



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI TEKANAN UAP
PADA *STEAM-DRUM* BOILER SKALA KECIL
MENGUNAKAN PID DAN LQR**

TESIS

**TRI ANGGONO
0806424762**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS INDONESIA
JANUARI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI TEKANAN UAP
PADA *STEAM-DRUM* BOILER SKALA KECIL
MENGUNAKAN PID DAN LQR**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister

**TRI ANGGONO
0806424762**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
KEKHUSUSAN TEKNIK KONTROL INDUSTRI
UNIVERSITAS INDONESIA
JANUARI 2011**

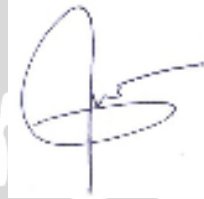
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Tri Anggono

NPM : 0806424762

Tanda tangan :



Tanggal : 04 Januari 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Tri Anggono

NPM : 0806424762

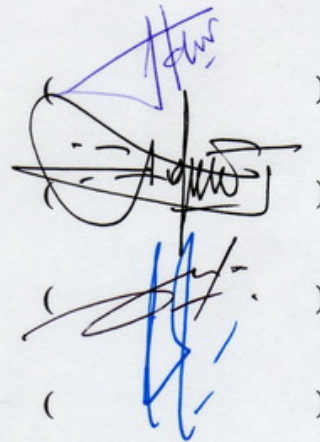
Program Studi : Teknik Kontrol Industri

Judul Tesis : Perancangan Sistem Kendali Tekanan Uap Pada *Steam-Drum*
Boiler Skala Kecil Menggunakan PID dan LQR

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada program studi Teknik Elektro Kekhususan Teknik Kontrol Industri Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

1. Dr.Abdul Halim, M.Eng
2. Dr.Ir. Ridwan Gunawan, MT
3. Dr.Ir. Feri Yusivar, M.Eng
4. Ir. Aries Subiantoro, M.SEE



()
()
()
()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 04 Januari 2011

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas Rahmat dan Ridhonya, penulis dapat menyelesaikan laporan Tesis ini. Penulisan laporan Tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sangat mendalam kepada:

- (1) Bapak Dr. Abdul Halim, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan Tesis ini.
- (2) Kedua orang tua saya dan isteri tercinta yang sedang mengandung anak pertama kami untuk selalu memberikan dorongan moril serta doa yang senantiasa menyertai kepada saya.
- (3) Pimpinan Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan, Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral, yang telah memberikan kesempatan tugas belajar kepada saya.

Dan sebagai penutup, saya berdoa agar Allah SWT dapat membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga Tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 04 Januari 2011

Penulis,

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Tri Anggono

NPM : 0806424762

Program Studi : Teknik Kontrol Industri

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Tesis

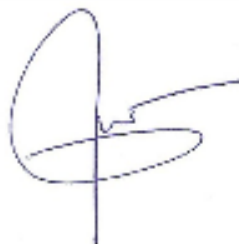
Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Non- Eksklusif (*Non Exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : Perancangan Sistem Kendali Tekanan Uap Pada *Steam-Drum* Boiler Skala Kecil Menggunakan PID dan LQR beserta perangkat yang ada (bila diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari 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: 04 Januari 2011

Yang menyatakan,



(Tri Anggono)

ABSTRAK

Nama : Tri Anggono
Program Studi : Teknik Kontrol Industri
Judul : Perancangan Sistem Kendali Tekanan Uap Pada *Steam-Drum* Boiler Skala Kecil Menggunakan PID dan LQR

Pengendalian keluaran tekanan uap *steam-drum* boiler pada PLTU penting dilakukan agar dapat menghasilkan energi yang cukup untuk memutar turbin generator sehingga menghasilkan daya listrik yang diinginkan. Untuk merancang sistem pengendalian tekanan uap yang tepat diperlukan model *steam-drum* boiler dan metode perancangan pengendali yang mampu mengatasi perubahan kondisi *steam-drum* boiler yang dinamis.

Pada tesis ini, diaplikasikan dua metode perancangan sistem kendali untuk *steam-drum* boiler yaitu sistem kendali PID dan LQR (*Linear Quadratic Regulator*). Sistem kendali PID dirancang untuk sistem SISO (*single input single output*). Sistem SISO merupakan bentuk penyederhanaan dari sistem MISO (*multi input single output*) dengan menganalisa besarnya efek masing-masing masukan terhadap keluarannya. Berdasarkan model SISO ini, parameter kendali PID ditetapkan dan dipergunakan untuk mengendalikan laju alir panas masukan. Pada perancangan sistem kendali LQR, kendali ini diaplikasikan baik untuk sistem SISO maupun MISO. Kendali LQR yang dikembangkan memiliki pre-kompensator.

Untuk mengetahui efektifitas dari rancangan yang didapat simulasi dilakukan dengan mempergunakan perangkat lunak MATLAB/SIMULINK. Pada simulasi ini, kinerja masing-masing sistem kendali (PID dan LQR) dibandingkan pada sistem SISO, sedangkan untuk sistem MISO perbandingan dilakukan antara kendali LQR dengan pre-kompensator dan tanpa pre-kompensator. Dari hasil simulasi yang didapat bahwa untuk sistem SISO kinerja kendali PID menghasilkan *overshoot* pada keluarannya, sedangkan pada kendali LQR tanpa pre-kompensator akan menghasilkan kenaikan sesaat pada sinyal kendali panas masukan yang sangat besar sekali. Untuk sistem MISO kinerja kendali LQR menggunakan pre-kompensator menghasilkan keluaran tanpa adanya *overshoot* dengan kenaikan sesaat pada panas masukan yang lebih kecil dibandingkan tanpa menggunakan pre-kompensator.

Kata Kunci – Model MISO *Steam-Drum* Boiler, Model SISO *Steam-Drum* Boiler kendali tekanan uap, PID, LQR.

ABSTRACT

Name : Tri Anggono
Study Program : Industrial Control Engineering
Title : Steam Pressure Control System Design On a Small Scale Steam-Drum Boiler Using PID and LQR

Controlling steam pressure output from a steam-boiler drum in power plant is important in order to produce enough energy to turn turbine generators that can produce the desired electrical power. To design a proper control system, steam-drum boiler model and controller design method is needed to be able to deal with the changing conditions of the steam-drum boiler dynamics.

In this thesis, two methods of control system design have been applied for the steam-drum boiler, which are PID and LQR (Linear Quadratic Regulator) control system. The designed of PID control system is applied on SISO system (single input single output). SISO system is a model simplification from MISO system by analyzing the effect of each input to output. Based on SISO model, PID control parameters are established and used to control the flow rate of heat input. In the LQR control system design, these controls are applied both for SISO and MISO systems. The LQR control system has a pre-compensator.

To determine the effectiveness of the designed control system, simulation was performed by using the software MATLAB / SIMULINK. In this simulation, for SISO system the performance of control system (PID and LQR) compared each other, while for MISO systems comparison is made between LQR control with pre-compensator and without pre-compensator. Results of the simulation shows that the performance of SISO system using PID control produced overshoot on the output, while the LQR control without pre-compensator produced a huge momentary increase in heat input control signals. The performance of MISO system using LQR control with pre-compensator produced an output without any overshoot and momentary increase in heat input is much smaller compared without using a pre-compensator.

Keywords – SISO *Steam-drum* boiler model, MISO *Steam-drum* boiler model steam pressure control, PID, LQR.

DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMAKASIH	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Tujuan Penelitian	2
1.3.Batasan Masalah	2
1.4.Metodologi Penelitian	2
1.5.Sistematika Penulisan	3
BAB 2 LANDASAN TEORI	4
2.1. <i>Steam-Drum</i> Boiler	4
2.1.1. Gambaran Umum	4
2.1.2. Model Non Linier <i>Steam-Drum</i> Boiler	5
2.2. Sistem Kendali PID (Proposional-Integral-Diferensial)	8
2.2.1. Sistem Kendali Proposional	8
2.2.2. Sistem Kendali Integral	10
2.2.3. Sistem Kendali Diferensial	12
2.2.4. Sistem Kendali Proposional-Integral-Diferensial (PID)	13
2.2.5. Penalaan Parameter PID	15
2.3. Sistem Kendali LQR (<i>Linear Quadratic Regulator</i>)	16

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM KENDALI UNTUK <i>STEAM-DRUM</i> BOILER SKALA KECIL	20
3.1. Model Linier <i>Steam-Drum</i> Boiler	20
3.2. Analisa Model Linier	24
3.2.1. Nilai <i>Eigen</i>	24
3.2.2. Uji <i>Controllability</i>	24
3.2.3. Uji <i>Observability</i>	25
3.3. Perancangan Sistem Kendali PID	25
3.4. Perancangan Sistem Kendali LQR	28
3.4.1. Perancangan Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan Model Linier SISO	29
3.4.2. Perancangan Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan Model Linier MISO Yang Disederhanakan	31
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA	33
4.1. Pengujian Sistem Kendali Proposional, PI, dan PID	34
4.1.1. Pengujian Sistem Kendali Proposional (P)	35
4.1.2. Pengujian Sistem Kendali Proposional-Integral (PI)	37
4.1.3. Pengujian Sistem Kendali PID	39
4.2. Pengujian Sistem Kendali LQR	41
4.2.1. Pengujian Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan SISO Tanpa Pre-Kompensator	41
4.2.2. Pengujian Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan SISO Menggunakan Pre-Kompensator	44
4.2.3. Pengujian Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan MISO Tanpa Pre-Kompensator	47
4.2.4. Pengujian Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan MISO Menggunakan Pre-Kompensator	50
4.3. Analisa Kelebihan dan Kelemahan Sistem Kendali PID dan LQR Untuk <i>Steam-Drum</i> Boiler Skala Kecil	54
BAB 5 KESIMPULAN	57
DAFTAR REFERENSI	58

DAFTAR PUSTAKA

59

- LAMPIRAN-A Hasil Simulasi Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO
Dengan Menggunakan Pre-Kompensator
- LAMPIRAN-B Model Simulink
- LAMPIRAN-C Tabel Uap Tersaturasi
- LAMPIRAN-D Data Fisik Boiler



DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1. Sistem <i>Steam-Drum</i> Boiler	4
Gambar 2.2. Diagram Blok Pengendali Proporsional	8
Gambar 2.3. Grafik Hubungan Antara PB, Keluaran Pengendali Dan Kesalahan.	9
Gambar 2.4. Kurva Sinyal Kesalahan $e(t)$ Terhadap t Dan Kurva $u(t)$ Terhadap t Pada Pembangkit Kesalahan Nol	10
Gambar 2.5. Diagram Blok Diagram Hubungan Antara Besaran Kesalahan Dengan Pengendali Integral	11
Gambar 2.6. Perubahan Keluaran Sebagai Akibat Penguatan Dan Kesalahan	11
Gambar 2.7. Diagram Blok Pengendali Diferensial	12
Gambar 2.8. Kurva Waktu Hubungan Masukan-Keluaran Pengendali Diferensial	13
Gambar 2.9. Blok Diagram Sistem Kendali PID Analog	14
Gambar 2.10. Hubungan Dalam Fungsi Waktu Antara Sinyal Keluaran Dengan Masukan Untuk Pengendali PID	14
Gambar 2.11. Sistem Kendali LQR (<i>Linear Quadratic Regulator</i>)	17
Gambar 3.1. Penentuan Titik Operasi Dari Hasil Simulasi Simulink/Matlab	21
Gambar 3.2. Diagram Blok Simulink/Matlab Perbandingan Keluaran Model Linier dan Non-Linier Lingkar Terbuka	23
Gambar 3.3. Perbandingan Hasil Keluaran Model Linier dan Non Linier	23
Gambar 3.4. Diagram Blok Simulink/Matlab Pendekatan Praktis Model SISO	26
Gambar 3.5. Respons Keluaran Sistem SISO Lingkar Terbuka	27
Gambar 3.6. Diagram Blok Simulink/Matlab Perbandingan Keluaran Model Linier dan Model Linier Yang Disederhanakan	30
Gambar 3.7. Perbandingan Hasil Keluaran Dari Model Linier Awal dan Model Linier Yang Telah Disederhanakan	30

Gambar 4.1.	Alur Kerja Perancangan dan Simulasi Sistem Kendali	33
Gambar 4.2.	Diagram Blok Simulink/Matlab Untuk Simulasi Sistem Kendali P, PI, dan PID	34
Gambar 4.3.	Diagram Blok Simulink/Matlab Sistem Kendali PID	34
Gambar 4.4.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Dengan Menggunakan Sistem Kendali Proposional	35
Gambar 4.5.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Menggunakan Sistem Kendali Proposional Dengan Laju Air Pengumpan Masukan Berubah-ubah	36
Gambar 4.6.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Dengan Menggunakan Sistem Kendali PI	37
Gambar 4.7.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali PI Dengan Laju Air Pengumpan Masukan Berubah-ubah	38
Gambar 4.8.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Dengan Menggunakan Sistem Kendali PID	39
Gambar 4.9.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali PID Dengan Laju Air pengumpan Masukan Berubah-ubah	40
Gambar 4.10.	Diagram Blok Simulink/Matlab Simulasi Sistem Kendali LQR Tanpa Penguat Pre-Kompensator Dengan Pendekatan SISO	41
Gambar 4.11.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan SISO Tanpa Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$, $R = \left[1/34.2^2\right]$	42
Gambar 4.12.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan SISO Tanpa pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/10^2$, $R = \left[1/102.6^2\right]$	43
Gambar 4.13.	Diagram Blok Simulink/Matlab Simulasi Sistem Kendali LQR Menggunakan Penguat Pre-Kompensator Dengan Pendekatan SISO	44

Gambar 4.14.	Sinyal Keluaran dan Kendali masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan SISO Menggunakan Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$, $R = \begin{bmatrix} 1/34.2^2 \end{bmatrix}$	45
Gambar 4.15.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan SISO Menggunakan Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$, $R = \begin{bmatrix} 1/342^2 \end{bmatrix}$	46
Gambar 4.16.	Diagram Blok Simulink/Matlab Simulasi Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Tanpa Pre-Kompensator	47
Gambar 4.17.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Tanpa Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$, $R = \begin{bmatrix} 1/34.2^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0138^2 \end{bmatrix}$	48
Gambar 4.18.	Sinyal Keluaran Dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Tanpa Pre-Kompensator Menggunakan Bobot $Q = 1/100^2$, $R = \begin{bmatrix} 1/1026^2 & 0 \\ 0 & 1/0.138^2 \end{bmatrix}$	49
Gambar 4.19.	Diagram Blok Simulink/matlab Simulasi Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Dengan Menggunakan Pre-Kompensator	50
Gambar 4.20.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Menggunakan Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$, $R = \begin{bmatrix} 1/34.2^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0138^2 \end{bmatrix}$	51
Gambar 4.21.	Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Menggunakan Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$, $R = \begin{bmatrix} 1/342^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0345^2 \end{bmatrix}$	52

Gambar 4.22. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Menggunakan Pre-Kompensator

54

$$\text{Dengan Bobot } Q = 1/100^2, R = \begin{bmatrix} 1/342^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0345^2 \end{bmatrix}$$

Dengan Laju Air pengumpan Masukan Berubah-ubah



DAFTAR TABEL

		Hal
Tabel 2.1.	Rumus <i>Zeigler-Nichols</i> Untuk Penalaan Paramater PID	16
Tabel 3.1.	Hasil Penalaan Paramater PID Untuk <i>Steam-Drum</i> Boiler	27
Tabel 4.1.	Hasil Simulasi Sistem Kendali P, PI, PID, dan LQR	55



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Boiler merupakan salah satu bentuk mesin konversi energi dimana terjadi pembakaran bahan bakar yang dipergunakan untuk memanaskan air yang terdapat dalam suatu ketel untuk dapat menghasilkan uap maupun air panas pada tekanan dan suhu tertentu. Jenis bahan bakar yang dipergunakan oleh boiler adalah dalam bentuk padatan (batubara, sampah biomassa, dll), cair (minyak) dan gas alam.

Pada umumnya, terdapat dua jenis boiler yaitu boiler pipa api dan boiler pipa air. Boiler pipa air umum digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap karena dapat menghasilkan uap bertekanan tinggi. Boiler pipa air terdiri dari *bottom header*, *top header*, *riser*, *downcomer*, dan *drum*. Bagian *drum* merupakan tempat penyimpanan uap yang dihasilkan oleh tabung-tabung air (*riser*) dan berfungsi sebagai pemisah antara campuran air dan uap. Hal ini dapat dilakukan karena adanya perbedaan berat jenis antara air dan uap. Salah satu bentuk pemanfaatan uap bertekanan yang dihasilkan oleh boiler adalah sebagai energi penggerak turbin untuk memutar generator yang akan menghasilkan listrik.

Fenomena yang terjadi didalam *steam-drum* merupakan reaksi kompleks dari suatu keseimbangan massa dan energi. Penelitian yang sudah dipublikasikan tentang hal ini sudah banyak dilakukan sebelumnya, baik dalam hal pemodelan matematis [1] dan perancangan sistem kendalinya [2]. Pada penelitian-penelitian tersebut, salah satu tujuan yang ingin dicapai adalah mendapatkan uap bertekanan atau laju alir uap keluaran yang stabil, karena kestabilan uap bertekanan atau laju alir uap merupakan syarat didapatkannya listrik yang stabil berdasarkan spesifikasi teknis yang ada (titik kerja tertentu) yang dipersyaratkan oleh pembangkit listrik tersebut. Namun demikian, umumnya penelitian tersebut dilakukan pada pembangkit dengan skala besar. Penelitian untuk pembangkit listrik tenaga uap skala kecil dengan menggunakan boiler pipa air bertekanan rendah masih jarang dilakukan.

Untuk menghasilkan tekanan keluaran yang ingin dicapai, pengendalian laju alir panas masukan dan/atau laju alir air pengumpan masukan harus dilakukan. Untuk dapat mengendalikannya, dalam penelitian ini dipergunakan sistem kendali PID dan LQR (*linear quadratic regulator*) secara terpisah.

1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan rancangan sistem kendali yang menghasilkan keluaran tekanan uap mengikuti *setpoint* yang diberikan. Dirancang dua buah sistem kendali secara terpisah, yaitu sistem kendali PID dan LQR. Kinerja kedua kendali ini diuji melalui simulasi dengan menggunakan Simulink/Matlab terhadap model non linier *steam-drum* boiler. Hasil simulasi dianalisa dan dibandingkan kinerjanya.

1.3. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, kendali PID dirancang untuk model SISO (*single input single output*). Sedangkan kendali LQR dirancang baik untuk model SISO maupun MISO (*multi input single output*). Asumsi yang dipergunakan dalam model non linier adalah, air yang digunakan merupakan air murni dengan kondisi pipa boiler dalam keadaan baik tanpa adanya *scaling* dan kebocoran sehingga sistem bekerja dalam kondisi ideal tanpa ada kehilangan (*losses*) dengan distribusi uap yang merata. Proses pembakaran diasumsikan mampu menyediakan kebutuhan panas yang diinginkan oleh *plant* (model sistem pembakaran tidak dibahas dalam penelitian ini).

1.4. Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan dibagi atas beberapa tahapan, yaitu:

- a. Menentukan bentuk persamaan matematis (model non linier) dari *steam-drum* boiler pipa air dari hasil studi literatur.
- b. Mengumpulkan data parameter boiler yang akan dijadikan sebagai bahan penelitian yang dibutuhkan dari persamaan matematis yang telah ditentukan.

- c. Membuat model simulasi dari persamaan matematis tersebut dengan mempergunakan simulink/matlab.
- d. Melakukan linierisasi model *steam-drum* boiler beserta analisisnya.
- e. Melakukan perancangan sistem kendali PID.
- f. Melakukan perancangan sistem kendali LQR.
- g. Melakukan simulasi dan analisa dari hasil perancangan kedua sistem kendali tersebut.
- h. Membuat kesimpulan hasil analisa yang didapat dari kedua sistem kendali yang telah dirancang dan disimulasikan.

1.5. Sistematika Penulisan

Penulisan di bagi ke dalam lima bab yang akan menjelaskan secara bertahap mengenai isi dari tulisan ini. Bab satu menjelaskan tentang latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan. Pada bab dua dibahas mengenai cara kerja umum dari boiler, model non-linier dari *steam-drum* boiler, sistem kendali PID, dan sistem kendali LQR. Bab tiga membahas mengenai linierisasi model *steam-drum* boiler berdasarkan data teknis yang ada, nilai *eigen* serta uji *controllability* dan *observability*, perancangan sistem kendali PID, dan perancangan sistem kendali LQR. Pada bab empat dibahas mengenai hasil simulasi beserta analisis yang dilakukan untuk rancangan sistem kendali PID dan sistem kendali LQR terhadap model non linier *steam-drum* boiler. Pada bagian akhir, yaitu bab lima diberikan kesimpulan dari hasil penelitian ini secara keseluruhan.

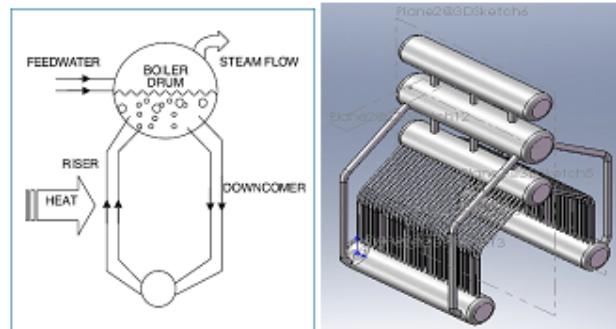
BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1. *Steam-Drum* Boiler

2.1.1. Gambaran Umum

Kunci utama dari suatu *steam-drum* boiler adalah terdapatnya perpindahan panas yang sangat efisien selama proses pemanasan air dan kondensasi. Seluruh bagian pada sistem yang berhubungan dengan campuran cairan tersaturasi-uap air akan berada dalam kondisi panas yang seimbang. Energi yang tersimpan dalam uap dan air akan terlepas atau terserap secara cepat ketika terjadi perubahan tekanan. Mekanisme inilah yang merupakan kunci utama dari dinamika dalam suatu *steam-drum* boiler. Pelepasan energi yang cepat ini memastikan bagian lain dari sistem *steam-drum* boiler tersebut akan berubah pula temperaturnya. Karena alasan inilah maka dinamika tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk model orde rendah. Tekanan drum dan dinamika daya dapat dinyatakan dengan baik dalam bentuk orde pertama dimana efek distribusinya dapat diabaikan baik untuk sistem dengan dimensi yang cukup besar.



Gambar 2.1. Sistem *Steam-Drum* Boiler

Pada Gambar 2.1 dapat dilihat sistem dari sebuah *steam-drum* boiler. Panas, Q , yang diberikan ke tabung *riser* akan mengakibatkan pemanasan air. Gaya grafitasi akan mendorong uap tersaturasi untuk naik yang mengakibatkan sirkulasi dalam lingkaran *riser – drum – downcomer*. Air pengumpan, q_f , dimasukkan ke dalam drum dan uap tersaturasi, q_s , akan keluar dari dalam drum

menuju turbin. Perilaku dari suatu sistem boiler yang kompleks tersebut, secara umum dapat dinyatakan dalam bentuk keseimbangan massa dan energi.

2.1.2. Model Non Linier *Steam-Drum* Boiler

Bagian-bagian yang terdapat pada suatu boiler secara keseluruhan terdiri dari *bottom header*, *top header*, *riser*, *downcomer*, dan *drum*. Pada bagian *drum* terjadi campuran antara air dan uap yang dihasilkan. Dinamika yang terjadi didalamnya secara keseluruhan dapat dinyatakan dalam keseimbangan massa dan energi. Dari kedua prinsip yang berlaku tersebut, maka akan dapat dinyatakan dalam bentuk model matematis.

Bentuk model matematis tersebut didapatkan dari model yang dikembangkan oleh *Astrom dan Bell* [1].

Bentuk persamaan keseimbangan massa keseluruhan adalah :

$$\frac{dM_t}{dt} = \frac{d}{dt} [\rho_s V_{st} + \rho_w V_{wt}] = q_f - q_s \quad (2.1)$$

Dimana,

$$\frac{dM_t}{dt} = \text{Massa total per satuan waktu}$$

$$q_f = \text{Laju alir air pengumpan (Kg/detik)}$$

$$q_s = \text{Laju alir uap (Kg/detik)}$$

$$\rho_w = \text{Berat jenis air (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_s = \text{Berat jenis uap (Kg/m}^3\text{)}$$

$$V_{wt} = \text{Volume air (m}^3\text{)}$$

$$V_{st} = \text{Volume uap (m}^3\text{)}$$

Dan keseimbangan energi keseluruhannya adalah :

$$\begin{aligned} \frac{dE_t}{dt} &= \frac{d}{dt} [\rho_s u_s V_{st} + \rho_w u_w V_{wt} + m_{(iron)} C_{p(iron)} t_m] \\ &= Q + q_f h_f - q_s h_s \end{aligned} \quad (2.2)$$

Karena energi internal $u = h - p/\rho$, maka keseimbangan energinya dapat dituliskan menjadi :

$$\begin{aligned} \frac{dE_t}{dt} &= \frac{d}{dt} [\rho_s h_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} - pV_t + m_{(iron)} C_{p(iron)} t_m] \\ &= Q + q_f h_f - q_s h_s \end{aligned} \quad (2.3)$$

Dimana,

$\frac{dE_t}{dt}$ = Energi total per satuan waktu

Q = Energi panas masukan (Kj/detik)

h_f = Enthalpi spesifik air masukan (Kj/Kg)

h_s = Enthalpi spesifik uap keluaran (Kj/Kg)

h_w = Enthalpy spesifik air (Kj/Kg)

V_t = Volume total (m³)

$m_{(iron)}$ = Massa total besi (Kg)

$C_{p(iron)}$ = Panas spesifik besi (Kj/Kg °C)

t_m = Temperature besi (°C)

p = Tekanan (Kpa)

Volume total dalam *drum*, *downcomer*, dan *riser*, V_t adalah

$$V_t = V_{st} + V_{wt} \quad (2.4)$$

Temperatur besi t_m dapat diekspresikan sebagai fungsi dari tekanan dengan mengasumsikan bahwa perubahan t_m berkorelasi terhadap perubahan temperatur saturasi dari uap t_s dan juga terhadap perubahan tekanan p . Prinsip tangan kanan dari persamaan (2.3) menyatakan aliran energi menuju sistem yang berasal dari bahan bakar dan air dan aliran energi dari sistem melalui uap.

Dari persamaan (2.1), (2.3), dan (2.4) dapat diturunkan model *Steam-Drum* boiler orde dua. Model tersebut merupakan sistem persamaan diferensial dengan mengambil dua variable keadaan. Variabel keadaan pertama adalah

tekanan. Variabel ini secara eksplisit hanya muncul pada persamaan (2.3). Tetapi karena parameter-parameter dalam persamaan (2.1) dan (2.3) secara implisit merupakan fungsi dari tekanan yang ditunjukkan dari tabel uap tersaturasi, maka tekanan diambil menjadi salah satu variable keadaan untuk model yang akan diturunkan. Alasan lain pengambilan tekanan sebagai variable keadaan dilakukan adalah karena variable ini mudah untuk diukur. Variabel keadaan kedua adalah volume total air.

Dengan menggunakan persamaan (2.4) dan dimana V_t bernilai konstan, maka V_{st} dapat dihilangkan dari persamaan (2.1) dan (2.3), sehingga akan didapatkan persamaan keadaan sebagai berikut

$$e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s \quad (2.5)$$

$$e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s \quad (2.6)$$

Dimana,

$$e_{11} = \rho_w - \rho_s$$

$$e_{12} = V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p}$$

$$e_{21} = \rho_w h_w - \rho_s h_s$$

$$e_{22} = V_{wt} \left(h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) + V_{st} \left(h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) - V_t + m_t c_p \frac{\partial t_s}{\partial p}$$

Dalam kondisi keadaan mantap (*steady-state*), persamaan (2.5) dan (2.6) akan menjadi

$$q_f = q_s \quad (2.7)$$

$$Q = q_s h_s - q_f h_f \quad (2.8)$$

Bentuk kondisi keadaan mantap dipergunakan untuk mengetahui nilai titik operasi dari laju alir uap q_s , tekanan uap p , laju alir air pengumpan q_f dan energi panas Q .

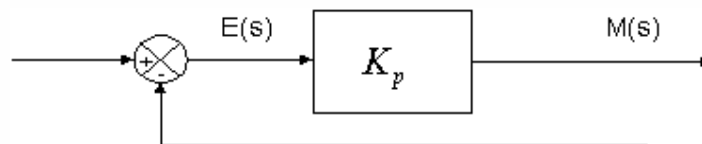
Dengan demikian, dari bentuk model matematis yang telah dijelaskan tersebut, maka masukan sistem adalah laju alir panas yang diberikan ke riser Q dan laju alir air pengumpan q_f . Sedangkan keluaran dari sistem adalah tekanan dalam drum p , dan volume air dalam drum, V_{wt} . Model tersebut dapat memberikan gambaran terhadap perilaku umum dari suatu boiler dengan cukup baik. Khususnya akan dapat menjelaskan respons dari tekanan drum terhadap perubahan energi panas, dan laju alir air pengumpan.

2.2. Sistem Kendali PID (Proporsional-Integral-Diferensial)

2.2.1. Sistem Kendali Proporsional

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

Gambar 2.2 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara besaran setting, besaran aktual dengan besaran keluaran pengendali proporsional. Sinyal kesalahan (*error*) merupakan selisih antara besaran setting dengan besaran aktualnya. Selisih ini akan mempengaruhi pengendali, untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat pencapaian harga setting) atau negatif (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan).



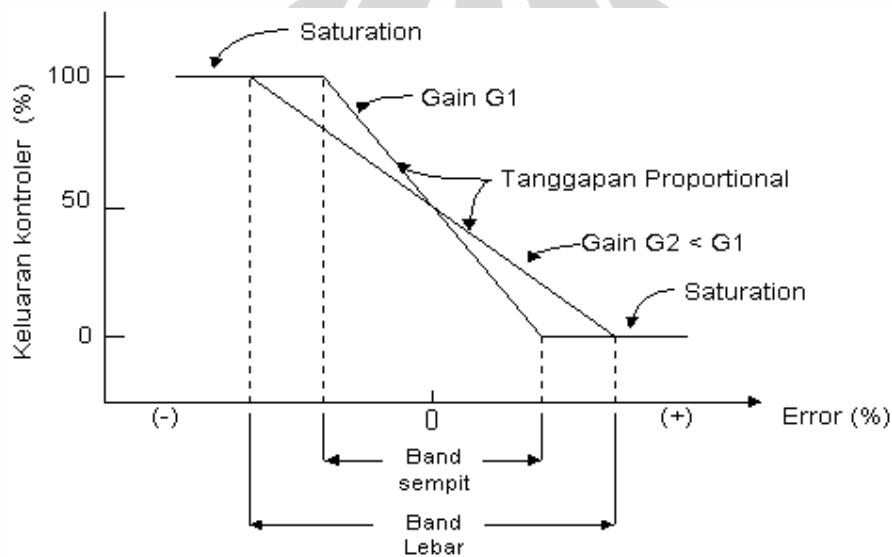
Gambar 2.2. Diagram Blok Pengendali Proporsional

Sistem kendali proporsional memiliki 2 parameter, pita proporsional (PP) dan konstanta proporsional (K_p). Daerah kerja pengendali efektif dicerminkan oleh pita proporsional, sedangkan konstanta proporsional menunjukkan nilai faktor penguatan terhadap sinyal kesalahan. Hubungan antara

pita proporsional dengan konstanta proporsional ditunjukkan secara persentasi oleh persamaan berikut

$$PP = 1/K_p \times 100 \% \quad (2.9)$$

Gambar 2.3 menunjukkan grafik hubungan antara PP, keluaran pengendali dan kesalahan yang merupakan masukan pengendali. Ketika konstanta proporsional bertambah semakin tinggi, pita proporsional menunjukkan penurunan yang semakin kecil, sehingga lingkup kerja yang dikuatkan akan semakin sempit.



Gambar 2.3. Grafik Hubungan Antara PP, Keluaran Pengendali Dan Kesalahan.

Ciri-ciri sistem kendali proporsional harus diperhatikan ketika pengendali tersebut diterapkan pada suatu sistem. Secara eksperimen, pengguna sistem kendali proporsional harus memperhatikan ketentuan-ketentuan berikut ini:

1. Kalau nilai K_p kecil, sistem kendali proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat.
2. Kalau nilai K_p dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan mantapnya (*steady-state*).

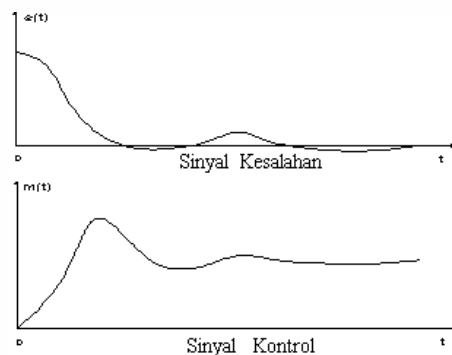
3. Namun jika nilai K_p diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil, atau respon sistem akan berosilasi.

2.2.2. Sistem Kendali Integral

Sistem kendali integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol. Kalau sebuah plant tidak memiliki unsur integrator ($1/s$), pengendali proporsional tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan mantapnya nol. Dengan pengendali integral, respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai kesalahan keadaan mantapnya nol.

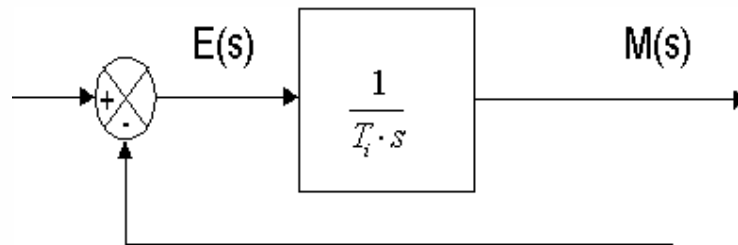
Sistem kendali integral memiliki karakteristik seperti halnya sebuah integral. Keluaran pengendali sangat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Keluaran pengendali ini merupakan jumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Kalau sinyal kesalahan tidak mengalami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

Sinyal keluaran sistem kendali integral merupakan luas bidang yang dibentuk oleh kurva kesalahan penggerak. Sinyal keluaran akan berharga sama dengan harga sebelumnya ketika sinyal kesalahan berharga nol. Gambar 2.4 menunjukkan contoh sinyal kesalahan yang disulutkan ke dalam pengendali integral dan keluaran controller integral terhadap perubahan sinyal kesalahan tersebut.



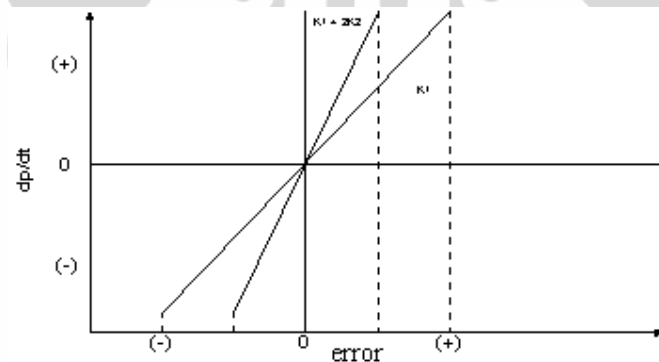
Gambar 2.4. Kurva Sinyal Kesalahan $e(t)$ Terhadap t Dan Kurva $u(t)$ Terhadap t Pada Pembangkit Kesalahan Nol.

Gambar dibawah menunjukkan blok diagram antara besaran kesalahan dengan keluaran suatu pengendali integral.



Gambar 2.5. Diagram Blok Hubungan Antara Besaran Kesalahan Dengan Pengendali Integral

Pengaruh perubahan konstanta integral terhadap keluaran integral ditunjukkan oleh Gambar 2.6. Ketika sinyal kesalahan berlipat ganda, maka nilai laju perubahan keluaran pengendali berubah menjadi dua kali dari semula. Jika nilai konstanta integrator berubah menjadi lebih besar, sinyal kesalahan yang relatif kecil dapat mengakibatkan laju keluaran menjadi besar.



Gambar 2.6. Perubahan Keluaran Sebagai Akibat Penguatan Dan Kesalahan

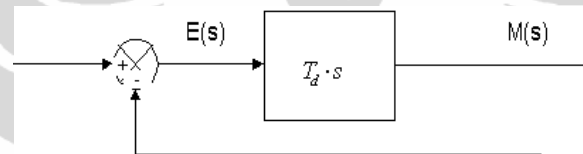
Sistem kendali integral mempunyai beberapa karakteristik berikut ini:

1. Keluaran pengendali membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga sistem kendali integral cenderung memperlambat respon.
2. Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran pengendali akan bertahan pada nilai sebelumnya.

3. Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i .
4. Konstanta integral K_i yang berharga besar akan mempercepat hilangnya *offset*. Tetapi semakin besar nilai konstanta K_i akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran pengendali.

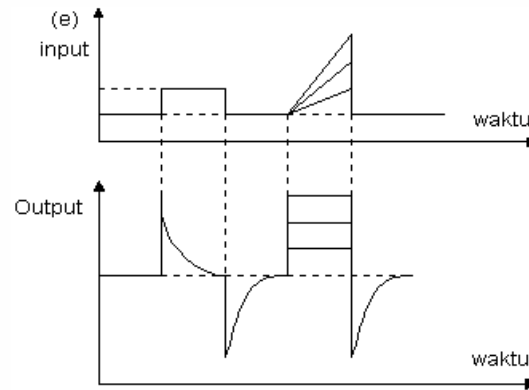
2.2.3. Sistem Kendali Diferensial

Keluaran pengendali diferensial memiliki sifat seperti halnya suatu operasi derivatif. Perubahan yang mendadak pada masukan pengendali, akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. Gambar 2.7 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara sinyal kesalahan dengan keluaran pengendali.



Gambar 2.7. Diagram Blok Pengendali Diferensial

Selanjutnya, Gambar 2.8 dibawah menyatakan hubungan antara sinyal masukan dengan sinyal keluaran pengendali diferensial. Ketika masukannya tidak mengalami perubahan, keluaran pengendali juga tidak mengalami perubahan, sedangkan apabila sinyal masukan berubah mendadak dan menaik (berbentuk fungsi *step*), keluaran menghasilkan sinyal berbentuk impuls. Jika sinyal masukan berubah naik secara perlahan (fungsi *ramp*), keluarannya justru merupakan fungsi *step* yang besar magnitudnya sangat dipengaruhi oleh kecepatan naik dari fungsi *ramp* dan faktor konstanta diferensialnya T_d .



Gambar 2.8. Kurva Waktu Hubungan Masukan-Keluaran Pengendali Diferensial
Karakteristik sistem kendali diferensial adalah sebagai berikut:

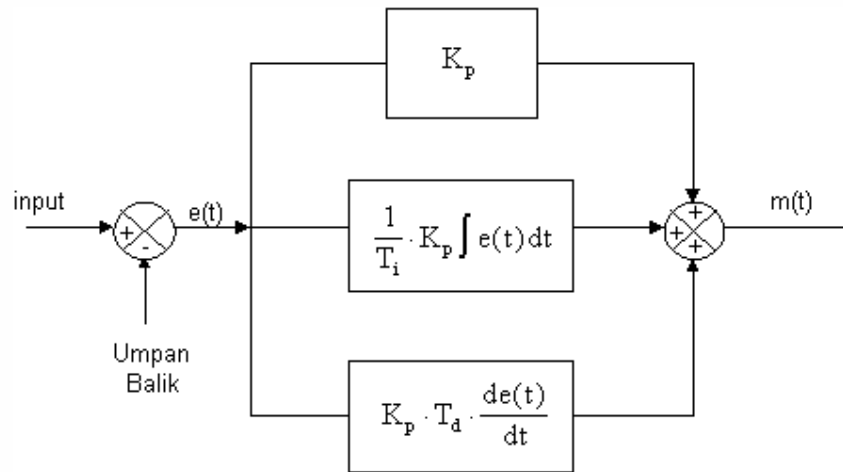
1. Sistem kendali ini tidak dapat menghasilkan keluaran bila tidak ada perubahan pada masukannya (berupa sinyal kesalahan).
2. Jika sinyal kesalahan berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan pengendali tergantung pada nilai T_d dan laju perubahan sinyal kesalahan.
3. Sistem kendali diferensial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

Berdasarkan karakteristik sistem kendali tersebut, pengendali diferensial umumnya dipakai untuk mempercepat respon awal suatu sistem, tetapi tidak memperkecil kesalahan pada keadaan tunaknya. Kerja pengendali diferensial hanyalah efektif pada lingkup yang sempit, yaitu pada periode peralihan. Oleh sebab itu pengendali diferensial tidak pernah digunakan tanpa ada kendali lain pada sebuah sistem.

2.2.4. Sistem Kendali Proposional-Integral-Diferensial (PID)

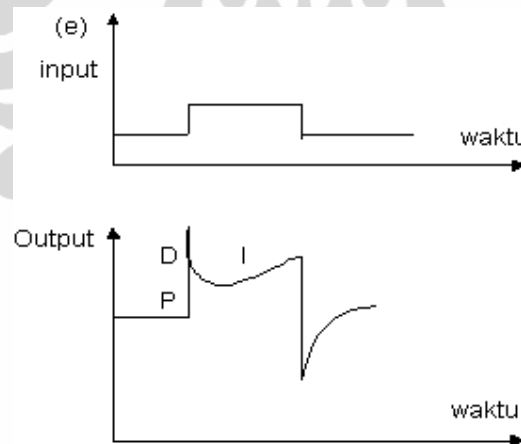
Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing sistem kendali Proposional, Integral dan Diferensial dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi sistem kendali proposional plus integral plus diferensial (sistem kendali PID). Elemen-elemen pengendali P, I dan

D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar.



Gambar 2.9. Blok Diagram Sistem Kendali PID Analog

Keluaran pengendali PID merupakan jumlahan dari keluaran pengendali proporsional, keluaran pengendali integral, dan keluaran pengendali diferensial. Gambar 2.10 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 2.10. Hubungan Dalam Fungsi Waktu Antara Sinyal Keluaran Dengan Masukan Untuk Pengendali PID

Karakteristik sistem kendali PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P, I dan D. Pengaturan konstanta K_p , T_i , dan T_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat diatur lebih menonjol dibanding yang lain.

Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan.

2.2.5. Penalaan Parameter PID

Dengan menggunakan metode identifikasi model empiris yaitu dengan memberikan masukan berupa fungsi step kepada sistem lingkaran terbuka untuk mendapatkan respons keluaran, maka akan didapatkan parameter Δ . Dengan menggunakan parameter tersebut, selanjutnya akan didapatkan parameter-parameter sebagai berikut [3] :

$$t_{63\%} = 0.632 \times \Delta \quad (2.10)$$

$$t_{28\%} = 0.283 \times \Delta \quad (2.11)$$

$$\tau = 1.5(t_{63\%} - t_{28\%}) \quad (2.12)$$

$$\theta = t_{63\%} - \tau \quad (2.13)$$

Dimana,

Δ = Selisih antara tegangan keluaran kondisi keadaan mantap dan tegangan keluaran kondisi awal.

$t_{63\%}$ = Amplitudo pada saat 63% dari amplitudo keadaan mantap.

$t_{28\%}$ = Amplitudo pada saat 28% dari amplitudo keadaan mantap.

τ = Konstanta waktu (*time constant*) dari obyek kontrol.

θ = Waktu tunda (*delay time* atau *dead time*).

Penalaan parameter PID didasarkan perolehan kedua konstanta itu (τ dan θ). *Zeigler* dan *Nichols* melakukan eksperimen dan menyarankan parameter penyetelan nilai penguat proposional (K_p), waktu integral (T_i), dan waktu diferensial (T_d) dengan didasarkan pada kedua parameter tersebut. Tabel 2.1 merupakan rumusan penalaan parameter PID berdasarkan metode kurva reaksi.

Tabel 2.1. Rumus *Zeigler-Nichols* Untuk Penalaan Paramater PID

Tipe Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	τ/θ	\sim	0
PI	$0.9 \tau/\theta$	$\theta/0.3$	0
PID	$1.2 \tau/\theta$	2θ	0.5θ

2.3. Sistem Kendali LQR (*Linear Quadratic Regulator*)

Keuntungan dari metode kendali kuadratis optimal yaitu bentuk dari sistem kendali ini dapat menyediakan cara yang sistematis untuk menghitung matrik penguat umpan balik keadaan (K) untuk masukan (u) sebanyak m . Bentuk dari sinyal kendali, yaitu

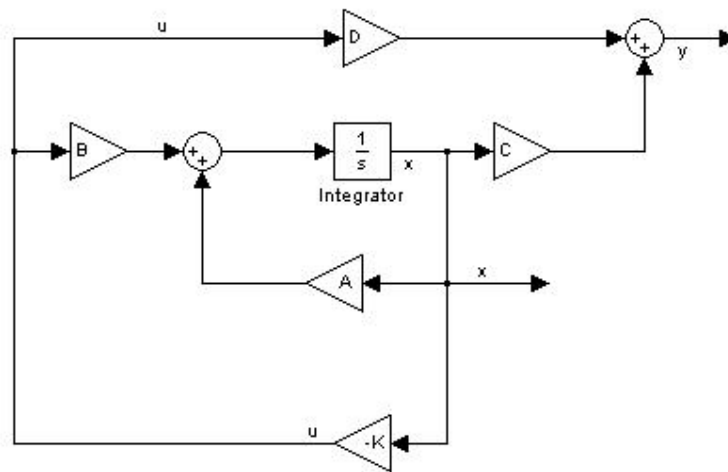
$$u(t) = -Kx(t) \quad (2.14)$$

Dengan bentuk indeks kinerjanya, yaitu

$$J = \int_0^{\infty} (x'Qx + u'Ru)dt \quad (2.15)$$

Dimana Q adalah positif-definite (atau positif-semidefinite) Hermitian atau matrik simetris $n \times n$ dan R adalah positif-definite Hermitian atau matrik simetris $m \times m$. Matrik Q dan R menentukan nilai kesalahan dan pengeluaran energinya. Dalam hal ini, diasumsikan bahwa vektor kendali $u(t)$ tidak dibatasi. Suatu matriks hermitian dengan bilangan kompleks merupakan positif definite apabila $z^*Mz > 0$ untuk seluruh vektor-vektor z bilangan kompleks yang tidak sama dengan nol, dimana z^* merupakan transpose konjugasi dari z . Kuantitas z^*Mz selalu bernilai nyata. Kondisi positif definite terjadi apabila seluruh nilai eigen bernilai positif, seluruh determinan bernilai positif, dan seluruh poros bernilai positif.

Hukum kendali linier yang terdapat pada persamaan (2.14) merupakan hukum kendali optimal. Dengan demikian, jika elemen yang tidak diketahui dari matrik K sudah ditentukan begitu pula indeks kinerja minimum, maka bentuk persamaan (2.14) tersebut optimal untuk keadaan inisial $x(0)$ manapun. Bentuk diagram blok dari konfigurasi optimal dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 2.11. Sistem Kendali LQR (*Linear Quadratic Regulator*)

Dengan memasukan persamaan (2.14) ke dalam persamaan bentuk persamaan umum keadaan, maka didapat

$$\dot{x} = Ax - BKx = (A - BK)x \quad (2.16)$$

Dan dengan memasukkan persamaan (2.14) ke dalam persamaan (2.15), maka didapat

$$J = \int_0^{\infty} (x'Qx + x'K'RKx)dt = \int_0^{\infty} x'(Q + K'RK)xdt$$

Atau

$$x'(Q + K'RK)x = \frac{d}{dt} (x'Px) \quad (2.17)$$

Dimana P adalah positif-definite Hermitian atau matrik simetris nyata, sehingga akan didapatkan

$$\begin{aligned} x'(Q + K'RK)x &= -\dot{x}'Px - x'P\dot{x} \\ &= -x'[(A - BK)'P + P(A - BK)]x \end{aligned} \quad (2.18)$$

Dari persamaan diatas maka didapat bentuk penyederhanaan

$$(A - BK)'P + P(A - BK) = -(Q + K'RK) \quad (2.19)$$

Jika sistem dalam kondisi stabil, yaitu nilai eigen yang didapat bernilai negatif, maka akan selalu terdapat satu matrik P yang positif-definite untuk memenuhi persamaan diatas. Apabila tidak didapatkan matrik P yang positif-definite maka sistem tersebut tidak stabil.

Indeks kinerja J, dapat dievaluasi sebagai berikut

$$J = \int_0^{\infty} x'(Q + K'RK)xdt = -x'Px \Big|_0^{\infty} = -x'(\infty)Px(\infty) + x'(0)Px(0)$$

Karena sistem diasumsikan dalam keadaan stabil dimana seluruh nilai eigen bernilai negatif, maka $x(\infty) \rightarrow 0$, maka akan didapat

$$J = x'(0)Px(0) \quad (2.20)$$

Dengan demikian, indeks kinerja akan didapat pada saat kondisi inisial $x(0)$ dan P.

Karena R diasumsikan bernilai positif-definite Hermitian atau matrik simetris nyata, maka dapat ditulis sebagai berikut

$$R = T'T$$

Dimana T merupakan matriks non singular, sehingga persamaan (2.19) dapat dirubah menjadi

$$(A' - K'B')P + P(A - BK) + Q + K'T'TK = 0$$

Atau

$$\begin{aligned} A'P + PA + [TK - (T')^{-1}B'P]' [TK - (T')^{-1}B'P] - \\ PBR^{-1}B'P + Q = 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Minimisasi J terhadap K membutuhkan minimalisasi dari persamaan berikut

$$x'[TK - (T')^{-1}B'P]' [TK - (T')^{-1}B'P]x \quad (2.22)$$

Karena bentuk persamaan diatas tidak negatif, nilai minimum timbul pada saat nol, atau pada saat

$$TK = (T')^{-1}B'P$$

Sehingga

$$K = T^{-1}(T')^{-1}B'P = R^{-1}B'P \quad (2.23)$$

Persamaan (2.23) memberikan matriks optimal K. Dengan demikian, hukum kendali optimal terhadap permasalahan kendali optimal kuadratis ketika indeks kinerja yang diberikan oleh persamaan (2.19) adalah linier yang diberikan oleh

$$u(t) = -Kx(t) = -R^{-1}B'Px(t) \quad (2.24)$$

Matrik P dalam persamaan (2.23) harus memenuhi persamaan (2.19) atau bentuk penyederhanaan persamaan berikut

$$A'P + PA - PBR^{-1}B'P + Q = 0 \quad (2.25)$$

Untuk menentukan nilai pembobotan Q dan R tidak ada yang baku, namun penentuan awal dari nilai bobot Q dan R dapat dilakukan dengan menggunakan aturan Bryson (*Bryson's Rule*)[4], yaitu

$$Q = 1/y_{max}^2 \quad (2.26)$$

$$R = 1/u_{max}^2 \quad (2.27)$$

Dimana,

y_{max} = Perubahan maksimum keluaran yang diperbolehkan

u_{max} = Perubahan maksimum masukan yang diperbolehkan

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM KENDALI UNTUK *STEAM-DRUM* BOILER SKALA KECIL

3.1. Model Linier *Steam-Drum* Boiler

Parameter yang digunakan dalam model simulink/matlab diambil dari boiler yang dipergunakan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) skala kecil yang terdapat di Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Energi dan Ketenagalistrikan, Badan Penelitian dan Pengembangan Energi dan Sumber Daya Mineral [5]. Adapun parameter-parameter yang dipergunakan adalah sebagai berikut :

- Tekanan inisial : 800 KPa
- Volume air inisial : 0.051 m³ (asumsi 30% dari volume total)
- Gain katup uap : 0.00522
- Volume total : 0.17 m³
- Massa total : 653 Kg
- Panas spesifik besi : 0.452 Kj/Kg °C
- Suhu air masukan : 70 °C
- Laju alir uap : 500 Kg/jam

Dengan memasukan parameter diatas ke dalam model *steam-drum* boiler simulink/matlab yang telah dibuat, maka selanjutnya dilakukan proses linierisasi dengan menggunakan bantuan dari fasilitas yang ada dalam simulink/matlab. Proses linierisasi dimaksudkan untuk dapat mengetahui bentuk model matematis yang lebih sederhana dalam bentuk persamaan ruang keadaan (*state space*) yang dapat mewakili *steam-drum* boiler yang dipergunakan dalam penelitian ini. Pertama-tama dilakukan penentuan titik kerja operasi dari sistem yang hasilnya dapat dilihat dari gambar berikut.

```

Operating Point Search Report:
-----

Operating Report for the Model Boiler_control_1b.
(Time-Varying Components Evaluated at time t=0)

Operating point specifications were successfully met.

States:
-----
(1.) Boiler_control_1b/Boiler-Drum/Pressure
    x:    800    dx: -2.94e-015 (0)
(2.) Boiler_control_1b/Boiler-Drum/Water Volume
    x:    0.051    dx:  3.15e-018 (0)

Inputs:
-----
(1.) Boiler_control_1b/Input
    u:    342    [0 Inf]
    u:    0.138    [0 Inf]

Outputs:
-----
(1.) Boiler_control_1b/Boiler-Drum
    y:    800    [0 Inf]

```

Gambar 3.1. Penentuan Titik Operasi Dari Hasil Simulasi Simulink/Matlab

Dari gambar 3.1 diatas, terlihat bahwa simulasi telah menggunakan dua buah variabel keadaan (x) yaitu tekanan sebesar 800 KPa dan volume air sebesar 0.051 m³. Kondisi awal (dx) dari keduanya memiliki nilai hampir mendekati nol. Kemudian pada masukannya, didapatkan nilai titik operasi sebagai berikut

$$Q_0 = 341.56 \text{ KJ/detik}$$

$$q_{f0} = 0.1380 \text{ Kg/detik}$$

Sedangkan pada keluaran, nilai titik operasinya adalah sebagai berikut

$$P_0 = 800 \text{ KPa}$$

Selanjutnya, dilakukan linierisasi terhadap *steam-drum* boiler berdasarkan titik operasi yang telah didapatkan. Hasil linierisasi selanjutnya dinyatakan dalam bentuk persamaan ruang keadaan (*state space*). Bentuk matriks ruang keadaan yang didapat adalah sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta P} \\ \dot{\Delta V}_{wt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9.483 \times 10^{-4} & 5.301 \times 10^{-14} \\ 1.083 \times 10^{-7} & -1.756 \times 10^{-19} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta V_{wt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0045 & -1.8894 \\ 1.0712 \times 10^{-8} & -0.0011 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta q_f \end{bmatrix}$$

Sedangkan bentuk matriks keluaran sistem adalah

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta V_{wt} \end{bmatrix} + [0 \quad 0] \begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta q_f \end{bmatrix}$$

Dengan mengacu kepada bentuk persamaan umum ruang keadaan dan keluaran

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Maka dari matrik ruang keadaan dan keluaran sistem didapatkan bentuk model MISO (*Multi Input Single Output*) sebagai berikut

$$A = \begin{bmatrix} -9.483 \times 10^{-4} & 5.301 \times 10^{-14} \\ 1.083 \times 10^{-7} & -1.756 \times 10^{-19} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0045 & -1.8894 \\ 1.0712 \times 10^{-8} & -0.0011 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0]$$

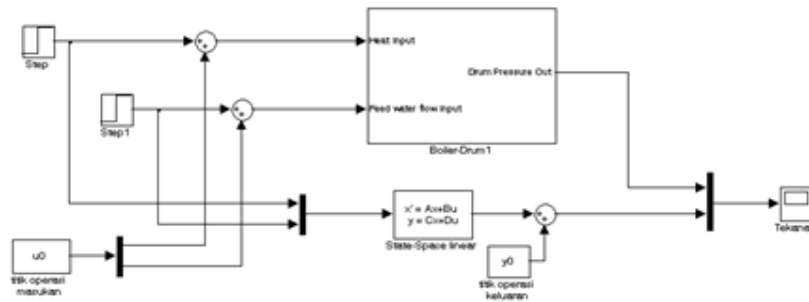
$$D = [0 \quad 0]$$

Dalam bentuk persamaan diferensial didapatkan

$$\begin{aligned} \dot{\Delta P} = & -9.48 \times 10^{-4} \Delta P + 5.301 \times 10^{-4} \Delta V_{wt} + 0.0045 \Delta Q - \\ & 1.8894 \Delta q_f \end{aligned}$$

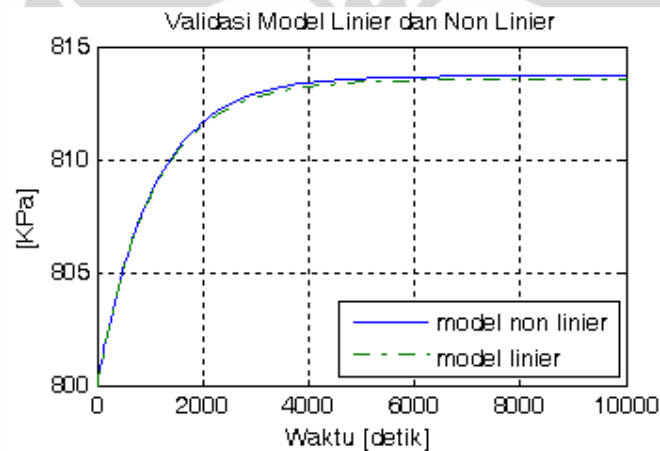
$$\begin{aligned} \dot{\Delta V}_{wt} = & 1.083 \times 10^{-7} \Delta P - 1.756 \times 10^{-19} \Delta V_{wt} + 1.0712 \times 10^{-8} \Delta Q - \\ & 0.0011 \Delta q_f \end{aligned}$$

Dengan membandingkan hasil keluaran yang dihasilkan oleh model linier terhadap model non linier, maka akan dapat diketahui apakah bentuk model linier yang telah mendekati karakteristik sistem yang sebenarnya. Model simulink untuk membandingkan hasil keluaran dari sistem linier dan tidak linier dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 3.2. Diagram Blok Simulink/Matlab Perbandingan Keluaran Model Linier dan Non-Linier Lingkaran Terbuka

Perbandingan hasil keluaran dari model linier dan non linier dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 3.3. Perbandingan Hasil Keluaran Model Linier dan Non Linier

Dari Gambar 3.3. diatas terlihat bahwa hasil keluaran dari model linier yang didapat telah dapat bekerja sesuai dengan hasil keluaran dari model non linier. Dengan demikian, bentuk model linier tersebut dapat dipergunakan dalam dalam merancang sistem kendali untuk *steam-drum* boiler.

3.2. Analisa Model Linier

3.2.1. Nilai Eigen

Kestabilan dari suatu sistem dapat dilihat dengan menghitung nilai eigen dari matriks ruang keadaan model yang sudah dilinierisasi. Nilai eigen didapatkan dengan menggunakan persamaan

$$[\lambda I - A] = 0$$

Sehingga didapat nilai

$$\lambda_1 = -0.948 \times 10^{-3}$$

$$\lambda_2 = 0.6 \times 10^{-17}$$

Meskipun salah satu nilai eigen yang didapat mendekati nol, namun sistem tersebut menghasilkan keluaran yang stabil untuk tekanannya. Hal ini terlihat pada gambar 3.3 dimana pada saat model linier tersebut diberikan masukan berupa fungsi step maka akan menghasilkan bentuk sinyal tekanan keluaran yang stabil dengan waktu yang diperlukan untuk dapat mencapai kondisi mantap cukup lama (*settling time* sebesar ± 3000 detik), untuk itulah diperlukan sistem kendali yang nantinya akan mampu memberikan sinyal keluaran yang lebih baik. Syarat yang harus dicapai agar sistem tersebut dapat dikendalikan adalah dengan mengetahui sifat *controllability* dan *observability* dari sistem tersebut.

3.2.2. Uji Controllability

Sifat *controllability* sempurna, yaitu apabila jumlah keadaan sistem sama dengan rank maksimum dari matriks *controllability* yang dihasilkan. Hal ini dilakukan untuk dapat menentukan apakah sistem yang diwakili oleh suatu model linier dapat dikendalikan oleh sebuah pengendali. Bentuk dari matriks *controllability* didapatkan dengan

$$Q_c = [B \quad A \cdot B \quad A^2 \cdot B]$$

Sehingga didapatkan bentuk matriks

$$Q_c = \begin{bmatrix} 4.51 \times 10^{-3} & -1.89 & -4.28 \times 10^{-6} & 1.79 \times 10^{-3} \\ 1.07 \times 10^{-8} & -1.12 \times 10^{-3} & 4.89 \times 10^{-10} & -2.05 \times 10^{-7} \end{bmatrix}$$

Dan rank yang dihasilkan oleh matriks tersebut adalah 2, yang merupakan nilai rank maksimum sesuai dengan banyaknya keadaan yang ada sehingga sistem ini dapat dikatakan *controllable* sempurna.

3.2.3. Uji Observability

Sifat *observability* sempurna, yaitu apabila jumlah keadaan sistem sama dengan rank maksimum dari matriks *observability* yang dihasilkan. Hal ini dilakukan untuk dapat mengetahui apakah sistem tersebut dapat diobservasi dan keadaan (*state*) yang diobservasi tersebut dapat mewakili keadaan sistem yang sebenarnya. Bentuk dari matriks *observability* didapatkan dengan

$$Q_{ob} = \begin{bmatrix} C \\ C \cdot A \\ C \cdot A^2 \end{bmatrix}$$

Sehingga didapatkan bentuk matriks

$$Q_{ob} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -9.483 \times 10^{-4} & 0.053 \times 10^{-12} \end{bmatrix}$$

Dan rank yang dihasilkan oleh matriks tersebut adalah 2, yang merupakan nilai rank maksimum sesuai dengan banyaknya keadaan yang ada sehingga sistem ini dapat dikatakan *observable* sempurna.

3.3. Perancangan Sistem Kendali PID

Sistem kendali PID pada *steam-drum* boiler dirancang hanya untuk mengendalikan laju alir panas masukannya saja. Hal ini dilakukan agar dapat dengan mudah sistem kendali PID diimplementasikan dengan melihat kasus serupa yang umum di lapangan.

Dilakukan pendekatan secara praktis dengan menyederhanakan persamaan diferensial model linier *steam-drum* boiler dengan mengasumsikan bahwa perubahan volume air bernilai sama dengan nol dikarenakan perubahan di dalam sistem yang terjadi sangat kecil sekali untuk mendapatkan respon keluaran yang nantinya dipergunakan dalam menentukan parameter Δ . Maka persamaan diferensial untuk tekanan akan berubah menjadi

$$\Delta \dot{P} = -9.48 \times 10^{-4} \Delta P + 0.0045 \Delta Q - 1.8894 \Delta q_f$$

Sedangkan persamaan diferensial untuk volume air berubah menjadi

$$0 = 1.083 \times 10^{-7} \Delta P + 1.0712 \times 10^{-8} \Delta Q - 0.0011 \Delta q_f$$

$$0.0011 \Delta q_f = -1.083 \times 10^{-7} \Delta P - 1.0712 \times 10^{-8} \Delta Q$$

$$\Delta q_f = -\frac{1.083 \times 10^{-7}}{0.0011} \Delta P - \frac{1.0712 \times 10^{-8}}{0.0011} \Delta Q$$

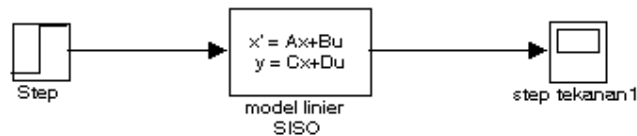
Dengan memasukkan bentuk persamaan diferensial volume air yang telah mengalami perubahan ke dalam persamaan diferensial tekanan didapatkan

$$\Delta \dot{P} = -9.48 \times 10^{-4} \Delta P + 0.0045 \Delta Q - 1.8894 \left(-\frac{1.083 \times 10^{-7}}{0.0011} \Delta P - \frac{1.0712 \times 10^{-8}}{0.0011} \Delta Q \right)$$

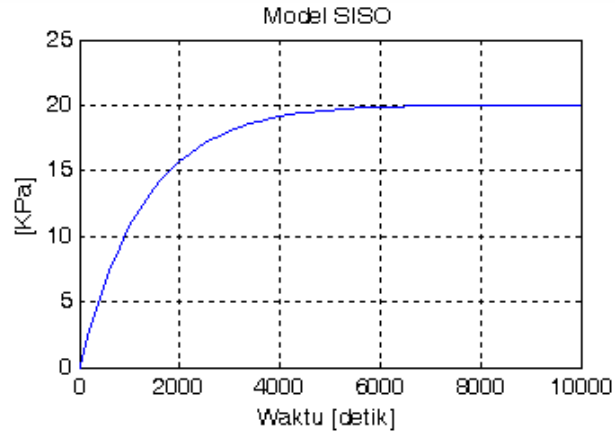
$$\Delta \dot{P} = \left(-9.48 \times 10^{-4} + \frac{1.8894 \times (1.083 \times 10^{-7})}{0.0011} \right) \Delta P + \left(0.0045 + \frac{1.8894 \times (1.0712 \times 10^{-8})}{0.0011} \right) \Delta Q$$

$$\Delta \dot{P} = (-7.663 \times 10^{-4}) \Delta P + (0.0045) \Delta Q$$

Dari hasil simulasi pada gambar 3.4 dengan menggunakan bentuk persamaan diferensial model linier *steam-drum* boiler yang telah disederhanakan, maka akan didapatkan bentuk respons keluaran seperti terlihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.4. Diagram Blok Simulink/Matlab Pendekatan Praktis Model SISO



Gambar 3.5. Respons Keluaran Sistem SISO Lingkak Terbuka

Dengan menggunakan metode identifikasi model empiris, maka dari gambar 3.5 diatas akan didapatkan parameter Δ sebesar 20. Maka selanjutnya akan didapatkan parameter-parameter sebagai berikut

$$t_{63\%} = 0.632\Delta = 0.632 \times 20 = 12.64$$

$$t_{28\%} = 0.283\Delta = 0.283 \times 20 = 5.66$$

$$\tau = 1.5(t_{63\%} - t_{28\%}) = 1.5(12.64 - 5.66) = 10.47$$

$$\theta = t_{63\%} - \tau = 12.64 - 10.47 = 2.17$$

Parameter τ dan θ yang dihasilkan dipergunakan untuk menghasilkan paramater kendali PID dengan menggunakan rumus pada tabel 2.1. sehingga menghasilkan parameter kendali PID sebagai berikut

Tabel 3.1. Hasil Penalaan Paramater PID Untuk *Steam-Drum Boiler*

Tipe Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	4.8248	0	0
PI	4.3424	7.233	0
PID	5.7897	4.34	1.085

3.4. Perancangan Sistem Kendali LQR

Pada bagian perancangan untuk sistem kendali LQR, penentuan parameter kendali berupa penguat regulator dan penguat pre-kompensator dilakukan dengan menggunakan dua buah pendekatan dari model linier *steam-drum* boiler yang didapat. Pendekatan pertama yaitu dengan menyederhanakan model linier dengan bentuk MISO menjadi SISO seperti pada perancangan sistem PID sebelumnya. Pendekatan yang kedua adalah menyederhanakan model linier *steam-drum* boiler dengan menghilangkan salah satu variabel keadaannya.

3.4.1. Perancangan Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan Model Linier SISO

Pada pembahasan perancangan sistem kendali PID sebelumnya telah dibahas mengenai penyederhanaan model linier yang semula MISO menjadi SISO. Didapatkan bentuk matriks sebagai berikut

$$A = [-7.663 \times 10^{-4}]$$

$$B = [0.0045]$$

$$C = [1]$$

$$D = [0]$$

Dalam melakukan perancangan sistem kendali LQR pendekatan SISO ini asumsi awal yang dilakukan untuk menentukan nilai bobot Q dan R adalah, perubahan maksimum dari tekanan keluaran yang dapat diterima sebesar 100 KPa sedangkan untuk panas masukan yang dapat diterima sebesar 10 persen dari nilai titik operasinya. Maka akan didapatkan bobot nilai matriks (dengan menggunakan aturan Bryson) sebagai berikut

$$Q = [1/100^2]$$

Dan

$$R = [1/34.2^2]$$

Selanjutnya, bentuk dari persamaan aljabar *Ricatti* dipergunakan dalam merancang sistem kendali optimal untuk menentukan nilai P.

$$A'P + PA - PBR^{-1}B'P + Q = 0$$

Dengan menggunakan bantuan perintah dari simulink/matlab untuk menyelesaikan persamaan diatas, yaitu $P = \text{are}(A, B * \text{inv}(R) * B', C' * Q * C)$ didapatkan besar nilai P

$$P = 0.0401$$

Selanjutnya ditentukan nilai penguat regulator dengan persamaan

$$K = R^{-1} B' P$$

$$K = [0.2121]$$

Untuk mensimulasikan sistem kendali dengan menggunakan *setpoint* yang berubah-ubah diperlukan perhitungan untuk menentukan besarnya penguat pre-kompensator [6]. Adapun langkah-langkah yang ditempuh untuk dapat menentukan besarnya penguat tersebut adalah sebagai berikut

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 221.3747 & 0.1696 \end{bmatrix}$$

$$F = [1 \ 0] * T * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 1$$

$$N = [0 \ 1] * T * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0.1696$$

$$K_c = K * F + N = [0.2121] * [1] + [0.1696] = [0.3818]$$

3.4.2. Perancangan Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan Model Linier MISO Yang Disederhanakan

Pada pembahasan sebelumnya telah didapatkan dua buah variabel keadaan (*state*), yaitu tekanan dan volume air pada model linier *steam-drum* boiler. Bentuk persamaan ruang keadaan dan keluaran yang sudah didapatkan kemudian disederhanakan dengan menghilangkan variabel keadaan yang tidak dapat diukur atau diambil datanya, dalam hal ini bentuk keadaan dari volume air (V_{wt}). Variabel keadaan ini dapat dihilangkan karena pengaruhnya yang sangat kecil sekali terhadap sistem, dengan melihat nilai-nilai model linier dari perubahan volume air mendekati nilai nol. Hal ini dilakukan karena LQR mengendalikan proses/plant dengan menggunakan kombinasi linier keadaan plant tersebut. Didapatkan bentuk persamaan ruang keadaan yang telah disederhanakan sebagai berikut

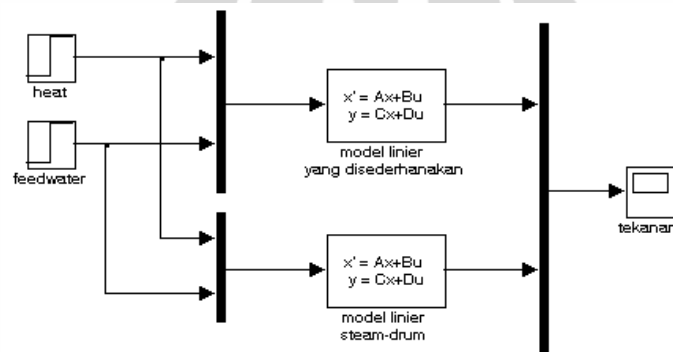
$$A = [-9.483 \times 10^{-4}]$$

$$B = [0.0045 \quad -1.8894]$$

$$C = [1]$$

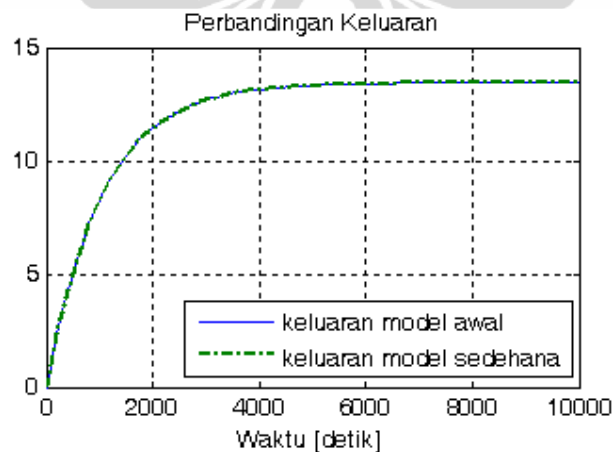
$$D = [0 \quad 0]$$

Bentuk persamaan ruang keadaan yang telah disederhanakan kemudian divalidasi dengan membandingkan terhadap bentuk persamaan ruang keadaan awal (model linier *steam-drum* boiler). Hal ini dilakukan agar dapat membuktikan bahwa penyederhanaan bentuk persamaan ruang keadaan tersebut tidak banyak mempengaruhi hasil keluaran dari sistem.



Gambar 3.6. Diagram Blok Simulink/Matlab Perbandingan Keluaran Model Linier dan Model Linier Yang Disederhanakan

Dari hasil simulasi didapat keluaran dari model linier *steam-drum* boiler dan persamaan ruang keadaan yang telah disederhanakan sebagai berikut



Gambar 3.7. Perbandingan Hasil Keluaran Dari Model Linier Awal dan Model Linier Yang Telah Disederhanakan

Pada gambar 3.7 terlihat bahwa bentuk persamaan ruang keadaan yang telah disederhanakan memiliki bentuk keluaran yang sama dengan keluaran yang dihasilkan dari persamaan ruang keadaan awal.

Dalam melakukan perancangan sistem kendali LQR dengan pendekatan MISO ini asumsi awal yang dilakukan untuk menentukan nilai bobot Q dan R adalah, perubahan maksimum dari tekanan keluaran yang dapat diterima sebesar 100 KPa sedangkan untuk panas dan air pengumpan masukan yang dapat diterima sebesar 10 persen dari nilai titik operasinya. Maka akan didapatkan bobot nilai matriks (dengan menggunakan aturan Bryson) sebagai berikut

$$Q = [1/100^2]$$

Dan

$$R = \begin{bmatrix} 1/34.2^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0138^2 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya, bentuk dari persamaan aljabar *Ricatti* dipergunakan dalam merancang sistem kendali optimal untuk menentukan nilai P.

$$A'P + PA - PBR^{-1}B'P + Q = 0$$

Dengan menggunakan bantuan perintah dari simulink/matlab untuk menyelesaikan persamaan diatas, yaitu $P = \text{are}(A, B * \text{inv}(R) * B', C' * Q * C)$ didapatkan besar nilai P

$$P = 0.03597$$

Selanjutnya ditentukan nilai penguat regulator dengan persamaan

$$K = R^{-1}B'P$$

$$K = \begin{bmatrix} 0.1901 \\ -0.1294 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$$

Sama seperti pada perancangan sebelumnya, untuk mensimulasikan sistem kendali dengan menggunakan *setpoint* yang berubah-ubah diperlukan perhitungan untuk menentukan besarnya penguat pre-kompensator. Adapun langkah-langkah yang ditempuh untuk dapat menentukan besarnya penguat tersebut adalah sebagai berikut

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} -0 & 0.999 \\ 0.0012653 & 0.0000011998 \\ -0.529249 & -0.0005018 \end{bmatrix}$$

$$F = [1 \ 0 \ 0] * T * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0.999$$

$$N = [0 \ 0 \ 1] * T * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = -5.019 \times 10^{-4}$$

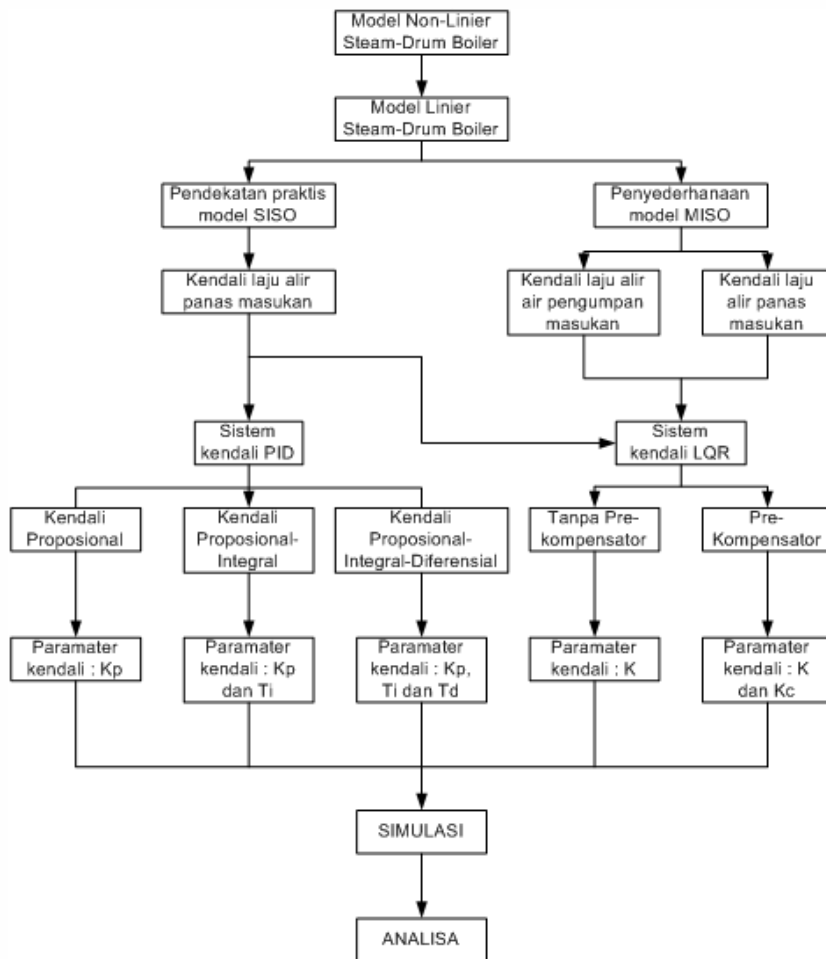
$$K_c = K * F + N = \begin{bmatrix} 0.0603 \\ -0.4132 \times 10^{-5} \end{bmatrix} * [0.999] + [-5.019 \times 10^{-4}] = \begin{bmatrix} 0.1896 \\ -0.5148 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$



BAB 4

SIMULASI DAN ANALISA

Pada bagian ini akan di bahas mengenai simulasi hasil perancangan sistem kendali dengan memasukan nilai parameter kendali yang sudah dibahas pada bagian bab sebelumnya dengan alur pengerjaan sebagai berikut.



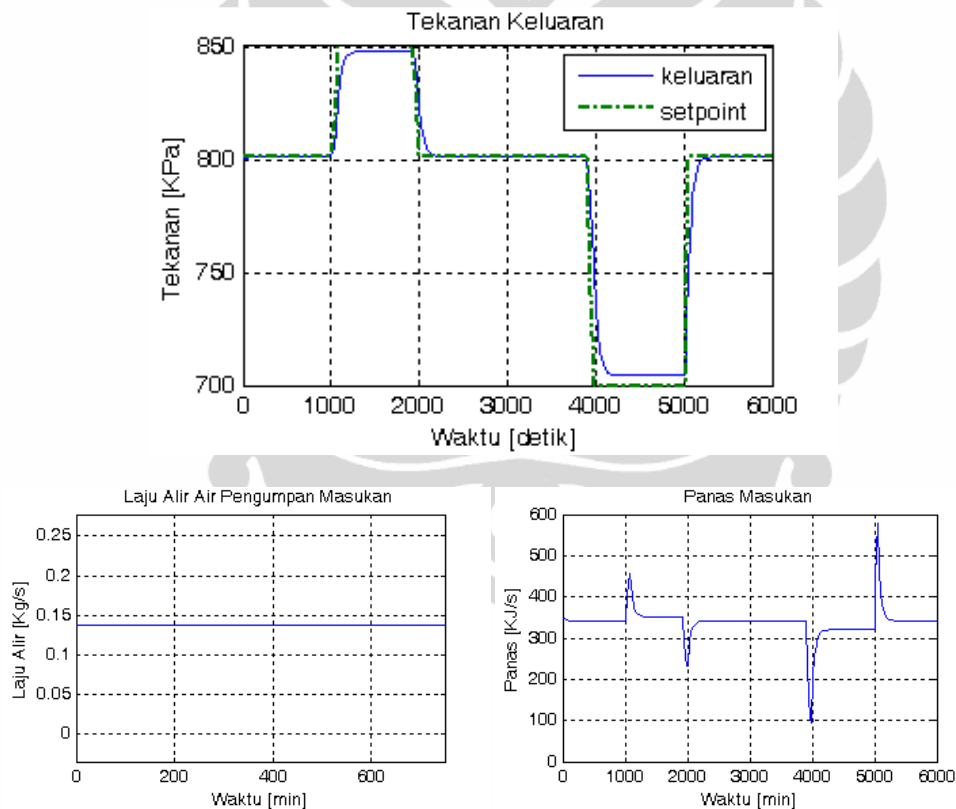
Gambar 4.1. Alur Kerja Perancangan dan Simulasi Sistem Kendali

Dari hasil simulasi tersebut nantinya akan di analisa mengenai efek pemasangan sistem kendali tersebut pada model non linier *steam-drum* boiler dalam kondisi lingkaran tertutup dan membandingkan hasil kinerja yang didapat dari masing-masing sistem kendali yang dirancang.

Untuk melakukan simulasi dengan sistem kendali P maka nilai yang dimasukan hanya nilai K_p sedangkan lainnya nol. Pada sistem kendali PI, dimasukan nilai K_p dan K_i dimana nilai $K_i = 1/T_i$ sedangkan nilai K_d sama dengan nol. Untuk sistem kendali PID, dimasukan keseluruhan nilai penguat yang ada.

4.1.1. Pengujian Sistem Kendali Proposional (P)

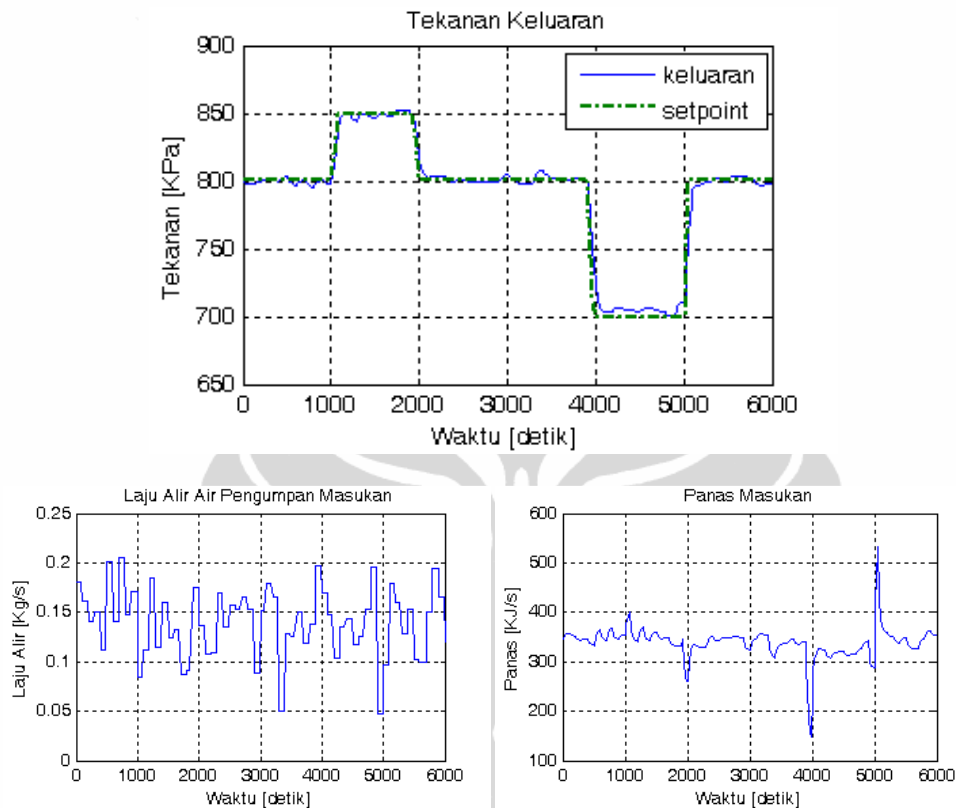
Dari hasil perancangan pada bab sebelumnya didapatkan besar nilai penguat proposional, $K_p = 4.8248$. Hasil simulasi lingkaran tertutup seperti pada gambar 4.2 dengan menggunakan sistem kendali penguat proposional menunjukkan bentuk sinyal keluaran dan masukan sebagai berikut



Gambar 4.4. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Dengan Menggunakan Sistem Kendali Proposional

Kemudian dilakukan pula simulasi terhadap model non linier dengan menggunakan sistem kendali penguat proposional dengan menggunakan laju alir

air pengumpan masukan yang berubah-ubah. Hasil sinyal keluaran dan masukan yang didapat adalah sebagai berikut



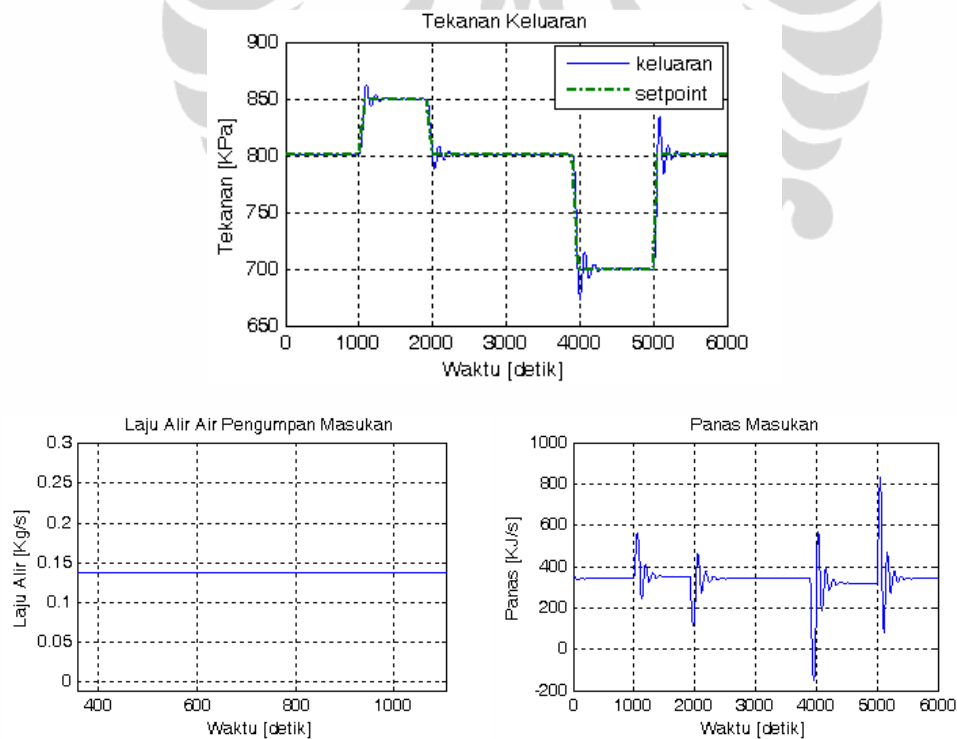
Gambar 4.5. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Menggunakan Sistem Kendali Proporsional Dengan Laju Air Pengumpan Masukan Berubah-ubah

Pada gambar 4.4 terlihat bahwa sinyal keluaran mencapai kondisi mantap dengan *settling time* kurang lebih (\pm) 152 detik. Namun, belum dapat dengan baik mengikuti perubahan *setpoint* yang diberikan karena adanya *steady state error* sebesar ± 2 KPa pada saat perubahan sebesar *setpoint* sebesar 50 KPa dan ± 4.4 KPa pada saat perubahan sebesar *setpoint* sebesar 100 KPa. Hal ini juga terlihat pada sinyal panas masukannya, bahwa apabila *setpoint* mengalami perubahan sebesar 100 KPa, maka akan timbul kenaikan sesaat puncak sebesar ± 578 KJ untuk selanjutnya secara proposional laju panas masukan akan mengalami penambahan/pengurangan (\pm) laju alirannya ± 20 KJ/detik dari titik operasi masukannya, sedangkan laju alir air pengumpan masukan tidak mengalami perubahan karena sistem kendali hanya diberikan untuk panas masukannya saja.

Sedangkan pada gambar 4.5 terlihat bahwa pada saat laju alir air pengumpan masukan berubah-ubah, maka panas masukannya akan mengalami perubahan pula agar dapat menyesuaikan dengan *setpoint* keluaran yang diinginkan. Kenaikan panas masukan yang terjadi disaat laju alir air pengumpan masukan bernilai konstan, yaitu pada saat terdapat kenaikan tekanan pada *setpoint* ditujukan agar dapat memberikan energi yang lebih besar sehingga dapat menghasilkan uap yang lebih besar dari massa air yang dimasukkan, sehingga didapatkan tekanan yang diinginkan. Sedangkan perubahan panas masukan disaat terjadi perubahan air pengumpan masukan ditujukan agar dapat menghasilkan tekanan keluaran yang diinginkan.

4.1.2. Pengujian Sistem Kendali Proposional-Integral (PI)

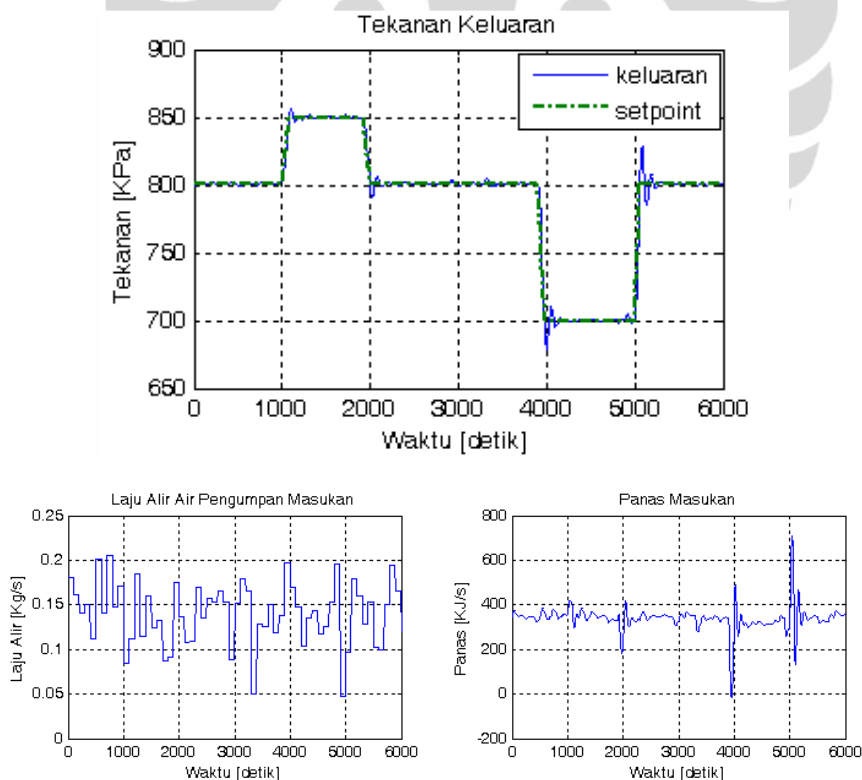
Dari hasil perancangan pada bab sebelumnya didapatkan besar nilai penguat proposional, yaitu $K_p = 4.3424$ dan waktu integral, $T_i = 7.233$. Hasil simulasi menunjukkan bentuk sinyal keluaran dan masukan dengan menggunakan parameter hasil perhitungan untuk sistem kendali PI adalah sebagai berikut



Gambar 4.6. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Dengan Menggunakan Sistem Kendali PI

Pada gambar 4.6 terlihat bahwa sinyal kendali keluaran telah dapat mengikuti perubahan *setpoint* yang diberikan dengan baik sesuai dengan nilai yang diinginkan, namun terdapat *overshoot* yang cukup besar pada saat terjadi perubahan *setpoint* sebesar 100 KPa dengan persentase nilai maksimum *overshoot* 4.26 persen pada waktu puncak ± 86 detik dengan *settling time* sebesar ± 250 detik. Akan tetapi, tidak terdapat *steady state error* seperti pada simulasi kendali proposional sebelumnya. Hal ini juga terlihat pada sinyal kendali masukan, pada saat terjadi kenaikan *setpoint* sebesar 100 KPa mengakibatkan kenaikan sesaat puncak yang cukup besar, yaitu 838 KJ dan \pm laju alir sebesar ± 21 KJ/detik pada saat kondisi mantap.

Selanjutnya dilakukan pula simulasi terhadap model non linier dengan menggunakan sistem kendali PI dengan air pengumpan masukan yang berubah-ubah. Hasil simulasi bentuk keluaran dan masukan yang didapat dapat dilihat pada gambar berikut

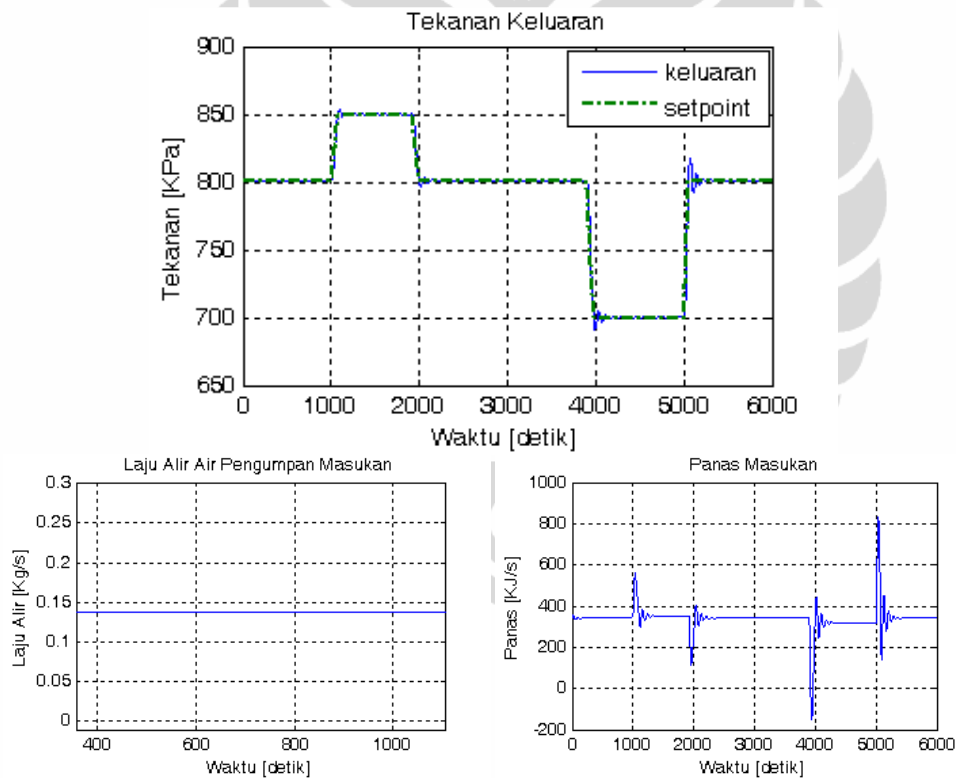


Gambar 4.7. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali PI Dengan Laju Air Pengumpan Masukan Berubah-ubah

Dari gambar 4.7 terlihat bahwa pada saat terjadi perubahan air pengumpanan masukan, maka panas masukan yang terkendali akan memberikan respons untuk menjaga nilai keluaran yang diinginkan sesuai dengan *setpoint* yang ada.

4.1.3. Pengujian Sistem Kendali PID

Dari hasil perancangan pada bab sebelumnya didapatkan besar nilai penguat proposional, $K_p = 5.78976$, waktu integral, $T_i = 4.34$, dan waktu diferensial, $T_d = 1.085$. Hasil simulasi menunjukkan bentuk sinyal keluaran dan masukan dengan menggunakan parameter hasil perhitungan untuk pengendali PID adalah sebagai berikut

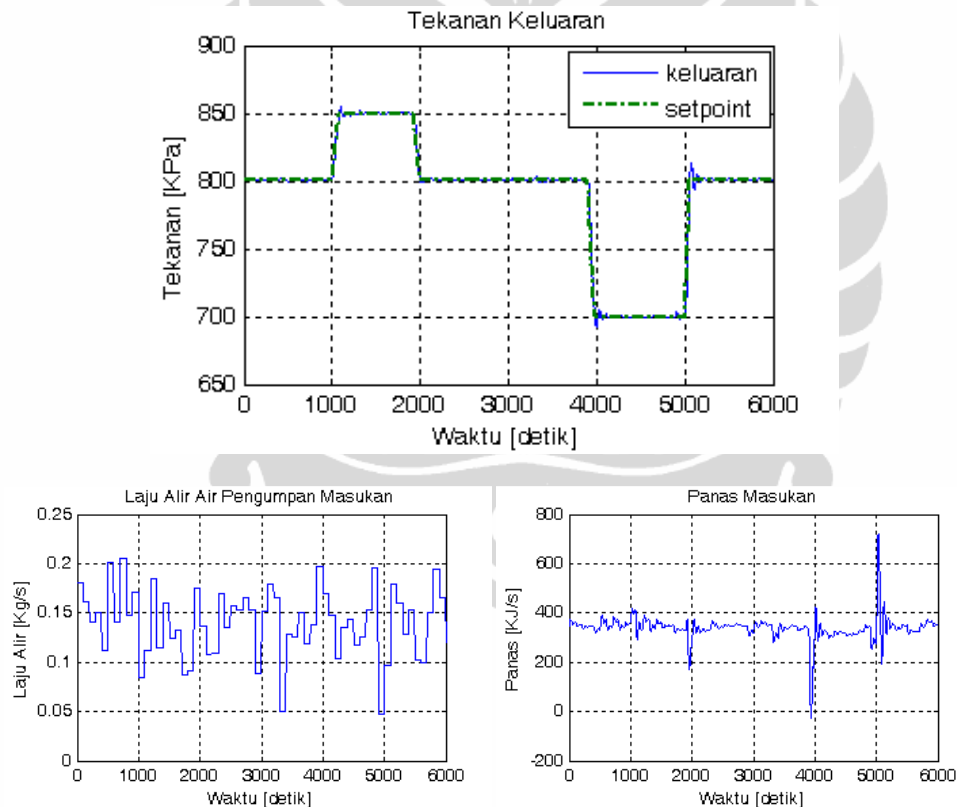


Gambar 4.8. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Dengan Menggunakan Sistem Kendali PID

Pada gambar 4.8 terlihat bahwa sinyal kendali keluaran telah dapat mengikuti perubahan *setpoint* yang diberikan dengan baik dengan dapat meredam besarnya *overshoot* pada keluaran saat terjadi kenaikan *setpoint* sebesar 100 KPa apabila menggunakan sistem kendali PID dengan persentase nilai maksimum

overshoot menjadi sebesar 2.14 persen pada waktu puncak ± 75 detik dengan *settling time* sebesar ± 127 detik dibandingkan dengan penggunaan sistem kendali PI. Sinyal keluaran yang dihasilkan juga tidak terdapat adanya *steady state error*. Namun pada sinyal kendali panas masukan, saat terjadi kenaikan *setpoint* sebesar 100 KPa mengakibatkan kenaikan sesaat puncak yang cukup besar, yaitu 845 KJ dan \pm laju alir sebesar ± 21 KJ/detik pada saat kondisi mantap.

Selanjutnya dilakukan pula simulasi terhadap model non linier dengan menggunakan sistem kendali PID dengan air pengumpan masukan yang berubah-ubah. Hasil sinyal keluaran dan masukan yang didapat dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 4.9. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali PID Dengan Laju Air pengumpan Masukan Berubah-ubah

Dari gambar 4.9 terlihat bahwa sinyal keluaran dapat mengikuti *setpoint* dengan baik meskipun laju alir air pengumpan masukan berfluktuasi. Hal ini disebabkan panas masukan dapat mengendalikan sinyalnya masukannya tidak

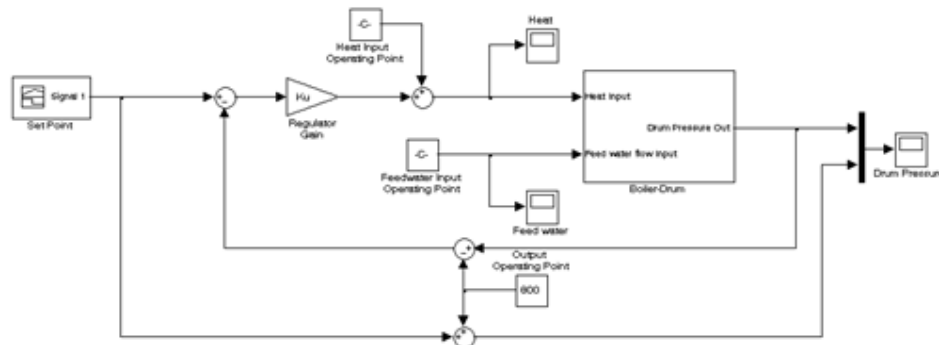
hanya karena adanya perubahan *setpoint* saja melainkan apabila terdapat pula perubahan laju alir air pengumpan masukan.

4.2. Pengujian Sistem Kendali LQR

Pengujian sistem kendali LQR dilakukan dengan menggunakan dua parameter kendali yang dihasilkan seperti pada bagian perancangan sistem kendali LQR sebelumnya. Parameter kendali tersebut dihasilkan dengan menggunakan dua buah pendekatan, yaitu pendekatan penyederhanaan sistem menjadi SISO dan pendekatan MISO melalui penyederhanaan model linier dengan menghilangkan satu buah variabel keadaan.

4.2.1. Pengujian Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan SISO Tanpa Pre-Kompensator

Bentuk blok diagram simulink/matlab yang dibuat untuk melakukan simulasi sistem kendali LQR dengan parameter kendali melalui pendekatan SISO tanpa menggunakan penguat pre-kompensator yang akan diimplementasikan pada model non linier *steam-drum* boiler skala kecil dapat dilihat pada gambar berikut

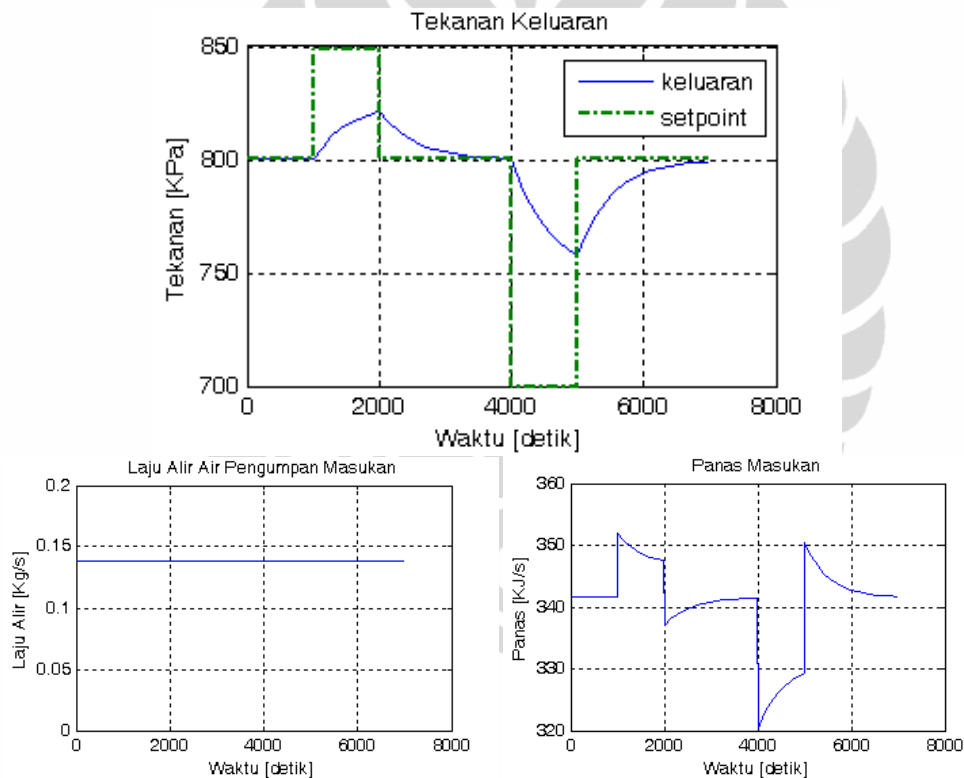


Gambar 4.10. Diagram Blok Simulink/Matlab Simulasi Sistem Kendali LQR Tanpa Penguat Pre-Kompensator Dengan Pendekatan SISO

Gambar 4.10 di atas menunjukkan proses simulasi dari sistem kendali LQR. Nilai *set point* yang telah ditentukan akan dikurangi dengan besarnya nilai perubahan tekanan keluaran (merupakan nilai kesalahan). Hasil yang didapatkan kemudian dikalikan dengan parameter kendali LQR berupa penguat regulator

sehingga menghasilkan nilai sinyal kendali untuk panas masukan dengan ditambahkan dengan nilai titik operasi masukannya.

Pada bab sebelumnya telah dilakukan perancangan untuk dapat menentukan besarnya penguat regulator dengan menggunakan nilai $Q = 1/100^2$ dan $R = [1/34.2^2]$. Besar penguat regulator yang telah didapatkan, yaitu $K = 0.2121$ kemudian dimasukkan kedalam blok simulink/matlab untuk dapat dilakukan simulasi. Dengan melakukan simulasi berdasarkan bentuk diagram simulink pada gambar 4.10. didapatkan bentuk sinyal keluaran dan kendali masukan sebagai berikut



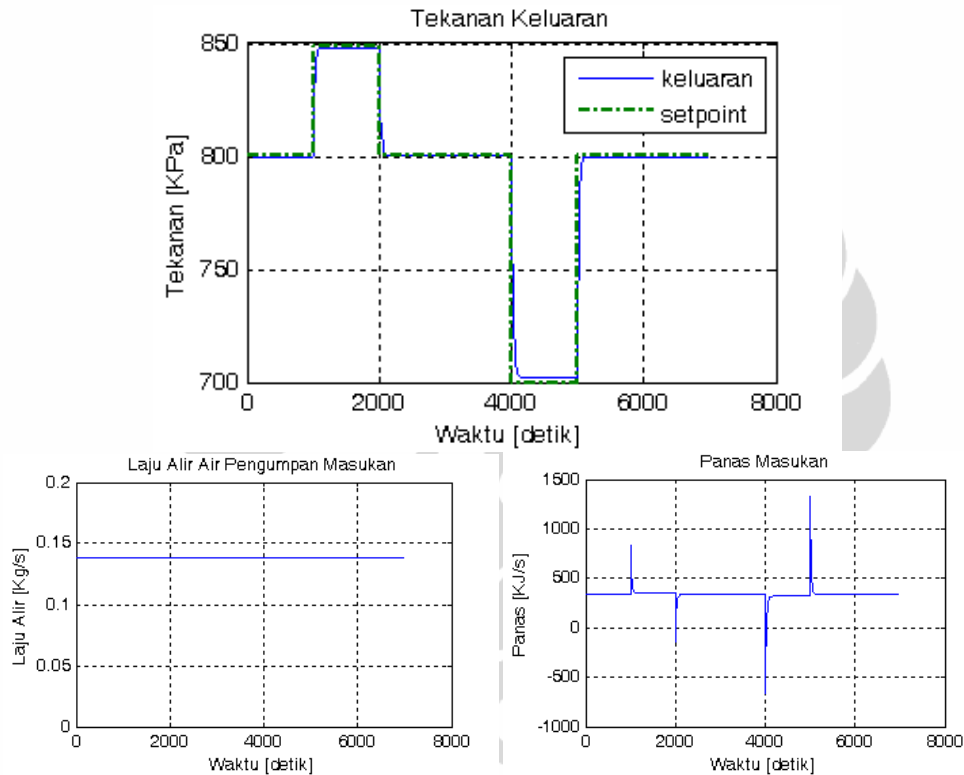
Gambar 4.11. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan SISO Tanpa Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$,

$$R = [1/34.2^2]$$

Pada hasil simulasi diatas, keluaran yang dihasilkan belum mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan dengan baik. Dengan demikian, perlu dilakukan penentuan kembali kedua nilai pembobotan agar dapat menghasilkan

nilai penguat regulator yang nantinya dapat menghasilkan sinyal keluaran yang mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan dengan nilai sinyal kendali masukan optimal.

Selanjutnya, dengan menggunakan nilai $Q = 1/10^2$ dan $R = [1/102.6^2]$. Besar penguat regulator yang didapat adalah $K = 10.09$. simulasi menunjukkan bentuk sinyal keluaran dan kendali masukan sebagai berikut



Gambar 4.12. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan SISO Tanpa pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/10^2$,

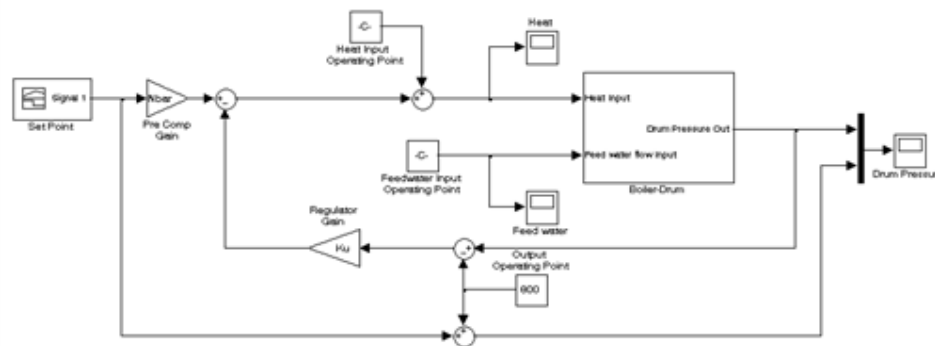
$$R = \left[\frac{1}{102.6^2} \right]$$

Pada hasil simulasi diatas dapat terlihat bahwa sistem dapat mencapai kondisi keadaan mantap pada *settling time* ± 41 detik tanpa adanya *overshoot*. Keluaran yang dihasilkan sudah mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan dengan nilai *steady state error* yang cukup kecil, yaitu 2.1 KPa pada saat perubahan *setpoint* sebesar 100 KPa. Namun demikian, dengan adanya perubahan pada nilai pembobotan dengan batas maksimum perubahan keluaran hanya

menjadi 10 Kpa dan panas masukan sebesar 102.6 KJ/s menghasilkan nilai penguat regulator yang jauh lebih besar dari sebelumnya sehingga mengakibatkan kenaikan sesaat puncak yang timbul pada kendali panas masukan menjadi sangat besar sekali yaitu 1329 KJ dengan +/- laju alir panas pada saat kondisi mantap sebesar ± 2 KJ/detik disaat terjadi perubahan *setpoint* sebesar 100 KPa.

4.2.2. Pengujian Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan SISO Menggunakan Pre-Kompensator

Bentuk blok diagram simulink/matlab yang dibuat untuk melakukan simulasi sistem kendali LQR dengan parameter kendali melalui pendekatan SISO dengan menggunakan penguat pre-kompensator yang akan diimplementasikan pada model non linier *steam-drum* boiler skala kecil dapat dilihat pada gambar berikut

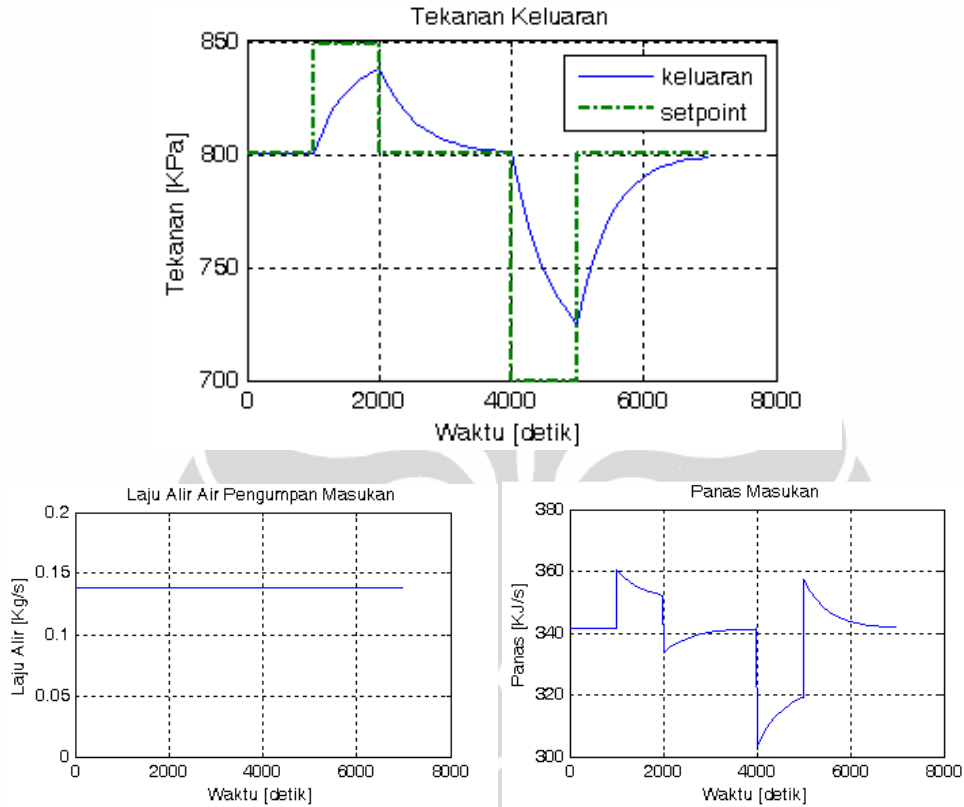


Gambar 4.13. Diagram Blok Simulink/Matlab Simulasi Sistem Kendali LQR Menggunakan Penguat Pre-Kompensator Dengan Pendekatan SISO

Gambar 4.13 diatas menunjukkan proses simulasi dari sistem kendali LQR. Nilai *setpoint* yang telah ditentukan akan dikalikan terlebih dahulu dengan nilai penguat pre-kompensator yang didapat sebelum dikurangi dengan besarnya nilai perubahan tekanan keluaran yang dikalikan dengan besar nilai penguat regulator. Hasil yang didapatkan merupakan nilai sinyal kendali untuk panas masukan dengan ditambahkan dengan nilai titik operasi masukannya.

Pada bab sebelumnya telah dilakukan perancangan untuk dapat menentukan besarnya penguat regulator dan pre-kompensator dengan menggunakan nilai $Q = 1/100^2$ dan $R = [1/34.2^2]$. Besar penguat regulator yang telah didapatkan, yaitu $K = 0.2121$ dan $K_c = 0.3818$ dimasukkan kedalam blok

simulink/matlab untuk dapat dilakukan simulasi. Dengan melakukan simulasi berdasarkan bentuk diagram simulink pada gambar 4.13 didapatkan bentuk sinyal keluaran dan kendali masukan sebagai berikut



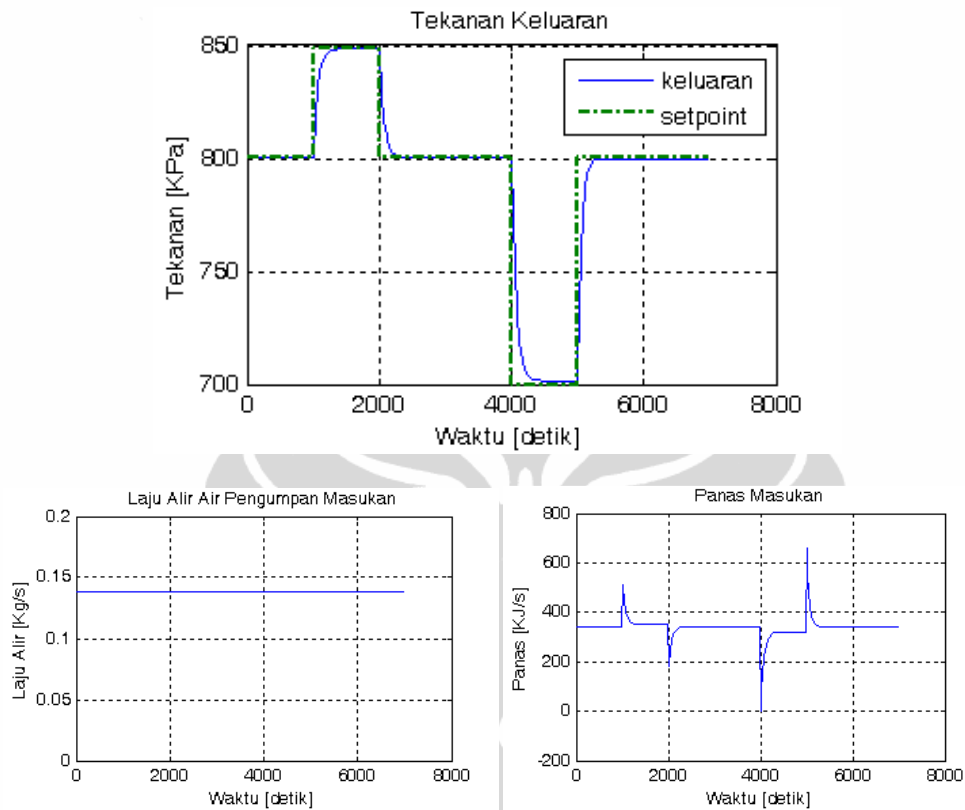
Gambar 4.14. Sinyal Keluaran dan Kendali masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan SISO Menggunakan Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$,

$$R = \left[\frac{1}{34.2^2} \right]$$

Pada hasil simulasi diatas dapat terlihat bahwa keluaran yang dihasilkan belum mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan. Dengan demikian, perlu dilakukan penentuan nilai bobot kembali agar dapat menghasilkan nilai penguat regulator dan pre-kompensator yang nantinya dapat menghasilkan sinyal keluaran yang mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan dengan nilai sinyal kendali masukan optimal.

Selanjutnya, dengan menggunakan nilai $Q = 1/100^2$ dan $R = \left[\frac{1}{34.2^2} \right]$. Besar penguat regulator yang didapat adalah $K = 3.25$ dan penguat pre-

kompensator sebesar $K_c = 3.42$. Kemudian dilakukan simulasi yang menunjukkan bentuk sinyal keluaran dan kendali masukan sebagai berikut



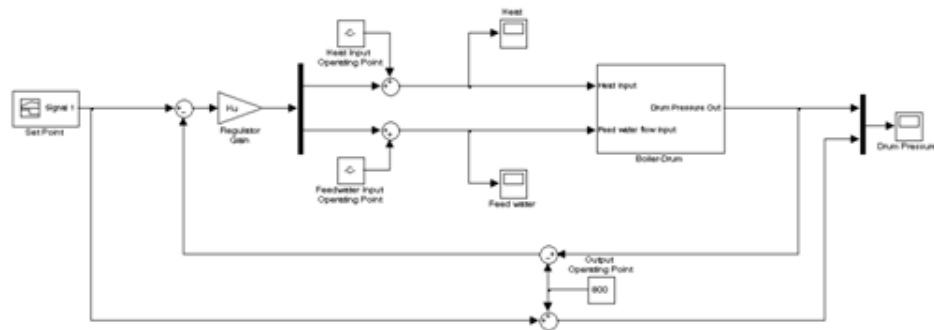
Gambar 4.15. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan SISO Menggunakan Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$,

$$R = \left[\frac{1}{342^2} \right]$$

Pada hasil simulasi diatas dapat terlihat bahwa sistem dapat mencapai kondisi keadaan mantap pada *settling time* ± 200 detik tanpa adanya *overshoot*. Keluaran yang dihasilkan sudah mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan. Dengan adanya penambahan penguat pre-kompensator pada *setpoint* dapat memperbaiki sinyal keluaran tanpa mengakibatkan kenaikan sesaat yang berlebihan pada sinyal kendali panas masukannya yaitu hanya sebesar ± 66.2 KJ dengan +/- laju alir panas pada saat kondisi mantap sebesar ± 22 KJ/detik disaat terjadi perubahan *setpoint* sebesar 100 KPa.

4.2.3. Pengujian Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan MISO Tanpa Pre-Kompensator

Bentuk blok diagram simulink/matlab yang dibuat untuk melakukan simulasi sistem kendali LQR dengan parameter kendali melalui pendekatan MISO tanpa menggunakan penguat pre-kompensator yang akan diimplementasikan pada model non linier *steam-drum* boiler skala kecil dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 4.16. Diagram Blok Simulink/Matlab Simulasi Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Tanpa Pre-Kompensator

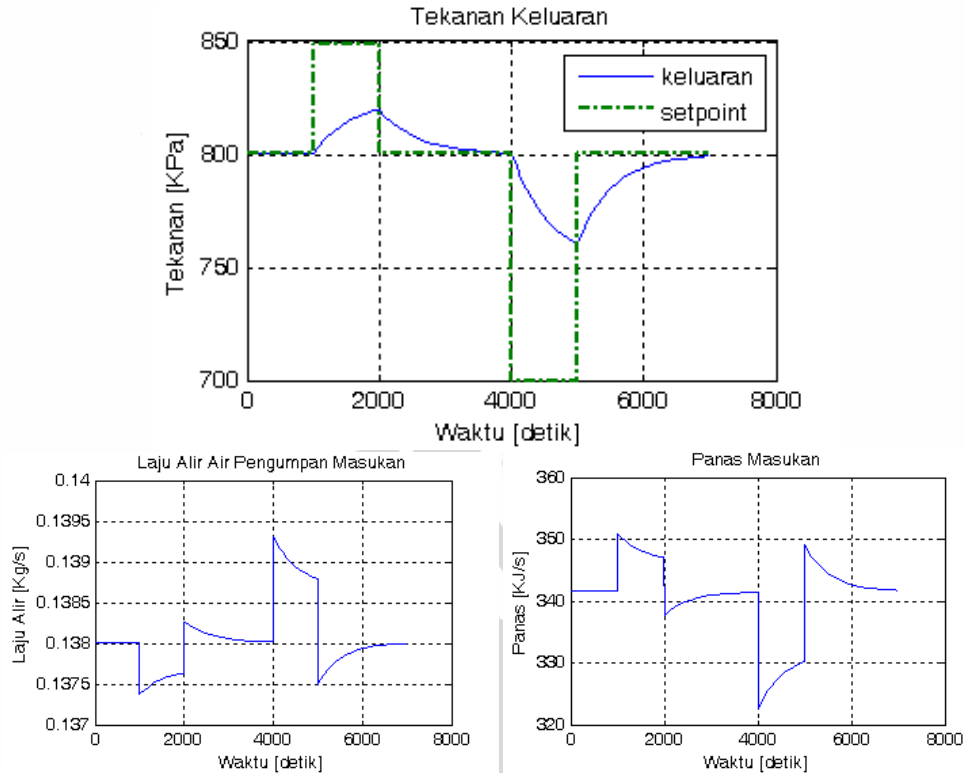
Gambar 4.16 diatas menunjukkan proses simulasi dari sistem kendali LQR. Nilai *setpoint* yang telah ditentukan akan dikurangi dengan besarnya nilai perubahan tekanan keluaran (merupakan nilai kesalahan). Hasil yang didapatkan kemudian dikalikan dengan parameter kendali LQR berupa penguat regulator sehingga menghasilkan nilai sinyal kendali untuk panas dan air pengumpan masukan dengan ditambahkan dengan nilai titik operasi masukannya.

Pada bab sebelumnya telah dilakukan perancangan untuk dapat menentukan besarnya penguat regulator dengan menggunakan nilai $Q = 1/100^2$

dan $R = \begin{bmatrix} 1/34.2^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0138^2 \end{bmatrix}$. Besar penguat regulator yang telah didapatkan,

yaitu $K = \begin{bmatrix} 0.1901 \\ -0.1294 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$ kemudian dimasukkan kedalam blok

simulink/matlab untuk dapat dilakukan simulasi. Dengan melakukan simulasi berdasarkan bentuk diagram simulink pada gambar 4.16 didapatkan bentuk sinyal keluaran dan kendali masukan sebagai berikut

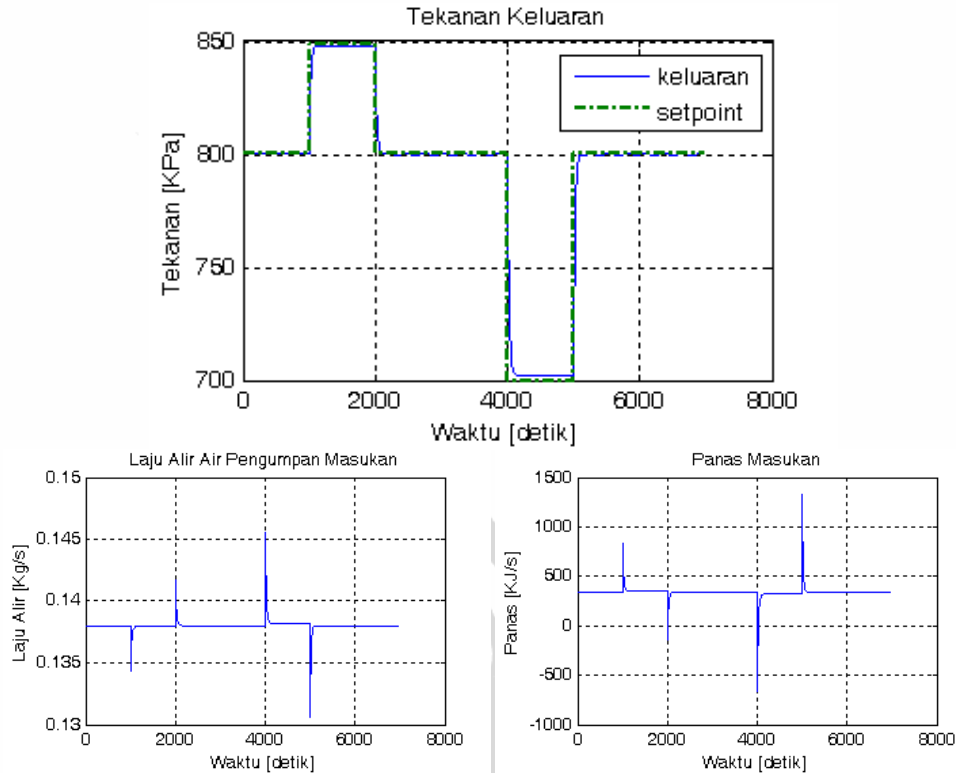


Gambar 4.17. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Tanpa Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$,

$$R = \begin{bmatrix} 1/34.2^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0138^2 \end{bmatrix}$$

Pada hasil simulasi diatas keluaran yang dihasilkan belum mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan. Dengan demikian, perlu dilakukan penentuan nilai bobot kembali agar dapat menghasilkan nilai penguat regulator yang nantinya dapat menghasilkan sinyal keluaran yang mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan dengan nilai sinyal kendali masukan optimal.

Selanjutnya, dengan menggunakan nilai $Q = 1/100^2$ dan $R = \begin{bmatrix} 1/1026^2 & 0 \\ 0 & 1/0.138^2 \end{bmatrix}$. Besar penguat regulator yang didapat adalah $K = \begin{bmatrix} 10.0367 \\ -0.7595 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$. Hasil simulasi menunjukkan bentuk sinyal keluaran dan kendali masukan sebagai berikut



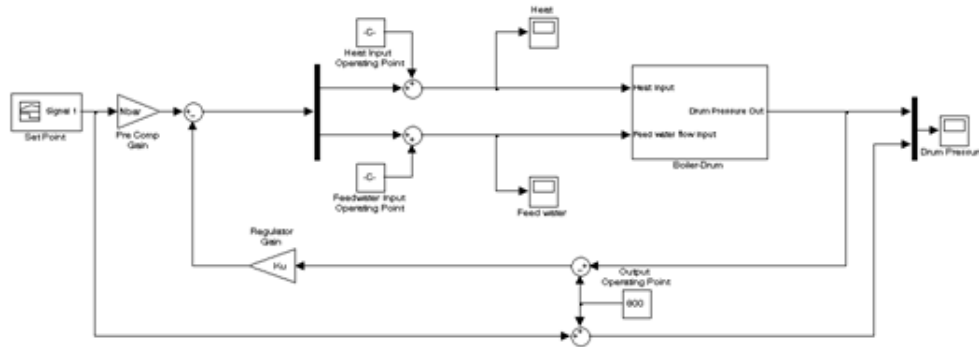
Gambar 4.18. Sinyal Keluaran Dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Tanpa Pre-Kompensator Menggunakan Bobot $Q = 1/100^2$,

$$R = \begin{bmatrix} 1/1026^2 & 0 \\ 0 & 1/0.138^2 \end{bmatrix}$$

Pada hasil simulasi diatas dapat terlihat bahwa sistem dapat mencapai kondisi keadaan mantap pada *settling time* ± 55 detik tanpa adanya *overshoot* dengan nilai *steady state error* yang cukup kecil, yaitu 2.1 KPa pada saat perubahan *setpoint* sebesar 100 KPa.. Keluaran yang dihasilkan sudah mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan. Namun demikian, dengan adanya perubahan pada nilai pembobotan dengan batas maksimum perubahan panas masukan sebesar 1026 KJ/s dan air pengumpan masukan 0.138 Kg/s menghasilkan nilai penguat regulator yang jauh lebih besar dari sebelumnya sehingga mengakibatkan kenaikan sesaat puncak yang timbul pada kendali panas dan air pengumpan masukan menjadi sangat besar sekali yaitu sebesar ± 1324 KJ dan ± 0.1456 dengan +/- laju alir panas pada saat kondisi mantap sebesar ± 20 KJ/detik dan laju alir air pengumpan ± 0.0002 Kg/detik disaat terjadi perubahan *setpoint* sebesar 100 KPa.

4.2.4. Pengujian Sistem Kendali LQR Dengan Pendekatan MISO Menggunakan Pre-Kompensator

Bentuk blok diagram simulink/matlab yang dibuat untuk melakukan simulasi sistem kendali LQR dengan parameter kendali melalui pendekatan MISO yang akan diimplementasikan pada model non linier *steam-drum* boiler skala kecil dapat dilihat pada gambar berikut



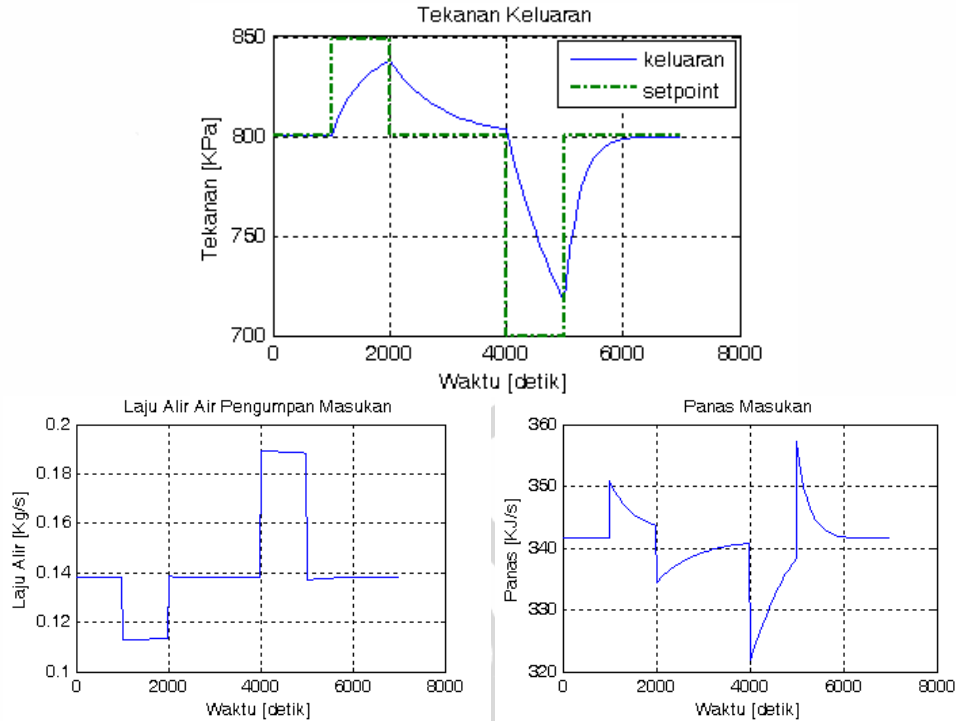
Gambar 4.19. Diagram Blok Simulink/matlab Simulasi Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Dengan Menggunakan Pre-Kompensator

Gambar 4.19 diatas menunjukkan proses simulasi dari sistem kendali LQR. Nilai *setpoint* yang telah ditentukan akan dikalikan terlebih dahulu dengan penguat pre-kompensator untuk selanjutnya dikurangi dengan besarnya nilai perubahan tekanan keluaran yang telah dikalikan dengan nilai penguat regulator. hasil yang didapatkan merupakan nilai hasil sinyal kendali untuk panas dan air pengumpan masukan dengan ditambahkan dengan nilai titik operasi masukannya.

Pada bab sebelumnya telah dilakukan perancangan untuk dapat menentukan besarnya penguat regulator dan pre-kompensator dengan

menggunakan nilai $Q = 1/100^2$ dan $R = \begin{bmatrix} 1/34.2^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0138^2 \end{bmatrix}$. Nilai-nilai yang

didapatkan tersebut kemudian dimasukkan kedalam blok simulink/matlab untuk dapat dilakukan simulasi. Dengan melakukan simulasi berdasarkan bentuk diagram simulink pada gambar 4.19 didapatkan bentuk sinyal keluaran dan kendali masukan sebagai berikut



Gambar 4.20. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Menggunakan Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$,

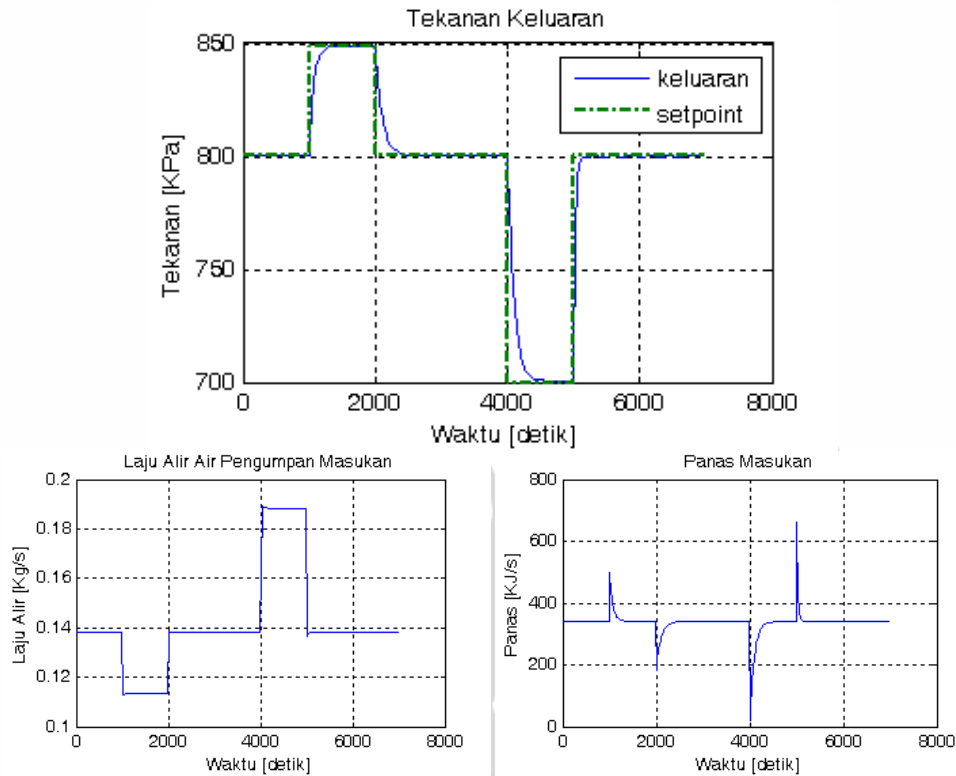
$$R = \begin{bmatrix} 1/34.2^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0138^2 \end{bmatrix}$$

Pada hasil simulasi diatas keluaran yang dihasilkan belum mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan. Dengan demikian, perlu dilakukan penentuan nilai bobot kembali agar dapat menghasilkan nilai penguat regulator dan pre-kompensator yang nantinya dapat menghasilkan sinyal keluaran yang mampu mengikuti *setpoint* yang diberikan dengan nilai sinyal kendali masukan optimal.

Setelah dilakukan beberapa simulasi dengan menggunakan nilai Q dan R yang berbeda untuk sistem kendali LQR pendekatan MISO dengan menggunakan pre-kompensator (lampiran 1), maka didapatkan nilai penguat regulator yang optimal dengan menggunakan bobot regulator $Q = 1/100^2$ dan $R =$

$$\begin{bmatrix} 1/342^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0345^2 \end{bmatrix} \text{ adalah sebesar } K = \begin{bmatrix} 3.2138 \\ -0.1368 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \text{ dengan nilai}$$

penguat untuk pre-kompensator sebesar $K_c = \begin{bmatrix} 3.2133 \\ -5.1556 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$. Hasil simulasi menunjukkan bentuk sinyal keluaran dan kendali masukan sebagai berikut



Gambar 4.21. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Menggunakan Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$,

$$R = \begin{bmatrix} 1/342^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0345^2 \end{bmatrix}$$

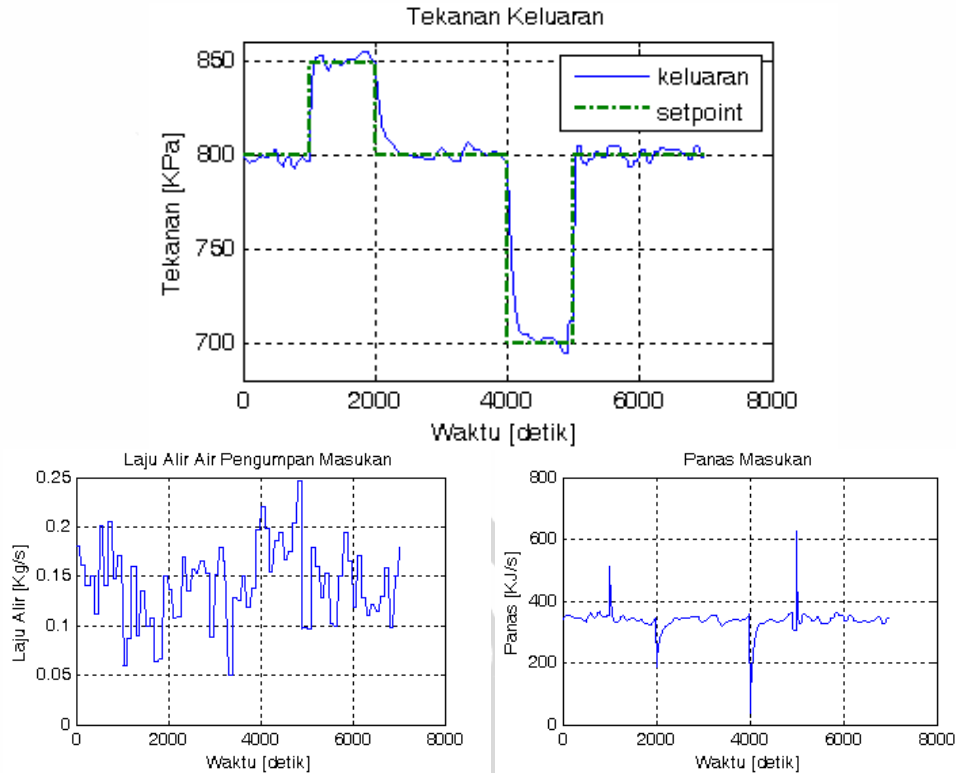
Penetapan bobot nilai R akan mempengaruhi sinyal kendali masukan. Bobot nilai R_{11} akan mempengaruhi nilai sinyal kendali panas masukan dan bobot nilai R_{22} akan mempengaruhi nilai sinyal kendali air pengumpan masukan. Semakin kecil nilai R_{11} dibandingkan dengan nilai R_{22} maka kenaikan sesaat pada laju alir panas masukannya akan semakin lebih besar dengan kenaikan sesaat pada laju alir air pengumpan semakin mengecil. Begitu pula sebaliknya, apabila nilai R_{11} diperbesar maka kenaikan sesaat pada laju alir panas masukan akan semakin kecil namun kenaikan sesaat pada laju alir air pengumpan masukan akan semakin besar. Dari hasil simulasi (gambar 4.20) dengan besar pembobotan yang telah

diubah dari sebelumnya terlihat bahwa keluaran sistem menunjukkan sistem mencapai kondisi mantap pada *settling time* ± 200 detik. Hasil keluaran yang didapat telah mengikuti *setpoint* yang diberikan dengan baik dengan kenaikan sesaat puncak panas masukan sebesar ± 660.8 KJ dan +/- laju bahan bakar pada saat kondisi mantap sebesar ± 2 KJ/detik dan laju alir air pengumpan ± 0.05 Kg/detik disaat terjadi perubahan *setpoint* sebesar 100 KPa.

Perubahan nilai pembobotan R pada simulasi ini mengubah asumsi besarnya nilai perubahan sinyal kendali masukannya. Untuk sinyal kendali panas masukannya memiliki batas perubahan nilai sebesar 342 (sebanyak 100% dari nilai titik operasinya) dan sinyal kendali air pengumpan masukan memiliki batas perubahan nilai sebesar 0.0345 (sebanyak 25% dari nilai titik operasinya). Perubahan *setpoint* lebih banyak mempengaruhi sinyal kendali air pengumpan masukan. Pada saat terjadi kenaikan *setpoint*, maka laju alir air pengumpan akan berkurang dengan diikuti kenaikan sesaat dari panas masukannya. Begitupula sebaliknya, apabila terjadi penurunan *setpoint*, maka air pengumpan masukan akan semakin bertambah dengan diikuti pula oleh penurunan sesaat dari panas masukannya.

Sinyal kendali panas dan air pengumpan masukan terlihat lebih realistis jika dibandingkan dengan hasil simulasi-simulasi sebelumnya, dimana pada saat terjadi kenaikan tekanan sebesar 50 KPa, laju alir air pengumpan masukan tidak melewati batas kerja (diasumsikan bahwa pompa air pengumpan masukan akan mati pada saat nilainya ≤ 0). Begitu pula dengan laju alir panas masukannya, pada saat terjadi penurunan tekanan sebesar 100 KPa maka aliran panas masukan masih dalam batas kerjanya (diasumsikan bahwa *feder* bahan bakar akan mati pada saat nilainya ≤ 0).

Selanjutnya dilakukan pula simulasi dengan besar pembobotan ini dengan mengasumsikan laju alir air pengumpan masukan yang berubah-ubah sama seperti pada simulasi sistem kendali PID sebelumnya, didapatkan bentuk sinyal keluaran dan kendali masukan sebagai berikut



Gambar 4.22. Sinyal Keluaran dan Kendali Masukan Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Menggunakan Pre-Kompensator Dengan Bobot $Q = 1/100^2$,

$$R = \begin{bmatrix} 1/342^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0345^2 \end{bmatrix} \text{ Dengan Laju Air pengumpan Masukan Berubah-ubah}$$

Dari gambar diatas terlihat bahwa sinyal keluaran masih dapat mengikuti *set point* dengan baik meskipun laju alir air pengumpan masukan berfluktuasi. Hal ini disebabkan sinyal kendali panas masukan dapat mengendalikan sinyalnya tidak hanya karena adanya perubahan *setpoint* saja melainkan apabila terdapat perubahan laju alir air pengumpan masukan yang sudah terkendali pula untuk dapat menghasilkan sinyal keluaran yang diinginkan.

4.3. Analisa Kelebihan dan Kelemahan Sistem Kendali PID dan LQR untuk *Steam-Drum Boiler* Skala Kecil

Dari hasil pengujian sistem kendali dengan menggunakan parameter kendali sesuai dengan perancangan yang telah dilakukan, baik dengan

menggunakan sistem kendali PID dan sistem kendali LQR masing-masing memiliki kelebihan dan kelemahan seperti terlihat pada tabel berikut.

Tabel 4.1. Hasil Simulasi Sistem Kendali P, PI, PID, dan LQR

PENDEKATAN SISO													
SISTEM KENDALI	PARAMETER KENDALI					KONDISI PADA PERUBAHAN SETPOINT 100 KPa							
						OUTPUT				HEAT INPUT		FEEDWATER INPUT	
	Kp	Ti	Td	K	Kc	SSE (KPa)	OS (%)	Ts (detik)	Tp (detik)	KSP (KJ)	+/- (KJ/S)	KSP (Kg)	+/- (Kg/S)
P	4,8248	-	-	-	-	4,4	-	150	-	578	20	-	-
PI	4,3424	7,233	-	-	-	-	4,26	250	86	838	21	-	-
PID	5,7898	4,34	1,085	-	-	-	2,14	127	75	845	21	-	-
LQR tanpa Pre-Comp	-	-	-	10,09	-	2,1	-	41	-	1329	2	-	-
LQR dengan Pre-Comp	-	-	-	3,25	3,42	-	-	200	-	662,2	22	-	-
PENDEKATAN MISO													
LQR tanpa Pre-Comp	-	-	-	[10,0367 ; - 0,7595E-4]	-	2,1	-	55	-	1324	20	0,1456	0,0002
LQR dengan Pre-Comp	-	-	-	[3,2138 ; - 0,1368E-4]	[3,2133 ; - 5,1556E-4]	-	-	200	-	660,8	2	0,19	0,05

Penggunaan sistem kendali PID sebagai pengendali pada panas masukan akan menghasilkan kenaikan sesaat pada laju alir panas masukan yang cukup besar apabila terjadi perubahan kenaikan *set point* tekanan keluaran. Namun, jika dibandingkan dengan sistem kendali LQR dengan menggunakan pendekatan SISO tanpa menggunakan pre-kompensator maka nilainya lebih kecil dari kenaikan sesaat yang dihasilkan pada sistem kendali ini. Namun apabila sistem kendali LQR pendekatan SISO dengan menggunakan pre-kompensator akan menghasilkan kenaikan sesaat yang lebih kecil daripada yang dihasilkan oleh sistem kendali PID dengan sinyal keluaran yang dihasilkan tanpa terjadi *overshoot*.

Sedangkan jika sistem kendali PID dibandingkan dengan sistem kendali LQR dengan menggunakan pendekatan MISO dengan menggunakan pre-kompensator, maka sinyal kendali yang ditujukan baik untuk panas dan air pengumpan masukan akan memberikan besar kenaikan sesaat yang lebih kecil dari yang dihasilkan oleh sistem kendali PID. Meskipun besarnya kenaikan sesaat pada laju alir panas masukan dapat ditekan, namun terdapat pula kenaikan pada laju alir pada laju alir air pengumpan masukan yang mengakibatkan diperlukan penyediaan pompa air yang dapat menanggapi perubahan sesaat tersebut. Namun, jika dilihat dari hasil simulasi sinyal keluarannya, sistem kendali PID akan menghasilkan *overshoot* pada sinyal keluaran yang dapat mengakibatkan

kestabilan awal sistem terganggu apabila terjadi perubahan *setpoint*. Sedangkan hasil sinyal keluaran dari sistem kendali LQR menunjukkan hasil sinyal keluaran yang mampu mengikuti *setpoint* tanpa adanya *overshoot* pada sinyal keluarannya.

Jika melihat sisi ekonomis dari pemakaian energi tentunya pemakaian sistem kendali LQR menjadi pilihan utama karena dapat menekan pemakaian bahan bakar pada saat terjadi kenaikan sesaat pada laju alir panas masukan yang diakibatkan adanya perubahan *setpoint*. Akan tetapi, sistem kendali LQR membutuhkan biaya investasi awal yang lebih besar jika dibandingkan dengan sistem kendali PID karena harus mengendalikan kedua buah masukannya untuk *steam-drum* boiler skala kecil ini. Implementasi sistem kendali PID akan lebih mudah dilakukan dengan biaya investasi awal yang lebih kecil karena hanya akan mengendalikan laju alir panas masukannya saja dengan konsekuensi pemakaian bahan bakar yang lebih banyak pada saat pengoperasiannya apabila sering terjadi perubahan *setpoint* sehingga biaya operasional yang dikeluarkan akan semakin lebih besar.

BAB 5

KESIMPULAN

- Model linier *steam-drum* boiler skala kecil menunjukkan perubahan volume air yang sangat kecil sekali (mendekati nol), sehingga model linier tersebut dapat disederhanakan untuk menghitung parameter kendalinya.
- Sistem kendali PID dapat dipergunakan dalam mengendalikan laju alir panas masukan untuk menghasilkan tekanan uap keluaran yang dapat mengikuti *setpoint* yang diberikan.
- Parameter sistem kendali PID yang didapat adalah $K_p = 5.78976$, $T_i = 4.34$, dan $T_d = 1,085$, menghasilkan sinyal keluaran yang telah dapat mengikuti *setpoint* dengan persentase maksimum *overshoot* 2.14 persen pada waktu puncak ± 75 detik dengan *settling time* sebesar ± 127 detik dengan kenaikan sesaat puncak pada panas masukan sebesar 845 KJ dan +/- laju alir sebesar ± 21 KJ/detik pada saat terjadi perubahan *setpoint* sebesar 100 KPa.
- Sistem kendali LQR menghasilkan besar nilai penguat regulator yang optimal dengan menggunakan penguat pre-kompensator untuk *setpoint* masukan agar dapat memberikan sinyal kendali untuk panas dan air pengumpanan masukan, sehingga menghasilkan sinyal keluaran yang dapat mengikuti *setpoint* dengan baik tanpa adanya *overshoot*.
- Perancangan sistem kendali LQR pendekatan MISO menggunakan pre-kompensator mendapatkan besar penguat regulator $K = \begin{bmatrix} 3.2138 \\ -0.1368 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$ dan penguat pre-kompensator $K_c = \begin{bmatrix} 3.2133 \\ -5.1556 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$, menghasilkan keluaran yang dapat mengikuti *setpoint* dengan *settling time* ± 200 detik tanpa *overshoot*, dengan kenaikan sesaat puncak panas dan air pengumpanan masukan sebesar ± 660.8 KJ dan penambahan laju bahan bakar pada saat kondisi mantap sebesar ± 2 KJ/detik dan +/- laju alir air pengumpanan ± 0.05 Kg/detik disaat terjadi perubahan *setpoint* sebesar 100 KPa.

DAFTAR REFERENSI

- [1] K.J. Astrom and R.D. Bell, *Drum Boiler Dynamics*, Automatica, Vol 36, 2000.
- [2] C.X.Lu, N.W.Rees, S.C.Donaldson, *The Use of The Astrom-Bell Model For The Design Of Drum Level Controllers In Power Plant Boilers*, IFAC, 2005
- [3] Marlin, T.E., *Process Control : Designing Processes and Control Systems For Dynamic Performance, 2nd Edition*, Mc-Graw-Hill, 2000.
- [4] J.P. Hespanha, *Undergraduate Lecture Notes On LQG/LQR Controller Design*, April, 2007.
- [5] Laporan Akhir Kegiatan, Pembuatan Boiler Skala Kecil Sebagai Pembangkit Listrik/Pengering Hasil Pertanian/Perkebunan, Puslitbangtek Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan, Balitbang Energi dan Sumberdaya Mineral, 2008.
- [6] J.D. Ojong, Setpoint Tracking dengan LQR, July, 2010.
<http://akirajunto.wordpress.com/2010/07/29/setpoint-tracking-dengan-lqr>

DAFTAR PUSTAKA

- Setiawan, Iwan, Kontrol PID Untuk Proses Industri, PT.Elex Media Computindo, Jakarta, 2008.
- Mrunalini, K., Kundu, P., & Dutta, K.K., *State Space Model for Drum Boiler System*. IE(I)-Journal, Vol.86, March, 2006
- Ali, Muhammad, Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID Dengan Software Matlab, Jurnal Edukasi@Elektro, Vol.1, No.1, Oktober, 2004, Hal. 1-8
- Ogata, K., *Modern Control Engineering, Fourth Edition*, Prentice-Hall, Inc., 2002
- Eborn, J., *Model Libraries for Thermo-Hydraulic Applications : Case Study of Astrom and Bell Drum-Boiler*, Technical report, Departemen of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 2001.
- Nekoogar, F., & Moriarty, G., *Digital Control Using Digital Signal Processing*, Prentice Hall PTR, 1999
- Astrom, K.J., & Hagglund, T., *PID Controllers : Theory, Design, and Tuning*, 2nd Edition, Instrument Society of America, 1995.
- Pengenalan Metode Ziegler-Nichols pada Perancangan Kontroler pada PID.
<http://www.freewebs.com/kapeha/dsp.doc>



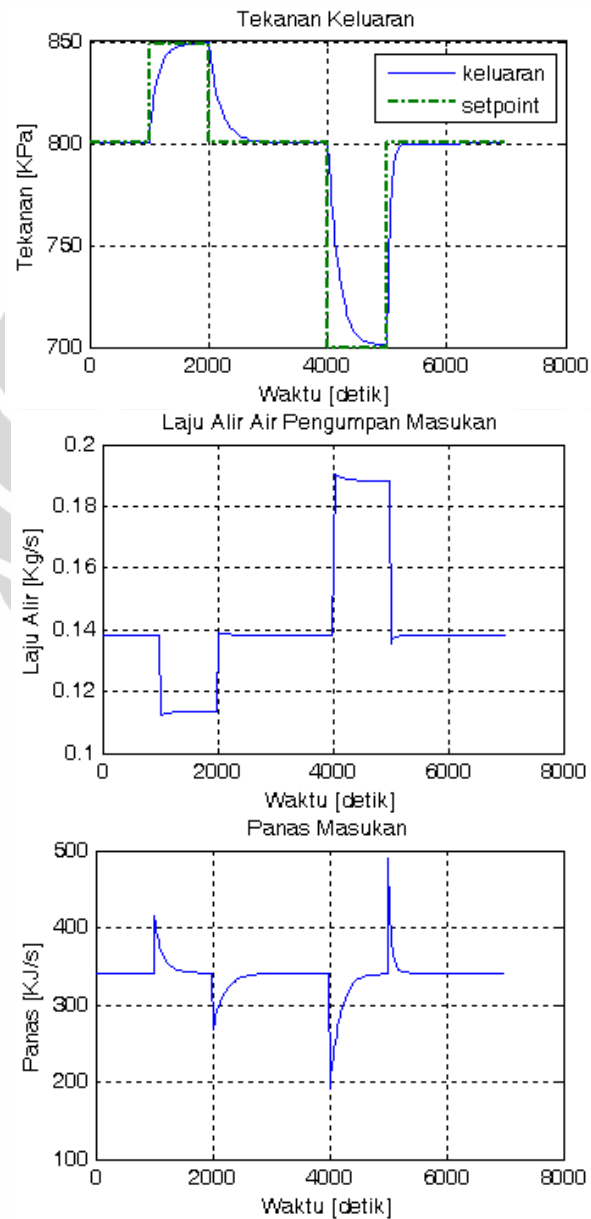
LAMPIRAN – A

Hasil Simulasi Sistem Kendali LQR Pendekatan MISO Dengan Menggunakan
Pre-Kompensator

Hasil simulasi dengan menggunakan bobot $Q = 1/100^2$ dan $R =$

$$\begin{bmatrix} 1/171^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0345^2 \end{bmatrix}$$

Didapatkan nilai penguat regulator, $K = \begin{bmatrix} 1.508200007317981 \\ -0.000025678506667 \end{bmatrix}$ dan pre-compensator, $K_c = \begin{bmatrix} 1.507698118365415 \\ -0.000527567459231 \end{bmatrix}$

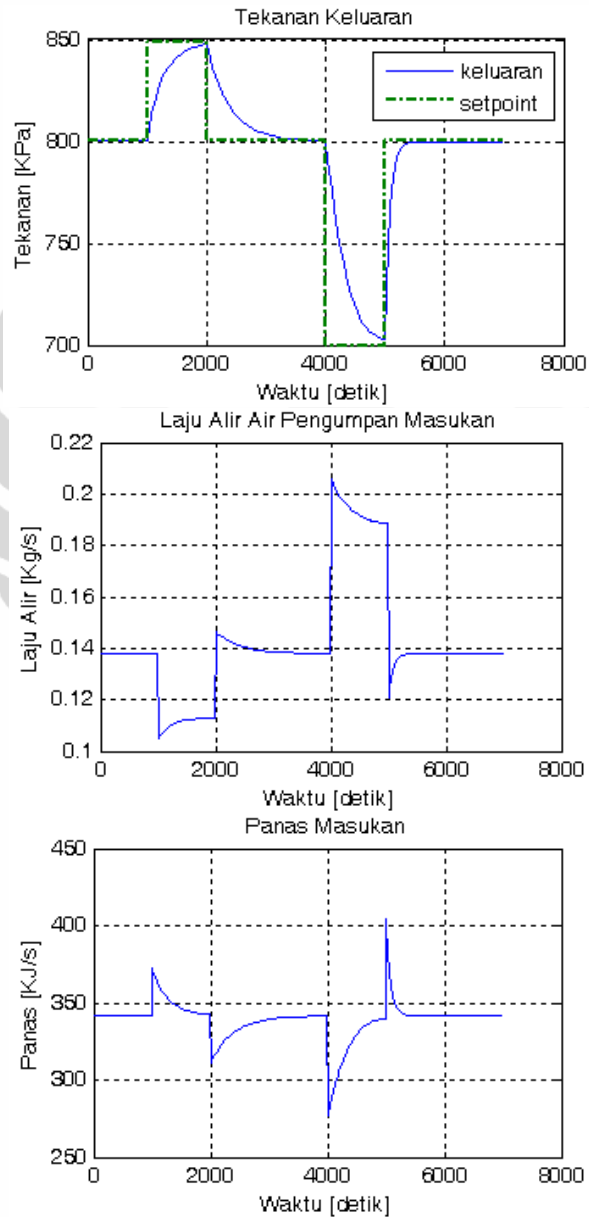


Gambar 1. Hasil keluaran dan masukan

Hasil simulasi dengan menggunakan bobot $Q = 1/100^2$ dan $R =$

$$\begin{bmatrix} 1/85.5^2 & 0 \\ 0 & 1/0.069^2 \end{bmatrix}$$

Didapatkan nilai penguat regulator, $K = \begin{bmatrix} 0.643267308391495 \\ -0.000175235579227 \end{bmatrix}$ dan pre-compensator, $K_c = \begin{bmatrix} 0.642765419438930 \\ -0.000677124531792 \end{bmatrix}$

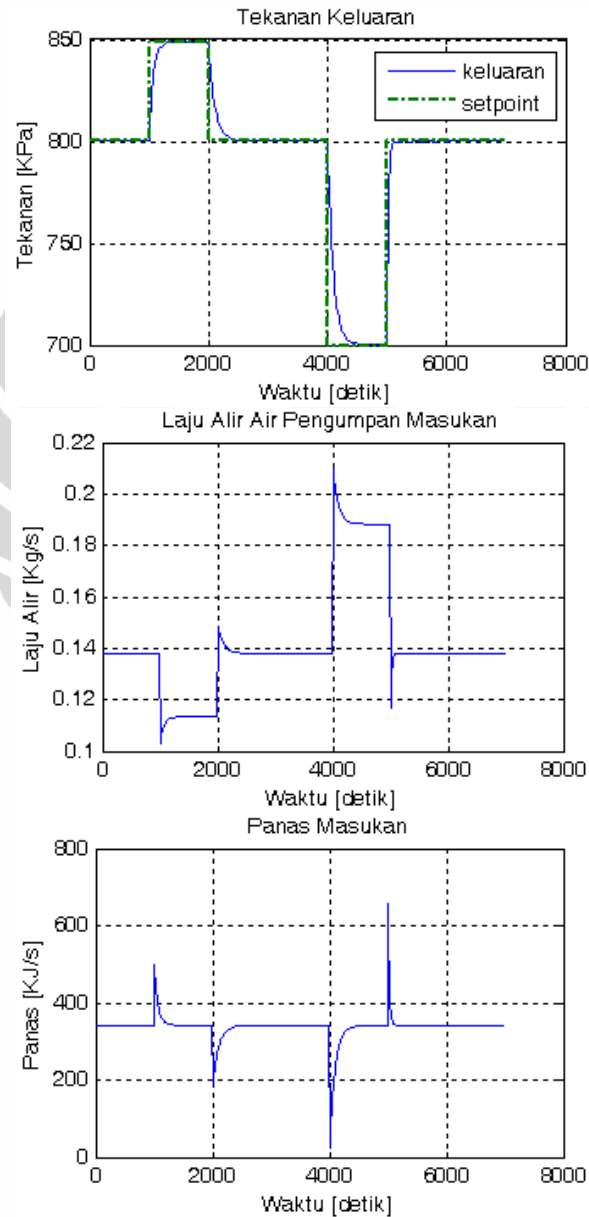


Gambar 2. Hasil keluaran dan masukan

Hasil simulasi dengan menggunakan bobot $Q = 1/10^2$ dan $R =$

$$\begin{bmatrix} 1/34.2^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0138^2 \end{bmatrix}$$

Didapatkan nilai penguat regulator, $K = \begin{bmatrix} 3.174360957922531 \\ -0.000216185780733 \end{bmatrix}$ dan pre-compensator, $K_c = \begin{bmatrix} 3.173859068969965 \\ -0.000718074733297 \end{bmatrix}$

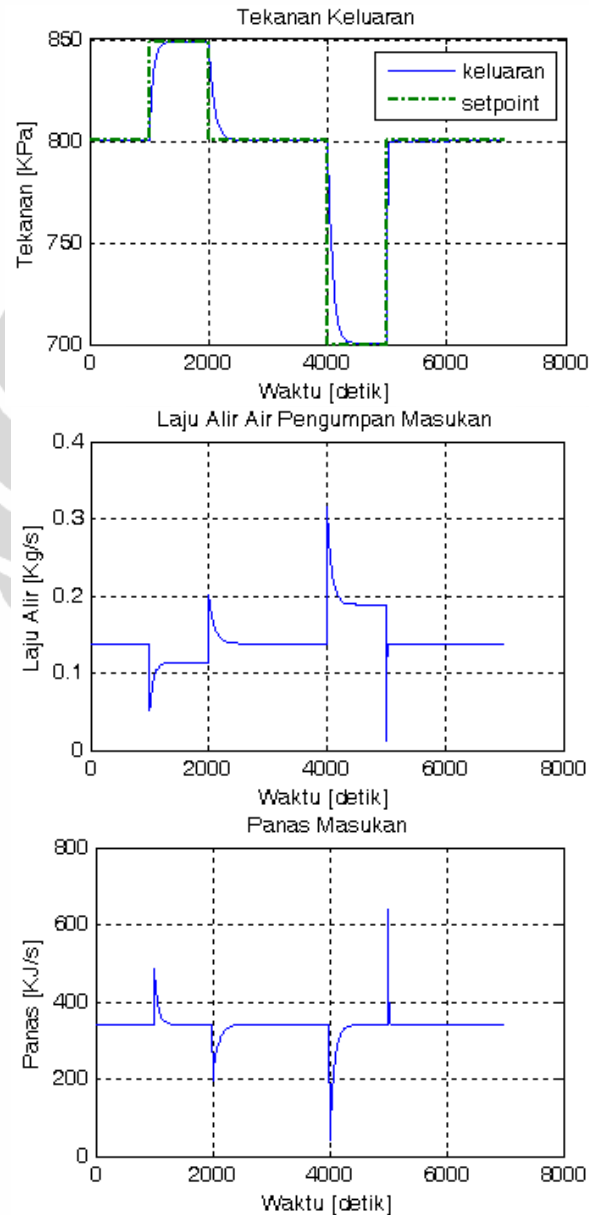


Gambar 3. Hasil keluaran dan masukan

Hasil simulasi dengan menggunakan bobot $Q = 1/10^2$ dan $R =$

$$\begin{bmatrix} 1/34.2^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0345^2 \end{bmatrix}$$

Didapatkan nilai penguat regulator, $K = \begin{bmatrix} 2.977816242734328 \\ -0.001267502219044 \end{bmatrix}$ dan pre-compensator, $K_c = \begin{bmatrix} 2.977314353781762 \\ -0.001769391171609 \end{bmatrix}$

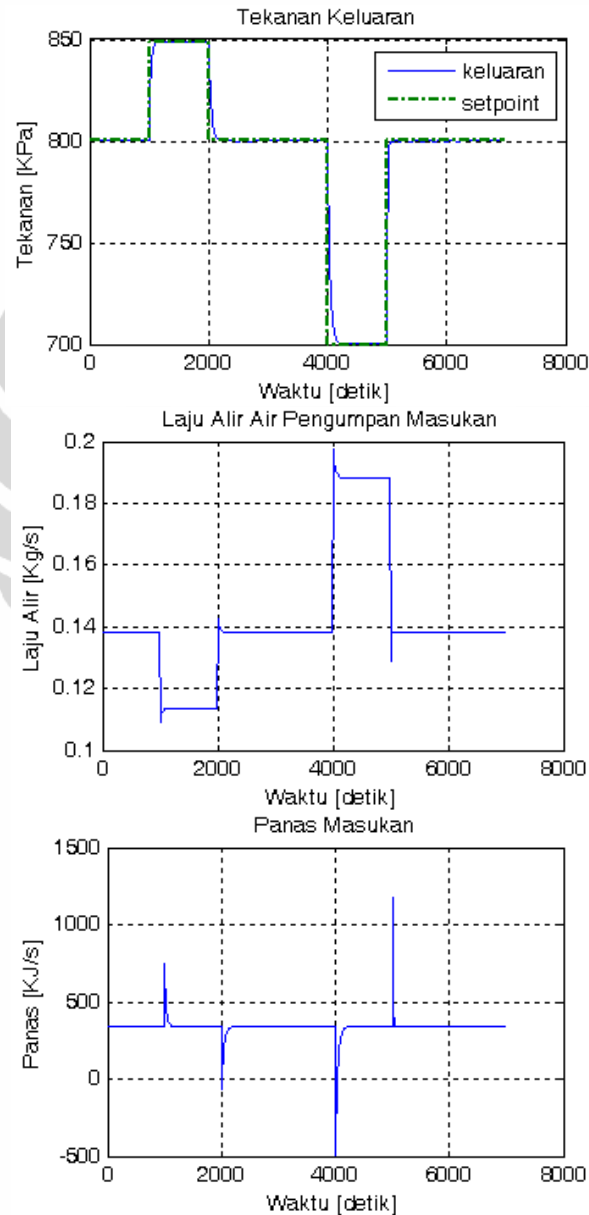


Gambar 4. Hasil keluaran dan masukan

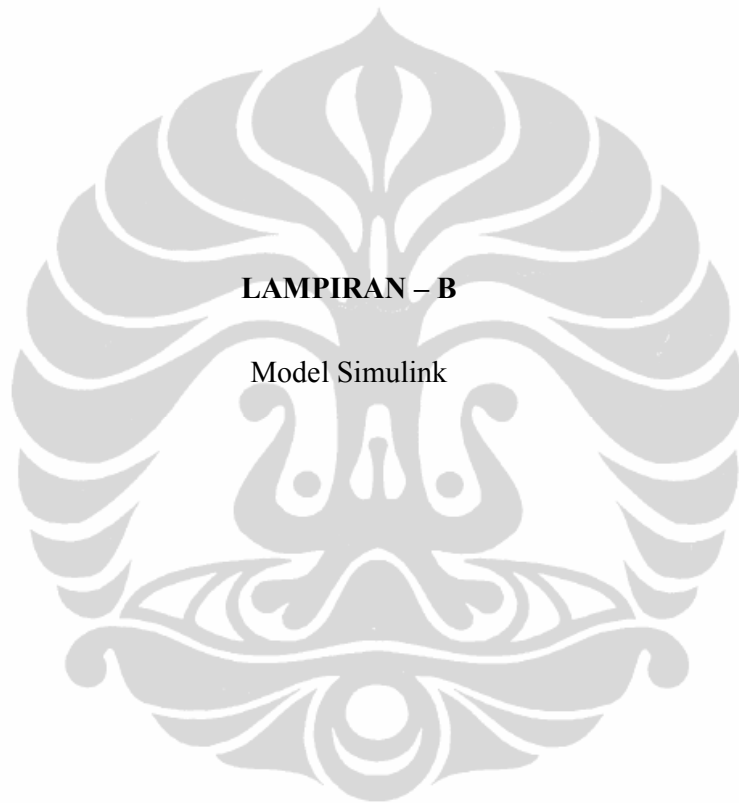
Hasil simulasi dengan menggunakan bobot $Q = 1/10^2$ dan $R =$

$$\begin{bmatrix} 1/85.5^2 & 0 \\ 0 & 1/0.0138^2 \end{bmatrix}$$

Didapatkan nilai penguat regulator, $K = \begin{bmatrix} 8.324163323967916 \\ -0.000090705034292 \end{bmatrix}$ dan pre-compensator, $K_c = \begin{bmatrix} 8.323661435015346 \\ -0.000592593986856 \end{bmatrix}$

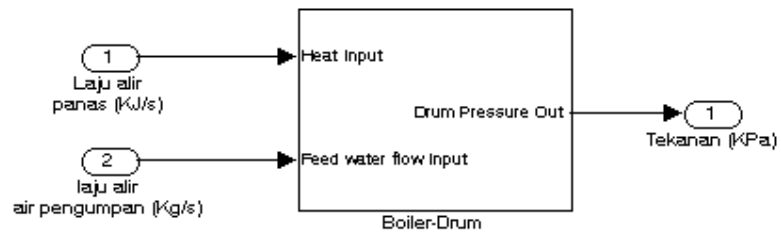


Gambar 5. Hasil keluaran dan masukan

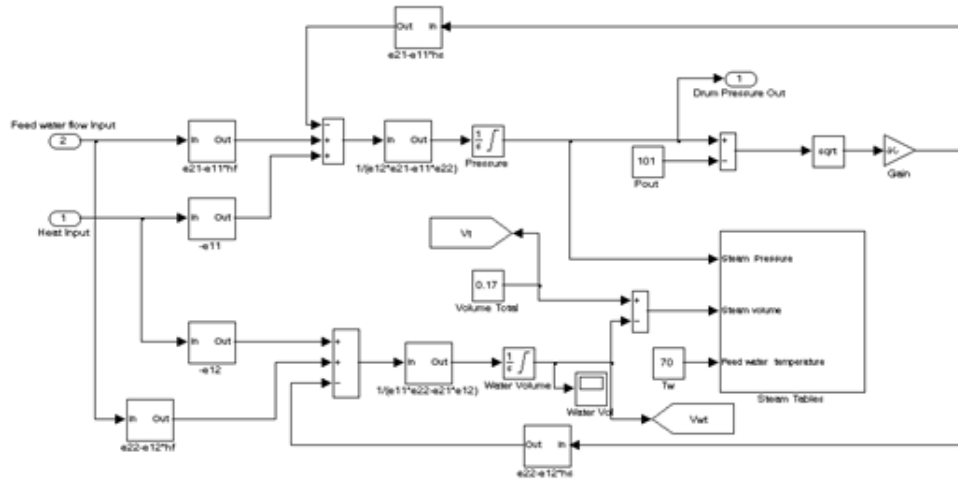


LAMPIRAN – B

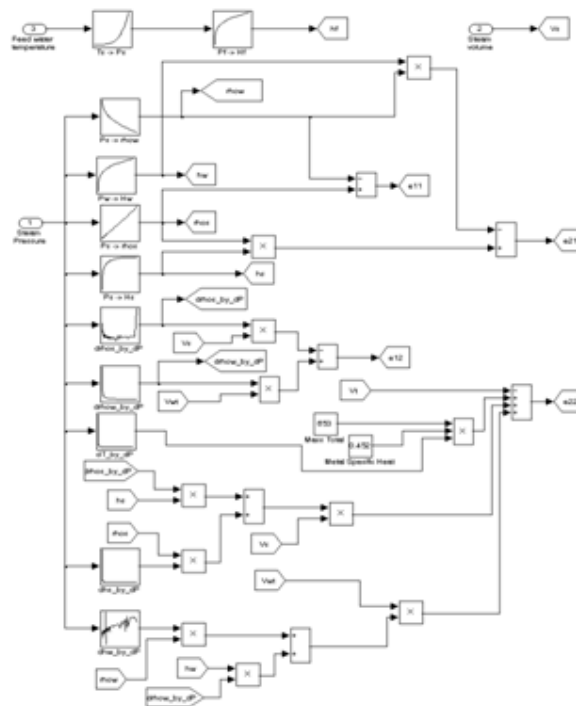
Model Simulink



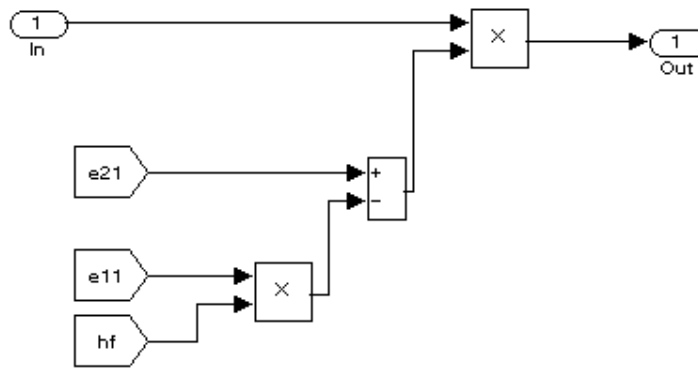
Bagian utama



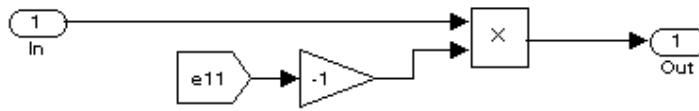
Subsistem boiler-drum



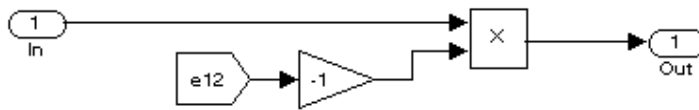
Subsistem steam table



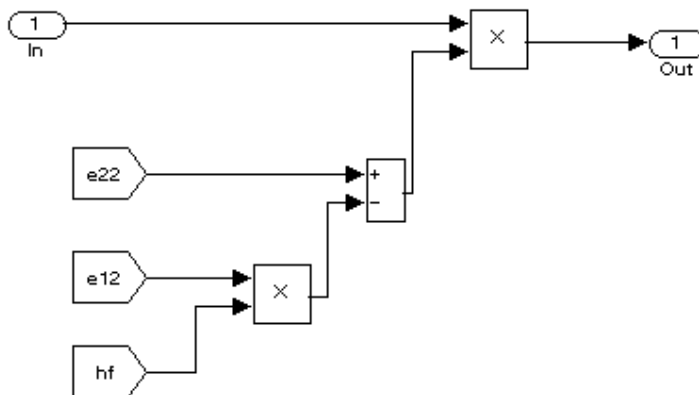
Subsistem $e_{21} - e_{11} * h_f$



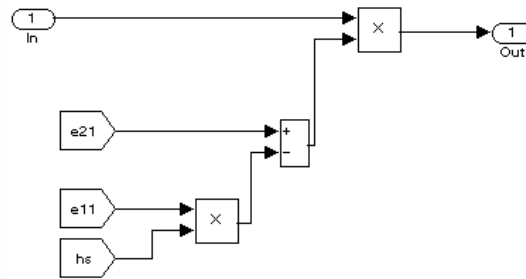
Subsistem $-e_{11}$



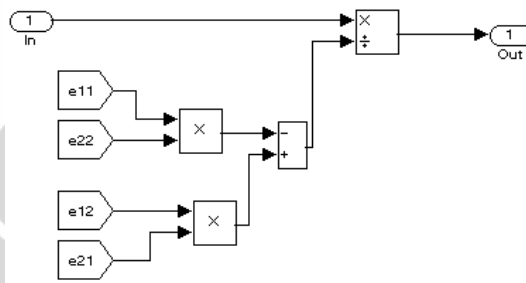
Subsistem $-e_{12}$



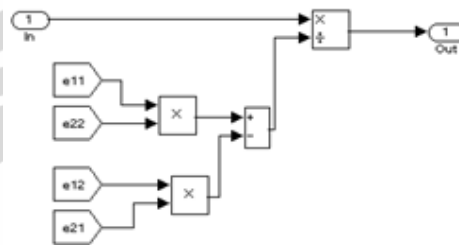
Subsistem $e_{22} - e_{12} * h_f$



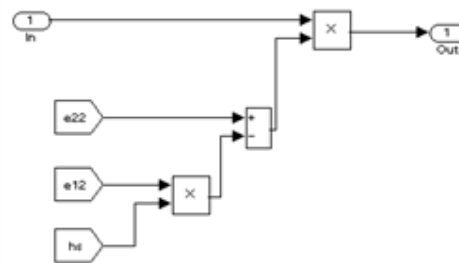
Subsistem $e_{21} - e_{11} * h_s$



Subsistem $1/(e_{12}e_{21} - e_{11}e_{22})$



Subsistem $1/(e_{11}e_{22} - e_{21}e_{12})$



Subsistem $e_{22} - e_{12} * h_s$

Listing program M-file

```
opspec = operspec('Boiler_control_pole1');
opspec.States(1).Known = 1;
opspec.States(2).Known = 1;

opspec.Inputs(1).Known = [0;0];      %Inputs unknown
opspec.Inputs(1).Min = [0;0];       %Input minimum value

opspec.Outputs(1).Known = [0;0];    %Outputs unknown
opspec.Outputs(1).Min = [0;0];     %Output minimum value

[opSS,opReport] = findop('Boiler_control_pole1',opspec);

Boiler_io(1)=linio('Boiler_control_pole1/Demux',1,'in');
Boiler_io(2)=linio('Boiler_control_pole1/Demux',2,'in');

Boiler_io(3)=linio('Boiler_control_pole1/Boiler-
Drum',1,'out','on');

Lin_Boiler = linearize('Boiler_control_pole1',opSS,Boiler_io);

u0 = opReport.Inputs.u;
y0 = opReport.Outputs.y;

[A,B,C,D] = ssdata(Lin_Boiler);
```



LAMPIRAN – C

Tabel Uap Tersaturasi

P (Kpa)	Hw (KJ/Kg)	Hs (KJ/Kg)	rhow (Kg/m ³)	rhos (Kg/m ³)	T (°C)	dHw/dP	dHs/dP	drhos/dP	drhow/dP	dT/dP
0,8	15,8	2509	999,9254	0,00626	3,8	-	-	-	-	-
2	73,5	2534	998,6424	0,0149	17,5	4,211679	20,83333	0,0072	1,0691667	11,41667
5	137,8	2562	994,699	0,0354	32,9	4,175325	9,333333	0,006833	1,3144667	5,133333
10	191,8	2585	989,8468	0,0682	45,8	4,186047	4,6	0,00656	0,97044	2,58
20	251,5	2610	983,1237	0,131	60,1	4,174825	2,5	0,00628	0,67231	1,43
28	282,7	2623	979,1577	0,179	67,5	4,216216	1,625	0,006	0,49575	0,925
35	304,3	2632	976,1883	0,221	72,7	4,153846	1,285714	0,006	0,4242	0,742857
45	329,6	2642	972,5841	0,279	78,7	4,216667	1	0,0058	0,36042	0,6
55	350,6	2650	969,4404	0,338	83,7	4,2	0,8	0,0059	0,31437	0,5
65	368,6	2657	966,6382	0,395	88	4,186047	0,7	0,0057	0,28022	0,43
75	384,5	2663	964,0878	0,45	91,8	4,184211	0,6	0,0055	0,25504	0,38
85	398,6	2668	961,7482	0,507	95,2	4,147059	0,5	0,0057	0,23396	0,34
95	411,5	2673	959,6394	0,563	98,2	4,3	0,5	0,0056	0,21088	0,3
100	417,5	2675	958,6411	0,59	99,6	4,285714	0,4	0,0054	0,19966	0,28
101,33	419,1	2676	958,3543	0,598	100	4	0,75188	0,006015	0,2156391	0,300752
110	428,8	2680	956,6908	0,646	102,3	4,217391	0,461361	0,005536	0,1918685	0,265283
130	449,2	2687	953,1428	0,755	107,1	4,25	0,35	0,00545	0,1774	0,24
150	467,1	2698	949,8777	0,863	111,4	4,162791	0,55	0,0054	0,163255	0,215
170	483,2	2699	946,9249	0,97	115,2	4,236842	0,05	0,00535	0,14764	0,19
190	497,8	2704	944,2299	1,08	118,6	4,294118	0,25	0,0055	0,13475	0,17
220	517,6	2711	940,4225	1,23	123,3	4,212766	0,233333	0,005	0,1269133	0,156667
260	540,9	2718	935,9314	1,44	128,7	4,314815	0,175	0,00525	0,1122775	0,135
280	551,4	2722	933,8101	1,55	131,2	4,2	0,2	0,0055	0,106065	0,125
320	570,9	2728	929,8376	1,75	135,8	4,23913	0,15	0,005	0,0993125	0,115
360	588,5	2733	926,2212	1,96	139,9	4,292683	0,125	0,00525	0,09041	0,1025
400	604,7	2738	923,3488	2,16	143,1	5,0625	0,125	0,005	0,07181	0,08
440	619,6	2742	919,697	2,36	147,1	3,725	0,1	0,005	0,091295	0,1
480	633,5	2746	916,7262	2,57	150,3	4,34375	0,1	0,00525	0,07427	0,08
500	640,1	2748	915,3185	2,67	151,8	4,4	0,1	0,005	0,070385	0,075
550	655,8	2752	911,8045	2,92	155,5	4,243243	0,08	0,005	0,07028	0,074
600	670,4	2756	908,6202	3,175	158,8	4,424242	0,08	0,0051	0,063686	0,066
650	684,1	2759	905,4869	3,425	162	4,28125	0,06	0,005	0,062666	0,064
700	697,1	2762	902,5083	3,66	165	4,333333	0,06	0,0047	0,059572	0,06
750	709,3	2765	899,6921	3,915	167,8	4,357143	0,06	0,0051	0,056324	0,056
800	720,9	2768	897,0445	4,16	170,4	4,461538	0,06	0,0049	0,052952	0,052
850	732	2770	894,4718	4,41	172,9	4,44	0,04	0,005	0,051454	0,05
900	742,6	2772	891,8694	4,65	175,4	4,24	0,04	0,0048	0,052048	0,05
950	752,8	2774	889,4497	4,9	177,7	4,434783	0,04	0,005	0,048394	0,046
1000	762,6	2776	887,1121	5,15	179,9	4,454545	0,04	0,005	0,046752	0,044
1050	772	2778	884,8595	5,39	182	4,47619	0,04	0,0048	0,045052	0,042
1150	790	2781	880,5106	5,89	186	4,5	0,03	0,005	0,043489	0,04
1250	807	2784	876,3073	6,38	189,8	4,473684	0,03	0,0049	0,042033	0,038
1300	815	2785	874,2914	6,62	191,6	4,444444	0,02	0,0048	0,040318	0,036
1500	845	2790	866,6445	7,59	198,3	4,477612	0,025	0,00485	0,0382345	0,0335
1600	859	2792	863,0281	8,03	201,4	4,516129	0,02	0,0044	0,036164	0,031
1800	885	2795	856,2454	9,07	207,1	4,561404	0,015	0,0052	0,0339135	0,0285
2000	909	2797	849,7789	10,01	212,4	4,528302	0,01	0,0047	0,0323325	0,0265
2100	920	2798	846,6736	10,54	214,9	4,4	0,01	0,0053	0,031053	0,025
2300	942	2800	840,7371	11,52	219,6	4,680851	0,01	0,0049	0,0296825	0,0235
2400	952	2800	837,913	12,02	221,8	4,545455	0	0,005	0,028241	0,022
2600	972	2801	832,4392	13,01	226	4,761905	0,005	0,00495	0,027369	0,021
2700	981	2802	829,6607	13,52	228,1	4,285714	0,01	0,0051	0,027785	0,021
2900	1000	2802	824,4251	14,52	232	4,871795	0	0,005	0,026178	0,0195
3000	1008	2802	821,9748	15	233,8	4,444444	0	0,0048	0,024503	0,018
3200	1025	2802	817,0081	16,02	237,4	4,722222	0	0,0051	0,0248335	0,018
3400	1042	2802	812,0925	17,04	240,9	4,857143	0	0,0051	0,024578	0,0175
3600	1058	2802	807,3769	18,06	244,2	4,848485	0	0,0051	0,023578	0,0165
3800	1073	2801	802,873	19,08	247,3	4,83871	-0,005	0,0051	0,0225195	0,0155
4000	1087	2800	798,4438	21	250,3	4,666667	-0,005	0,0096	0,022146	0,015



LAMPIRAN – D

Data Fisik Boiler

		Area (mm ²)	Length (mm)	Perimeter (mm ²)	Volume (mm ³)
Part	<i>Bottom Header</i>	997.456,7	1.250,0	50.670,75	63.338.434,89
		39.477,0			1.804.991,51
		39.477,0			1.804.991,51
Qty	2	1.076.410,7			66.948.417,91
		2.152.821,5			133.896.835,81
Part	<i>Riser</i>	42.589,0	1.067,38	506,71	540.849,93
Qty	114	4.855.141,4			61.656.891,78
Part	<i>Top Header</i>	997.456,7	1.250,0	50.670,75	63.338.434,89
		39.477,0			1.804.991,51
		39.477,0			1.804.991,51
Qty	1	1.076.410,7			66.948.417,91
Part	<i>Steam Drum</i>	1.196.946,8	1.250,0	72.965,88	91.207.346,24
		96.338,72			2.679.818,77
		96.338,72			2.679.818,77
Qty	1	1.389.624,2			96.566.983,78
Part	<i>Steam Header</i>	997.456,7	1.250,0	50.670,75	63.338.434,89
		39.477,0			1.804.991,51
		39.477,0			1.804.991,51
Qty	1	1.076.410,7			66.948.417,91
Part	<i>Downcomer</i>	118.890,7	1678,87	2.026,83	3.402.783,20
		15.444,8			
		130.628,9			
		21.098,9			
Qty	4	286.063,4			3.402.783,20
		1.144.253,6			13.611.132,79