



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERANCANGAN  
SISTEM KENDALI TUNGKU AUTOCLAVE**

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik**

**SUGENG RIANTO  
NPM. 0906578402**

**PROGRAM PASCASARJANA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
DEPOK  
DESEMBER 2011**

i

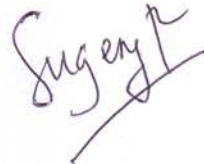
## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Sugeng Rianto

NPM : 0906578402

Tanda Tangan :

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Sugeng Rianto', with a horizontal line underneath.



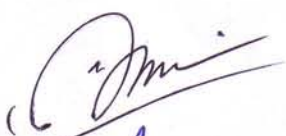

Tanggal : 17 Januari 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Thesis ini diajukan oleh :  
Nama : Sugeng Rianto  
NPM : 0906578402  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Thesis : Perancangan Sistem Kendali Tungku Autoclave

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Abdul Halim, M.Eng (  )  
Penguji : Dr. Ir. Feri Yusivar, M.Eng (  )  
Penguji : Dr. Abdul Muis, ST, M.Eng (  )  
Penguji : Ir. Aries Subiantoro, MS.EE (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal 17 Januari 2012  
Perancangan sistem..., Sugeng Rianto, FTUI, 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala kasih sayang dan kemurahan-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan seminar ini. Penulisan tesis ini adalah salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dari berbagai pihak sangat sulit bagi saya untuk dapat menyelesaikan penulisan tesis ini. Oleh karena itu saya mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Dr. Abdul Halim, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikirannya untuk mengarahkan saya dalam penulisan tesis ini.
2. Segenap Karyawan Bidang Bahan Bakar Nuklir PTBN – BATAN yang telah banyak membantu dalam menyediakan peralatan dan simulasi pengujian alat.
3. Keluarga besar saya yang selalu mendoakan saya agar selalu berhasil.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas kebaikan berlipat-lipat bagi semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat sebesar-besarnya.

Depok, 17 Januari 2012

Penulis

Sugeng Rianto

**HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI THESIS UNTUK  
KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Sugeng Rianto

NPM : 0906578402

Program Studi : Teknik Elektro kekhususan Teknik Kontrol Industri

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Thesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul : Perancangan Sistem Kendali Tungku Autoclave.

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 17 Januari 2012

Yang Menyatakan



Perancangan sistem, Sugeng Rianto, FTUI, 2011  
(Sugeng Rianto)

## **ABSTRAK**

Nama : Sugeng Rianto

Program Studi : Teknik Elektro

Judul : Perancangan Sistem Kendali Tungku Autoclave

Autoclave adalah suatu perangkat yang digunakan sebagai pasifasi (membuat pasif) material logam guna menekan laju korosi logam tersebut sehingga bahan logam akan memiliki laju korosi yang rendah. Khusus untuk autoclave model ME – 24 yang ada di Laboratorium Instalasi Elemen Bakar Nuklir PTBN – BATAN berfungsi untuk meningkatkan kekuatan berkas elemen bakar nuklir terhadap korosi, dimana pada pengerjaan autoclaving ini akan terbentuk lapisan pelindung oksida-ZrO<sub>2</sub> pada permukaan batang elemen bakar nuklir. Pada tesis ini dibahas pemodelan sistem tungku autoclave secara eksperimen langsung pada alat. Model yang diperoleh selanjutnya dilakukan simulasi model sistem dan dirancang sistem kendalinya guna mendapatkan sistem pengendalian yang optimal. Hasil eksperimen dengan sistem kontrol PI didapat untuk pengaturan suhu 200°C dicapai pada 9246 detik dengan kesalahan pada saat kondisi tunak adalah 2,38% untuk keluaran thermocouple 3.

Kata kunci:

Autoclave, pasifasi, pemodelan, simulasi, sistem kendali PI.

## **ABSTRACT**

Name : Sugeng Rianto

Study Program : Electrical Engineering

Title : Design of Autoclave Control System

Autoclave is a device used as a passivation (make passive) of metallic materials in order to suppress the rate of corrosion of metal so that metal will have a low corrosion rate. Especially the autoclave model ME - 24 at the Laboratory of Nuclear Fuel Element Installation PTBN - BATAN serves to increase the beam power of nuclear fuel elements against corrosion, which in this autoclaving workmanship will form a protective ZrO<sub>2</sub>-oxide layer on the surface of the rod nuclear fuel elements. This thesis discusses an autoclave furnace system modeling based experiments the appliance. The model obtained is then performed as simulation model of the system, and PI control system is designed to gain optimal system. The results of experiments has shown that for setting print 200°C the system has achieved steady state at 9246 s with error 2.38% for thermocouple number 3.

Keyword:

Autoclave, passivation, modeling, simulation, PI control system

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
1. PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Penelitian .....	2
1.4. Manfaat Penelitian .....	2
1.5. Batasan Masalah .....	3
1.6. Sistematika Penulisan .....	3
2. LANDASAN TEORI .....	4
2.1. Sistem Tungku Autoclave.....	4
2.1.1. Sistem mekanik dan pneumatik tungku autoclave .....	5
2.1.2. Sistem elektrikal tungku autoclave .....	6
2.1.3. Instrumentasi sistem pemanas tungku autoclave .....	8
2.2. Identifikasi Sistem.....	10
2.3. Perancangan Pengendali Model Ciancone .....	11
2.4. Sistem Model Proses Decoupling .....	13
2.4.1. Ideal Decoupling .....	14
2.4.2. Model Inverted Decoupling .....	15
2.5. Analisa Parameter PI terhadap keluaran sistem .....	18
3. PERANCANGAN SISTEM .....	21
3.1. Perancangan Sistem Perangkat Keras .....	21
3.1.1. Sistem Akuisisi Data .....	21
3.1.2. Driver Heater .....	24
3.2. Perancangan perangkat lunak .....	25
3.2.1. Perangkat lunak labview .....	26

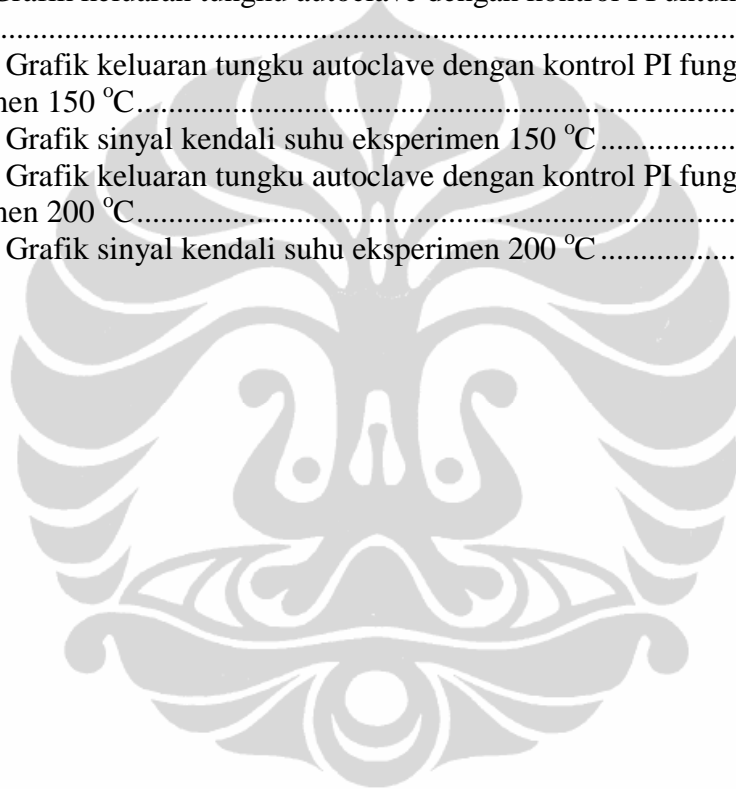
3.2.2. Sistem Perangkat Lunak Pengujian fungsi step .....	27
3.3. Prosedur Pemodelan Tungku Autoclave .....	28
4. PEMODELAN DAN SIMULASI SISTEM TUNGKU AUTOCLAVE .....	30
4.1 Pengujian fungsi step heater.....	30
4.1.1. Pengujian Fungsi Step Heater Zona 1 .....	30
4.1.2. Pengujian Fungsi Step Heater Zona 2 .....	31
4.1.3. Pengujian Fungsi Step Heater Zona 3 .....	33
4.2. Model Sistem Tungku Autoclave .....	34
4.3. Validasi Model Sistem Tungku Autoclave .....	35
4.3.1. Validasi model untuk Heater 1 .....	35
4.3.2. Validasi model untuk Heater 2 .....	37
4.3.3. Validasi model untuk Heater 3 .....	38
4.3.4. Validasi model penurunan suhu dan kenaikan suhu .....	40
5. PERANCANGAN SISTEM KENDALI AUTOCLAVE .....	41
5.1. Model Sistem Tungku Autoclave .....	41
5.2. Decoupling dengan penurunan langsung .....	44
5.3. Decoupling dengan Model Inverted Decoupling .....	45
5.4. Parameter Kontrol PI proses .....	45
5.5. Pengujian Simulasi dan Pembahasan.....	46
5.5.1. Simulasi Uji lingkaran terbuka .....	46
5.5.2. Simulasi Model Decoupling dengan penurunan langsung.....	47
5.5.3. Simulasi Model Inverted Decoupling .....	51
5.5.4. Pengujian Model Inverted Decoupling dengan eksperimen .....	54
6. KESIMPULAN .....	59
DAFTAR PUSTAKA .....	60
LAMPIRAN .....	61



## DAFTAR GAMBAR

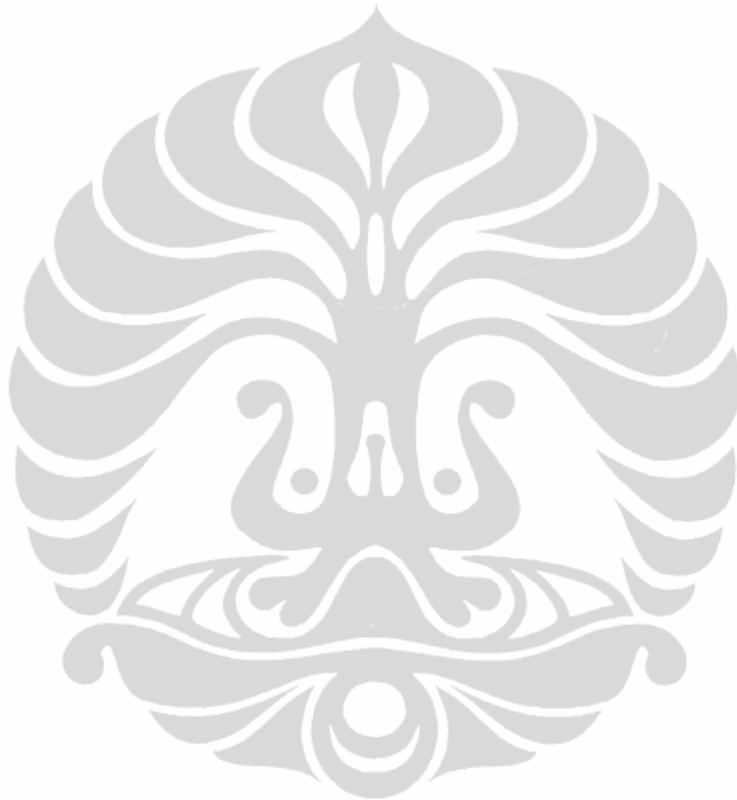
Gambar 1.1. Berkas elemen baker nuklir type Cirene .....	1
Gambar 2.1. Sistem Tungku Autoclave .....	4
Gambar 2.2. Tungku Autoclave ketika dibuka tutupnya .....	5
Gambar 2.3. Sistem pneumatic tungku Autoclave .....	6
Gambar 2.4. Diagram sistem pneumatic tungku autoclave .....	6
Gambar 2.5. Panel sistem elektrik tungku autoclave .....	7
Gambar 2.6. Diagram sistem elektrik tungku autoclave .....	8
Gambar 2.7. Thermocouple pada Heater dan Chamber .....	9
Gambar 2.8. Elemen Pemanas tungku Autoclave .....	9
Gambar 2.9. Menentukan model dengan ciancone .....	10
Gambar 2.10. Model Proporsional .....	11
Gambar 2.11. Model Integral .....	12
Gambar 2.12. Grafik Ciancone PI.....	13
Gambar 2.13. Blok Diagram sistem model tungku dengan decoupling .....	14
Gambar 2.13. Matriks Represtasi dari Inverted Decoupling .....	16
Gambar 2.14. Blok diagram sistem Plant SISO .....	18
Gambar 2.15. Respon close lop fungsi step terhadap penguatan (Kp) .....	19
Gambar 2.16. Respon close lop fungsi step terhadap Ti untuk kontrol PI.....	20
Gambar 3.1. Rangkaian Sistem Akuisisi Data Tungku autoclave .....	22
Gambar 3.2. Modul Advantech ADAM 4018.....	23
Gambar 3.3. Modul Advantech ADAM 4011.....	23
Gambar 3.4. Modul Advantech ADAM 4050.....	24
Gambar 3.5. Modul Advantech ADAM 4520.....	24
Gambar 3.6. Solid State Relay (SSR) .....	25
Gambar 3.7. Rangkaian Driver Solid State Relay ( SSR ).....	25
Gambar 3.8. Tampilan Labview untuk Identifikasi Tungku autoclave .....	26
Gambar 3.9. Listing program untuk pengukuran suhu chamber.....	27
Gambar 3.10. Listing program untuk driver sistem pemanas ( heater ) alat .....	28
Gambar 4.1. Grafik respon suhu chamber dengan unit <i>step</i> untuk heater 1 .....	30
Gambar 4.2. Grafik respon suhu chamber dengan unit <i>step</i> untuk heater 2 .....	32
Gambar 4.3. Grafik respon suhu chamber dengan unit <i>step</i> untuk heater 3.....	33
Gambar 4.4. Grafik respon suhu turun chamber dengan unit <i>step</i> untuk heater 1 ...	35
Gambar 4.5. Grafik respon suhu turun chamber $G_{11}(s)$ .....	36
Gambar 4.6. Grafik respon suhu turun chamber $G_{21}(s)$ .....	37
Gambar 4.7. Grafik respon suhu turun chamber $G_{31}(s)$ .....	37
Gambar 4.8. Grafik respon suhu turun chamber dengan unit <i>step</i> untuk heater 2 ...	38
Gambar 4.9. Grafik respon suhu turun chamber $G_{12}(s)$ .....	39
Gambar 4.10. Grafik respon suhu turun chamber $G_{22}(s)$ .....	39
Gambar 4.11. Grafik respon suhu turun chamber $G_{32}(s)$ .....	40
Gambar 4.12. Grafik respon suhu turun chamber dengan unit <i>step</i> untuk heater 3 ..	41
Gambar 4.13. Grafik respon suhu turun chamber $G_{13}(s)$ .....	41
Gambar 4.14. Grafik respon suhu turun chamber $G_{23}(s)$ .....	42
Gambar 4.15. Grafik respon suhu turun chamber $G_{33}(s)$ .....	43

Gambar 5.1. Blok sistem diagram model tungku autoclave .....	45
Gambar 5.2. Blok sistem diagram model tungku dengan decoupling & kontrol PI.	47
Gambar 5.3. Grafik keluaran open loop model autoclave .....	48
Gambar 5.4. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI 150 °C.....	48
Gambar 5.5. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI setelah dilakukan pengaturan penguatan dengan sinyal masukannya.....	49
Gambar 5.6. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI untuk fungsi ramp .....	51
Gambar 5.7. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI 200 °C.....	52
Gambar 5.8. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI hasil pengaturan penguatan .....	53
Gambar 5.9. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI untuk fungsi ramp 200 °C.....	54
Gambar 5.10. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI fungsi ramp suhu eksperimen 150 °C.....	55
Gambar 5.11. Grafik sinyal kendali suhu eksperimen 150 °C .....	56
Gambar 5.12. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI fungsi ramp suhu eksperimen 200 °C.....	57
Gambar 5.13. Grafik sinyal kendali suhu eksperimen 200 °C .....	58



## DAFTAR TABEL

Tabel 5.1. keluaran fungsi step 200 °C .....	50
Tabel 5.2. keluaran fungsi ramp 200 °C .....	51
Tabel 5.3. keluaran fungsi ramp 150 °C eksperimen .....	55
Tabel 5.4. keluaran fungsi ramp 200 °C eksperimen .....	57



## DAFTAR LAMPIRAN

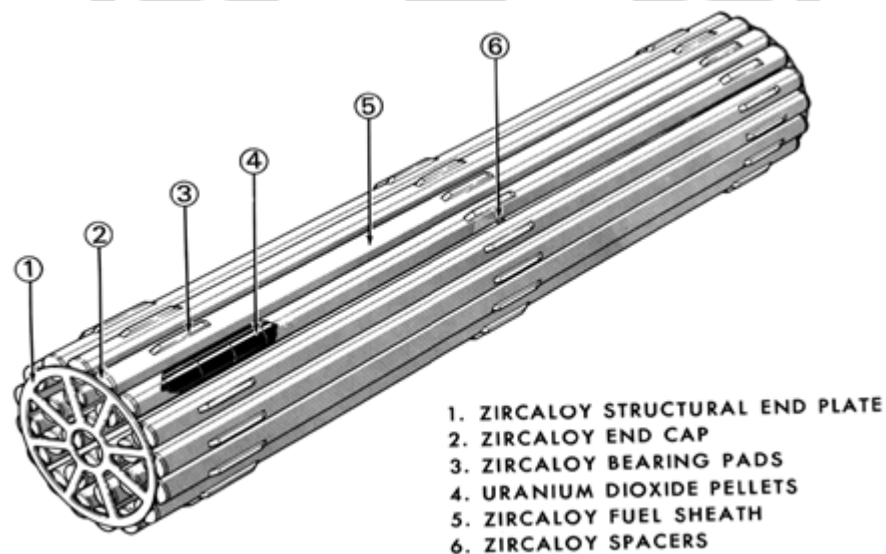
Lampiran 1. Gambar Simulink Simulasi sistem decoupling untuk fungsi step 150°C dan 200 °C .....	61
Lampiran 2. Simulasi Labview Ramp setting 200 °C dan listing programnya .....	62
Lampiran 3. Simulasi Labview Step setting 200 °C dan listing programnya .....	63
Lampiran 4. Listing program Kontrol PI dengan Inverted Decoupling .....	64



## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Dalam usaha untuk mendukung keamanan ketersediaan energi 2025, maka pemerintah membuat kebijakan untuk melaksanakan penelitian dan pengembangan PLTN. Untuk mendukung penguasaan teknologi PLTN di Indonesia maka perlu dilakukan penelitian terhadap teknologi PLTN. Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE) merupakan salah satu Instalasi nuklir di PTBN – BATAN yang salah satu fungsinya untuk melaksanakan pengembangan teknologi produksi bahan bakar reaktor daya (PLTN), khususnya dalam pengembangan fabrikasi berkas bahan bakar reaktor air berat type HWR-cirene dengan bahan bakar nuklir berbasis pelet  $UO_2$  sinter dalam kelongsong Zirkaloy kedap<sup>[1]</sup>.



Gambar 1.1. Berkas elemen baker nuklir type Cirene

Salah satu pengujian untuk meningkatkan kekuatan berkas Elemen Bakar Nuklir terhadap korosi, dilakukan pengerjaan *autoclaving* yang merupakan tahap terakhir dari proses fabrikasi. Proses *autoclaving* berfungsi untuk mempasivasi elemen bakar nuklir sehingga terbentuk lapisan pelindung (lapisan tipis oksida- $ZrO_2$ ) pada permukaan batang elemen bakar nuklir yang berfungsi untuk menahan korosi<sup>[3]</sup>. *Autoclaving* dilakukan dalam tungku autoclave yang berisi uap air pada

temperatur sekitar  $300^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 10 atm selama waktu operasi 24 jam. Untuk lebih meningkatkan unjuk kerja alat tungku autoclave ini, dilakukan perancangan sistem kendali autoclave berbasis komputer, yang sebelumnya dilakukan dengan kontroller biasa.

Sebagai tahap awal dari perancangan sistem kendali autoclave ini, maka akan dilakukan identifikasi sistem guna mendapatkan model sistem alat autoclave secara eksperimen dengan memberikan fungsi *step* terhadap masukan. Respon keluaran fungsi *step* berupa kenaikan temperatur alat ini, kemudian dibuat modelnya. Hasil model ini kemudian dibuat sistem kendalinya dengan simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab/Simulink, dan eksperimen langsung dengan alat.

#### 1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dapat dibuat rumusan berikut:

- Bagaimana mengidentifikasi sistem secara eksperimen, sehingga alat autoclave didapat model matematisnya.
- Bagaimana membuat simulasi dan analisis rancangan sistem kendali alat autoclave dengan perangkat lunak matlab/Simulink.

#### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan pemodelan dari sistem alat autoclave. Dari model ini kemudian dibuat sistem kendalinya sehingga didapat sistem pengendalian alat autoclave yang optimal.

#### 1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan karakteristik dari sistem alat autoclave berupa model matematis, dan selanjutnya dapat dibuat sistem kendali yang tepat untuk alat autoclave ini sehingga dapat menghasilkan proses pasivasi elemen bakar nuklir berupa lapisan oksida pelindung pada permukaan batang elemen bakar nuklir yang baik.

#### 1.5. Batasan Penelitian

Dalam tesis ini, ditetapkan batasan-batasan dari penelitian sebagai berikut:

- Identifikasi alat autoclave yang dilakukan adalah pada parameter suhu saja, sedangkan tekanan alat autoclave akan naik sejalan dengan kenaikan suhu, nilai tekanan ini tidak dikendalikan hanya dibatasi nilai limitnya menggunakan safety control valve.
- Identifikasi alat autoclave dilakukan secara eksperimen, dengan sistem pemanasan suhu menggunakan *heater* elektrik (sistem pemanas listrik) dengan jangkauan pengaturan suhu pada sistem alat dibatasi sampai 300°C.
- Pengendali sistem dilakukan dengan simulasi sistem dan langsung eksperimen terhadap alat pada beban kosong (tanpa sampel), dengan pengaturan suhu 150°C dan suhu 200°C.

#### 1.6. Sistematika Penulisan

Tulisan ini terdiri dari enam bab yang disusun secara sistematis. Bab 1 memuat bagian pendahuluan mencakup latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab 2 dari tulisan ini menguraikan landasan teori yang memuat teori dasar mengenai sistem tungku autoclave, sistem perangkat keras kendali tungku autoclave, sistem perangkat lunak kendali tungku autoclave, identifikasi proses sistem tungku autoclave dan perancangan sistem pengendali. Bab 3 dari tulisan ini membahas perancangan sistem, terdiri dari perancangan perangkat keras, perangkat lunak dan prosedur pemodelan. Bab 4 tulisan ini membahas pemodelan sistem tungku autoclave, terdiri dari hasil pengujian fungsi *step* tungku dan pembuatan model. Bab 5 membahas perancangan sistem kendali tungku, dengan pengujian secara simulasi menggunakan matlab/Simulink dan eksperimen langsung dengan alat. Bab 6 mencakup kesimpulan.

## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Sistem Tungku Autoclave

Autoclave secara umum adalah suatu perangkat yang digunakan sebagai pasifasi (membuat pasif) material logam guna menekan laju korosi logam tersebut, dengan kondisi pasif ini, logam akan memiliki laju korosi yang rendah. Khusus untuk autoclave model ME – 24 yang ada di Laboratorium Instalasi Elemen Bakar Nuklir PTBN – BATAN berfungsi untuk meningkatkan kekuatan berkas elemen bakar nuklir terhadap korosi, dimana pada pengerjaan autoclaving ini akan terbentuk lapisan pelindung (lapisan tipis oksida-ZrO<sub>2</sub>) pada permukaan batang elemen bakar nuklir. Dalam operasinya, alat autoclave ini sanggup menguji sampai 9 bundel bahan bakar nuklir yang dibagi menjadi 3 kelompok secara berderet. Tiap bundel bahan bakar nuklir mempunyai berat kurang lebih 28 kg.<sup>[4]</sup>

Proses Autoclaving dilakukan dalam tungku autoclave yang berisi uap air jenuh pada temperatur kerja 300 °C dan tekanan sampai dengan 10 bar selama waktu 24 jam. Proses autoclaving ini yang merupakan tahap terakhir dari tahapan proses fabrikasi elemen bakar nuklir.<sup>[3]</sup>



Gambar 2.1.Sistem Tungku Autoclave



Nilai temperatur pada chamber diatas harus dibuat konstan guna terbentuknya lapisan oksida lapisan pelindung oksida zirkaloy pada permukaan batang elemen bakar nuklir. Kestabilan suhu ini berpengaruh terhadap kerataan permukaan batang elemen bakar nuklir. Faktor – faktor yang mempengaruhi ketidakstabilan suhu pada chamber autoclave ini adalah bahwa sistem pemanas yang bekerja selain berfungsi untuk menaikkan suhu air dan uap air, juga digunakan untuk mengubah fasa air dari zat cair menjadi uap, selain itu juga sistem tekanan uap air yang spontan naik sebanding dengan peningkatan suhu uap air.<sup>[2]</sup>

Bagian – bagian dari sistem tungku autoclave ini, terdiri dari sistem mekanik tungku, sistem pneumatik tungku, sistem elektrikal tungku dan sistem instrumentasi dan kendali tungku.

### 2.1.1. Sistem mekanik dan pneumatik tungku autoclave

Sistem autoclave terdiri dari sebuah tungku silinder terbuat dari bahan stainless steel dengan diameter dalam 35 cm yang terisolasi dengan bahan wool, tinggi silinder 250 cm dan ketebalan silinder adalah 1 cm. Kapasitas dari tungku autoclave ini adalah 240 liter. Untuk keperluan pengujian tungku di beri air murni hasil distilasi dengan kapasitas air 5 sampai 10 liter.<sup>[4]</sup>



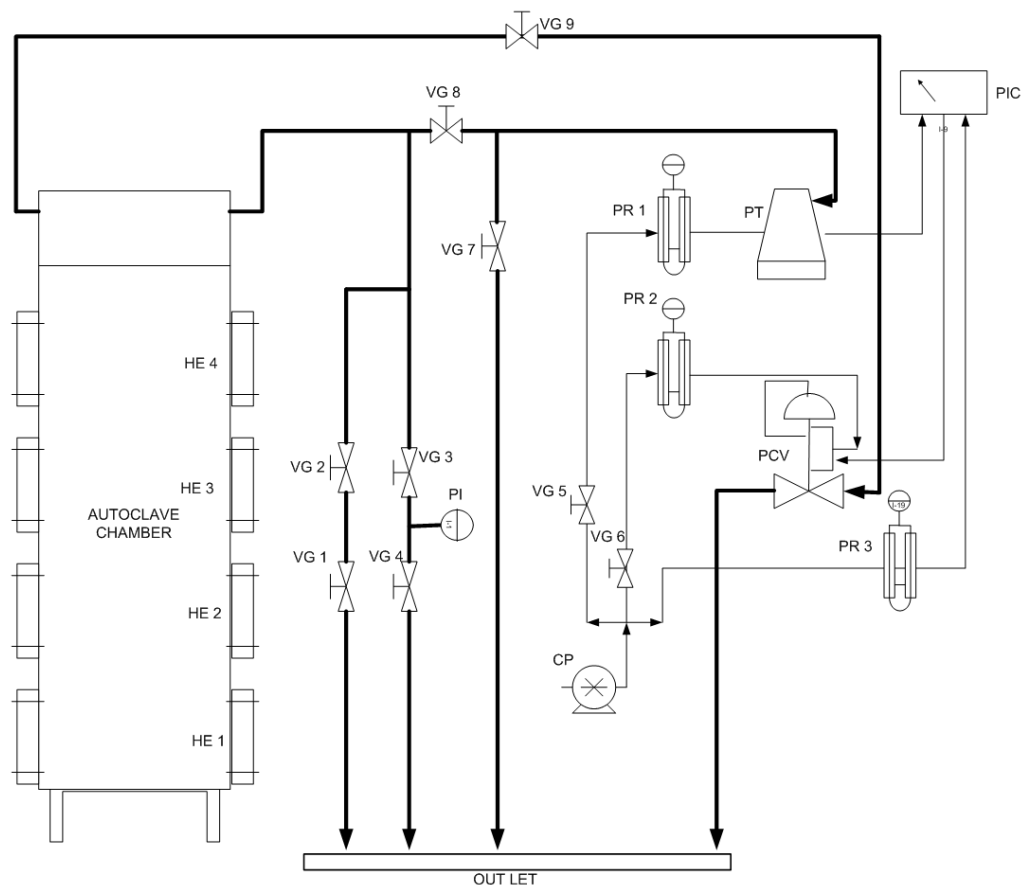
Gambar 2.2. Tungku Autoclave ketika dibuka tutupnya

Sistem mekanik tungku ini dihubungkan dengan sistem pneumatik yang berfungsi untuk mengendalikan tekanan operasi autoclave sesuai yang diinginkan oleh proses. Sistem pneumatik terdiri dari pressure transducer, control valve, manual valve dan pneumatic controller.



Gambar 2.3. Sistem pneumatic tungku Autoclave

Diagram dari sistem pneumatic tungku autoclave digambarkan di bawah ini :



Gambar 2.4. Diagram sistem pneumatic tungku autoclave

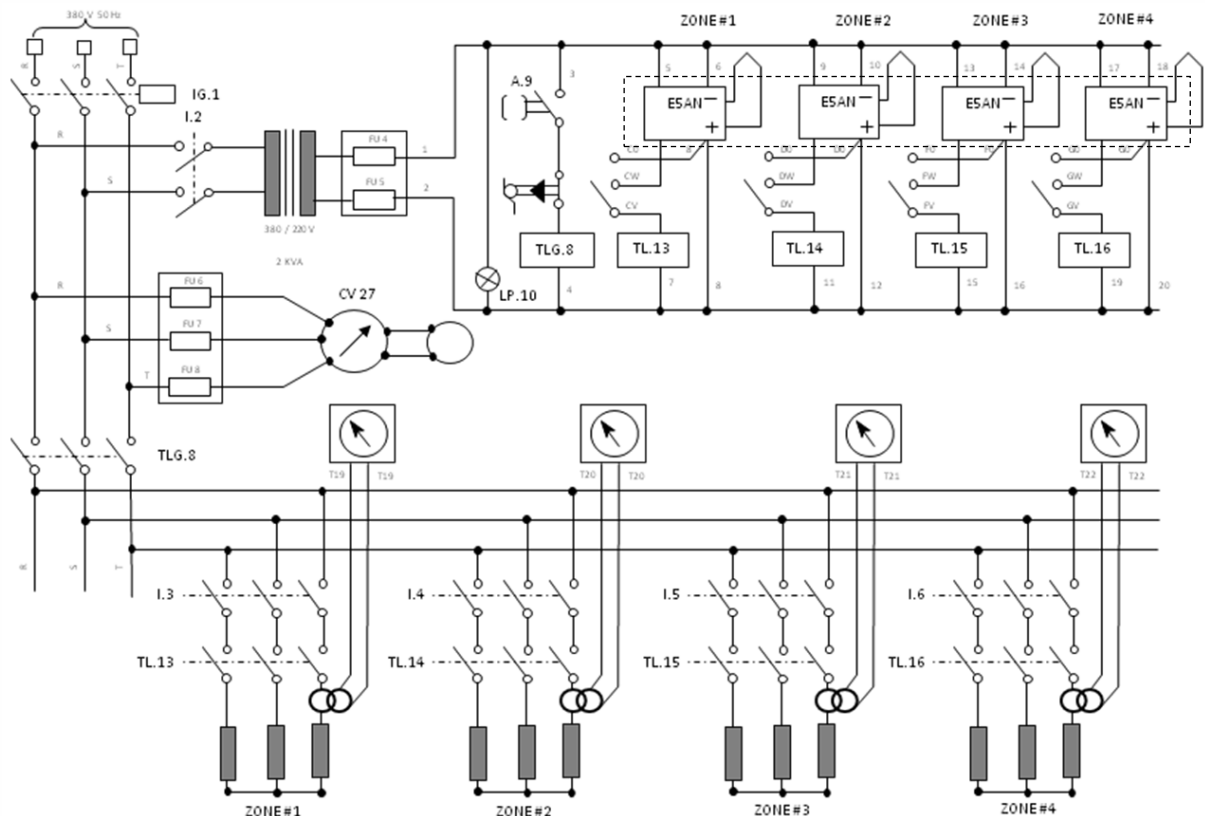
### 2.1.2. sistem elektrikal tungku autoclave

Sistem elektrikal tungku autoclave berfungsi untuk supply sistem tungku. Sistem tungku pemanas alat terdiri dari 4 *heater* 3 fasa tegangan AC 380 V, yang

masing-masing mempunyai daya 10 Kw, sehingga total daya sistem alat adalah 40 Kw. Gradien pemanasan tungku adalah fungsi *ramp* dengan kenaikan  $45^{\circ}\text{C}/\text{jam}$  sampai dengan  $100^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ , sedangkan untuk proses pendinginan atau penurunan suhu dilakukan secara alami atau tungku langsung dimatikan. Komponen sistem elektrik tersusun dari beberapa komponen dasar, antara lain : MCB utama 3 fasa, 4 MCB heater 3 fasa, 4 kontaktor 3 fasa yang diganti dengan relay semikonduktor (SSR), 4 kontroller temperatur dan 4 amper meter pembaca arus dari *heater*. Diagram sistem elektrik ditunjukkan gambar di bawah ini.



Gambar 2.5. Panel sistem elektrik tungku autoclave



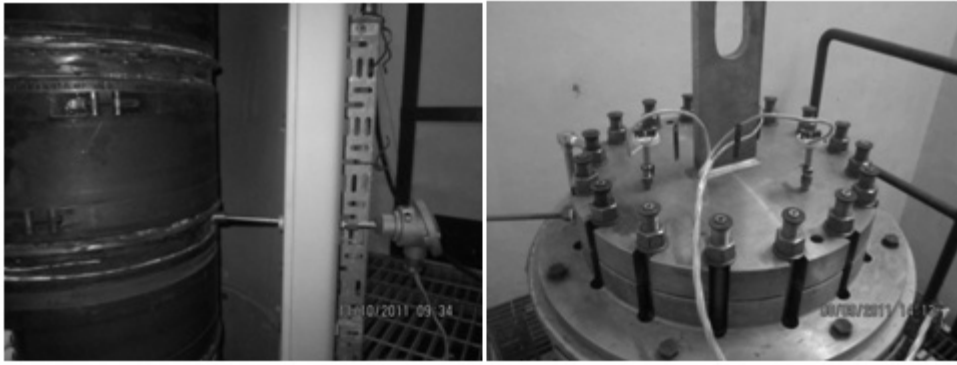
Gambar 2.6. Diagram sistem elektrik tungku autoclave

### 2.1.3. Instrumentasi sistem pemanas tungku autoclave

Instrumentasi sistem pemanas tungku autoclave merupakan bagian terpenting dari sistem yang terdiri dari :

#### a. Thermocouple

Sistem terdiri dari tujuh buah thermocouple type-K yang berfungsi sebagai sensor suhu. Pemasangan thermocouple adalah empat thermocouple dipasang pada tiap zona pemanasan *heater*, sedangkan yang tiga thermocouple dipasang masuk ke dalam *chamber* dengan panjang thermocouple yang berlainan. Panjang thermocouple pada *chamber* ( $T_c$ ) disesuaikan dengan dimensi penempatan bundel bahan bakar nuklir. Panjang  $T_{c1}$  adalah 70 cm, panjang  $T_{c2}$  adalah 125 cm dan panjang  $T_{c3}$  adalah 195 cm.



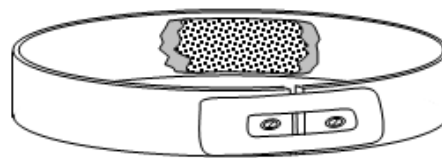
Gambar 2.7. Thermocouple pada Heater dan Chamber

*b. Heater*

*Heater* atau filamen pemanas tungku autoclave terdiri dari 12 buah *heater* yang dikelompokkan menjadi empat zona masing-masing tiga heater yang dirangkai dalam bentuk *delta* ( $\Delta$ ) dalam sistem listrik 3 fasa, seperti fisiknya pada Gambar 2.8. Karakteristik filamen pemanas dari hasil pengukuran diperoleh resistansi filamen tersebut 20 ohm dan induktansinya  $8.3 \mu\text{H}$  untuk tiap fasaa, dengan data ini filamen bersifat resistip, sehingga efisiensi pemanasan dari listrik sangat efisien/tinggi. <sup>[5]</sup>



a. Elemen pemanas autoclave ME-24

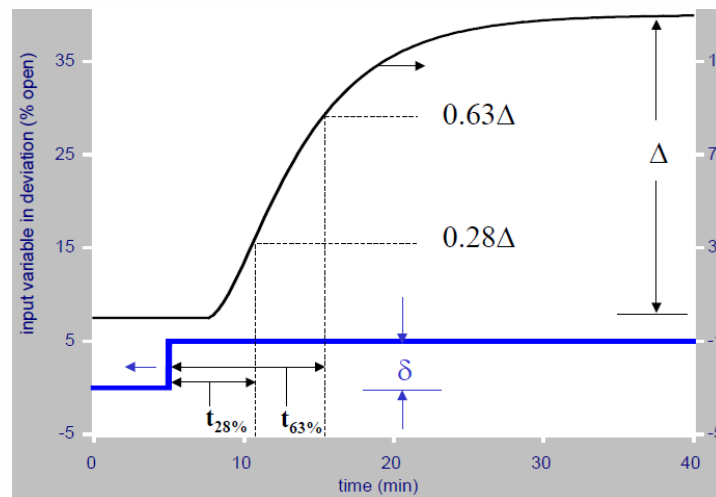


b. Komponen elemen pemanas autoclave ME-24

Gambar 2.8. Elemen Pemanas tungku Autoclave

## 2.2. Identifikasi Sistem

Identifikasi sistem digunakan untuk menentukan model dari suatu sistem yang disusun berdasarkan kurva reaksi yang diperoleh dari uji tanggapan sistem terbuka (*open loop*) dengan fungsi *step*. Dengan model ciancone, hasil identifikasi sistem ini kemudian didapatkan model matematis dengan pendekatan sistem orde satu ditambah *delay* sistem yang ditunjukkan pada gambar 2.9<sup>[7]</sup>.



Gambar 2.9. Menentukan model dengan ciancone

langkah-langkah yang dilakukan dalam penentuan model matematis adalah sebagai berikut :

- melakukan pendekatan orde 1 terhadap data empiris, mula-mula dihitung penguatan proporsional ( $K_p$ ) yang merupakan nilai keluaran ( $\Delta$ ) pada saat mapan dibagi nilai masukan ( $\delta$ ).

$$K_p = \frac{\Delta}{\delta} \quad (1)$$

- Menentukan konstanta waktu ( $\tau$ ) dengan mencari waktu yang diperlukan untuk mencapai 28% dari keadaan mapan ( $t_{28\%}$ ) dan waktu yang diperlukan untuk mencapai 63% keadaan mapan ( $t_{63\%}$ ) dengan persamaan :

$$\tau = 1,5 (t_{(63\%)} - t_{(28\%)} ) \quad (2)$$

- Selanjutnya adalah mencari waktu tunda ( $\theta$ ) dengan persamaan :

$$\theta = t_{(63\%)} - \tau \quad (3)$$

- Membuat model orde 1 dengan persamaan :

$$G(s) = \frac{K_p \cdot e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (4)$$

### 2.3. Perancangan Pengendali Model Ciancone<sup>[7]</sup>

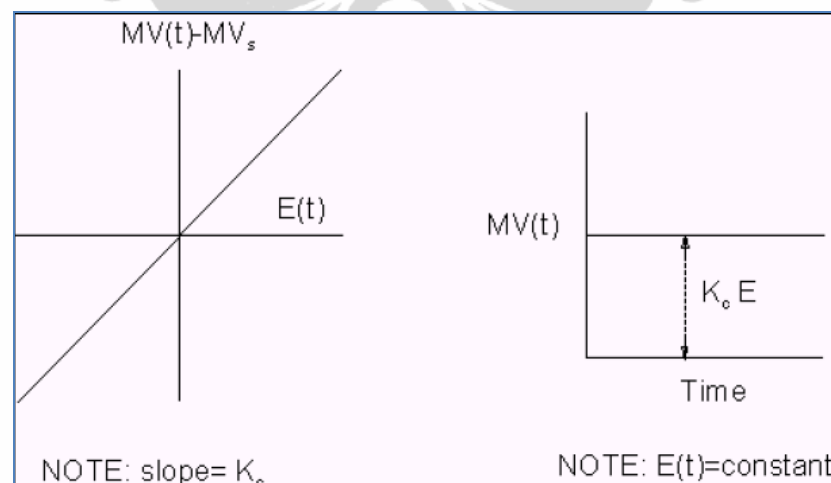
Dewasa ini, model pengendali yang paling banyak digunakan dalam dunia industry adalah model kendali algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID). Algoritma PID telah sukses digunakan dalam industry proses sejak tahun 1940an dan masih sering digunakan hingga kini. Algoritma ini digunakan dalam sistem loop tunggal, atau biasa disebut Single Input Single Output (SISO), yang memiliki satu variable yang dikendalikan (keluaran) dan satu variable yang dimanipulasi (masukan). Dalam algoritma kendali PID ini, terdapat tiga mode kendali yang digunakan. Mode-mode tersebut adalah mode proporsional, mode integral dan mode derivative. Ketiga mode ini akan dipaparkan secara singkat .

Dalam mode proporsional, tindakan kendali berupa penyesuaian masukan berbanding lurus terhadap sinyal galat (error) yang terjadi. Konsep ini dijabarkan dalam persamaan berikut

$$MV_p(t) = K_c E(t) + I_p \quad (5)$$

$$G_c(s) = \frac{MV_p(s)}{E(s)} = K_c \quad (6)$$

Dimana  $K_c$  adalah penguatan kendali. Mode proporsional ini digambarkan dalam grafik berikut ini



Gambar 2.10. mode proporsional

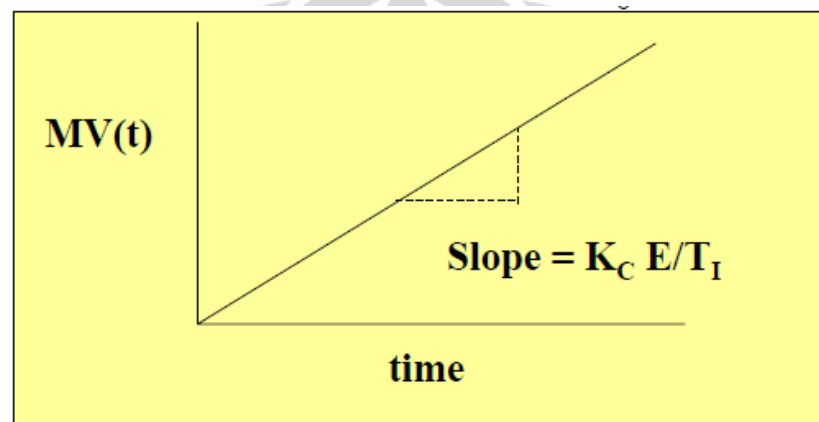
Mode proporsional ini sederhana dan menghasilkan penyesuaian yang cepat terhadap masukan, dan mempercepat respon dinamis tetapi tidak

menghasilkan selisih nol dan dapat menyebabkan ketidakstabilan bila distel secara kurang tepat.

Dalam mode integral, parameter disesuaikan dengan cara diintegrasikan terhadap waktu yang digabungkan dengan penguatan kendali dalam persamaan berikut ini.

$$MV_I(t) = \frac{K_c}{T_I} \int_0^t E(t') dt' + I_I \quad (8)$$

$$G_c(s) = \frac{MV_I(s)}{E(s)} = \frac{K_c}{T_I s} \quad (9)$$



Gambar 2.11. Mode Integral

Mode integral ini sederhana dan menghasilkan offset nol, tetapi responnya lambat dan dapat menyebabkan ketidakstabilan bila disetel kurang tepat

Bila ketiganya digabung, maka pengendali PI dinyatakan dalam persamaan berikut ini

$$MV(t) = K_c \left( E(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t E(t') dt' \right) \quad (10)$$

Dalam perancangan pengendali model Ciancone, langkah-langkah yang dilakukan adalah berikut ini

Untuk melakukan pendekatan orde 1 terhadap data empiris, mula-mula dihitung penguatan proporsional ( $K_p$ ) yang merupakan nilai keluaran ( $\Delta$ ) pada saat mapan dibagi nilai masukan ( $\delta$ ). Data empiris dapat dimodelkan dengan pendekatan orde 1 berikut ini

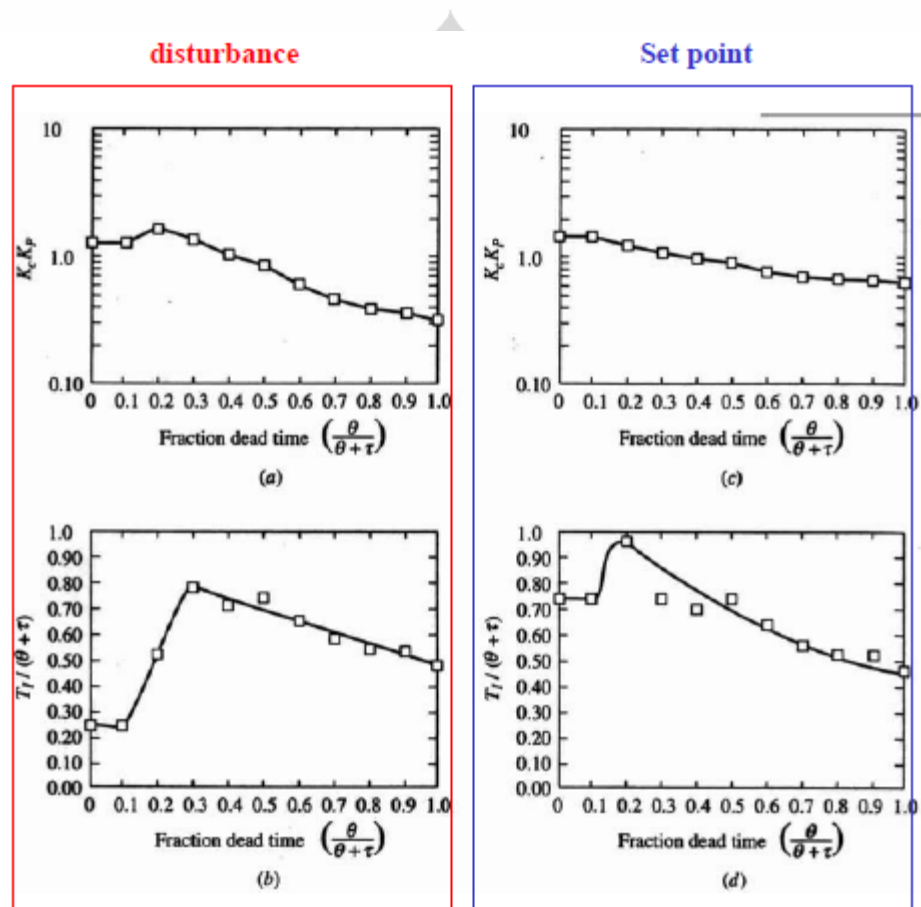


$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{1 + \tau s} \quad (11)$$

Selanjutnya adalah menghitung fraction dead time

$$\frac{\theta}{\theta + \tau} \quad (12)$$

Selanjutnya nilai Kc dan Ti, didapat dengan melihat grafik Ciancone berikut ini



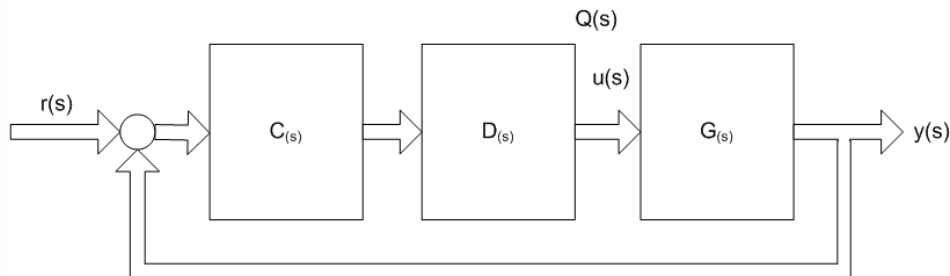
Gambar 2.12. Grafik Ciancone PI

Dengan melihat ke grafik, maka akan didapat parameter-parameter Kc dan Ti.

#### 2.4. Sistem Model Decoupling Proses

Pada model sistem Multiple Input Multiple Output (MIMO), diantara model plant mempunyai sifat saling mempengaruhi diantara keluarannya. Sistem decoupling

digunakan guna menghilangkan interaksi diantara keluarannya. Blok diagram sistem menggunakan decoupling adalah sebagai berikut [10]:



Gambar 2.13. Blok diagram sistem model tungku autoclave dengan decoupling

Dari gambar blok diagram diatas, didapat matriks persamaan [11] :

$$Q(s) = G(s).D(s) \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{11}(s) & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22}(s) & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & G_{13}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & G_{23}(s) \\ G_{31}(s) & G_{32}(s) & G_{33}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) & D_{13}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) & D_{23}(s) \\ D_{31}(s) & D_{32}(s) & D_{33}(s) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Dimana :

$Q(s)$  : diagonal matriks yang diharapkan ( hasil dari proses decoupling )

$G(s)$  : matriks fungsi alih

$D(s)$  : matriks decoupling

#### 2.4.1. Ideal Decoupling [12]

Ideal Decoupling yaitu dengan melihat elemen diagonal controller  $C_1(s)$ ,  $C_2(s)$  dan  $C_3(s)$  berdiri sendiri dan didasarkan pada diagonal matriks proses  $Q_{11}(s)$ ,  $Q_{22}(s)$  dan  $Q_{33}(s)$ . Secara logika nilai  $Q$  setelah dilakukan decoupling adalah :  $Q_{11}(s) = G_{11}(s)$ ,  $Q_{22}(s) = G_{22}(s)$  dan  $Q_{33}(s) = G_{33}(s)$ . Penentuan decoupling ini adalah dengan Penurunan Langsung dari tiap elemen matriks diatas dapat diuraikan menjadi bentuk persamaan – persamaan berikut :

$$Q_{11}(s) = G_{11}(s).D_{11}(s) + G_{12}(s).D_{21}(s) + G_{13}(s).D_{31}(s)$$

$$Q_{22}(s) = G_{21}(s).D_{12}(s) + G_{22}(s).D_{22}(s) + G_{23}(s).D_{32}(s)$$

$$Q_{33}(s) = G_{31}(s).D_{13}(s) + G_{32}(s).D_{23}(s) + G_{33}(s).D_{33}(s)$$

$$\begin{aligned}
0 &= G_{11}(s).D_{12}(s) + G_{12}(s).D_{22}(s) + G_{13}(s).D_{32}(s) \\
0 &= G_{11}(s).D_{13}(s) + G_{12}(s).D_{23}(s) + G_{13}(s).D_{33}(s) \\
0 &= G_{21}(s).D_{11}(s) + G_{22}(s).D_{21}(s) + G_{23}(s).D_{31}(s) \\
0 &= G_{21}(s).D_{13}(s) + G_{22}(s).D_{23}(s) + G_{23}(s).D_{33}(s) \\
0 &= G_{31}(s).D_{11}(s) + G_{32}(s).D_{21}(s) + G_{33}(s).D_{31}(s) \\
0 &= G_{31}(s).D_{12}(s) + G_{32}(s).D_{22}(s) + G_{33}(s).D_{32}(s)
\end{aligned} \tag{15}$$

Dari persamaan di atas didapat nilai parameter decoupling nya sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
D_{11}(s) &= D_{22}(s) = D_{33}(s) = 1 \\
D_{21}(s) &= \frac{G_{23}(s).G_{31}(s) - G_{21}(s).G_{33}(s)}{G_{22}(s).G_{33}(s) - G_{23}(s).G_{32}(s)} \\
D_{31}(s) &= \frac{G_{21}(s).G_{32}(s) - G_{31}(s).G_{22}(s)}{G_{22}(s).G_{33}(s) - G_{23}(s).G_{32}(s)} \\
D_{12}(s) &= \frac{G_{32}(s).G_{13}(s) - G_{12}(s).G_{33}(s)}{G_{11}(s).G_{33}(s) - G_{31}(s).G_{13}(s)} \\
D_{13}(s) &= \frac{G_{23}(s).G_{12}(s) - G_{13}(s).G_{22}(s)}{G_{11}(s).G_{22}(s) - G_{21}(s).G_{12}(s)} \\
D_{32}(s) &= \frac{G_{12}(s).G_{31}(s) - G_{32}(s).G_{11}(s)}{G_{11}(s).G_{33}(s) - G_{31}(s).G_{13}(s)} \\
D_{23}(s) &= \frac{G_{13}(s).G_{21}(s) - G_{23}(s).G_{11}(s)}{G_{11}(s).G_{22}(s) - G_{21}(s).G_{12}(s)}
\end{aligned} \tag{16}$$

Dari parameter decoupling ini selanjutnya dimasukan nilai gain statis tiap elemen matriks, sehingga didapat nilai parameter decoupling.

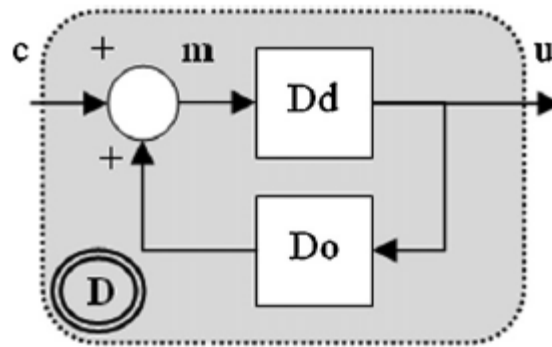
#### 2.4.2. Model Inverted Decoupling [11]

Model Inverted decoupling adalah manipulasi bentuk matriks pada persamaan (13) diatas. Bentuk persamaan matriks decouplernya adalah :

$$D(s) = G^{-1}(s).Q(s) \tag{17}$$

$$\text{Dimana : } G^{-1}(s) = \frac{Adj(G(s))}{|G(s)|} . G_{diag}(s) \tag{18}$$

Model sistem inverted decoupling menggunakan representasi matrix yang ditunjukkan pada Gambar. 2.13 di bawah ini.



Gambar 2.13. Matriks Reprerentasi dari inverted decoupling

Ada  $n$  elemen dari decoupler matriks  $D(s)$ , yang menghubungkan masukan "m" dengan masukan proses "u", sedangkan  $D_o$  adalah elemen umpan balik proses input "u" guna mendecoupler sistem. Dari Gambar. 2.13, dapat ditulis matriks decoupler  $D(s)$  diperoleh sebagai berikut:

$$D(s) = D_d(s) \cdot (1 - D_o(s) \cdot D_d(s))^{-1} \quad (19)$$

Matriks Fungsi transfer  $D(s)$  adalah decoupling konvensional yang berhubungan dengan struktur inveted decoupling sesuai dengan persamaan (19). Nilai invers decouplernya ditulis sebagai berikut:

$$D^{-1}(s) = (I - D_o(s) \cdot D_d(s)) \cdot D_d^{-1}(s) = D_d^{-1}(s) - D_o(s) \quad (20)$$

Persamaan invertng (19) di substitusi ke persamaan (20), menghasilkan persamaan:

$$D_d^{-1}(s) - D_o(s) = Q^{-1}(s) \cdot G(s) \quad (21)$$

Persamaan ini digunakan untuk menghitung tiap elemen inverted decoupling. Keuntungan dari inverted decoupling adalah kesederhanaannya, matriks  $Q(s)$  yang dipilih untuk menjadi diagonal dan pengurangan yang dihasilkan dari invers  $D_d(s)$  dan  $D_o(s)$  adalah matriks transfer dengan hanya satu elemen yang akan dihitung

dalam setiap posisi. Untuk sistem matriks  $3 \times 3$  dari persamaan (21), dapat ditulis bentuk matriks decouplingnya sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{dd_{11}} & -do_{12} & -do_{13} \\ -do_{21} & \frac{1}{dd_{22}} & -do_{23} \\ -do_{31} & -do_{32} & \frac{1}{dd_{33}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{g_{11}}{q_1} & \frac{g_{12}}{q_1} & \frac{g_{13}}{q_1} \\ \frac{g_{21}}{q_2} & \frac{g_{22}}{q_2} & \frac{g_{23}}{q_2} \\ \frac{g_{31}}{q_3} & \frac{g_{32}}{q_3} & \frac{g_{33}}{q_3} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Dimana,

$$\begin{aligned} dd_{11} &= \frac{q_1}{g_{11}} & do_{12} &= -\frac{g_{12}}{q_1} & do_{13} &= -\frac{g_{13}}{q_1} \\ do_{21} &= -\frac{g_{21}}{q_2} & dd_{22} &= \frac{q_2}{g_{22}} & do_{23} &= -\frac{g_{23}}{q_2} \\ do_{31} &= -\frac{g_{31}}{q_3} & do_{33} &= -\frac{g_{32}}{q_3} & dd_{33} &= \frac{q_3}{g_{33}} \end{aligned} \quad (23)$$

Untuk konfigurasi sistem matriks inverted decoupler 1-2-3 yaitu elemen Dd (1,1) , Dd(2,2) dan Dd(3,3) , diperoleh persamaan :

$$\begin{aligned} dd_{11} &= 1 & do_{12} &= -\frac{g_{12}}{g_{11}} & do_{13} &= -\frac{g_{13}}{g_{11}} \\ do_{21} &= -\frac{g_{21}}{g_{22}} & dd_{22} &= 1 & do_{23} &= -\frac{g_{23}}{g_{22}} \\ do_{31} &= -\frac{g_{31}}{g_{33}} & do_{33} &= -\frac{g_{32}}{g_{33}} & dd_{33} &= 1 \end{aligned} \quad (24)$$

Atau ditulis dalam bentuk matriks :

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-G_{12}(s)}{G_{11}(s)} & \frac{-G_{13}(s)}{G_{11}(s)} \\ \frac{-G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 & \frac{-G_{23}(s)}{G_{22}(s)} \\ \frac{-G_{31}(s)}{G_{33}(s)} & \frac{-G_{32}(s)}{G_{33}(s)} & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Dengan memasukan nilai fungsi alih matriks model proses, maka didapat persamaan matriks decouplingnya.

## 2.5. Analisa Parameter PI terhadap Keluaran Sistem

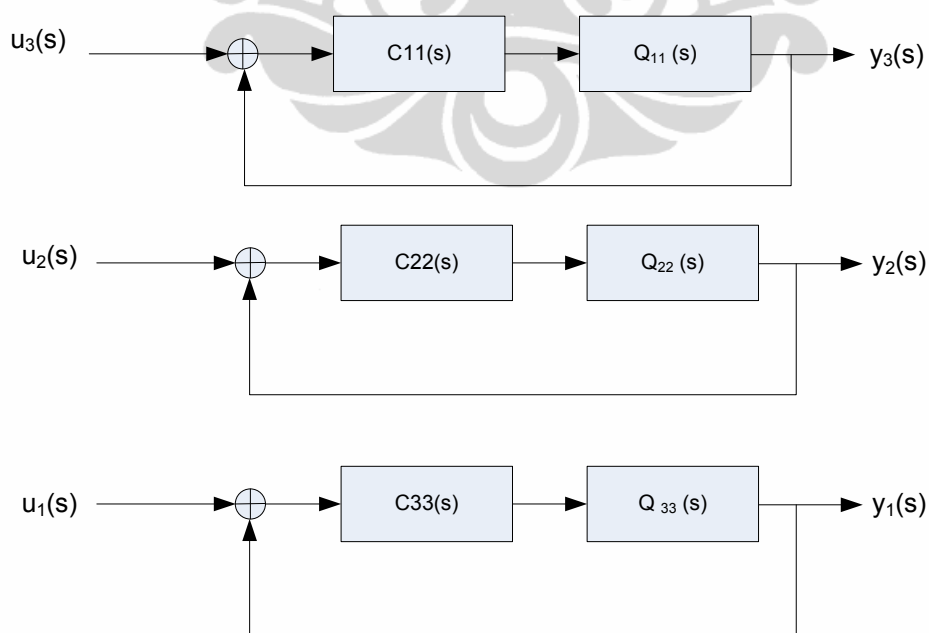
Dengan hasil proses decoupling diatas didapat matriks proses plant tungku autoclave adalah sistem diagonal matriks  $Q(s)$  sebagai berikut :

$$Q(s) = \begin{bmatrix} Q_{11}(s) & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22}(s) & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33}(s) \end{bmatrix} \quad (26)$$

Jika dihubungkan dengan sistem kendali PI  $C(s)$  , terdapat tiga sistem kendali yaitu  $C_{11}(s)$ ,  $C_{22}(s)$  dan  $C_{33}(s)$ . Bentuk matriks kendalinya adalah sebagai berikut :

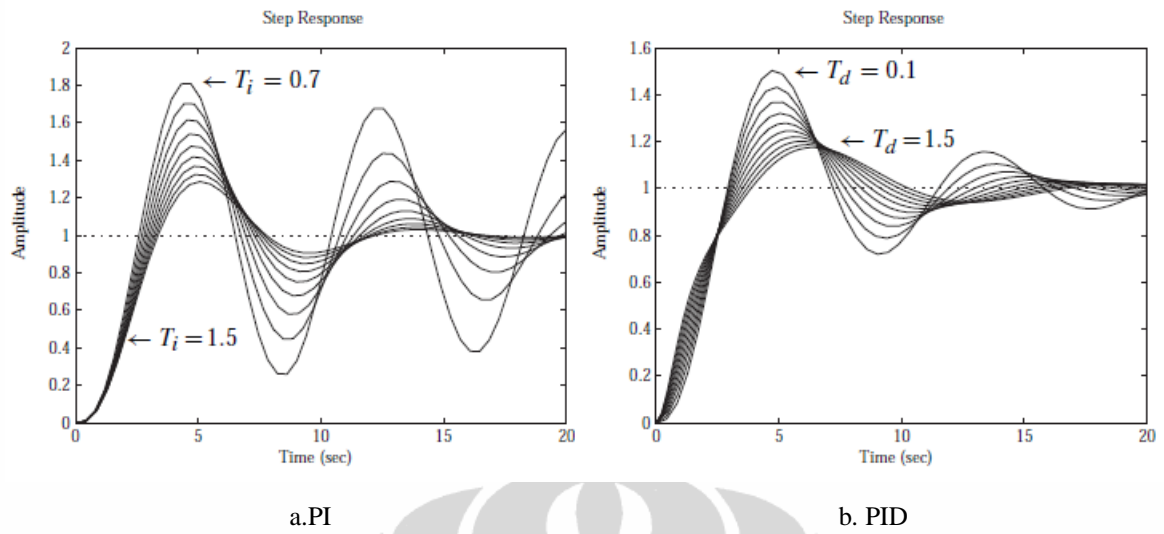
$$C(s) = \begin{bmatrix} C_{11}(s) & 0 & 0 \\ 0 & C_{22}(s) & 0 \\ 0 & 0 & C_{33}(s) \end{bmatrix} \quad (27)$$

Jika digabungkan antara kendali dan bentuk plan, maka akan terdapat tiga buah sistem SISO ( Single Input Single Output) sistem close loop dengan blok diagram masing- masing sebagai berikut :



Gambar 2.14. Blok diagram sistem diagram Sistem Plant SISO





a.PI

b. PID

Gambar 2.16. Respon Close Loop fungsi Step terhadap  $T_i$  untuk kontrol PI dan  $T_i$  dan  $T_d$  terhadap Kontrol PID



## BAB 3

### PERANCANGAN SISTEM

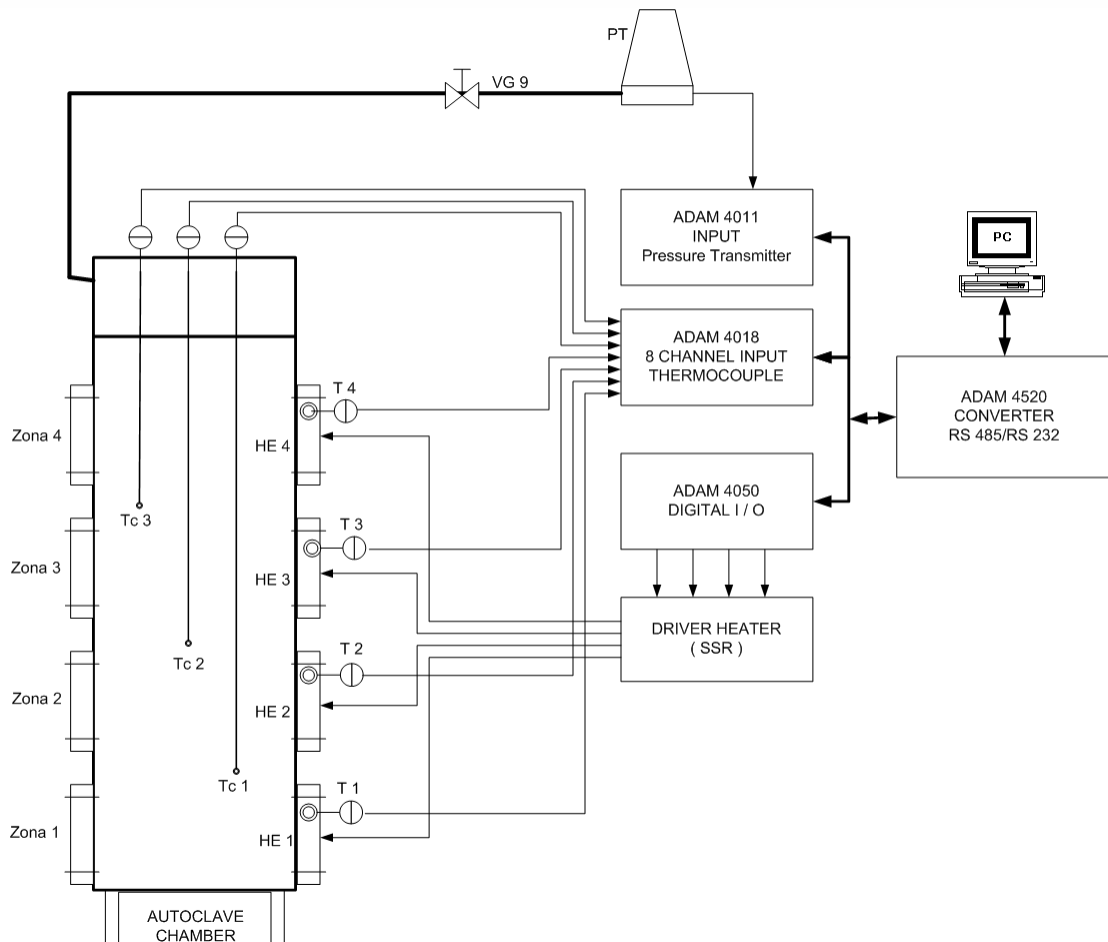
Perancangam sistem untuk identifikasi sistem tungku autoclave meliputi perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras meliputi perakitan sistem akuisisi data, pembuatan driver sistem pemanas dan power supply. Kemudian dilanjutkan dengan pengujian dan kalibrasi. Sedangkan untuk perancangan perangkat lunak meliputi pembuatan program untuk inisialisasi perangkat keras dan program untuk pengujian *open loop* fungsi *step* guna mendapatkan respon sistem.

#### **3.1. Perancangan perangkat keras**

##### **3.1.1. Sistem akuisisi data**

Sistem akuisisi data merupakan proses pengambilan data sampel kondisi fisik dari dunia nyata dan dikonversikan menjadi data digital, sehingga dapat dibaca oleh komputer<sup>[6]</sup>. Untuk sistem akuisisi data tungku autoclave besaran fisik yang diukur adalah temperatur pada tungku.

Perangkat sistem akuisisi data tungku autoclave menggunakan modul advantech ADAM 4018 untuk masukan thermocouple, modul advantech ADAM 4011 untuk masukan pressure transmitter sebagai data tekanan, modul advantech ADAM 4050 digital I/O untuk keluaran sinyal digital dan modul advantech ADAM 4520 *konverter* RS485/RS-232 untuk komunikasi komputer dengan modul lain. Gambar 3.1 menunjukkan sistem akuisisi data sistem tungku autoclave.



Gambar 3.1. Rangkaian Sistem Akuisisi Data Tungku autoclave

#### 3.1.1.1. Perangkat keras ADAM 4018

Perangkat keras ADAM 4018 keluaran advantech merupakan perangkat keras akuisisi data yang berfungsi untuk membaca data suhu khusus keluaran thermocouple. ADAM-4018 mempunyai 8 kanal masukan yang berdiri sendiri (*differensial*) dengan resolusi 16 bit<sup>[5]</sup>. Dari 8 kanal masukan modul ADAM 4018, digunakan 7 kanal untuk masukan 7 thermocouple tungku autoclave, sedangkan yang satu kanal digunakan sebagai *spare*.



Gambar 3.2. Modul Advantech ADAM 4018 ( 8 channel Input Thermocouple )

### 3.1.1.2. Perangkat keras ADAM 4011

Perangkat keras ADAM 4011 keluaran advantech merupakan perangkat keras akuisisi data yang berfungsi untuk membaca data sinyal analog. Pada sistem ini ADAM 4011 digunakan untuk membaca besar tekanan *chamber* yang dihubungkan dengan pressure transmitter.



Gambar 3.3. Modul Advantech ADAM 4011 ( 1 channel Input analog )

### 3.1.1.3. Perangkat keras ADAM 4050

Perangkat keras ADAM 4050 keluaran advantech merupakan perangkat keras akuisisi data yang berfungsi sebagai digital I/O. Khusus untuk sistem akuisisi data pada tungku autoclave, hanya digunakan keluaran sinyal digitalnya, dengan mode keluaran “*open collector transistor*”<sup>[5]</sup>. Sistem menggunakan 4 kanal sebagai kontrol tiap *heater* tungku.



Gambar 3.4. Modul Advantech ADAM 4050 Digital I/O

#### 3.1.1.4. Perangkat keras ADAM 4520

Perangkat keras ADAM 4520 keluaran advantech merupakan perangkat keras akuisisi data yang berfungsi sebagai konverter sistem komunikasi RS485 ke sistem komunikasi RS 232<sup>[5]</sup>. Komunikasi RS 485 digunakan untuk komunikasi antar modul ADAM, sedangkan komunikasi RS 232 digunakan untuk komunikasi modul adam dengan komputer. Model komunikasi RS-485 ini digunakan guna memperpanjang jarak pengendalian antara *plant* dengan sistem kendalinya.



Gambar 3.5. Modul Advantech ADAM 4050 Digital I/O

#### 3.1.2. *Driver heater*

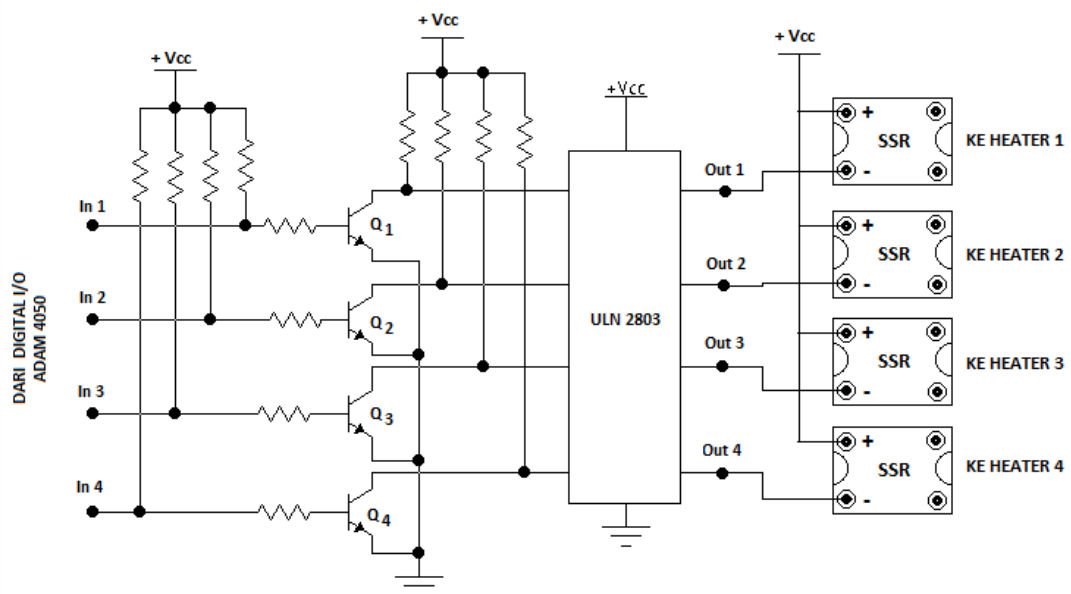
Untuk mengganti sistem mekanik pada sistem switch yang semula menggunakan kontaktor, diganti dengan switch menggunakan sistem SSR (*Solid State Relay*). Tujuan adalah selain mengurangi bunga api, juga untuk mempercepat kondisi hidup (*switch on*) dan kondisi mati (*switch off*) dimana

masuk ke sinyal ke SSR adalah sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) dengan periode antara “*switch on*” dan “*switch off*” minimum adalah  $20 \mu\text{s}$  [8].



Gambar 3.6. Solid State Relay (SSR)

Tegangan masukan SSR adalah DC 3 – 32 volt digunakan rangkaian driver, dimana masukan rangkaian *driver* adalah modul digital I/O ADAM 4050 pada model *open collector*, dan keluaran rangkaian driver adalah langsung terhubung dengan SSR pada konektor negatifnya sedangkan konektor positif dihubungkan dengan Vcc.



Gambar 3.7. Rangkaian Driver Solid State Relay ( SSR )

### 3.2. Perancangan perangkat lunak

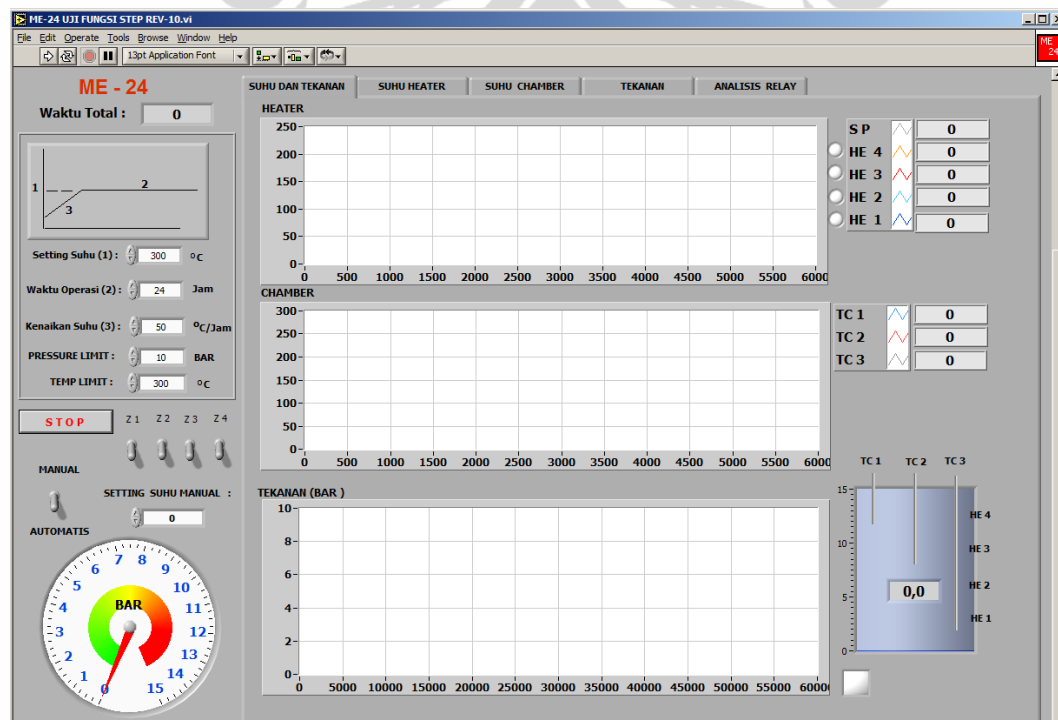
Perangkat lunak merupakan media komunikasi antara manusia dengan komputer. Pada sistem tungku autoclave ini, perangkat lunak yang tertanam pada komputer berfungsi sebagai pusat kendali sistem tungku. Dalam penelitian ini, digunakan perangkat lunak labview untuk proses identifikasi dan kendali sistem

tungku autoclave, matlab/simulink untuk analisa dan simulasi sistem, Microsoft Excel untuk pengolahan data dan driver perangkat keras modul advantech ADAM serial 40xx.

### 3.2.1. Perangkat Lunak Labview

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) merupakan bahasa pemrograman grafis yang menggunakan *icon-icon* dalam pembuatan suatu aplikasi program. Berbeda dengan bahasa pemrograman berbasis teks dimana instruksi teks mencerminkan eksekusi pada program, sedangkan Labview menggunakan pemrograman berbasis aliran data (*dataflow*), dimana aliran data tersebut mencerminkan eksekusi program.

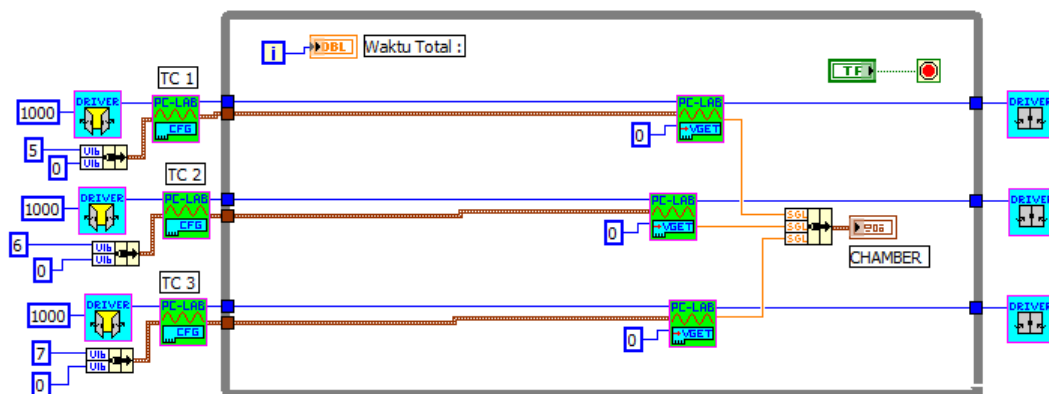
Di dalam labVIEW, tampilan pengguna (*user interface*) dibuat dengan kumpulan *tools* dan objek-objek. Tampilan pengguna disebut dengan *front panel*. Kemudian, perintah-perintah pemrograman yang mengatur objek-objek pada *front panel* dituliskan dalam representasi grafis berupa aliran data antar icon. Aliran data yang menyerupai diagram alir tersebut dituliskan pada *block diagram*. Hasil pemrograman pada labVIEW ini disebut dengan *virtual instrument (VI)* dan didalamnya dapat berbentuk kumpulan subVI<sup>[8]</sup>.



Gambar 3.8. Tampilan Labview untuk Identifikasi Tungku autoclave

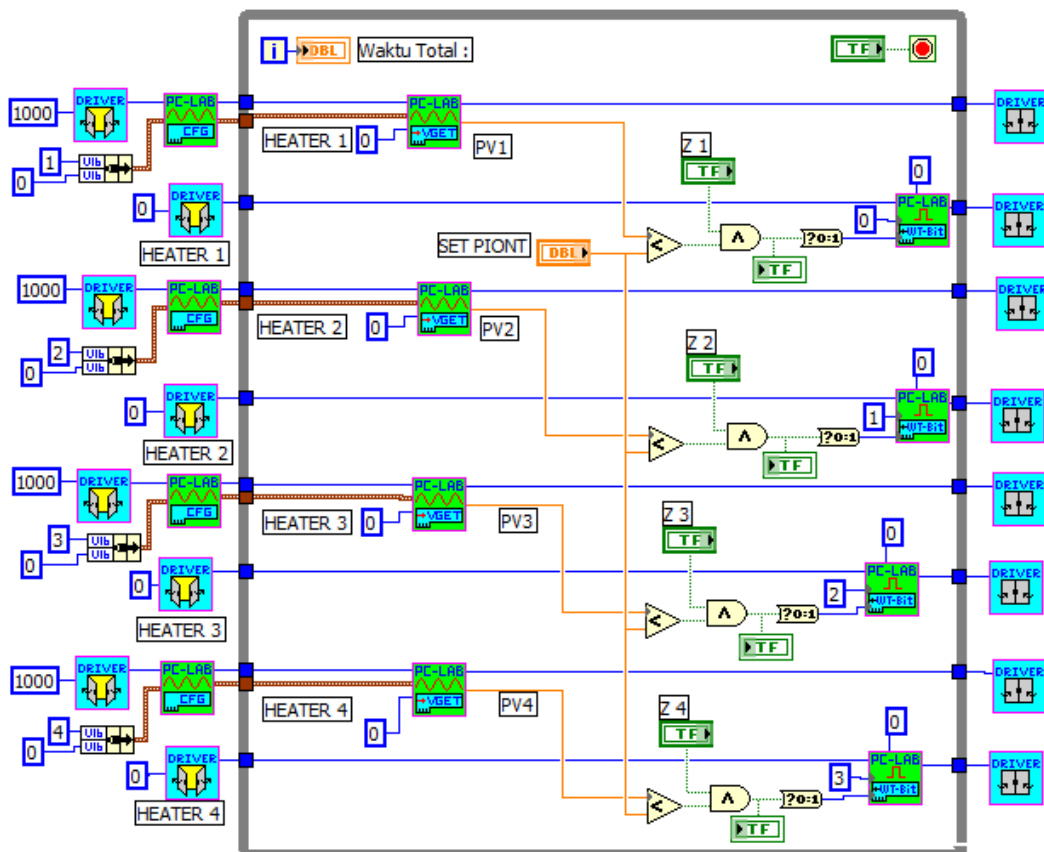
### 3.2.2. Sistem Perangkat Lunak Pengujian Fungsi *Step*

Sistem perangkat lunak untuk pengujian alat autoclave terdiri dari dua bagian yaitu perangkat lunak untuk mengukur suhu pada alat dan perangkat lunak untuk driver pemanas (*heater*). Perangkat lunak untuk mengukur suhu alat terdiri dari tiga pengukuran posisi suhu, sesuai dengan jumlah thermocouple yang ada pada *chamber* alat. Pengukuran suhu ini dilakukan secara bersamaan dengan waktu sampling 1 detik. Listing program pengukuran suhu ditampilkan di bawah ini.



Gambar 3.9 Listing program untuk pengukuran suhu chamber

Perangkat lunak untuk *driver* pemanas (*heater*) terdiri dari empat sistem *driver heater* yang berfungsi sebagai masukan sistem alat. Untuk pengujian fungsi *step* ini, dilakukan secara bergantian mulai dari *heater* 1 sampai *heater* 4. Pengujian tiap *heater* ini tidak bisa secara langsung dilakukan, karena harus menunggu sampai keadaan awal dan yang dijelaskan pada bagian 3.3. Listing program untuk driver pemanas ditampilkan di bawah ini.



Gambar 3.10 Listing program untuk driver sistem pemanas ( heater ) alat

### 3.3. Prosedur Pemodelan tungku autoclave

Secara umum langkah-langkah yang dilakukan dalam membuat model alat tungku autoclave adalah dengan melakukan pengujian pada tiap masukan pada sistem heater alat autoclave. Dari pengujian heater ini kemudian respon suhu tiap daerah tungku diukur dengan alat thermocouple. Hasil pengukuran ini kemudian dibuat model matematis secara eksperimen dari sistem tungku autoclave.

Sebelum dilakukan pengujian alat, maka diperlukan persyaratan sistem alat tungku autoclave yaitu :

1. kondisi alat sebelum dilakukan pengujian ada dalam kondisi suhu kamar dan tekanan atmosfer, dengan kondisi alat pada tiap pengujian adalah sama.
2. Memeriksa sistem mekanik dengan dipastikan tidak ada kebocoran pada alat.
3. Memeriksa sistem elektrik dari bahaya hubungan singkat.



Langkah–langkah pengujian sistem adalah berikut ini:

- Langkah 1: *Membuat sistem perangkat lunak dari pengujian fungsi step alat tungku autoclave.*

Langkah ini dilakukan untuk menentukan dan mengatur sistem pengujian fungsi *step* untuk tiap *heater*, dan membuat data *logging* sistem pengukuran suhu keluaran *thermocouple* alat.

- Langkah 2: *Melakukan pengujian fungsi step untuk heater zona 1*

Setelah membuat sistem perangkat lunak pengujian, maka identifikasi proses selanjutnya adalah Pengujian untuk menentukan tiga keluaran  $y(s)$  pada masukan *heater zona 1*  $u_1(s)$ . Pengujian dilakukan dengan fungsi step pada *heater 1* dengan memberikan sinyal PWM pada *duty cycle* 20% sampai dengan 80%, dan melihat respon pada 3 keluarannya pada *thermocouple chamber*. Waktu sampling yang dilakukan adalah 2 detik. Untuk pengujian penurunan suhu dilakukan dengan dengan fungsi step pada *heater 1* dengan memberikan sinyal PWM pada *duty cycle* 80% sampai dengan 20%, dan melihat respon pada 3 keluarannya pada *thermocouple chamber*.

- Langkah 3: *Melakukan pengujian fungsi step untuk heater zona 2*

Langkah ini dilakukan sama dengan langkah ke dua, dengan memberikan sinyal PWM pada *duty cycle* 20% sampai dengan 70%, *heater zona 2*. Untuk penurunan suhu dengan memberikan sinyal PWM pada *duty cycle* 80% sampai dengan 20%, *heater zona 2*.

- Langkah 4: *Melakukan pengujian fungsi step untuk heater zona 3*

Langkah ini dilakukan sama dengan langkah ke tiga, dengan memberikan sinyal PWM pada *duty cycle* 20% sampai dengan 70%, pada *heater zona 3*. Untuk penurunan suhu dengan memberikan sinyal PWM pada *duty cycle* 80% sampai dengan 20%, *heater zona 3*.

- Langkah 5: *Menentukan model alat dari hasil pengujian*

Setelah dilakukan pengujian untuk keseluruhan, maka dibuat model sistem alat dalam bentuk blok diagram fungsi alih, baik model untuk fungsi naik, maupun untuk fungsi turun.

## BAB 4

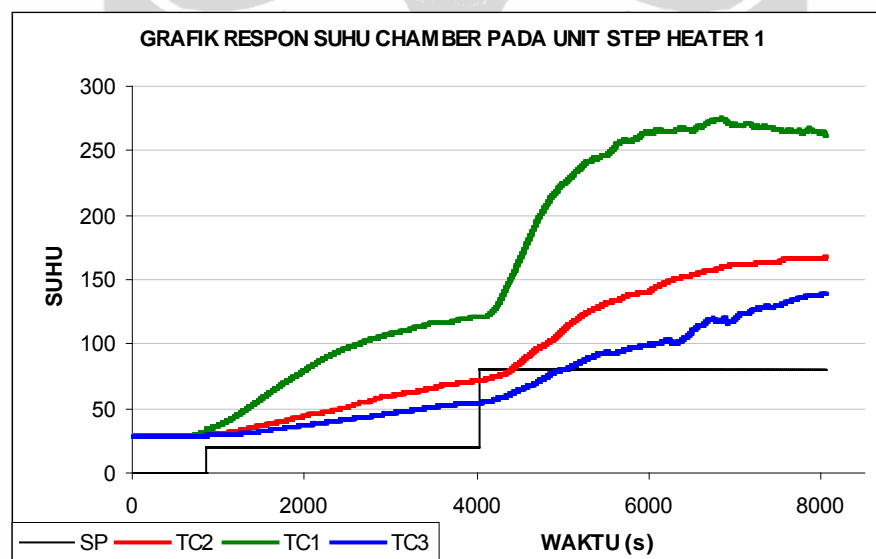
### PEMODELAN SISTEM TUNGKU AUTOCLAVE

#### 4.1. Pegujian fungsi *Step Heater*

Pengujian *heater* guna mendapatkan model sistem *heater* autoclave, dilakukan secara berurutan, yaitu dengan memberikan fungsi *step* sinyal PWM, pada tiap *heater* sampai nilai *steady state* untuk tiap perubahan nilai *duty cycle*.

##### 4.1.1. Pengujian Fungsi *Step Heater* Zona 1

Pengujian digunakan guna menentukan besar keluaran  $y(s)$  atau respon suhu untuk masukan  $u_1(s)$ . Pengujian dilakukan dengan memberi fungsi *step* pada *heater* 1, kemudian diukur respon keluarannya pada thermocouple *chamber*. Grafik Respon fungsi *Step* untuk *heater* 1 digambarkan di bawah ini.



Gambar 4.1 Grafik respon suhu chamber dengan unit *step* untuk *heater* 1

Dengan menggunakan identifikasi model sebagaimana yang telah diuraikan pada subbab 2.2, didapat model untuk pengujian heater zona 1 sebagai berikut :

##### a. Menentukan $G_{11}(s)$

Dari grafik gambar 4.1 diatas, didapat parameter untuk  $G_{11}(s)$  :

$$K_p = 1,8033 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 564 \text{ detik}$$

$$\theta = 235 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{11}(s) = \frac{1,8033 \cdot e^{-235 s}}{564 s + 1}$$

**b. Menentukan  $G_{21}(s)$**

Dari grafik gambar 4.1 diatas, didapat parameter untuk didapat untuk  $G_{21}(s)$  :

$$Kp = 1,2554 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 1307 \text{ detik} \quad \theta = 265 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{21}(s) = \frac{1,2554 \cdot e^{-265 s}}{1307 s + 1}$$

**c. Menentukan  $G_{31}(s)$**

Dari grafik gambar 4.1 diatas, didapat parameter untuk didapat untuk  $G_{31}(s)$  :

$$Kp = 1,415 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

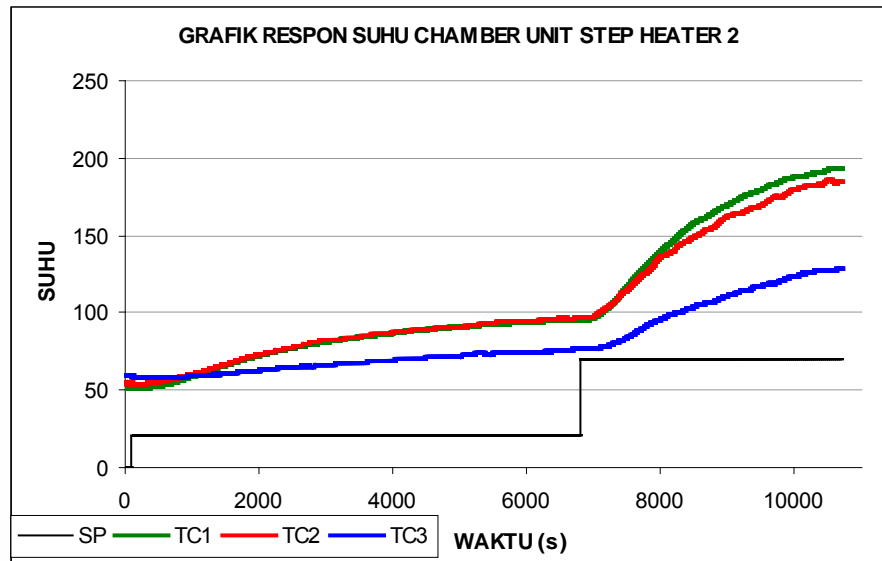
$$\tau = 2955 \text{ detik} \quad \theta = 335 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{31}(s) = \frac{1,415 \cdot e^{-335 s}}{2955 s + 1}$$

**4.1.2. Pengujian Fungsi Step Heater Zona 2**

Pengujian digunakan untuk menentukan keluaran  $y(s)$  pada pada masukan  $u_2(s)$ . Pengujian dilakukan dengan fungsi *step* pada *heater 2*, dan melihat respon pada tiga keluarannya pada *thermocouple chamber*. Grafik Respon fungsi *Step* untuk *heater 2* digambarkan di bawah ini



Gambar 4.2 Grafik respon suhu chamber dengan unit *step* untuk heater 2

**a. Menentukan  $G_{12}(s)$**

Dari grafik gambar 4.2 diatas, didapat parameter untuk  $G_{12}(s)$  :

$$Kp = 1,47 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 1275 \text{ detik} \quad \theta = 395 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{12}(s) = \frac{1,47 \cdot e^{-395s}}{1275s + 1}$$

**b. Menentukan  $G_{22}(s)$**

Dari grafik gambar 4.2 diatas, didapat parameter untuk  $G_{22}(s)$  :

$$Kp = 1,388 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 1558 \text{ detik} \quad \theta = 264 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{22}(s) = \frac{1,388 \cdot e^{-264s}}{1558s + 1}$$

### c. Menentukan $G_{32}(s)$

Dari grafik gambar 4.2 diatas, didapat parameter untuk  $G_{32}(s)$  :

$$Kp = 0,85 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

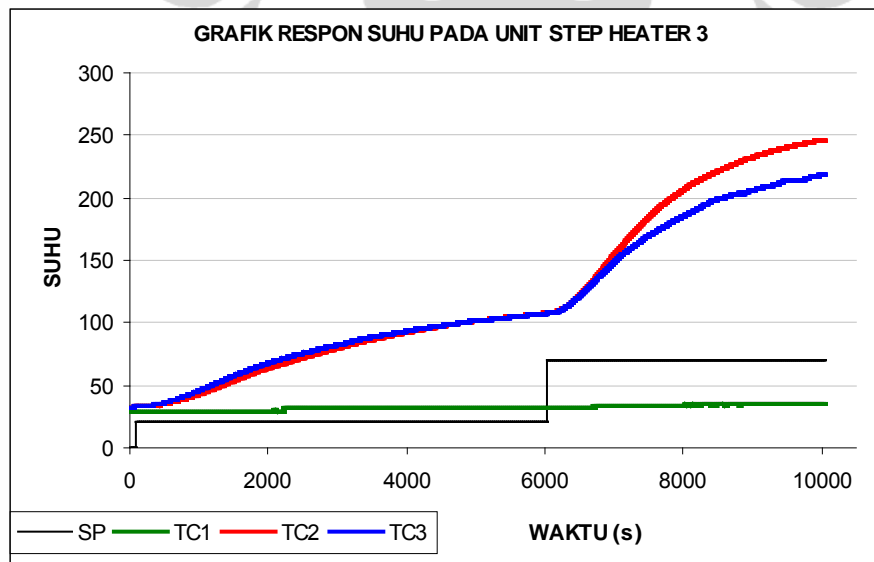
$$\tau = 1798 \text{ detik} \quad \theta = 402 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{32}(s) = \frac{0,85 \cdot e^{-402s}}{1798s + 1}$$

#### 4.1.3. Pengujian Fungsi Step Heater Zona 3

Pengujian digunakan untuk menentukan keluaran  $y(s)$  pada masukan  $u_3(s)$ . Pengujian dilakukan dengan fungsi *step* pada *heater 3*, dan melihat respon pada tiga keluarannya pada *thermocouple chamber*. Grafik Respon fungsi *Step* untuk *heater 3* digambarkan di bawah ini



Gambar 4.3 Grafik respon suhu chamber dengan unit *step* untuk *heater 3*

### a. Menentukan $G_{13}(s)$

Dari grafik gambar 4.3 diatas, didapat parameter untuk  $G_{13}(s)$  :

$$Kp = 0,0354 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 336 \text{ detik} \quad \theta = 828 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{13}(s) = \frac{0,0354 \cdot e^{-336s}}{828s + 1}$$

#### b. Menentukan $G_{23}(s)$

Dari grafik gambar 4.3 diatas, didapat parameter untuk  $G_{23}(s)$  :

$$Kp = 2,08 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 1245 \text{ detik} \quad \theta = 441 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{23}(s) = \frac{2,08 \cdot e^{-441s}}{1245s + 1}$$

#### c. Menentukan $G_{33}(s)$

Dari grafik gambar 4.3 diatas, didapat parameter untuk  $G_{33}(s)$  :

$$Kp = 1,702 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

$$\tau = 1386 \text{ detik} \quad \theta = 340 \text{ detik}$$

Persamaan Fungsi Alih :

$$G_{33}(s) = \frac{1,702 \cdot e^{-340s}}{1386s + 1}$$

### 4.2. Model Sistem Tungku Autoclave

Dari ke tiga pengujian di atas, maka bentuk model sistem tungku autoclave dapat menghasilkan matriks model 3 x 3. Dimana terdapat tiga masukan dan tiga keluaran. Masukan yaitu  $u_1(s)$ ,  $u_2(s)$ , dan  $u_3(s)$ , sedangkan keluaran yaitu

$y_1(s)$ ,  $y_2(s)$ , dan  $y_3(s)$ . Bentuk matriks model autoclavanya adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ y_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & G_{13}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & G_{23}(s) \\ G_{31}(s) & G_{32}(s) & G_{33}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ u_3(s) \end{bmatrix} \text{ atau}$$

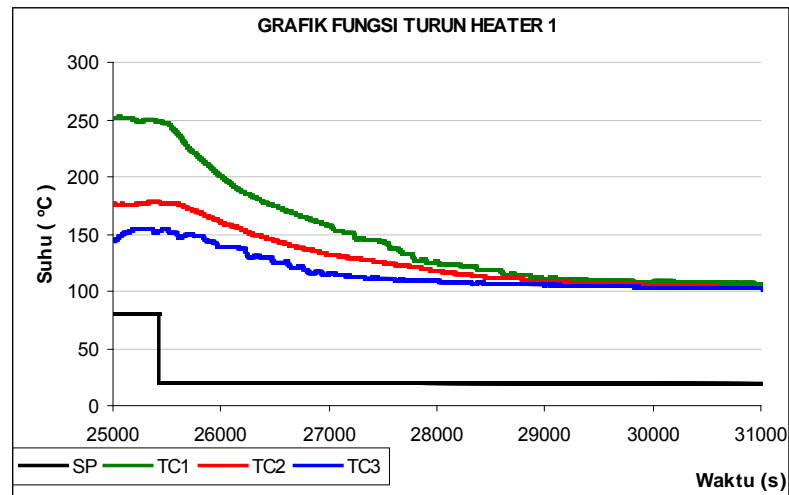
$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ y_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1,8033 \cdot e^{-235s}}{564s+1} & \frac{1,47 \cdot e^{-395s}}{1275s+1} & \frac{0,0354 \cdot e^{-336s}}{828s+1} \\ \frac{1,2554 \cdot e^{-265s}}{1,2554 \cdot e^{-265s}} & \frac{1,388 \cdot e^{-264s}}{1,388 \cdot e^{-264s}} & \frac{2,08 \cdot e^{-441s}}{2,08 \cdot e^{-441s}} \\ \frac{1,307s+1}{1,415 \cdot e^{-335s}} & \frac{1,558s+1}{0,85 \cdot e^{-402s}} & \frac{1,245s+1}{1,702 \cdot e^{-340s}} \\ 2955s+1 & 1798s+1 & 1386s+1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ u_3(s) \end{bmatrix}$$

#### 4.3. Validasi Model Sistem Tungku Autoclave

Uji validasi model sistem tungku autoclave dilakukan dengan cara membandingkan hasil eksperimen pada fungsi turun heater dengan model yang sudah dibuat. Eksperimen dilakukan dengan sistem open loop alat yaitu dengan memberikan fungsi *step* turun sinyal PWM 80% ke 20%, sedangkan untuk model adalah dengan simulasi hasil model diatas ada dengan memberikan fungsi *step* turun 80% ke 20%.

##### 4.3.1. Validasi model untuk heater 1

Pengujian digunakan untuk menentukan tiga keluaran  $y(s)$  pada masukan  $u_1(s)$  pengujian dilakukan dengan fungsi *step* pada heater 1, dan melihat respon pada 3 keluarannya pada thermocouple chamber. Grafik Respon fungsi *Step* fungsi turun untuk heater 1 digambarkan di bawah ini.

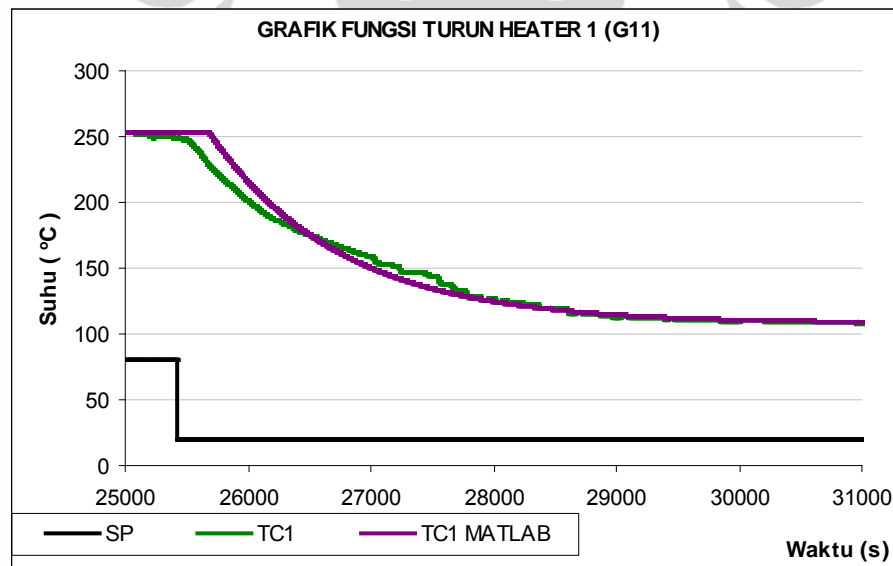


Gambar 4.4 Grafik respon suhu turun chamber dengan unit *step* untuk *heater 1*

Dengan menggunakan model sistem tungku autoclave untuk fungsi turun, maka grafik penurunan heater ini divalidasi untuk tiap fungsi alih keluaran sebagai berikut :

**a. Model  $G_{11}(s)$**

Dari grafik gambar 4.4 diatas, untuk model  $G_{11}(s)$  jika dibandingkan dengan model matlab untuk fungsi turun digambarkan sebagai berikut :



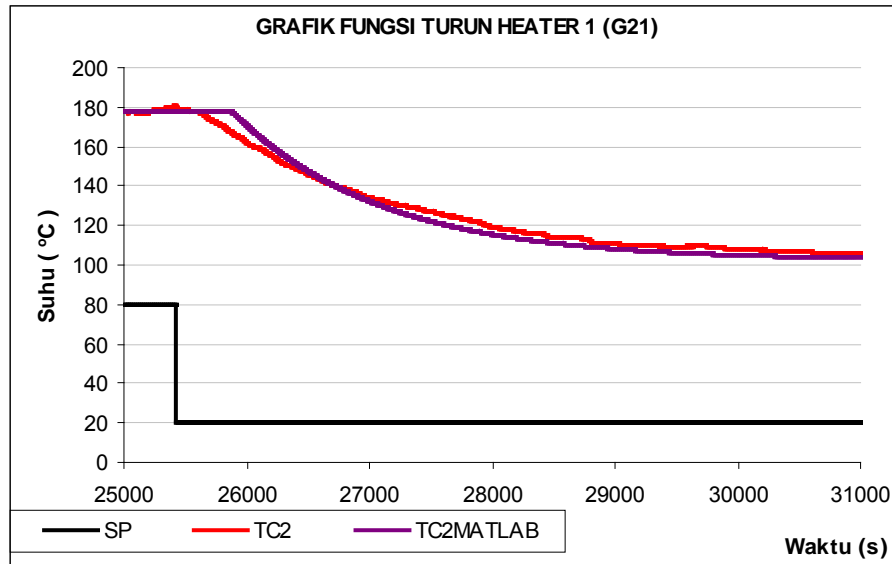
Gambar 4.5 Grafik respon suhu turun chamber  $G_{11}(s)$

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa simulasi matlab mempunyai delay lebih lambat, kemudian keadaan tunaknya yang mendekati nilai yang sama. Kesalahan rata – rata model terhadap fungsi turun heater adalah 4,2128 °C atau 2,5063%.



### b. Menentukan $G_{21}(s)$

Dari grafik gambar 4.4 diatas, untuk model  $G_{21}(s)$  jika dibandingkan dengan model matlab untuk fungsi turun digambarkan sebagai berikut :

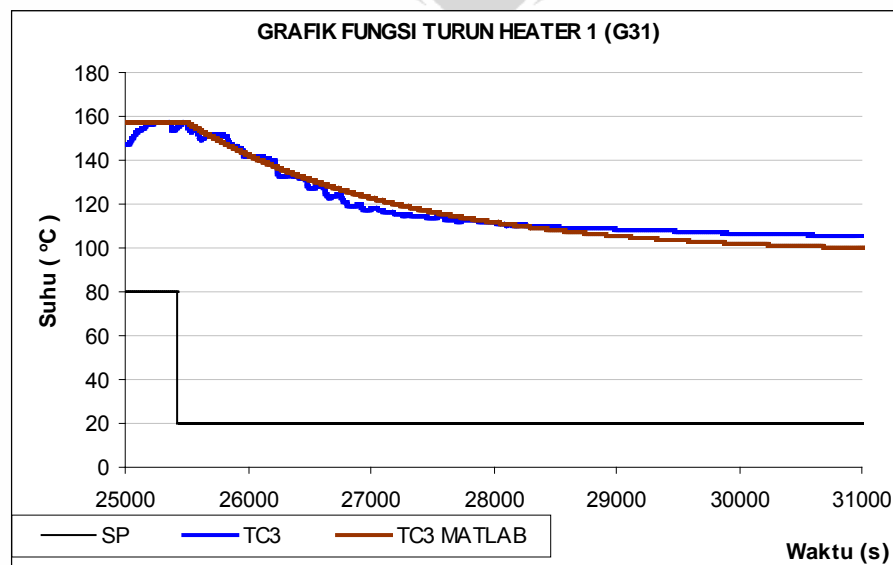


Gambar 4.6 Grafik respon suhu turun chamber  $G_{21}(s)$

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa simulasi matlab mempunyai delay lebih lambat, nilai tunak model lebih kecil dari nilai fungsi turun heaternya. Kesalahan rata – rata model terhadap fungsi turun heater adalah  $3,2056\text{ }^{\circ}\text{C}$  atau  $2,5437\%$ .

### c. Menentukan $G_{31}(s)$

Dari grafik gambar 4.4 diatas, untuk model  $G_{31}(s)$  jika dibandingkan dengan model matlab untuk fungsi turun digambarkan sebagai berikut :

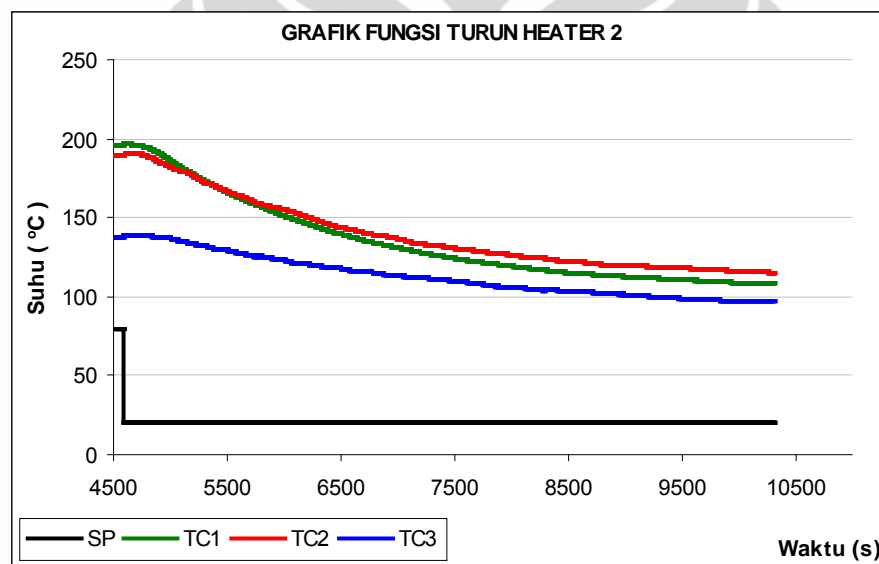


Gambar 4.7 Grafik respon suhu turun chamber  $G_{31}(s)$ 

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa simulasi matlab mempunyai delay yang sama dengan penurunan heater. Untuk keadaan tunaknya model simulasi matlab lebih rendah dari suhu heater. Kesalahan rata – rata model terhadap fungsi turun heater adalah  $3,1376\text{ }^{\circ}\text{C}$  atau  $2,7331\%$ .

#### 4.3.2. Validasi model untuk heater 2

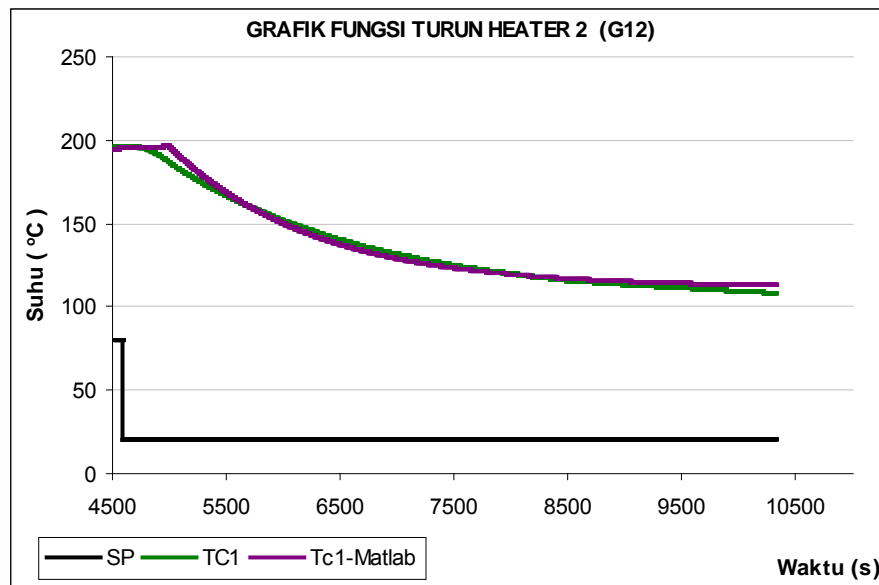
Pengujian digunakan untuk menentukan tiga keluaran  $y(s)$  pada masukan  $u_1(s)$  pengujian dilakukan dengan fungsi step pada heater 2, dan melihat respon pada 3 keluarannya pada thermocouple chamber. Grafik Respon fungsi Step untuk heater 2 digambarkan di bawah ini.

Gambar 4.8 Grafik respon suhu turun chamber dengan unit *step* untuk *heater 2*

Dengan menggunakan model sistem tungku autoclave untuk fungsi turun, maka grafik penurunan heater ini dapat divalidasi untuk tiap fungsi alih keluaran sebagai berikut :

##### a. Menentukan $G_{12}(s)$

Dari grafik gambar 4.8 diatas, untuk model  $G_{12}(s)$  jika dibandingkan dengan model matlab untuk fungsi turun digambarkan sebagai berikut :

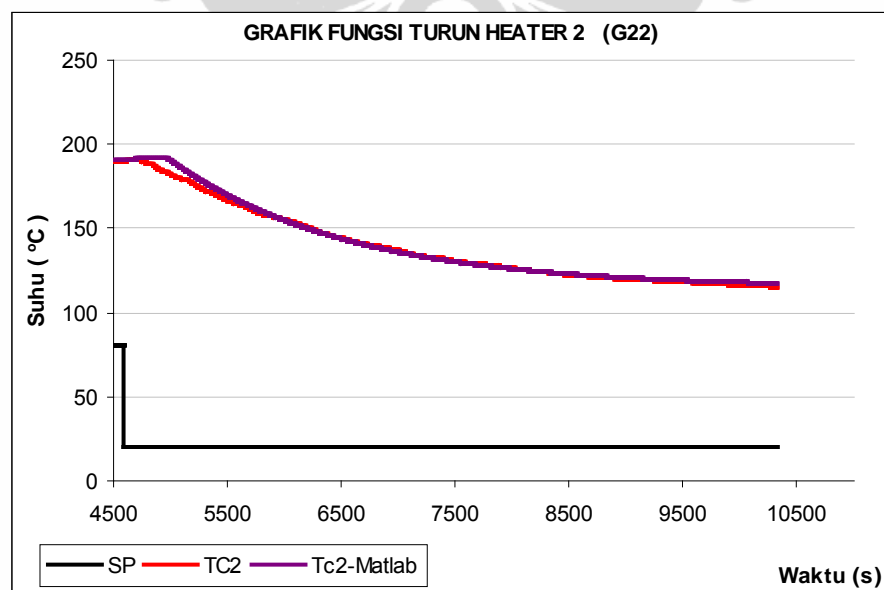


Gambar 4.9 Grafik respon suhu turun chamber  $G_{12}(s)$

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa simulasi matlab mempunyai delay lebih lambat. Untuk keadaan tunaknya, simulasi model lebih tinggi dari nilai fungsi turun heaternya. Kesalahan rata – rata model terhadap fungsi turun heater adalah  $2,2651\text{ }^{\circ}\text{C}$  atau  $1,6551\%$ .

#### b. Menentukan $G_{22}(s)$

Dari grafik gambar 4.8 diatas, untuk model  $G_{22}(s)$  jika dibandingkan dengan model matlab untuk fungsi turun digambarkan sebagai berikut :

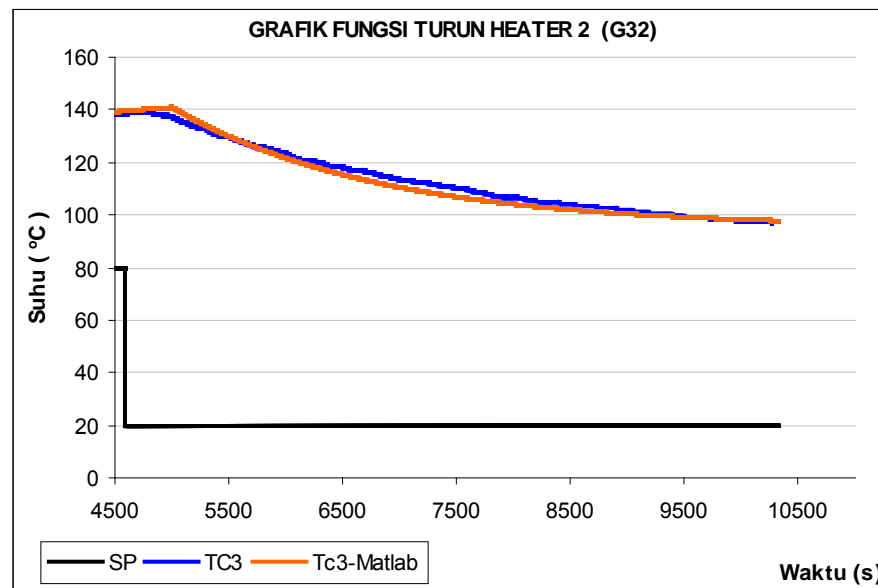


Gambar 4.10 Grafik respon suhu turun chamber  $G_{22}(s)$

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa simulasi matlab mempunyai delay lebih lambat. Kemudian keadaan tunaknya, antara model matlab dengan nilai fungsi turun heaternya mendekati nilai yang sama. Kesalahan rata – rata model terhadap fungsi turun heater adalah 1,4159 °C atau 0,9228 %.

### c. Menentukan $G_{32}(s)$

Dari grafik gambar 4.8 diatas, untuk model  $G_{32}(s)$  jika dibandingkan dengan model matlab untuk fungsi turun digambarkan sebagai berikut :

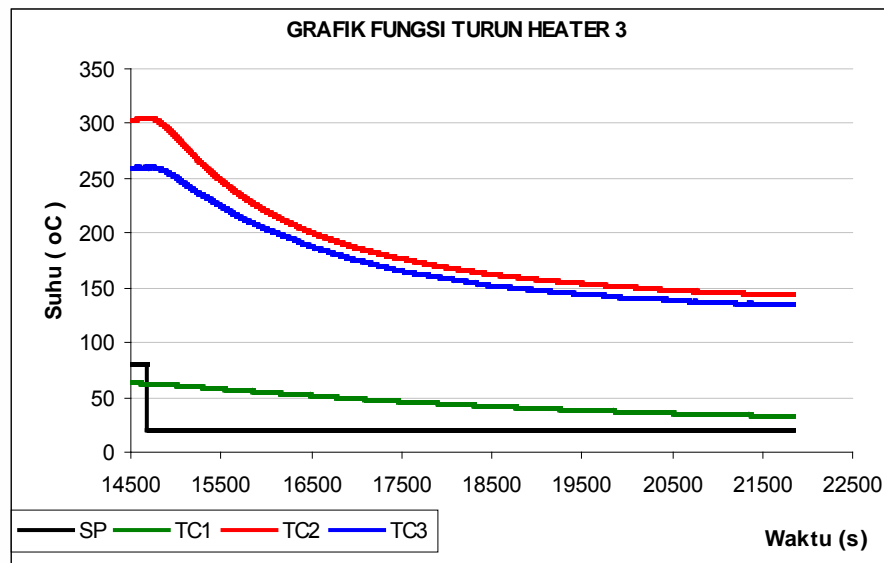


Gambar 4.11 Grafik respon suhu turun chamber  $G_{32}(s)$

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa simulasi matlab mempunyai delay lebih lambat. Kemudian keadaan tunaknya, antara model matlab dengan nilai fungsi turun heaternya mendekati nilai yang sama. Kesalahan rata – rata model terhadap fungsi turun heater adalah 1,9582 °C atau 1,7590 %.

### 4.3.3. Validasi model untuk heater 3

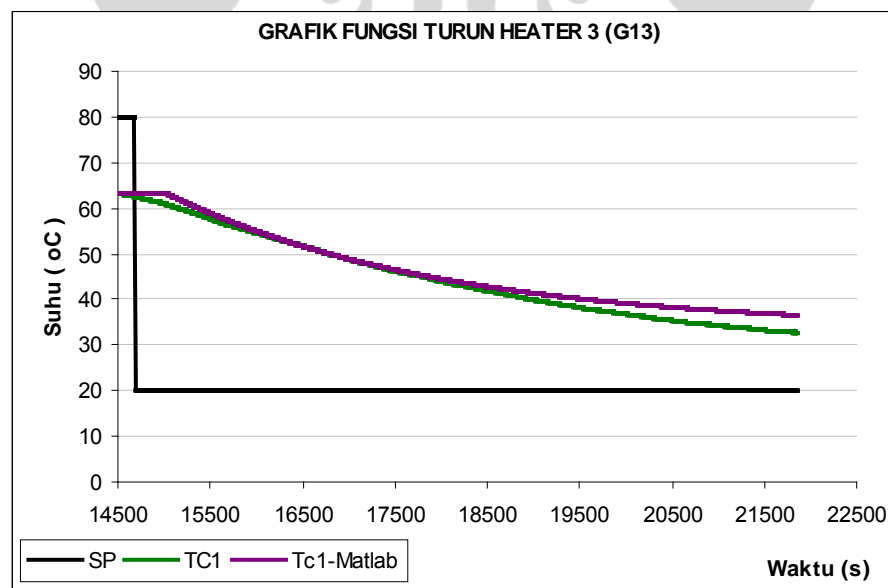
Pengujian digunakan untuk menentukan tiga keluaran  $y(s)$  pada masukan  $u_1(s)$  pengujian dilakukan dengan fungsi step pada heater 3, dan melihat respon pada 3 keluarannya pada thermocouple chamber. Grafik Respon fungsi Step fungsi turun untuk heater 3 digambarkan di bawah ini.



Gambar 4.12 Grafik respon suhu turun chamber dengan unit *step* untuk heater 3

#### a. Menentukan $G_{13}(s)$

Dari grafik gambar 4.12 diatas, untuk model  $G_{13}(s)$  jika dibandingkan dengan model matlab untuk fungsi turun digambarkan sebagai berikut :

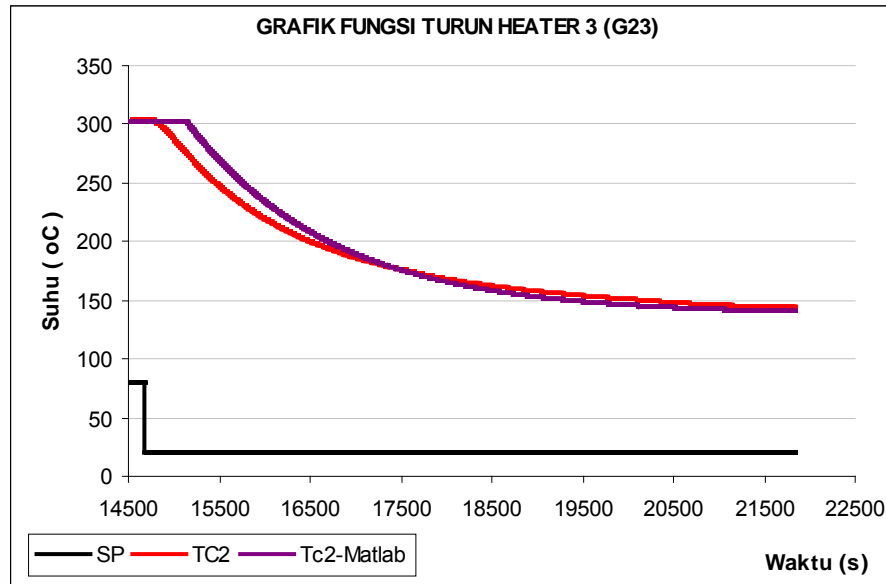


Gambar 4.13 Grafik respon suhu turun chamber  $G_{13}(s)$

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa simulasi matlab mempunyai delay lebih lambat. Untuk keadaan tunaknya, simulasi model lebih tinggi dari nilai fungsi turun heaternya. Kesalahan rata – rata model terhadap fungsi turun heater adalah 1,508 °C atau 3,6248 %.

### b. Menentukan $G_{23}(s)$

Dari grafik gambar 4.12 diatas, untuk model  $G_{23}(s)$  jika dibandingkan dengan model matlab untuk fungsi turun digambarkan sebagai berikut :

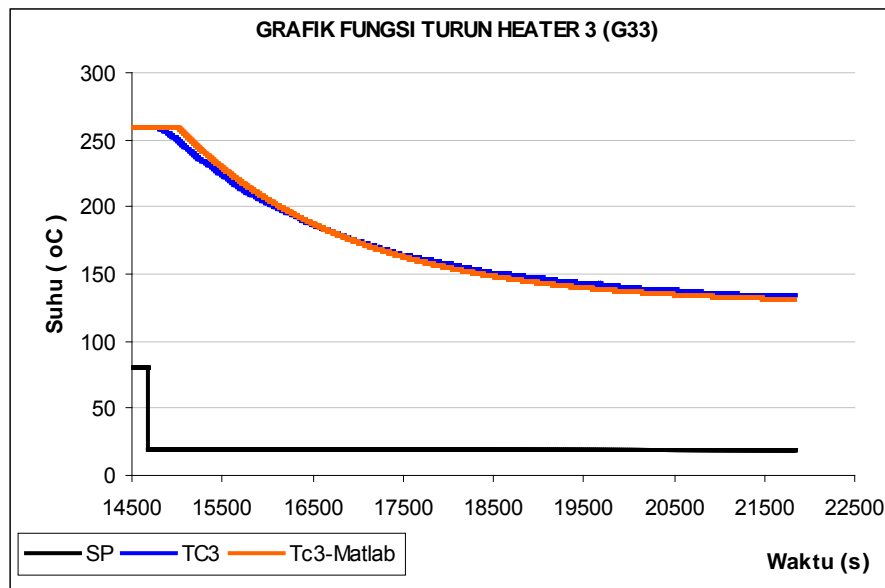


Gambar 4.14 Grafik respon suhu turun chamber  $G_{23}(s)$

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa simulasi matlab mempunyai delay lebih lambat, kemudian menuju nilai tunak yang lebih kecil dari nilai fungsi turun heaternya. Kesalahan rata – rata model terhadap fungsi turun heater adalah  $6,7124^{\circ}\text{C}$  atau  $3,3017\%$ .

### c. Menentukan $G_{33}(s)$

Dari grafik gambar 4.12 diatas, untuk model  $G_{33}(s)$  jika dibandingkan dengan model matlab untuk fungsi turun digambarkan sebagai berikut :



Gambar 4.15 Grafik respon suhu turun chamber  $G_{33}(s)$

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa simulasi matlab mempunyai delay lebih lambat. Kemudian keadaan tunaknya, antara model matlab dengan nilai fungsi turun heaternya mendekati nilai yang sama. Kesalahan rata – rata model terhadap fungsi turun heater adalah  $2,8146^{\circ}\text{C}$  atau  $1,6627\%$ .

Dari ketiga pengujian fungsi penurunan suhu diatas, nilai rata-rata prosentasi kesalahan kesalahan terbesar ada pada model  $G_{13}(s)$  sebesar  $3,6248\%$ . Kesalahan ini dimungkinkan karena pengaruh sistem fluida pada tungku autoclave, dimana pada saat kenaikan atau penurunan suhu terjadi perubahan fasa dari zat cair ke gas atau uap, begitu pula sebaliknya. Selain itu juga adalah sistem tekanan chamber dimana tekanan akan naik sejalan dengan kenaikan suhu, dan sebaliknya tekanan akan turun sejalan dengan penurunan suhu. Pada saat penurunan suhu ini, respon tekanan relatif lebih lambat dibandingkan pada saat kenaikan suhu, sehingga parameter pengujian open loop untuk menentukan model sistem autoclave antara suhu naik dan suhu turun akan berlainan terdapat perbedaan. Dengan nilai prosentase keasalahan yang di bawah nilai  $5\%$  atau tingkat akurasi  $95\%$ , secara kesuruhan dari penentuan model fungsi naik divalidasi dengan model fungsi turun dapat dikatakan model adalah valid dan dapat digunakan selanjutnya untuk menentukan sistem kendali modelnya.

## BAB 5

### RANCANGAN SISTEM KENDALI

#### TUNGKU AUTOCLAVE DAN PEMBAHASAN

##### 5.1. Model Sistem Tungku Autoclave

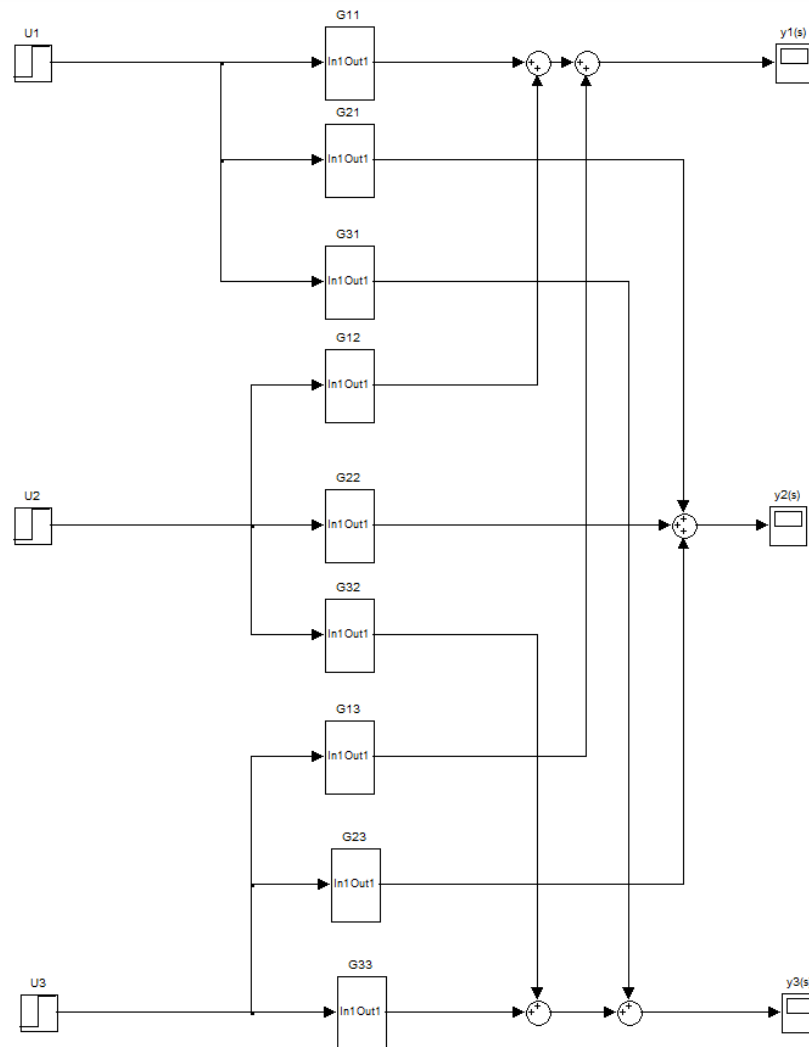
Bentuk model fungsi alih tungku autoclave adalah sistem matriks 3x3 yaitu :

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ y_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & G_{13}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & G_{23}(s) \\ G_{31}(s) & G_{32}(s) & G_{33}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ u_3(s) \end{bmatrix} \text{ atau}$$

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ y_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1,8033 \cdot e^{-235s}}{564s+1} & \frac{1,47 \cdot e^{-395s}}{1275s+1} & \frac{0,0354 \cdot e^{-336s}}{828s+1} \\ \frac{1,2554 \cdot e^{-265s}}{1,2554 \cdot e^{-265s}} & \frac{1,388 \cdot e^{-264s}}{1,388 \cdot e^{-264s}} & \frac{2,08 \cdot e^{-441s}}{2,08 \cdot e^{-441s}} \\ \frac{1,415 \cdot e^{-335s}}{2955s+1} & \frac{0,85 \cdot e^{-402s}}{1798s+1} & \frac{1,702 \cdot e^{-340s}}{1386s+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ u_3(s) \end{bmatrix}$$

Gambar blok diagram fungsi alih digambarkan dalam perangkat lunak Matlab/Simulink dibawah ini.





Gambar 5.1 Blok sistem diagram model tungku autoclave

## 5.2. Decoupling dengan Penurunan Langsung ( Ideal Decoupling )

Penentuan parameter untuk ideal decoupling ditentukan berdasarkan persamaan pada bagian 2.4.1 di atas, yaitu dengan memasukkan nilai gain statis tiap elemen matriks. Nilai parameter decouplingnya setelah dilakukan perhitungan didapat sebagai berikut :

$$D_{11}(s) = D_{22}(s) = D_{33}(s) = 1$$

$$D_{21}(s) = 1,3569$$

$$D_{31}(s) = -1,5090$$

$$D_{12}(s) = -0,81873$$

$$D_{32}(s) = 0,18126$$

$$D_{13}(s) = 4,57432$$

$$D_{23}(s) = -5,63678$$

### 5.3. Decoupling dengan Model Inverted Decoupling

Penentuan parameter untuk inverted decoupling ditentukan berdasarkan persamaan pada bagian 2.4.2 di atas. Dengan memasukan nilai fungsi alih matriks model proses, didapat persamaan matriks decouplingnya sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 D(s) &= \begin{bmatrix} 1 & \frac{1,47 \cdot e^{-395s}}{1275s+1} & \frac{0,0354 \cdot e^{-336s}}{828s+1} \\ \frac{1,2554 \cdot e^{-265s}}{1307s+1} & 1 & \frac{2,08 \cdot e^{-441s}}{1245s+1} \\ \frac{1,388 \cdot e^{-264s}}{1558s+1} & \frac{0,85 \cdot e^{-402s}}{1798s+1} & 1 \\ \frac{1,415 \cdot e^{-335s}}{2955s+1} & \frac{1,702 \cdot e^{-340s}}{1386s+1} & 1 \\ \frac{1,702 \cdot e^{-340s}}{1386s+1} & & \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & \frac{1,47(564s+1)}{1,8033(1275s+1)} e^{-160s} & \frac{0,0354(564s+1)}{1,8033(828s+1)} e^{-101s} \\ \frac{1,2554(1558s+1)}{1,388(1307s+1)} e^{-s} & 1 & \frac{-2,08(1558s+1)}{1,388(1245s+1)} e^{-177s} \\ \frac{1,415(1386s+1)}{1,702(2955s+1)} \cdot e^{5s} & \frac{0,85(1386s+1)}{1,702(1798s+1)} \cdot e^{-62s} & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & \frac{829,08s+1,47}{2299,2075s+1,8033} e^{-160s} & \frac{19,9656s+0,0354}{605,9088s+1,8033} e^{-593s} \\ \frac{1955,9132s+1,2554}{1814,116s+1,388} e^{-s} & 1 & \frac{3240,64s+2,08}{1728,06s+1,388} e^{-177s} \\ \frac{1961,19s+1,415}{5029,41s+1,702} \cdot e^{5s} & \frac{1178,1s+0,85}{3060,196s+1,702} \cdot e^{-62s} & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

### 5.4. Parameter Kontrol PI Proses

Dengan menggunakan grafik ciancone pada gambar 2.12 diatas, didapat parameter kontrol PI sebagai berikut :

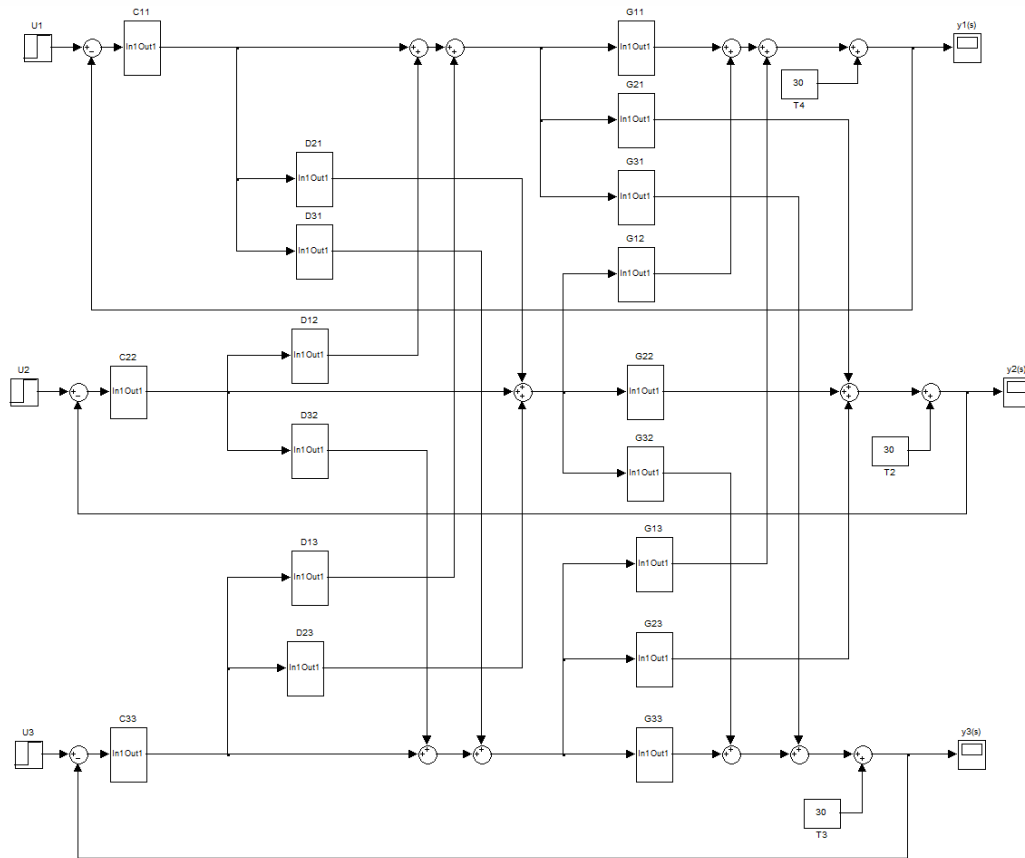
Kontrol 11 ( $C_{11}$ ) :  $K_c = 0,61$        $T_i = 687,12$

Kontrol 22 ( $C_{22}$ ) :  $K_c = 1,009$        $T_i = 1864,34$

Kontrol 33 ( $C_{33}$ ) :  $K_c = 0,764$        $T_i = 1656,96$

selanjutnya controller PI ini, dihubungkan dengan masukan dari matriks fungsi alih proses. Untuk  $C_{11}$  ke masukan  $u_1$ ,  $C_{22}$  ke masukan  $u_2$ , dan untuk  $C_{33}$  ke

masukan  $u_3$ . Gambar rangkaian kontrol dengan sistem decoupling digambarkan dibawah ini.

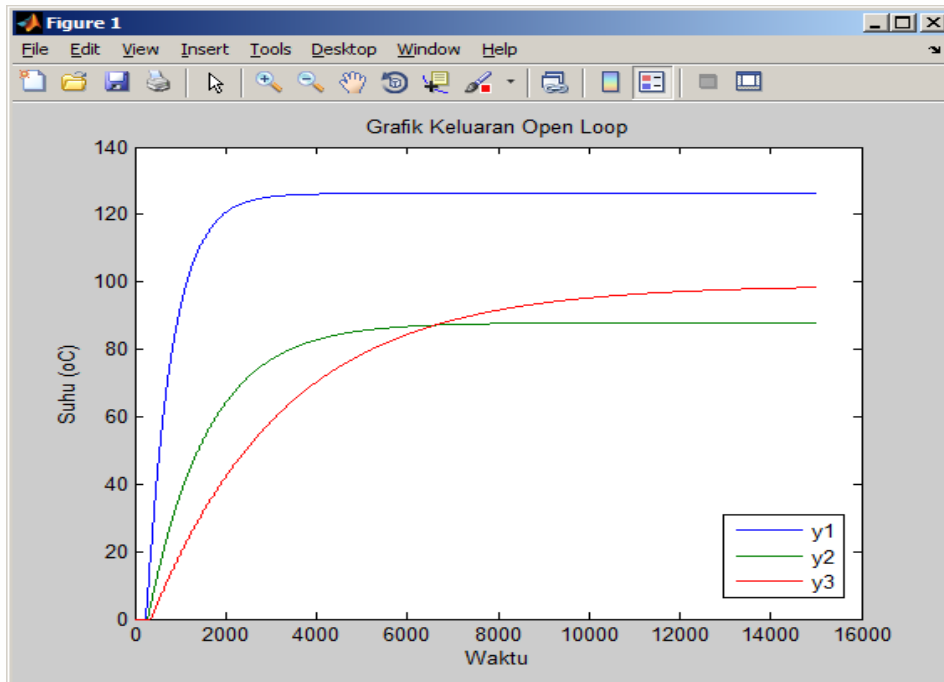


Gambar 5.2 Blok sistem diagram model tungku autoclave dengan decoupling dan kontrol PI

## 5.5. Pengujian, Simulasi dan Pembahasan

### 5.5.1. Simulasi uji lingkaran terbuka

Simulasi uji lingkaran terbuka (*open loop*) digunakan untuk menguji respon tiap keluaran untuk masing – masing masukan. Masukan yang digunakan adalah  $u_1(s)$  dengan sinyal step 0 - 70%, respon keluaran  $y_1(s)$ ,  $y_2(s)$  dan  $y_3(s)$  digambarkan di bawah ini:

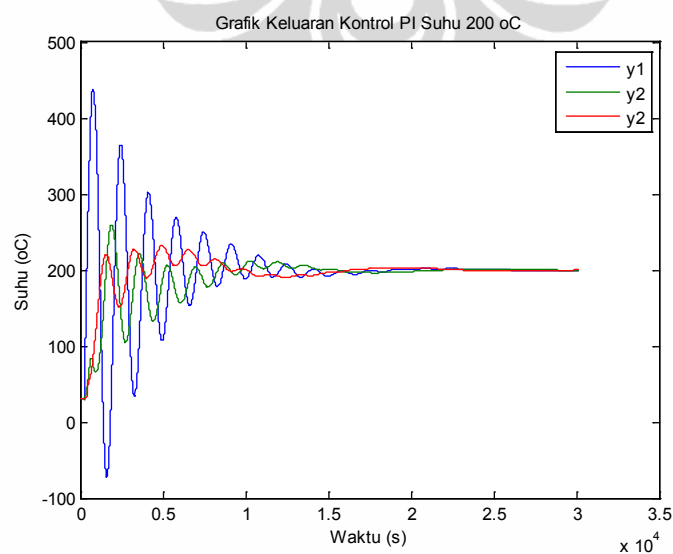


Gambar 5.3. Grafik keluaran open loop model autoclave

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa masukan step untuk  $u_1(s)$ , selain menghasilkan keluaran pada  $y_1$ , juga mempengaruhi keluaran,  $y_2$  dan  $y_3$ . Untuk sinyal step masukan 70% nilai  $y_1$  adalah 126,2 °C,  $y_2$  adalah 98,34 °C, dan  $y_3$  adalah 87,88 °C.

### 5.5.2. Simulasi Model Decoupling dengan Penurunan Langsung

Pada simulasi ini digunakan masukan fungsi step dan fungsi *ramp* suhu dengan setting suhu 200 °C. Grafik keluaran sistem kendali PI, digambarkan dibawah ini :



Gambar 5.4 Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI

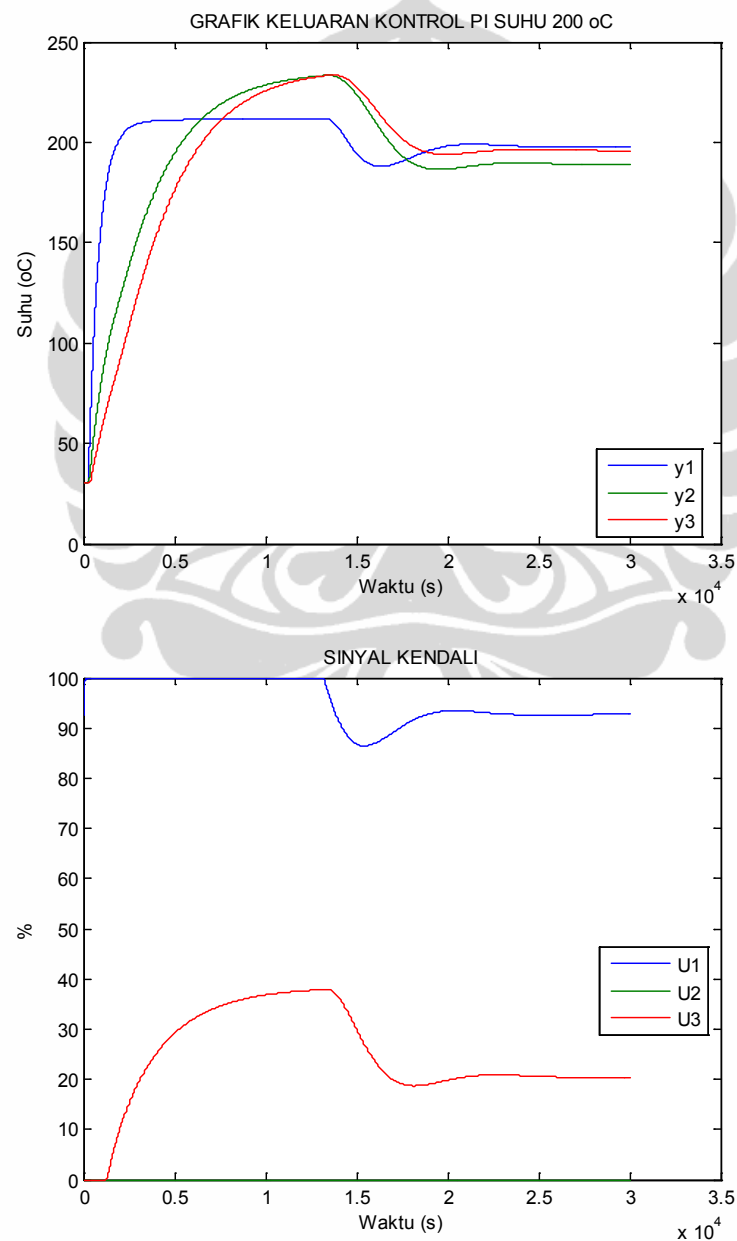
Dari grafik diatas, untuk ketiga keluarannya masih terjadi osilasi dan terdapat over shoot, sehingga diperlukan pengaturan nilai penguatan kontrol PI. Perubahan penguatan yang dilakukan pada ketiganya yaitu :

Kontrol 11 :  $K_c = 0,61$  menjadi  $K_c = 0,21$

Kontrol 22 :  $K_c = 1,009$  menjadi  $K_c = 0,509$

Kontrol 11 :  $K_c = 0,764$  menjadi  $K_c = 0,164$

Grafik keluaran dan sinyal kendali, setelah dilakukan perubahan parameter penguatan kontrol PI adalah sebagai berikut ;



Gambar 5.5 Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI setelah dilakukan pengaturan penguatan dengan sinyal masukannya

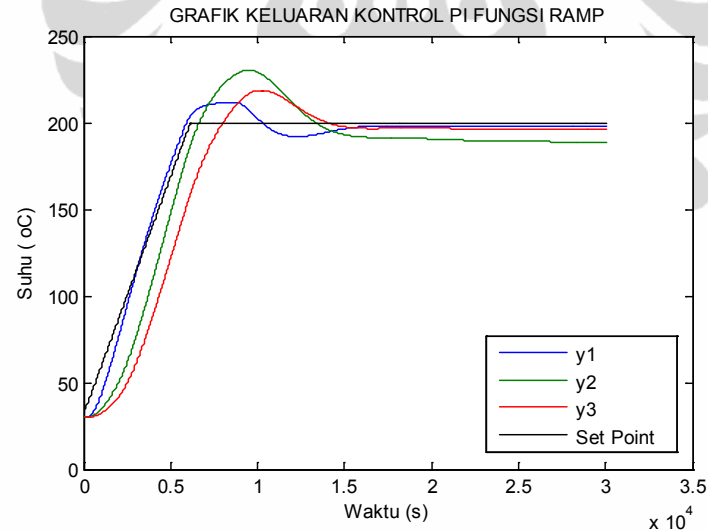
Dari grafik diatas, untuk masukan fungsi step dengan setting 200 °C, osilasi sistem keluaran sudah tidak ada, nilai overshoot dan keadaan tunak ditabelkan di bawah ini :

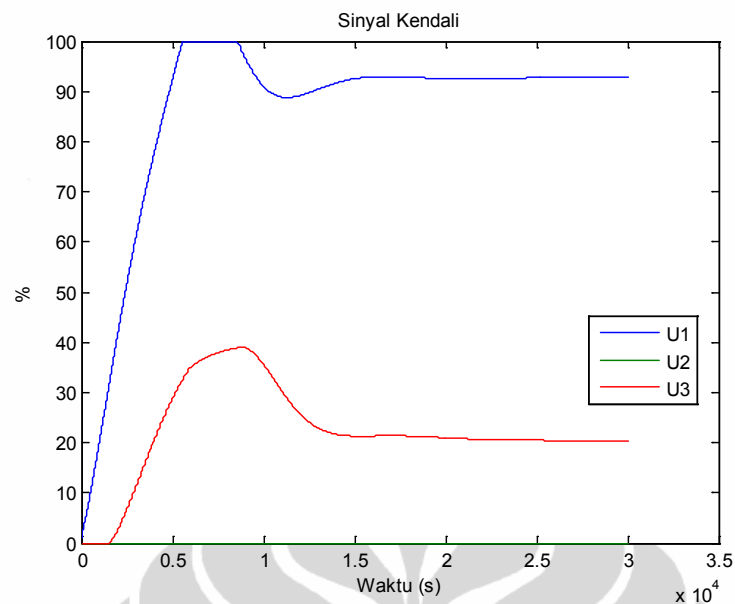
Tabel 5.1. keluaran fungsi step 200 °C

keluaran	overshoot		Nilai Tunak	
	°C	%	°C	%
$y_1(s)$	11,66	5,83 %	197,92	1,04
$y_2(s)$	33,39	16,70 %	188,79	5,60
$y_3(s)$	33,61	16,80 %	195,86	2,07

Dari data tabel diatas nilai overshoot tertinggi keadaan steady state adalah untuk keluaran  $y_3(s)$ . Sinyal pengendalian pada simulasi ini hanya masukan  $u_1(s)$  dan  $u_3(s)$  yang ada, sedangkan untuk  $u_2(s)$  tidak ada.

Untuk masukan fungsi *ramp* dengan kenaikan suhu 100°C/jam, grafik keluarannya dan sinyal kendalinya sebagai berikut :





Gambar 5.6. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI untuk Fungsi *ramp*

Dari grafik diatas, untuk masukan fungsi *ramp* dengan setting 200 °C dan kenaikan 100 °C/jam, nilai kesalahan tunak pada saat kenaikan, nilai overshoot dan nilai keadaan tunak ditabelkan di bawah ini :

Tabel 5.2. keluaran fungsi *ramp* 200 °C

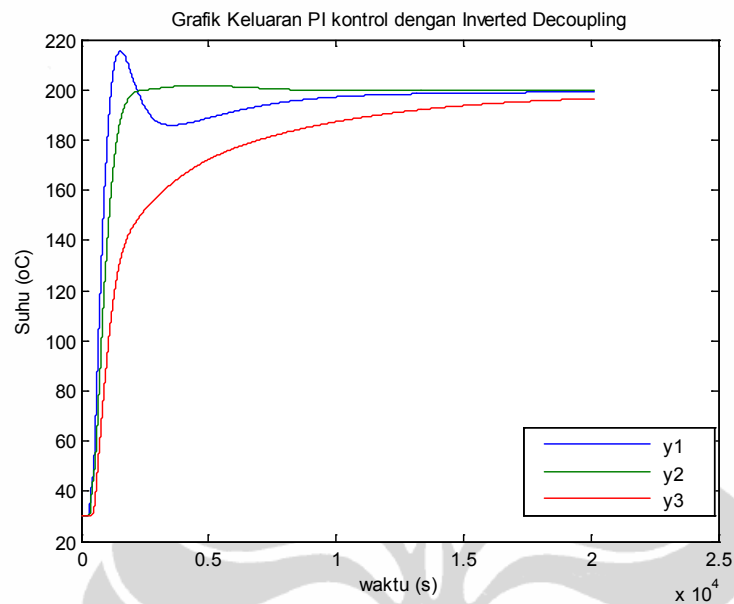
keluaran	Kesalahan tunak pada kenaikan		Overshoot		Nilai Tunak	
	°C	%	°C	%	°C	%
$y_1(s)$	5,32	2,71	11,61	5,81	297,90	1,05
$y_2(s)$	22,77	13,95	30,39	15,20	188,97	5,52
$y_3(s)$	48,26	29,09	9,45	9,45	195,96	2,02

Dari data tabel diatas nilai overshoot tertinggi keadaan steady state adalah untuk keluaran  $y_3(s)$ . Sinyal pengendalian pada simulasi ini hanya masukan  $u_1(s)$  dan  $u_3(s)$  yang ada, sedangkan untuk  $u_2(s)$  tidak ada. Pada sistem kendali ini nilai overshoot suhu ini pada proses harus dihindari, karena sistem model adalah sistem orde satu.

### 5.5.3. Simulasi Model *Inverted Decoupling*

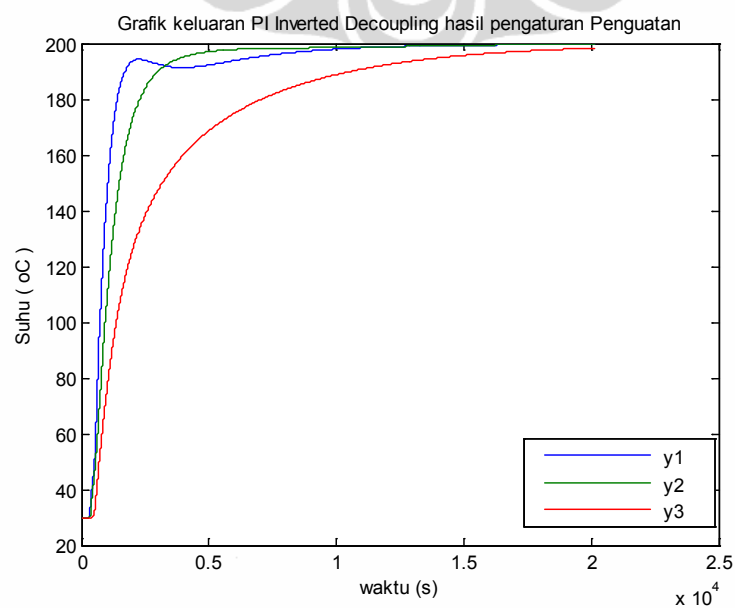
Pada simulasi model ini digunakan masukan fungsi step dan fungsi *ramp*, suhu 200 °C. Grafik keluaran sistem kendali PI dengan parameter sama dengan

diatas, untuk setpoint suhu  $200^{\circ}\text{C}$ , model kontrol close loop digambarkan dibawah ini :

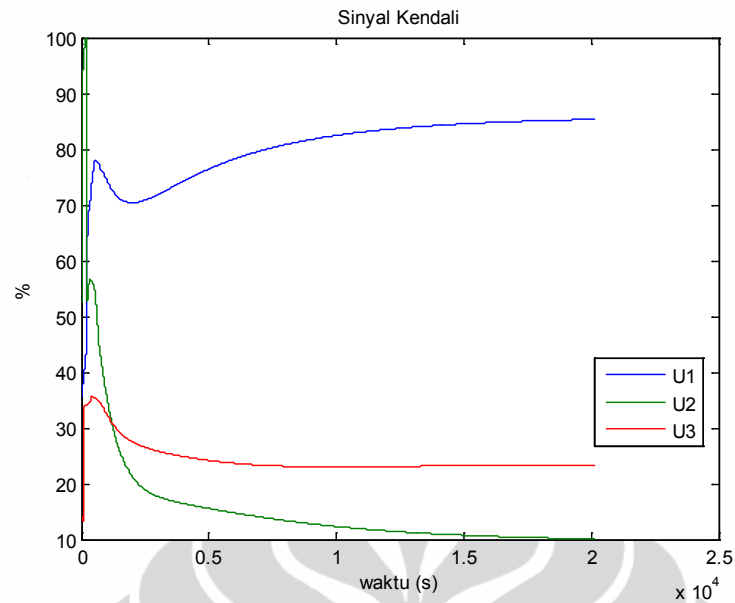


Gambar 5.7 Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI

Dari grafik diatas, untuk keluaran  $y_1$  masih terdapat overshoot sebesar ketiga keluarannya masih terjadi osilasi dan terdapat overshoot sebesar  $15^{\circ}\text{C}$ , sehingga diperlukan pengaturan nilai penguatan kontrol PI. Perubahan penguatan yang dilakukan adalah untuk kontroller 22, nilai  $K_c = 0,509$  diubah menjadi  $K_c = 0,309$ , sedangkan parameter yang lain tetap. Grafik keluaran setelah dilakukan perubahan parameter penguatan kontrol PI adalah sebagai berikut :



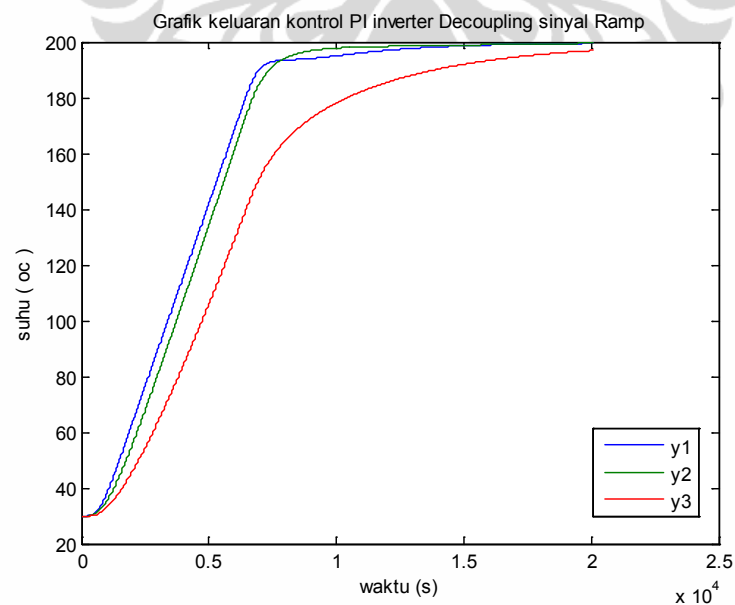


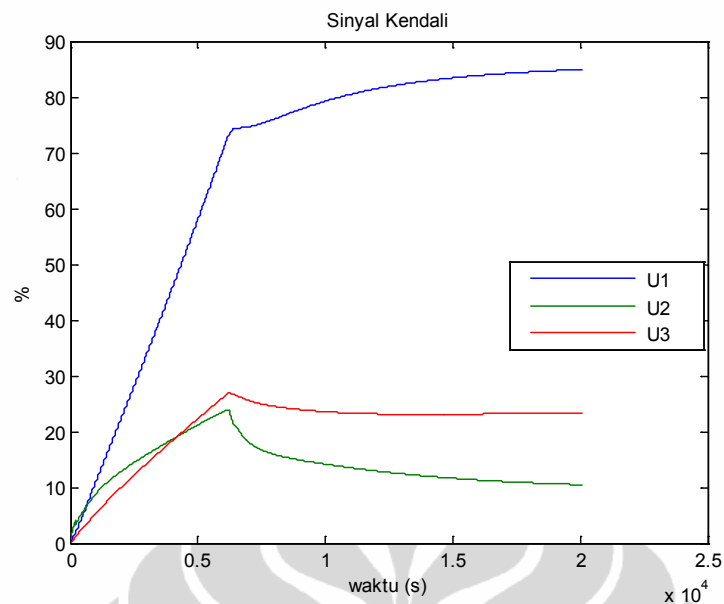


Gambar 5.8 Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI hasil pengaturan penguatan.

Dari grafik dapat dilihat, overshoot sudah tidak ada, tetapi untuk keluaran sinyal  $y_3$  terjadi kelambatan menuju nilai tunaknya.

Untuk masukan fungsi *ramp* dengan dengan kenaikan suhu  $100^\circ\text{C}/\text{jam}$  dan setting suhu  $200^\circ\text{C}$ , grafik keluarannya dan sinyal kendalinya sebagai berikut :





Gambar 5.9. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI fungsi *ramp*

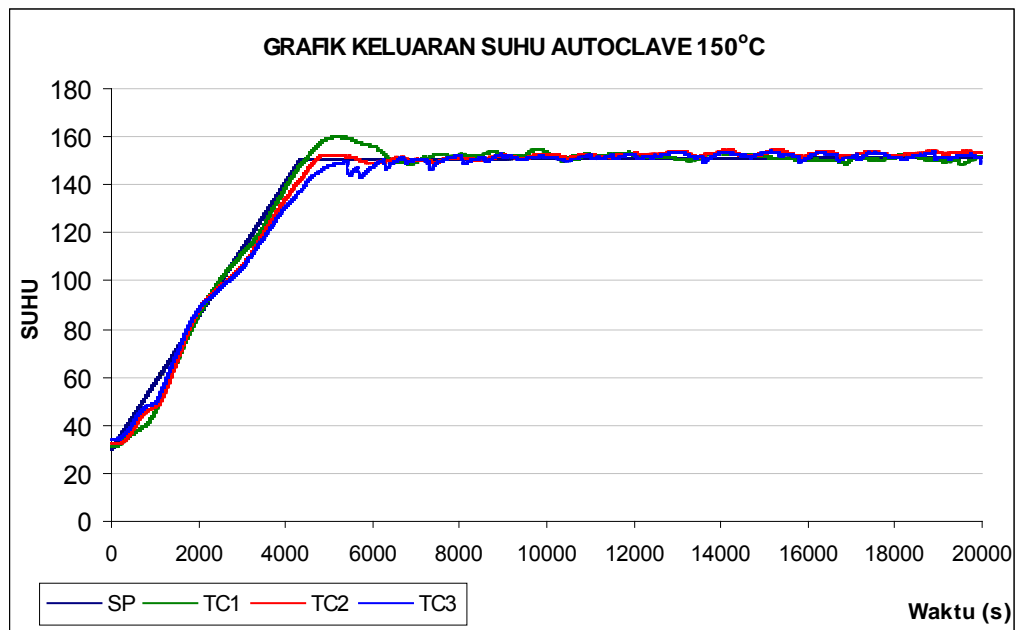
Dari grafik diatas, untuk masukan fungsi *ramp* dengan setting 200 °C dengan model inverted decoupling, kesalahan tunak pada saat suhu kenaikan terutama untuk keluaran  $y_2$  adalah 7,8°C dan  $y_3$  adalah 36,5°C. Jika dibandingkan dengan decoupler sebelumnya, maka untuk sistem decoupler inverted pada sistem ini lebih baik dengan ideal atau simple decoupling, sehingga pada eksperimen dengan sistem tungku autoclave digunakan model inverted decoupling.

#### 5.5.4. Pengujian Model Inverted Decoupling dengan eksperimen langsung

Model inverted decoupling ini sistem matriks 3x3 pada pengujian langsung dengan alat tungku autoclave ini menggunakan pemrograman Labview versi 6.1, dengan listing program diperlihatkan pada lampiran. Untuk parameter eksperimen adalah suhu 150 °C dan 200 °C, dengan kenaikan menggunakan fungsi *ramp* dengan kenaikan 100 °C/jam. Hasil keluaran sistem tungku autoclave untuk setting suhu 150 °C digambarkan di bawah ini.

##### a. Pengujian suhu 150 °C

Hasil keluaran sistem tungku autoclave untuk setting suhu 150 °C digambarkan di bawah ini.

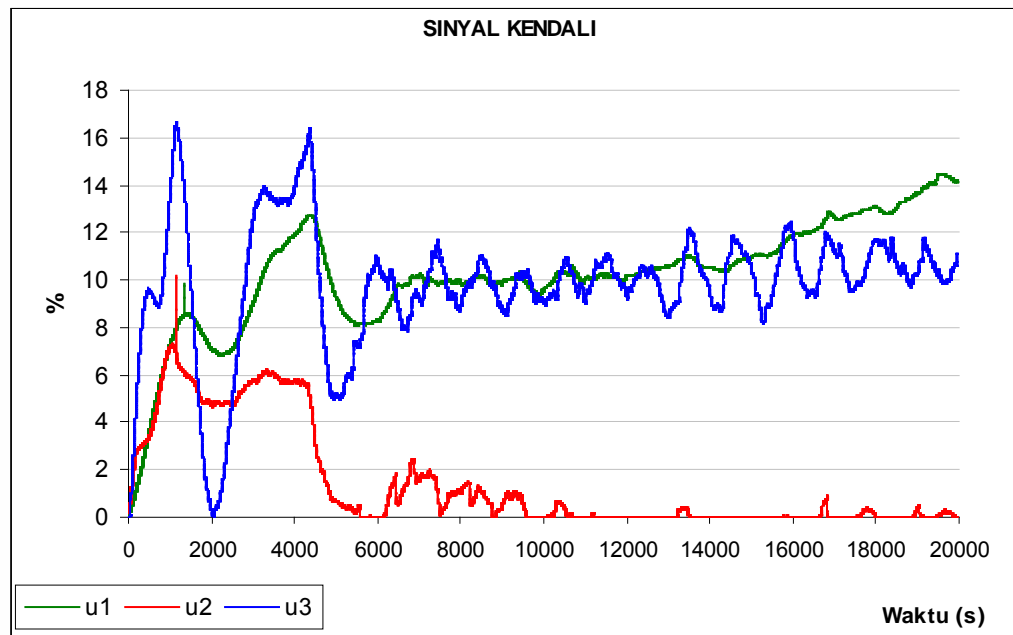


Gambar 5.10. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI fungsi *ramp* Suhu 150 °C

Tabel 5.3. keluaran fungsi *ramp* 150 °C Eksperimen

keluaran	Kesalahan tunak pada kenaikan		overshoot		Nilai Tunak		<i>Settling Time</i> (s)
	°C	%	°C	%	°C	%	
$y_1(s)$	2,83	2,63	8,82	5,56	149,13	0,58	4180
$y_2(s)$	6,27	5,57	0	0	149,17	0,55	4460
$y_3(s)$	8,47	7,44	0	0	146,95	2,03	4869

Dari tabel 5.3 di atas, nilai kesalahan tunak pada saat kenaikan jika di rata-rata adalah 5,21%, kesalahan tunak terbesar adalah untuk keluaran thermocouple 3 ( $y_3(s)$ ) yaitu 7,44%. Untuk nilai kondisi tunak (steady state) dengan kesalahan terbesar adalah untuk keluaran thermocouple 3 ( $y_3(s)$ ) yaitu 146,95 °C atau kesalahannya 2,03%. Nilai kesalahan ini sudah masuk kriteria pencapaian sistem kontrol yaitu dibawah 5%. Untuk nilai waktu turun (*settling time*) untuk keluaran thermocouple 3 mempunyai waktu terbesar yaitu 7854 detik atau 2 jam 10 menit 54 detik. Nilai *settling time* ini lebih lambat dibandingkan dengan keluaran thermocouple lain karena posisi dari keluaran ini adalah yang paling atas dari sistem tungku autoclave sehingga proses pemanasan lebih lambat.

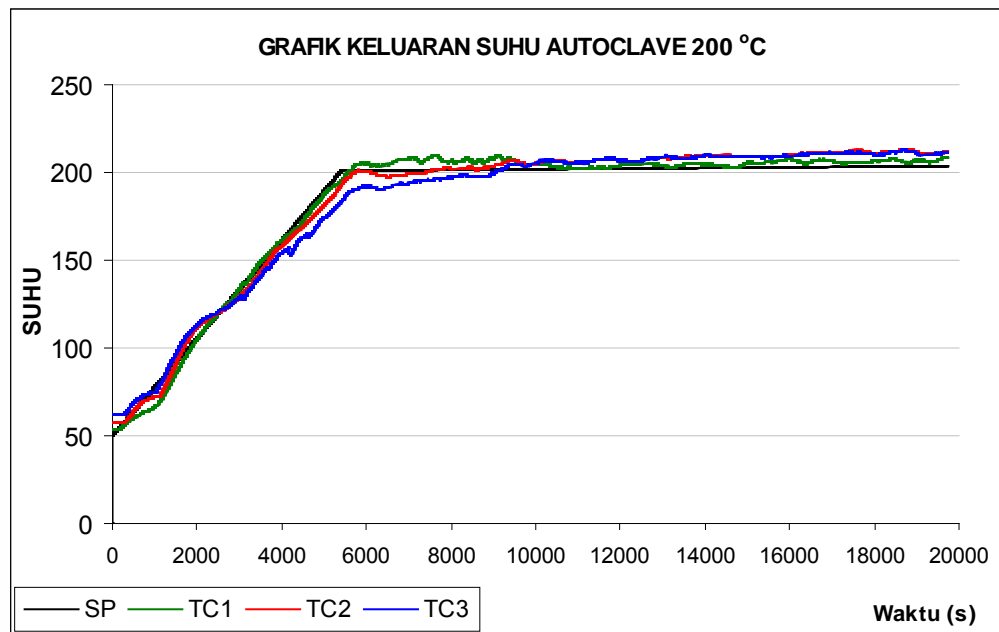


Gambar 5.11. Grafik Sinyal Kendali fungsi *ramp* 150°C

Dari grafik sinyal kendali gambar 5.12. diatas, nilai sinyal kendali yang mendominasi adalah masukan  $u_1$  dan  $u_3$ . Untuk sinyal  $u_2$  pada saat kenaikan suhu ada sinyal, tetapi setelah keadaan tunak, sinyal kendali  $u_2 = 0$ , karena pada keadaan tunak, heater1 ( $u_1$ ) dan heater3 ( $u_3$ ) sudah cukup untuk pemanasan sistem tungku.

#### b. Pengujian suhu 200 °C

Hasil keluaran sistem tungku autoclave untuk setting suhu 200 °C digambarkan di bawah ini.



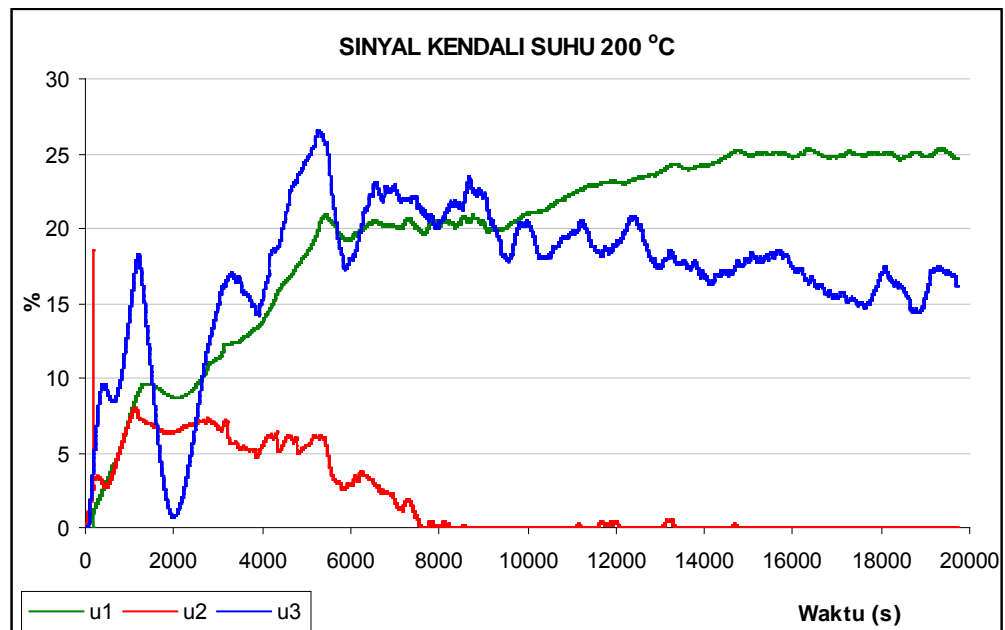
Gambar 5.12. Grafik keluaran tungku autoclave dengan kontrol PI fungsi *ramp* Suhu 200 °C

Tabel 5.4. keluaran fungsi *ramp* 200 °C Eksperimen

keluaran	Kesalahan tunak pada kenaikan		overshoot		Nilai Tunak		<i>Settling Time</i> (s)
	°C	%	°C	%	°C	%	
$y_1(s)$	5,67	4,98	0	0	198,60	0,70	5357
$y_2(s)$	9,72	7,43	0	0	199,26	0,37	6770
$y_3(s)$	14,66	10,45	0	0	195,24	2,38	9246

Dari tabel 5.4 di atas, nilai kesalahan tunak pada saat kenaikan jika di rata-rata adalah 7,62%, kesalahan tunak terbesar adalah untuk keluaran thermocouple 3 ( $y_3(s)$ ) yaitu 14,66 °C atau 10,45%. Untuk nilai kondisi tunak (steady state) dengan kesalahan terbesar adalah untuk keluaran thermocouple 3 ( $y_3(s)$ ) yaitu 195,24 °C atau kesalahannya 2,38%. Nilai kesalahan ini sudah masuk kriteria pencapaian sistem kontrol yaitu dibawah 5%. Untuk nilai waktu turun (*settling time*) untuk keluaran thermocouple 3 mempunyai waktu terbesar yaitu 9246 detik atau 2 jam 34 menit 6 detik. Nilai *settling time* ini lebih lambat dibandingkan dengan keluaran thermocouple lain hal ini sama dengan penjelasan

untuk suhu 150 °C, yaitu posisi dari keluaran ini adalah yang paling atas dari sistem tungku autoclave sehingga proses pemanasan lebih lambat



Gambar 5.13. Grafik Sinyal Kendali fungsi *ramp* 200°C

Dari grafik sinyal kendali gambar 5.14. diatas, nilai sinyal kendali yang mendominasi adalah masukan  $u_1$  dan  $u_3$ . Untuk sinyal  $u_2$  pada saat kenaikan suhu ada sinyal, tetapi setelah keadaan tunak, sinyal kendali  $u_2 = 0$ , karena pada keadaan tunak, heater1 ( $u_1$ ) dan heater3 ( $u_3$ ) sudah cukup untuk pemanasan sistem tungku.

## BAB 6

### KESIMPULAN

Kesimpulan dari tesis ini adalah:

1. Dalam penentuan model matematis yang dilakukan secara empiris dengan eksperimen secara langsung dengan penyederhanaan sistem keluaran didapat model MIMO dengan matriks 3x3 untuk bentuk fungsi alihnya.
2. Model fungsi alih yang didapat dari eksperimen merupakan bentuk model orde satu ditambah *delay*, dengan asumsi respon tidak melewati nilai set point yang telah ditentukan atau *overshoot* mendekati 0.
3. Dari simulasi model dengan kontrol PI dengan *decoupling* didapat, untuk model inverted decoupling mempunyai hasil lebih baik dibandingkan dengan model dengan penurunan secara langsung (*ideal decoupling*). Untuk simulasi pada suhu 200°C dengan fungsi *ramp*. nilai kesalahan tunak pada saat kenaikan untuk ideal decoupling parameter  $y_2$  dan  $y_3$  adalah 60 °C sedangkan untuk inverted decoupling parameter  $y_2$  adalah 7,8 °C dan  $y_3$  adalah 36,5 °C.
4. Hasil eksperimen langsung dengan sistem alat autoclave, untuk setting suhu 150 °C dengan kenaikan fungsi *ramp* 100 °C/jam didapat hasil pada tunak adalah untuk  $y_1$  adalah 149,13°C atau kesalahan 0,58% *settling time* 6780 detik,  $y_2$  adalah 149,17°C atau kesalahan 0,55% *settling time* 5694 detik dan  $y_3$  adalah 146,95°C atau 2,03% *settling time* 7854.
5. Hasil Eksperimen untuk setting suhu 200°C dengan kenaikan fungsi *ramp* 100°C/jam didapat hasil pada tunak adalah untuk  $y_1$  adalah 198,60°C atau kesalahan 0,70% *settling time* 5357 detik,  $y_2$  adalah 199,26°C atau kesalahan 0,37% *settling time* 6770 detik dan  $y_3$  adalah 195,24°C atau 2,38% *settling time* 9246 detik.

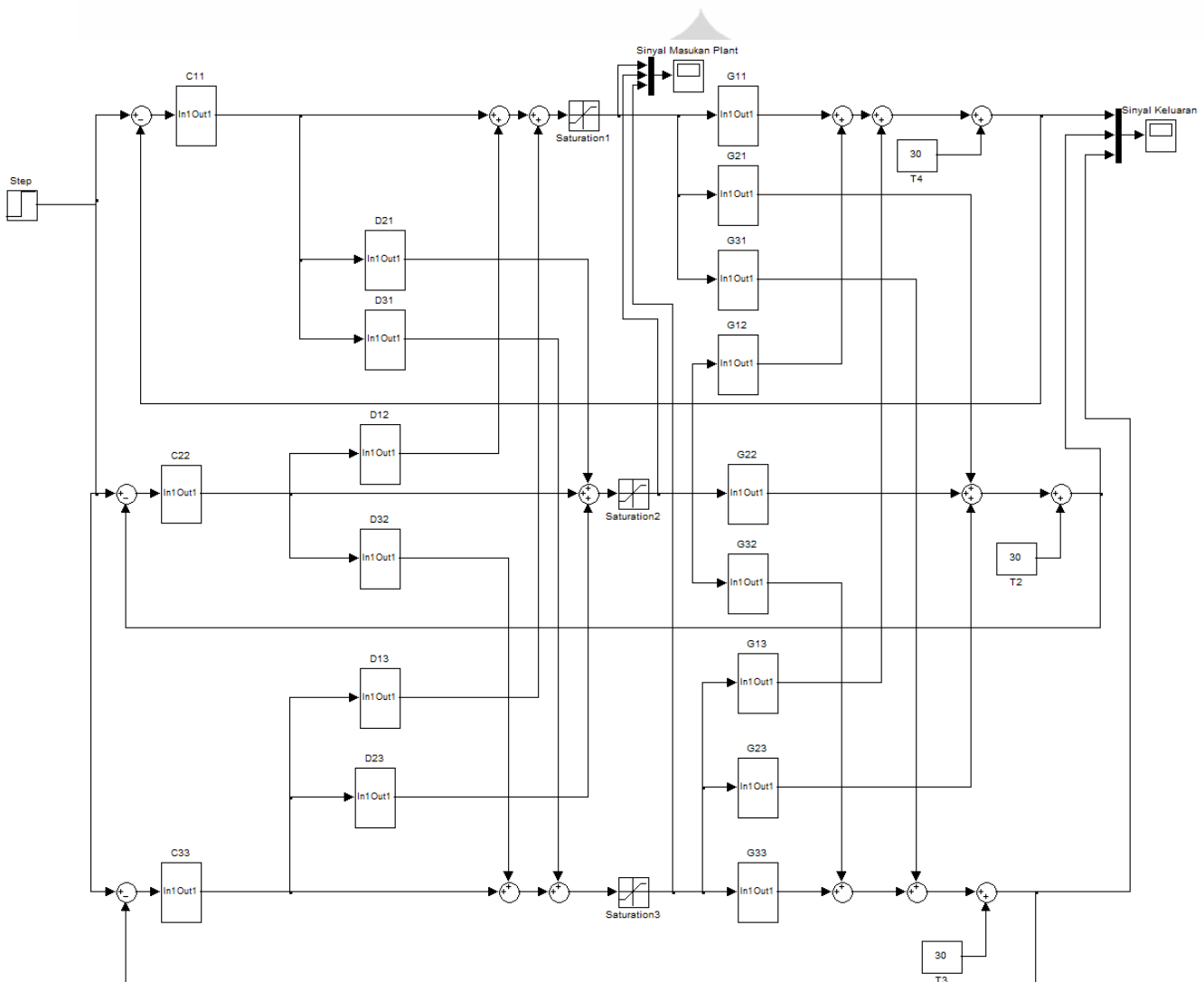
## DAFTAR PUSTAKA

1. B Herutomo, “Karakteristik Disain dan Operasi IEBE”, Pusdiklat BATAN, 2009.
2. Tri Yulianto, “ Proses Fabrikasi Elemen Bakar Nuklir di IEBE”, Pusdiklat BATAN, 2009
3. NIRA,” ME 24 Passivation Autoclave Instruction Manual ”, 1984
4. Achmad Suntoro, “Catatan Teknis Kendali Suhu ME-24 dan QE-12”, BATAN,2010
5. Advantech,“ADAM 4000 Data Modul User’s Manual”,2008
6. “LabVIEW user manual”, National Instruments,2001
7. Thomas E marlin, “Process Control, Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance”, Mc Graw-Hill,New York,1995.
8. Aleksander Preglej, Richard Karba, Igor Steiner, Igor Skrjanc, “ Mathematical Model of an autoclave”, Journal of Mechanical Engineering, 2011.
9. G.M.Kamalakaran, M Subba Rao, “ Development of a Computer Based Process Control System for An Autoclave to Cure Polymer Matrix Composites”, International Conference an Instrumentation, Pune, 2004.
10. M.T.Tham, “Multivariable Control : An Introduction To Decoupling Control”, Dep. Of Chemical engineering University of Newcastle upon Tyne, 1999.
11. Juan Garrido, Francisco Vazquez, Fernando Morilla, “ An Extended Approach of Inverted Decoupling “, Journal of Process Control, 2011.
12. E.Gagnon, A.Pomerleau, A. Desbiens, “ Simplified, Ideal or Inverted Decoupling?, ISA Transactions, 1998.
13. Dingyu Xue, YangQuan Chen, Derek P.Atherton, “ Linear Feedback Control”, Society fot Industrial and Applied Mathematics, 2007.

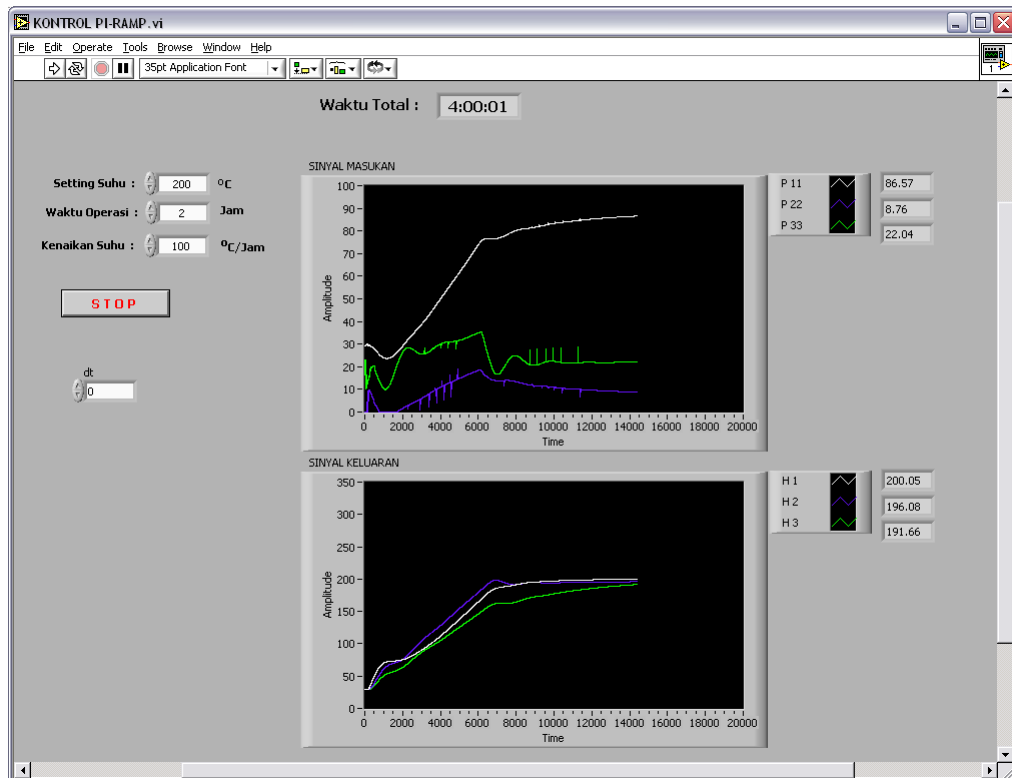


## LAMPIRAN

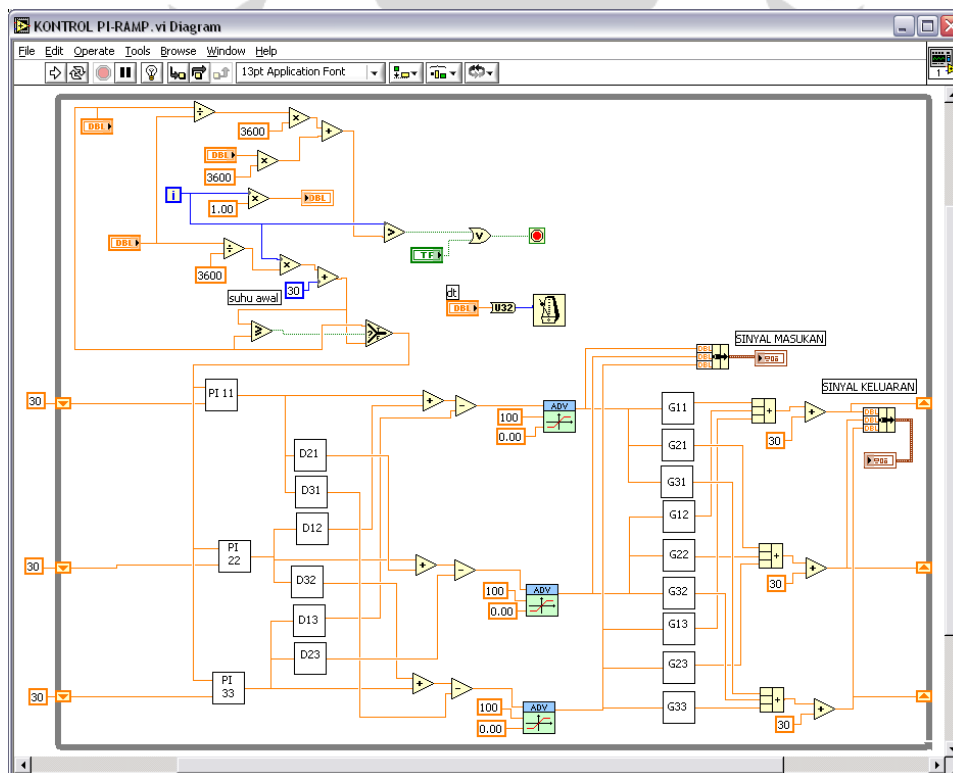
1. Gambar Simulink Simulasi Ideal Decoupling dan inverted decoupling untuk pengujian fungsi step 150 °C dan 200 °C.



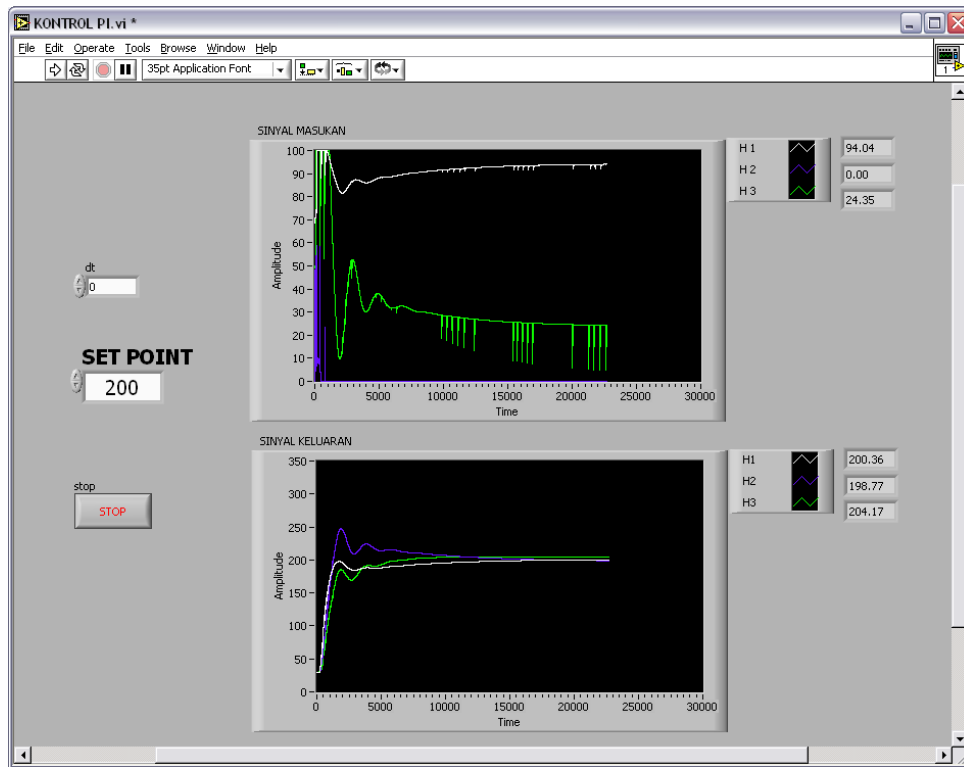
## 2. Simulasi Fungsi *Ramp* Setting 200 °C



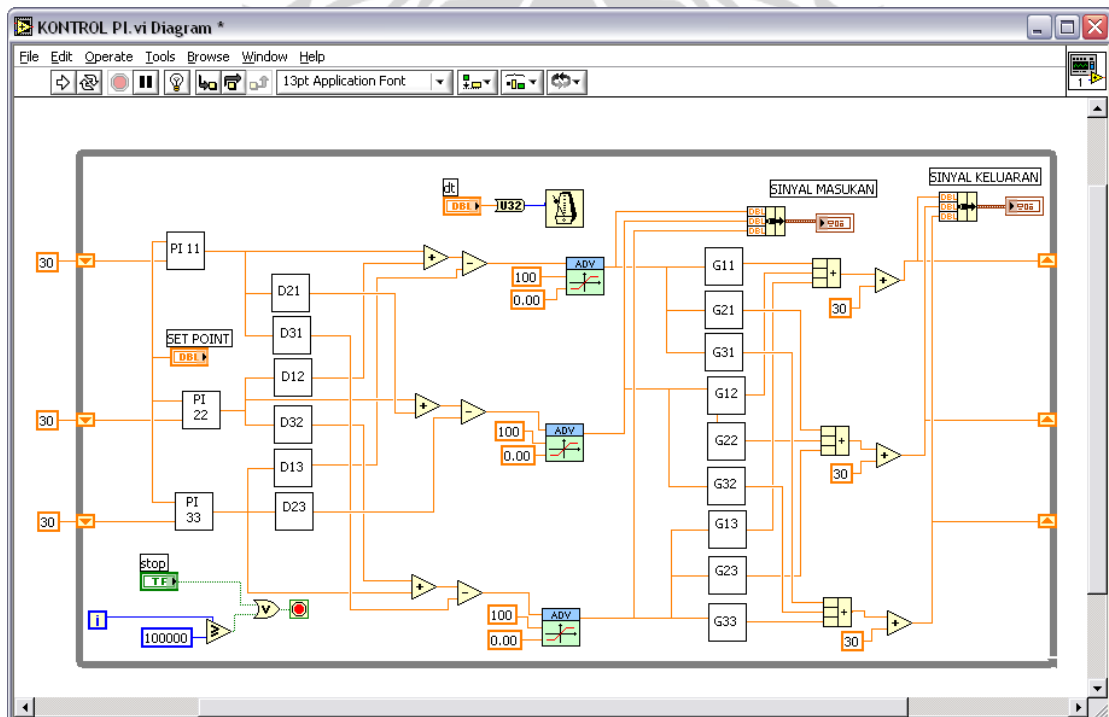
Listing Program Simulasi dengan Inverted Decoupled :



### 3. Program Simulasi fungsi step Setting 200 °C



Listing Program :



#### 4. LISTING PROGRAM Kontrol PI dengan Inverted Decoupling :

