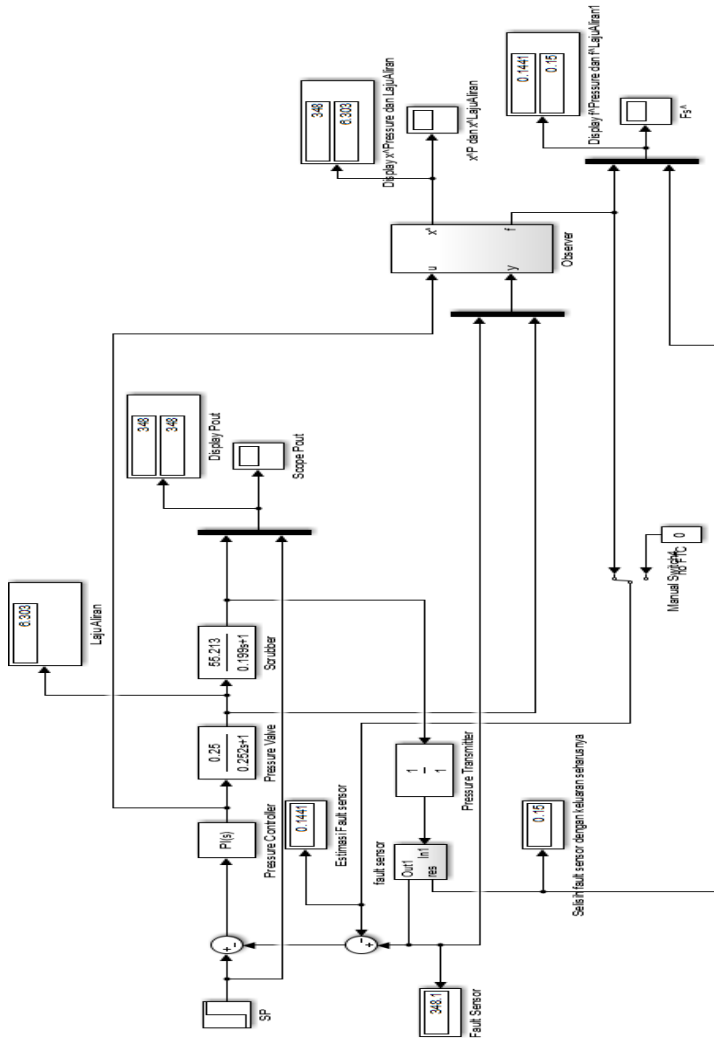
LAMPIRAN H

Simulink Matlab R2014a Skema Rekonfigurasi Kontrol



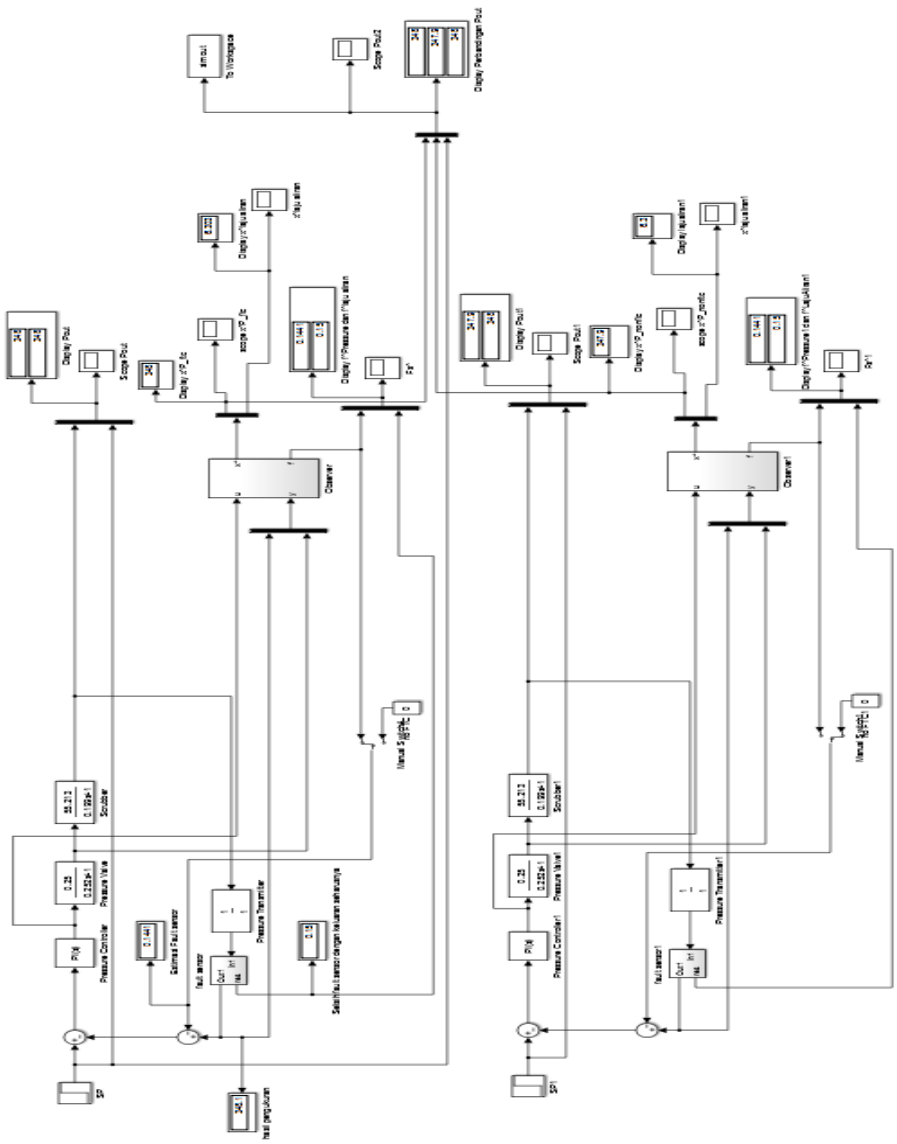
LAMPIRAN I

Simulink Matlab R2014a Skema Perancangan FTC




LAMPIRAN J

Simulink Matlab R2014a Skema Perbandingan FTC dan PI



LAMPIRAN K

Datasheet Scrubber V-100

 HEAT TRANSFER TECHNOLOGY	PRESSURE VESSEL MECHANICAL & STRENGTH CALCULATION GAS SCRUBBER V-100 REV. 2
DATA SHEET FOR MECHANICAL CALCULATIONS	
DESIGN CODE	: ASME VIII DIV. 1 2010 EDITION +2011 ADDENDA
CODE STAMP	: NOT REQUIRED
ITEM NUMBER	: V-100
SERVICE	: GAS SCRUBBER
CAPACITY	: 2500 Liters
POSITION (Vertical or Horizontal)	: VERTICAL
NAME OF FLUID	: GAS
DIAMETER (Inside)	: 1070 (mm)
LENGTH (TL - TL)	: 2480 (mm)
DESIGN PRESSURE	: 34 (BarG))*1
VACUUM CONDITION	: - (BarG)
OPERATING PRESSURE	: 20.6 / 30.9 (BarG)
DESIGN TEMPERATURE	: 69 (Deg. C)
OPERATING TEMPERATURE	: 26.7 / 51.7 (Deg. C)
MEAN METAL TEMPERATURE	: - (Deg. C)
MMT CALCULATED	: -29 (Deg. C)
CORROSION ALLOWANCE	: 3 (mm)
CLADDING	: - (mm)
LONG. JOINT EFFICIENCY	: 1
HYDROTEST PRESSURE	: 45.66 (BarG)
LOWEST RATIO	: 1
MAWP (HOT & CORRODED)	: 35.12 (BarG)
LINING PART	: NOZZLE
MAP (COLD & NEW)	: 40.12 (BarG)
LIMITING PART	: NOZZLE
RADIOGRAPHY	: FULL
ULTRASONIC TESTING	: -
POST WELD HEAT TREATMENT	: NOT REQD
HARDNESS TESTING	: NOT REQD
IMPACT TESTED	: NOT REQD
TEMPERATURE IMPACT	: - (Deg. C)
WIND LOAD	: ASCE 7-98
SEISMIC LOAD	: UBC-97, 2A
FLANGE TYPE	: WNRF
FLANGE CLASS	: 300#
MAXIMUM ALLOWABLE FLANGE	: 49.06 (BarG))*2
RATING PRESSURE	: -
MAXIMUM HYDRO PRESS. FOR FLANGE RATING PRESSURE)	: 77 (BarG)
MATERIAL SPECIFICATION	
MAIN PART MATERIALS	
SHELL	: SA516-70
HEAD/CLOSURE	: SA516-70
FLANGE/ FORGING NOZZLES	: SA105
NOZZLES PIPE	: SA106-B
SUPPORT	: SA516-70 / A36
NOTE:	
1. Design pressure is not include static head.	
2. Refer to ASME B16.5 Material Group 1.1 (SA 105 Flange).	

LAMPIRAN L

Data Kalibrasi Sensor Pressure Transmitter PT-0105

成績表 TEST CERTIFICATE			
製品名称 圧力伝送器 PRODUCT NAME Gauge Pressure Transmitter		タグ No. TAG NO. PT-0105	
形名 MODEL EJA630E-JCS7N-01DDL/FUI/D3/A/N4/M15		スタイル STYLE S1	
手配 No. ORDER NO. 2001112199-000010-0004		計器番号 SERIAL NO. 91N824656	
測定範囲 MEASURING RANGE 0 - 40 bar		外観 APPEARANCE 良, GOOD	
入出力特性 INPUT/OUTPUT CHARACTERISTICS 許容差 ACCURACY : ± 0.150 % of span			
入力 INPUT	出力 OUTPUT		
圧力 PRESSURE	基準値 DESIRED	誤差 ERROR (of span)	
(bar)	(mA)	↓ 上昇 INC. (%)	↑ 下降 DEC. (%)
0.000	4	+0.006	+0.010
20.000	12	+0.011	+0.013
40.000	20	+0.010	

項目 ITEM	結果 RESULT
絶縁抵抗 INSULATION RESISTANCE	出力端子(+,-端子間短絡)-GND OUTPUT TERM. (BETWEEN +/- TERM. SHORTED)-GND 20MΩ/100 V DC 良, GOOD
耐電圧 DIELECTRIC STRENGTH	出力端子(+,-端子間短絡)-GND OUTPUT TERM. (BETWEEN +/- TERM. SHORTED)-GND 100V AC/1 min 良, GOOD
内蔵指示計 INTEGRAL INDICATOR	許容差(入出力特性許容差)+(±0.1%) ACCURACY (INPUT/OUTPUT CHARACTERISTICS ACCURACY)+(±0.1%) 良, GOOD
プロセス接続口 PROCESS CONNECTION	HIGH 1/2 NPT male 良, GOOD
	LOW =====
配線接続口 CONDUIT HOLE	Two M20 × 1.5 and PLUG(316) 良, GOOD
I/FO 寸法検査 I/FO DIMENSIONAL CHECK	オリフィス口径 ORIFICE BORE SIZE =====
通信機能 COMMUNICATION FUNCTION	検査基準参照 REFER TO INSPECTION STD. 良, GOOD
ステータス接点出力 STATUS OUTPUT	検査基準参照 REFER TO INSPECTION STD. =====

NOTES

日付 DATE 2013-06-20	室内温度・湿度 AMBIENT TEMP. & HUM. 23 °C & 53 %
検査者 INSPECTOR I. Osada	承認者 APPROVED BY A. Matsuda <i>A.M</i>

BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis adalah Putri Merlisa Wahyuningrum, lahir di kota Surabaya tanggal 16 Agustus 1996. Penulis tinggal di Griya Permata Hijau N-18 Sidoarjo. Penulis telah menyelesaikan pendidikan formal, yaitu di SDN Balongsari 1 Mojokerto, SMPN 4 Mojokerto, SMAN 2 Mojokerto, D3 Teknik Instrumentasi ITS. Kemudian, diterima di Program Lintas Jalur Departemen Teknik Fisika ITS. Penulis fokus pada bidang minat rekayasa instrumentasi dan kontrol untuk menyelesaikan tugas akhirnya. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi mengenai tugas akhir ini, dapat menghubungi penulis melalui *email*: putrimerlisa26@gmail.com.