

**PERANCANGAN DAN SIMULASI KONTROL OPTIMAL DENGAN
METODE *LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN* DALAM
PENGENDALIAN *LEVEL* DAN *FEEDWATER FLOW* PADA *STEAM
DRUM BOILER* DI PLTU PAITON UNIT 7 DAN 8**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

MOHAMMAD NOVA ARDIANSYAH

NIM. 0001060346-63

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2007

repository.ub.ac.id

**PERANCANGAN DAN SIMULASI KONTROL OPTIMAL DENGAN
METODE *LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN* DALAM
PENGENDALIAN *LEVEL* DAN *FEEDWATER FLOW* PADA *STEAM
DRUM BOILER* DI PLTU PAITON UNIT 7 DAN 8**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

MOHAMMAD NOVA ARDIANSYAH

NIM. 0001060346-63

Dosen Pembimbing,

FITRIANA SUHARTATI, ST, MT

NIP. 132 206 527

RUSMI AMBARWATI, ST, MT

NIP. 132 258 188

repository.ub.ac.id

**PERANCANGAN DAN SIMULASI KONTROL OPTIMAL DENGAN
METODE *LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN* DALAM
PENGENDALIAN *LEVEL* DAN *FEEDWATER FLOW* PADA *STEAM
DRUM BOILER* DI PLTU PAITON UNIT 7 DAN 8**

Disusun Oleh:

MOHAMMAD NOVA ARDIANSYAH

NIM. 0001060346-63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus
pada tanggal 12 Juli 2007

MAJELIS PENGUJI:

Ir. Dipl.-Ing. Moch. Rusli
NIP. 131 653 473

Ir. Purwanto, MT
NIP. 131 574 847

Ir. Erni Yudaningtyas, MT
NIP. 131 879 035

Goegoes Dwi Nusantoro, ST, MT
NIP. 132 381 316

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ir. Heru Nurwarsito, MKom.
NIP. 131 879 033

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala petunjuk dan pertolonganNya sehingga skripsi yang berjudul “Perancangan Dan Simulasi Kontrol Optimal Dengan Metode *Linear Quadratic Gaussian* Dalam Pengendalian *Level* Dan *Feedwater Flow* Pada *Steam Drum Boiler* Di PLTU Paiton Unit 7 Dan 8” ini bisa terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari dalam menyelesaikan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. Heru Nurwarsito, MKom. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro dan Bapak Rudy Yuwono, ST, MSc. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro atas semua sarana dan prasarananya.
2. Bapak Ir. Dipl.-Ing. Moch. Rusli selaku Ketua Kelompok Pengajar Keahlian Teknik Kontrol.
3. Ibu Fitriana Suhartati, ST, MT dan Ibu Rusmi Ambarwati, ST, MT selaku dosen pembimbing atas arahan, bimbingan, dan nasehat yang bermanfaat dalam penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Hariyanto, ST selaku *Control System Engineer* PT. IPMOMI – Paiton, atas segala izin dan fasilitas untuk penelitian skripsi.
5. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya serta segenap staf dan karyawan atas segala yang telah diberikan kepada penulis.
6. Ayah, Ibu, dan semua keluarga tercinta atas doa, kasih sayang dan pengorbanannya.
7. Teman-teman WEB 2000 (Nino, Wijaya, Domi, Roni, Heri, Wahidi, Anas, Lia, Umar, dan lainnya) serta semua rekan-rekan seperjuangan atas dukungan moral dan semangatnya.

Masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini, oleh karena itu penulis berbesar hati menerima kritik dan saran sehingga bisa menyempurnakan skripsi ini. Harapan penulis semoga skripsi ini bermanfaat dan bisa memberikan masukan yang berarti bagi yang membaca.

Malang, Agustus 2007

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vi
ABSTRAK	vii

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan	2
1.5. Sistematika Pembahasan	3

BAB II DASAR TEORI

2.1. Teori <i>Boiler</i>	4
2.2. Metode Pemisahan Uap pada <i>Steam Drum</i>	4
2.2.1 <i>Gravity Separation</i>	4
2.2.2 <i>Mechanical Separation</i>	5
2.2.3 <i>Centrifugal Separation</i>	5
2.3. Proses Pemisahan Uap	6
2.4. Pengendalian <i>Level Air</i> dan <i>Feed Water Flow</i> dalam <i>Steam Drum</i>	7
2.5. Sistem Kontrol	8
2.6. Kontrol Kaskade	9
2.7. Tempat Kedudukan Akar (<i>Root Locus</i>)	10
2.8. Konsep Ruang Keadaan (<i>State Space</i>)	13
2.9. Analisis Kestabilan Sistem	14
2.10. Keterkendalian dan Keteramatan	15
2.11. Konsep Sistem Kontrol Optimal.....	15
2.11.1. Indeks Performansi	16
2.11.2. Metode Matematis Untuk Memecahkan Masalah Kontrol Optimal.....	17
2.12. Optimasi Sistem	17

2.12.1. Optimasi Tanpa Kendala	17
2.12.2. Optimasi Dengan Kendala	18
2.12.2.1. Metode Lagrange	18
2.12.2.2. Metode Hamiltonian	18
2.13. <i>Controller Algebraic Riccati Equations</i> (CARE)	19
2.13.1. Persamaan Riccati Bentuk Umum	21
2.13.1.1. Bentuk Perkalian Silang (<i>Cross Product</i>)	21
2.13.1.2. Regulator Dengan Penetapan Derajat Kebebasan	21
2.13.2. Filter Kalman	22
2.13.3. Perancangan <i>Linear Quadratic Gaussian</i> (LQG).....	22
2.14. Penentuan Filter	24

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Pengumpulan Data	26
3.2. Pemodelan Matematis Sistem	26
3.3. Analisis Optimal Sistem	26
3.4. Simulasi Sistem	27
3.5. Kesimpulan dan Saran	27

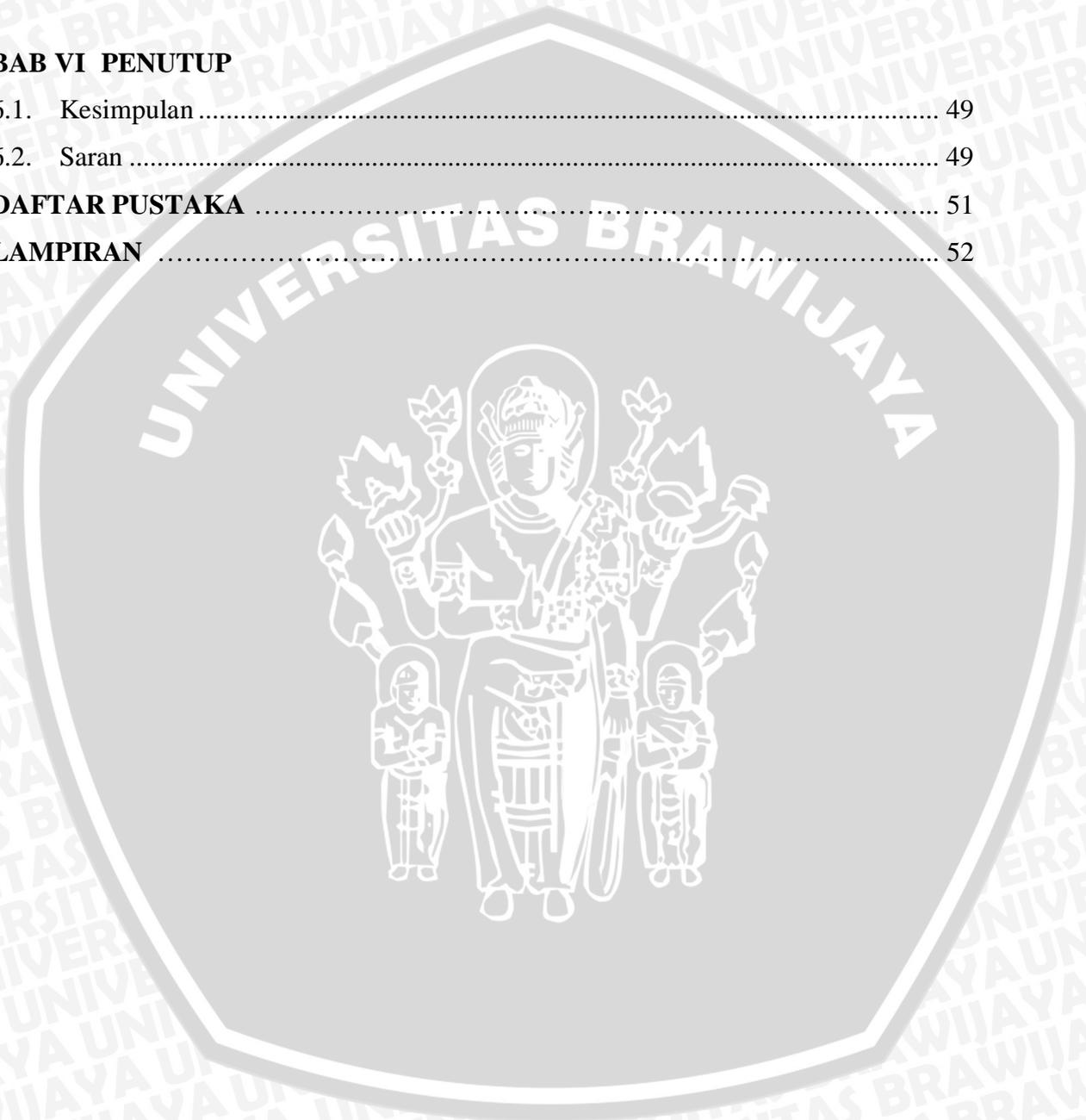
BAB IV PEMODELAN SISTEM

4.1. Definisi Pemodelan Sistem	28
4.2. Pemodelan Sistem.....	28
4.2.1. Fungsi Alih <i>Steam Drum</i>	29
4.2.2. Fungsi Alih Katup Pengendali (<i>Control Valve</i>)	31
4.2.3. Fungsi Alih <i>Level Transmitter</i>	32
4.2.4. Fungsi Alih <i>Flow Transmitter</i>	33
4.3. Perancangan Kontrol <i>Flow</i>	34
4.4. Penyusunan Model <i>State Space</i> (Ruang Keadaan)	36
4.5. Kerterkendalian dan Keteramatan	37

BAB V PENGENDALIAN OPTIMAL DAN SIMULASI SISTEM

5.1. Formulasi permasalahan Optimal	39
5.2. Perancangan Kontroler	39
5.1.1. Perancangan Kontroler Optimal	39

5.1.2. Penentuan Matriks Bobot Q dan R	40
5.3 Simulasi Sistem	42
5.3.1. Respon Sistem Dengan Umpan Balik LQR	42
5.3.2. Respon Sistem Terhadap Gangguan	44
5.2.3. Respon Sistem Dengan Umpan Balik LQG	46
BAB VI PENUTUP	
6.1. Kesimpulan	49
6.2. Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN	52



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Tipe <i>steam drum</i>	6
Gambar 2.2.	Konstruksi <i>steam drum boiler</i>	7
Gambar 2.3.	Pengendalian <i>level</i> dan <i>flow</i> pada <i>steam drum</i>	8
Gambar 2.4.	Gangguan pada sistem kontrol loop tertutup	9
Gambar 2.5.	Diagram Blok Kontrol Kaskade	10
Gambar 2.6.	Sistem loop tertutup	10
Gambar 2.7.	Kurva Respon Eksponensial	12
Gambar 2.8.	Representasi sistem dalam bentuk persamaan <i>state</i>	14
Gambar 2.9.	Indeks performansi terhadap waktu	16
Gambar 2.10.	Sistem kontrol optimal dengan umpan balik keadaan (<i>state feedback</i>).	20
Gambar 2.11.	Regulator dengan <i>observer</i> dan <i>state feedback</i>	23
Gambar 2.12.	Blok diagram regulator optimal dengan umpan balik K dan filter M	24
Gambar 4.1.	Skema loop tertutup pengendalian <i>level</i> pada <i>steam drum</i> dan <i>feedwater flow</i>	29
Gambar 4.2.	Model <i>steam drum</i>	30
Gambar 4.3.	Diagram blok <i>control valve</i>	32
Gambar 4.4.	Diagram blok <i>level transmitter</i>	33
Gambar 4.5.	Diagram blok <i>flow transmitter</i>	33
Gambar 4.6.	Diagram blok loop terbuka kontrol <i>level</i> dan <i>flow</i>	33
Gambar 4.7.	Diagram blok loop terbuka kontrol <i>level</i> dan <i>flow</i>	34
Gambar 4.8.	Diagram blok loop tertutup kaskade <i>level</i> dan <i>flow</i>	34
Gambar 4.9.	Diagram blok loop tertutup kontrol <i>flow</i>	35
Gambar 4.10.	Diagram <i>root locus</i> kontrol <i>flow</i>	35
Gambar 4.11.	Respon loop tertutup kontrol <i>flow</i> dengan nilai $K_p=10,2$ dan <i>setpoint</i> 578kg/s	36
Gambar 4.12.	Diagram blok keseluruhan sistem	36
Gambar 4.13.	Diagram blok <i>state space</i> Sistem	37
Gambar 5.1.	Sinyal Kontrol Optimal dengan <i>set point</i> 0,66m dan umpan balik LQR.	43
Gambar 5.2.	Respon sistem dengan umpan balik LQR pada <i>set point</i> 0,66m	44
Gambar 5.3.	Simulasi gangguan perubahan <i>level steam drum</i>	45
Gambar 5.4.	Respon sistem dengan umpan balik LQR pada <i>set point</i> 0,66m terhadap gangguan	45
Gambar 5.5.	Sinyal pengendali optimal dengan kontroler LQG pada <i>set point</i> 0,66m	47
Gambar 5.6.	Respon sistem dengan kontroler LQG pada <i>set point</i> 0,66m terhadap gangguan	47

DAFTAR TABEL

Tabel 5.1. Nilai Sisa Relatif untuk Berbagai Matriks Bobot Q dan R	41
Tabel 5.2. Respon sistem dengan umpan balik LQR pada <i>set point</i> 0,66m	44
Tabel 5.3. Respon sistem dengan kontroler LQG pada <i>set point</i> 0,66m	48



ABSTRAK

Mohammad Nova Ardiansyah, Jurusan Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, 2007, Perancangan Dan Simulasi Kontrol Optimal dengan Metode *Linear Quadratic Gaussian* dalam Pengendalian *Level* dan *Feedwater Flow* pada *Steam Drum Boiler* di PLTU Paiton Unit 7 dan 8, Dosen Pembimbing : Fitriana Suhartati, ST. MT dan Rusmi Ambarwati, ST. MT.

Steam drum adalah sebuah alat yang merupakan kelanjutan dari proses aliran air (*feedwater flow*) setelah melalui *economizer* pada *boiler* di sebuah instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Fungsi *steam drum* adalah memisahkan uap air dan air pada uap basah sehingga keluaran *steam drum* menjadi uap kering serta mencegah terbawanya mineral-mineral ke *superheater* yang dapat menyebabkan timbulnya korosi pada pipa *superheater* yang berakibat pada kebuntuan. Peran *steam drum* cukup penting karena apabila *level* uap basah dalam *steam drum* kurang maka akan terjadi kegagalan sirkulasi air, dan apabila *level steam drum* melebihi *range* tertentu akan terjadi pemisahan uap air dan air.

Pengendalian *level* pada *steam drum* dirancang menggunakan konfigurasi kaskade dengan dua *loop*. *Loop slave* adalah pengendalian *feedwater flow* menggunakan kontrol proporsional dan pengendalian *level* sebagai *loop master* adalah kontrol optimal dengan metode *Linear Quadratic Gaussian (LQG)*. Metode ini dapat mempertahankan keluaran pada kondisi setimbang yaitu pada *level* operasinya yaitu 0,66 m serta mengatasi perubahan beban acak berupa perubahan *level steam drum* akibat perubahan penggunaan uap kering yang dihasilkan *steam drum*. Diperoleh *settling time* sebesar 25,5 detik, *rise time* sebesar 7,75 detik, dan *level* dari *steam drum* tetap berada dalam *range* operasinya yaitu 0,61- 0,71 m.

Kata kunci : Konfigurasi Kaskade, Kontrol Proporsional, Kontrol Optimal dengan Metode *LQG*



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Steam drum adalah sebuah alat yang merupakan kelanjutan dari proses aliran air (*feedwater flow*) setelah melalui *economizer* pada *boiler* di sebuah instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Fungsi *steam drum* adalah memisahkan uap air dan air pada uap basah sehingga keluaran *steam drum* menjadi uap kering serta mencegah terbawanya mineral-mineral ke *superheater* yang dapat menyebabkan timbulnya korosi pada pipa *superheater* yang berakibat pada kebuntuan. Uap kering yang dihasilkan oleh *steam drum* kemudian mengalir menuju *superheater* dan *reheater* pada *boiler* sebelum uap tersebut digunakan untuk menggerakkan beban mekanik yaitu turbin uap, *boiler feedwater pump*, dan *soot blower*. Air di dalam *steam drum* harus berada pada kisaran *level* yang diizinkan untuk mengatasi perubahan beban dalam hal ini adalah daya keluaran dari pembangkit. Kenyataan inilah yang menyebabkan perlunya suatu sistem kontrol modern yang dapat mengoptimalkan pengendalian *level* dan *feedwater flow* pada *steam drum boiler*.

Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik, seringkali terjadi perubahan beban dari suatu pembangkit sehingga suatu pembangkit dituntut untuk dapat memenuhi daya yang dibutuhkan. Oleh karena itu, diperlukan pengendali yang dapat memberikan respon dengan performansi optimal. Di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton Unit 7 dan 8 yang dioperasikan oleh PT. International Power Mitsui *Operations and Maintenance* Indonesia (IPMOMI), salah satu bagian yang perlu dioptimalkan kinerjanya adalah pengendalian *level* dan *feedwater flow* pada *steam drum boiler*.

Teori kontrol modern dapat diterapkan untuk sistem dengan dengan banyak masukan dan banyak keluaran, linier dan tak linier serta parameter konstan ataupun berubah. Desain kontrol optimal merupakan desain kontrol modern yang meminimumkan suatu kriteria desain tertentu yang dinamakan indeks performansi. Salah satu metode kontrol optimal yaitu *Linear Quadratic Regulator* (LQR) mempunyai keunggulan dalam hal terjaminnya kestabilan sistem yang dirancang, namun kurang realistis untuk diterapkan karena mengabaikan adanya pengaruh gangguan. Metode *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) adalah suatu metode yang lebih realistis karena memperhitungkan adanya gangguan dan *noise*. Dalam metode LQG struktur kontroler dibentuk oleh *state feedback regulator*

(LQR) dan *filter* Kalman sehingga metode ini memiliki performansi dan stabilitas yang baik (Yamin, 2004:1).

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah ditekankan pada :

1. Bagaimana menentukan *gain* umpan balik yang memenuhi syarat pengontrolan optimal.
2. Bagaimana menentukan *gain* estimator optimal menggunakan perancangan *filter* Kalman.
3. Bagaimana performansi sistem dengan diterapkannya pengendalian optimal dengan metode LQG dan pengaruh gangguan pada sistem.

1.3. Batasan Masalah

Pada penyusunan skripsi ini, dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut :

- a. Dititikberatkan pada penerapan sistem kontrol optimal dalam pengendalian *level* dan *feedwater flow* pada *steam drum boiler* di PLTU Paiton Unit 7 dan 8.
- b. Model matematis *plant* bersifat linier dan *time invariant* serta mengacu pada literatur yang membahas obyek dalam penulisan tugas akhir ini.
- c. Gangguan pada sistem adalah perubahan *level* air pada *steam drum* akibat perubahan beban.
- d. Dalam penyusunan skripsi ini dilakukan simulasi dimana semua proses algoritma dan perhitungan dilakukan dengan paket program Matlab 6.5.

1.4. Tujuan

Tujuan penulisan tugas akhir ini adalah untuk menerapkan sistem kontrol optimal dengan metode LQG, agar diperoleh respon sinyal pengendali yang optimal. Dengan sinyal pengendali yang optimal dapat meminimumkan perubahan *level* yang terjadi sehingga *level* air di dalam *steam drum* menjadi stabil.

1.5. Sistematika Pembahasan

Adapun sistematika pembahasan yang dipakai dalam penyusunan tugas akhir ini adalah :

Bab I PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika pembahasan.

Bab II DASAR TEORI

Pada bab ini membahas *detail* dari *steam drum* serta dasar-dasar teori sistem kontrol optimal, penyajian ruang-keadaan sistem, keterkendalian dan keteramatan, dan penentuan filter.

Bab III METODOLOGI

Pada bab ini dijelaskan mengenai metode yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini.

Bab IV PEMODELAN SISTEM

Bab ini berisi pembahasan mengenai pembentukan model matematis *steam drum boiler* berikut bentuk persamaan ruang-keadaan, serta analisis optimalnya.

Bab V PENGENDALIAN OPTIMAL DAN SIMULASI SISTEM

Berisi tentang perancangan kontrol optimal pada *plant*, simulasi dan analisis respon sistem terhadap adanya gangguan.

Bab VI KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi kesimpulan dan saran dari keseluruhan penyusunan tugas akhir ini.

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Teori Boiler

Boiler (steam generator) adalah sebuah tungku tertutup dimana air, dalam keadaan bertekanan, ditransformasikan menjadi uap (*steam*) melalui pemberian energi panas. Di dalam tungku tersebut, energi kimia dari bahan bakar dikonversikan menjadi energi panas, dan fungsi dari *boiler* adalah untuk menghantarkan energi panas tersebut pada air dengan seefisien mungkin. Kegunaan dari *boiler* beraneka ragam. *Boiler* digunakan untuk memproduksi uap untuk pemanas, proses produksi, pembangkit daya, dan penggerak turbin, pompa, dan sebagainya (Lammers, 1998:27-29).

Steam Drum merupakan sebuah piranti dari *boiler* yang merupakan tempat kelanjutan proses aliran air (*feedwater flow*) setelah *economizer*. Fungsi utamanya adalah memisahkan uap dari campuran air dan uap. Air di dalam *steam drum* harus dalam *level* yang cukup untuk mengatasi perubahan *level* air yang disebabkan oleh perubahan beban dan mencegah terjadinya *low level* yang berbahaya serta mencegah terbawanya air ke *superheater*. Fungsi kedua adalah memisahkan kotoran dari air dan mengeringkan uap setelah dipisahkan dari air (El-Wakil, 2003:94).

2.2. Metode Pemisahan Uap pada *Steam Drum*

Dalam proses pemisahan uap pada *steam drum* terdapat tiga macam metode untuk menghasilkan uap kering (*saturated steam*) sebagai masukan dari *boiler*.

2.2.1. *Gravity Separation*

Metode paling sederhana dalam proses pemisahan uap air dari air adalah *gravity separation*. Apabila kecepatan aliran uap yang meninggalkan permukaan air cukup rendah (dibawah 3 ft/s) maka gelembung-gelembung uap akan terpisah secara alami tanpa menyertakan tetesan air. Faktor-faktor lain selain kecepatan yang dapat mempengaruhi proses adalah posisi dari *nozzle downcomer* dan *riser* yang dipengaruhi oleh keluaran uap, biasanya di puncak drum dan berfungsi untuk mengatur tekanan uap. Dalam *gravity separation* pemisahan uap air dari air diakibatkan oleh perbedaan berat jenis uap dan air (El-Wakil, 1985:94).

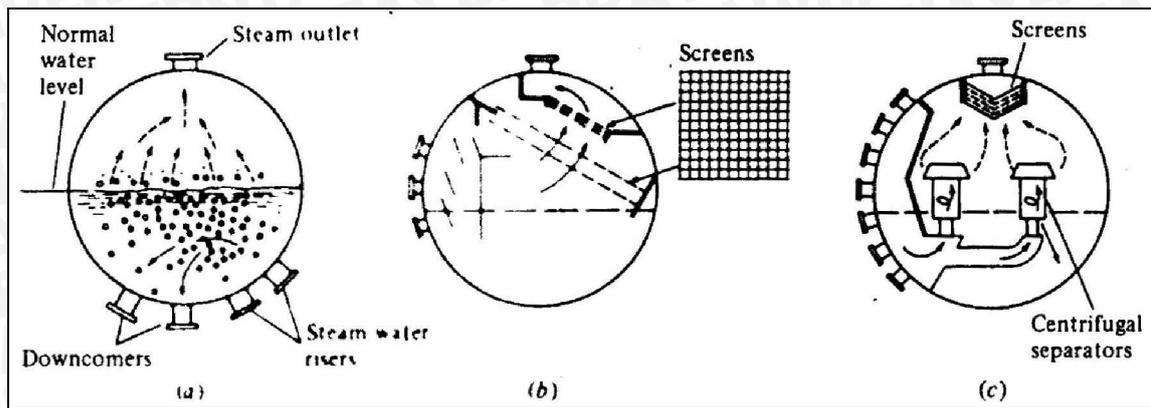
2.2.2. *Mechanical Separation*

Pada *boiler-boiler* modern yang berkapasitas dan bertekanan tinggi, tipe *mechanical separation* membagi *gravity separation* dalam dua tahap yaitu primer dan sekunder. Pemisahan primer (*primary separation*) memisahkan sebagian besar air dari uap dan mencegah uap ikut bersama air ke *downcomers*. Pemisahan sekunder (*secondary separation*), yang juga disebut pengeringan uap (*steam drying*) berfungsi memisahkan titik-titik air sisa dan bahan padat dari uap, hasilnya adalah uap murni atau uap kering yang kemudian mengalir ke *superheater*. *Mechanical separation* dilengkapi dengan lapisan tirai (*baffles*), lapisan penyaring (*screen*), dan lapisan berombak (*waving*).

Lapisan *baffle* berfungsi sebagai pemisah primer. Piranti ini merubah arah aliran uap, yang memberikan pemisahan berdasar gaya berat (*gravity separation*), dan beraksi dengan menepukkan lempeng-lempeng yang menyebabkan air turun. Lapisan penyaring (*screen*) terbuat dari jala-jala kawat yang berfungsi sebagai pemisah sekunder. Masing-masing kawatnya berfungsi untuk menangkap titik-titik air yang masih terbawa oleh uap, seperti *filter* yang menangkap debu dari gas. Semua air yang jatuh kembali ke penampung air utama (*primary reservoir*) terjadi karena adanya gravitasi. Lapisan berombak berguna untuk pemisahan primer maupun sekunder. Efektivitasnya diperoleh dari permukaannya yang lebih luas dari area pemisahan. Sedangkan tipe yang dipakai di PLTU Paiton 7 & 8 adalah tipe yang ketiga yaitu *Centrifugal Separation* (El-Wakil, 1985:95).

2.2.3. *Centrifugal Separation*

Pada tekanan tinggi, dimana perbedaan tekanan antara air dan uap air sangat kecil, gaya sentrifugal yang lebih besar dari gaya gravitasi dapat digunakan untuk memisahkan uap air dan air. Piranti pemisahan secara sentrifugal disebut juga *cyclone* atau *turbo separator*. Proses pemisahan ini terjadi pada tekanan di dekat tekanan kritis. Pada sebuah *centrifugal separator*, uap basah yang diperoleh dari *riser-riser* dibelokkan ke bawah menuju bagian pemisah. Kemudian uap basah masuk menuju *separator-separator*, yang berjajar di sepanjang *steam drum*. Baling-baling pemandu di dalam *steam drum* memberikan gerakan berputar pada uap basah dapat menyebabkan tetesan air yang lebih berat bergerak secara radial melalui uap air yang lebih ringan, mengenai permukaan dinding *separator*, dan dilepaskan ke permukaan air melalui bagian luar silinder. *Separator* dilengkapi dengan sebuah lempengan berkelok-kelok pada jalan keluar uap air untuk melakukan proses pemisahan lebih lanjut (El-Wakil, 1985:95).



Gambar 2.1. Tipe steam drum (a) Gravity separation (b) Mechanical separation (c) Centrifugal separation

Sumber : El-Wakil, 1985:94

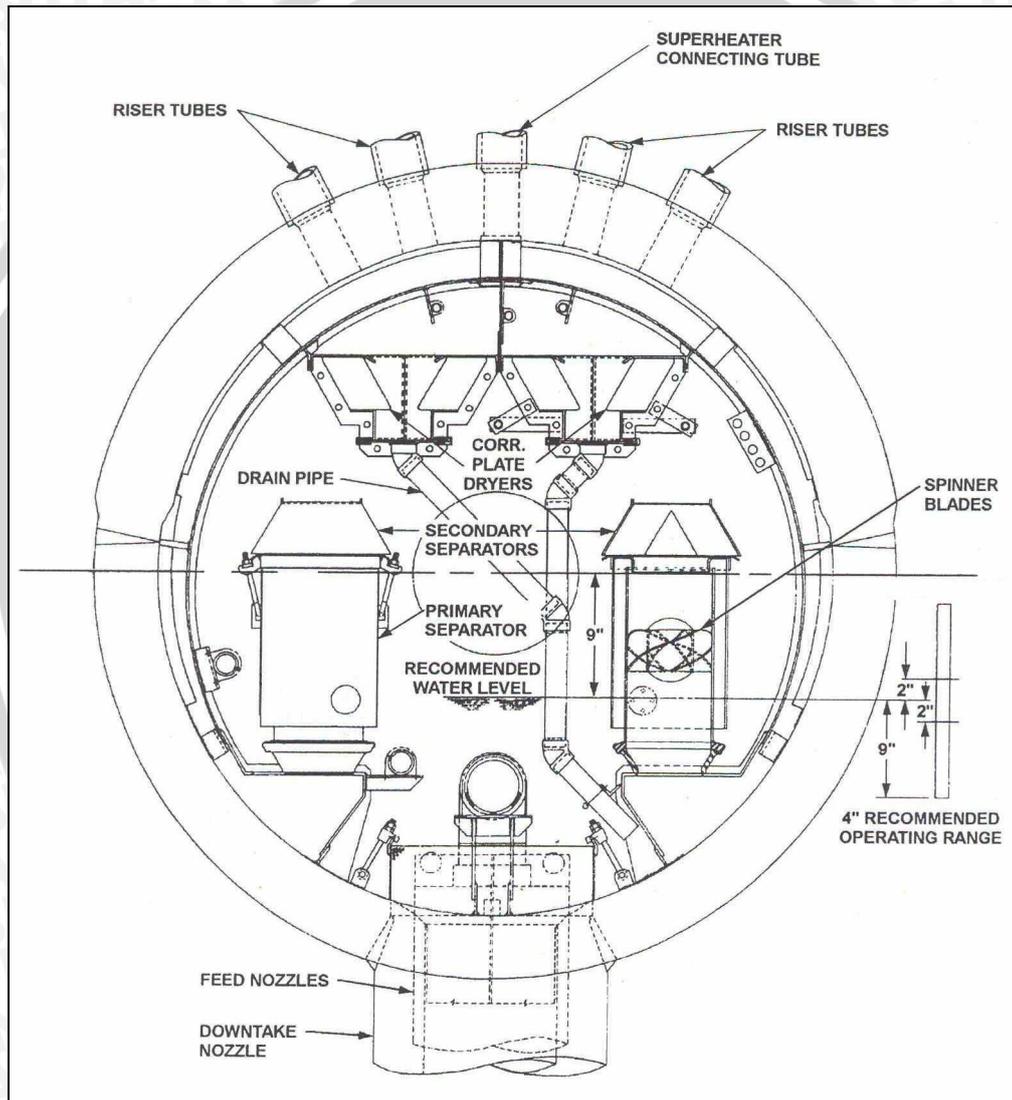
2.3. Proses Pemisahan Uap

Feedwater masuk ke *steam drum* melalui tiga saluran keluaran dari *economizer*. Uap bercampur air masuk ke dalam *steam drum* melalui riser yang terletak di bagian atas *steam drum*, dan turun melalui dua sisi *steam drum*. Pada dasar drum, uap dan air dialirkan ke atas masuk ke dalam dua baris *turbo separator* (pemisah), yaitu tempat dimulainya proses pemisahan uap dan air. Pemisahan uap dan air dalam *steam drum* terjadi dalam tiga tahap yaitu primer, sekunder, dan pengeringan. Tahap primer dan sekunder terjadi dalam *turbo separators*, sedangkan tahap ketiga terjadi pada lapisan metal yang berlipat (*corrugated metal plates*). Sasaran utama dari piranti pemisahan ini adalah untuk mengurangi kelembaban dalam uap sebelum meninggalkan drum. Uap yang keluar dari drum seharusnya 99,9 % bebas kelembaban.

Uap yang bercampur dengan air memasuki tahap pertama (primer) dari *turbo separators* yang mempunyai silinder masukan dan keluaran dengan *blade* pemutar yang terletak di bagian bawah *separator*. Uap dan air memasuki silinder, melewati *blade* pemutar yang menyebabkan terjadinya gerakan memutar sentrifugal yang membuat air terpercik keluar ke penampungan air utama. Uap dan air yang masih tersisa naik ke tahap pemisahan kedua (sekunder) (ABB Manual Book).

Pada tahap pemisahan sekunder terdapat lapisan-lapisan logam berlipat (*corrugated metal plates*), yang terletak pada bagian atas *turbo separators*. Bintik-bintik air dipisahkan dari uap, dengan mengubah arah aliran uap dengan cepat di antara lapisan-lapisan yang berlipat. Tahap akhir dari pemisahan uap dan pengeringan terjadi pada satu set lapisan logam belipat yang terletak pada bagian atas *steam drum*. Uap yang meninggalkan *turbo*

separator mengalir naik ke bagian akhir dari pengering yang berbentuk lapisan berlipat yang juga merubah arah aliran uap. Bintik-bintik air yang dipisahkan pada tahap pengeringan kemudian dikembalikan ke penampungan air yang berada pada dasar drum melalui pipa saluran air (*drain pipe*). Air yang telah berada di penampung air dikeluarkan melalui *downcomer* dengan debit yang tetap untuk dipanaskan lagi melalui *water wall* dan kemudian dialirkan kembali ke dalam steam drum melalui *riser* (ABB Manual Book).

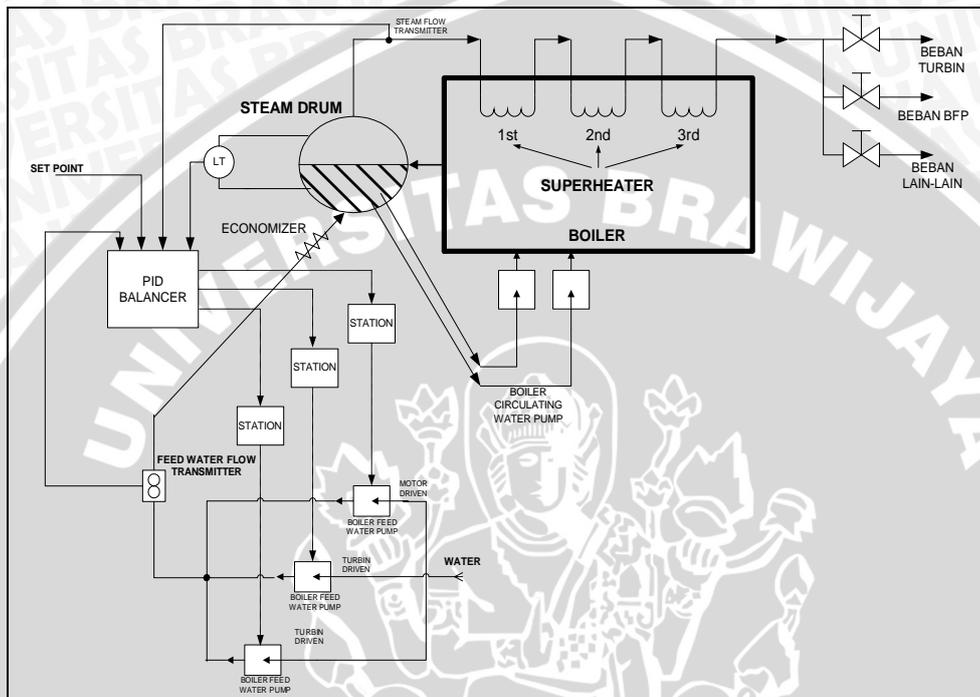


Gambar 2.2. Konstruksi *Steam Drum Boiler*
 Sumber : ABB Manual Book

2.4 Pengendalian *Level* dan *Feedwater Flow* pada *Steam Drum Boiler*

Suatu *boiler feedwater regulator* secara otomatis mengatur suplai air sehingga *level* air pada *steam drum boiler* dijaga dalam batas yang diinginkan. *Regulator* otomatis

ini menambah keselamatan dan keekonomisan serta meminumkan akibat dari *low level* dan *high level*. *Feedwater* sebagai masukan *boiler* dan bahan baku uap air diambil dari *reservoir* dipompakan oleh *boiler feedwater pump (BFWP)* menuju *economizer* dan berakhir di *steam drum*. *Boiler feedwater pump* digerakkan oleh turbin uap yang menggunakan uap keluaran *boiler* sebagai sumber tenaga penggerakannya (Lammers, 1998:343).



Gambar 2.3. Pengendalian *Level* dan *Flow* pada *Steam Drum*

Sumber : Pengamatan

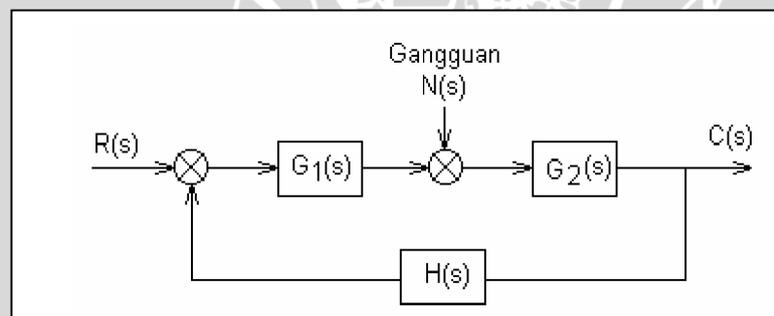
2.5. Sistem Kontrol

Sistem merupakan kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama untuk mencapai suatu tujuan tertentu. Sistem kontrol merupakan suatu sistem yang terdiri dari beberapa sub sistem yang berfungsi mengendalikan *plant* atau proses. Sistem kontrol sudah berkembang sejak awal abad ke-20, yaitu dengan ditemukannya kontroler proporsional, integral, dan diferensial atau dikenal dengan kontroler PID. Dalam aplikasinya, sistem memiliki banyak sekali gangguan. Gangguan (*disturbance*) adalah sinyal yang tidak diinginkan, tetapi memberikan pengaruh yang merugikan pada keluaran sistem secara keseluruhan (Ogata, 1996).

Sistem kontrol loop tertutup merupakan sistem kontrol berumpan balik, menggunakan prinsip sinyal kesalahan (*error*), yaitu perbedaan antara sinyal masukan

dengan sinyal umpan balik. Sedangkan sistem kontrol loop terbuka keluarannya tidak mempunyai pengaruh terhadap aksi kontrol atau dengan kata lain keluarannya tidak digunakan sebagai perbandingan umpan balik dengan masukannya. Sistem kontrol umpan balik mempertahankan hubungan dengan acuan (referensi) masukan, misal pada pengaturan suhu ruang. Sistem bekerja dengan prinsip mengukur suhu ruang sebenarnya dan membandingkan dengan suhu acuan kemudian diperoleh keluaran sesuai dengan yang diinginkan (sesuai *set point*) (Ogata.1996).

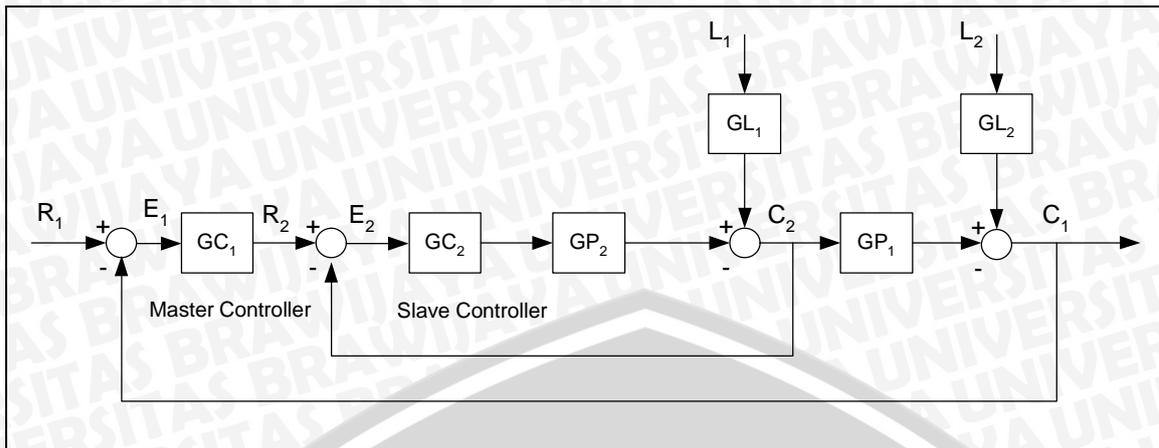
Kelebihan sistem kontrol loop tertutup adalah penggunaan umpan balik yang membuat respon sistem relatif kurang peka terhadap gangguan *eksternal* dan perubahan *internal* pada parameter sistem. Dari segi kestabilan, sistem kontrol dengan loop terbuka lebih mudah dibuat karena kestabilan bukan persoalan utama. Sebaliknya, kestabilan selalu menjadi persoalan utama pada sistem kontrol loop tertutup karena cenderung terjadi kesalahan akibat koreksi berlebih yang dapat menimbulkan osilasi dengan amplitudo konstan atau berubah. Jika masukan sistem telah diketahui sebelumnya dan tidak ada gangguan maka lebih baik jika digunakan kontrol loop terbuka. Akan tetapi bila terdapat gangguan yang tidak dapat diramalkan sebelumnya, maka akan lebih baik digunakan sistem kontrol loop tertutup (Ogata.1996).



Gambar 2.4. Gangguan pada sistem kontrol loop tertutup
Sumber : Ogata, 1996:50

2.6. Kontrol Kaskade

Kontrol kaskade merupakan strategi kontrol dimana minimal terdapat dua *loop* yaitu *loop* primer (*primary loop/master loop*) dan *loop* sekunder (*secondary loop/slave loop*). Masing-masing *loop* memiliki kontroler yaitu kontroler primer (*primary controller/master controller*) dan kontroler sekunder (*secondary controller/slave controller*) (Gunterus, 1994:11-4).



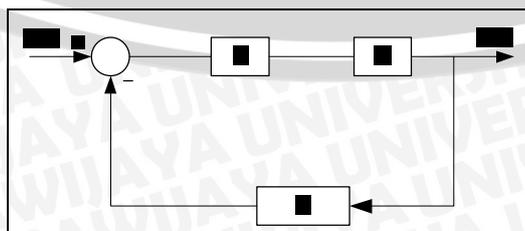
Gambar 2.5. Diagram Blok Kontrol Kaskade
Sumber : Gunterus, 1994:11-3

Keterangan:

- GC₁ = kontroler primer (*primary controller*)
- GC₂ = kontroler sekunder (*secondary controller*)
- GP₁ = bagian *plant* yang dipengaruhi kontroler primer
- GP₂ = bagian *plant* yang dipengaruhi kontroler sekunder
- GL₁ = fungsi alih dari *load 1*
- GL₂ = fungsi alih dari *load 2*

Ciri khas pengendalian semacam ini adalah adanya *manipulated variable* sebuah kontroler yang menjadi *set point* dari kontroler lain. Hal ini dimungkinkan karena unit kontroler sengaja dipersiapkan untuk dapat menerima sinyal *set point* dari luar. Unit semacam ini disebut kontroler dengan *remote set point*. Dari gambar 2.5 terlihat bahwa ada dua jalur umpan balik pada sistem pengendalian kaskade, sehingga terbentuk dua mata rantai pengendalian (*loop*). Mata rantai atau *loop* bagian luar (*outer loop*) disebut *primary loop* atau *master*, dan mata rantai atau *loop* bagian dalam (*inner loop*) disebut *secondary loop* atau *slave*. Itulah sebabnya sistem pengendalian kaskade juga sering disebut pengendalian *master and slave* (Gunterus, 1994:19-3)

2.7. Tempat Kedudukan Akar (*Root Locus*)



Gambar 2.6. Sistem *loop* tertutup
Sumber : Ogata, 1997:380

Fungsi alih sistem *loop* tertutup di atas adalah :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{KG}{1 + KGH} \quad (2.1)$$

Persamaan karakteristik sistem *loop* tertutup ini diperoleh dengan menyamakan penyebut ruas kanan persamaan (2.1) dengan nol. Jadi,

$$1 + KGH = 0 \quad (2.2)$$

$$KGH = -1$$

Root Locus adalah diagram tempat kedudukan akar, karena KGH adalah besaran kompleks, maka persamaan (2.2) dapat dipisahkan menjadi dua persamaan dengan menyamakan masing-masing sudut dan magnitude kedua ruas persamaan tersebut, untuk mendapatkan

$$\text{Syarat sudut} \quad : \angle -180^0 \quad (2.3)$$

$$\text{Syarat magnitude} \quad : |KGH| = 1 \quad (2.4)$$

(Phillips, 1997:187)

Secara matematis, sistem orde pertama dapat dinyatakan dalam (Ogata, 1996:274-277):

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (2.5)$$

keterangan:

$C(s)$: keluaran sistem

$R(s)$: masukan sistem

Karena transformasi Laplace dari fungsi masukan tangga adalah $1/s$ dengan mensubstitusi $R(s)=1/s$ ke dalam persamaan (2.5) diperoleh:

$$\begin{aligned} C(s) &= \frac{1}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{s} \\ &= \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dengan melakukan transformasi Laplace balik pada persamaan (2.6) didapatkan persamaan:

$$c(t) = 1 - e^{-t/T} \quad (t \geq 0) \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) menyatakan bahwa keluaran $c(t)$ mula-mula nol kemudian akhirnya menuju satu. Salah satu karakteristik penting dari kurva respon eksponensial $c(t)$

tersebut adalah pada $t=T$ harga $c(t)$ adalah 0,632 atau respon $c(t)$ telah mencapai 63,2% perubahan totalnya. Hal ini secara mudah dapat dilihat dengan mensubstitusi $t=T$ ke $c(t)$ jadi

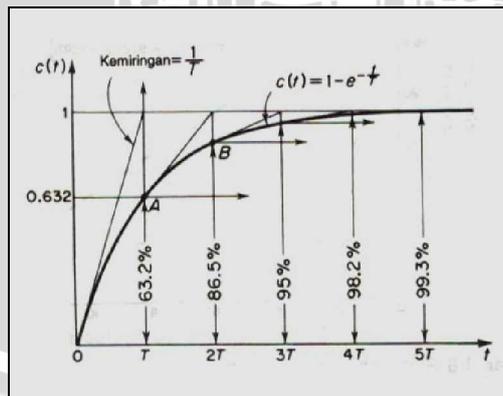
$$c(T) = 1 - e^{-1} = 0,632 \quad (2.8)$$

Tetapan waktu T yang lebih kecil akan mempercepat respon sistem. Karakteristik penting lain dari kurva respon eksponensial adalah kemiringan garis singgung pada $t=0$ adalah $1/T$ karena

$$\left. \frac{dc}{dt} = \frac{1}{T} \cdot e^{-t/T} \right|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (2.9)$$

Keluaran akan mencapai harga akhir $t=T$ jika sistem menjaga kecepatan awal respon. Dari persamaan (2.9) dapat dilihat bahwa kemiringan kurva respon $c(t)$ turun monoton dari $1/T$ pada $t = 0$ menjadi nol pada $t = \infty$.

Kurva respon eksponensial $c(t)$ ditunjukkan pada gambar 2.5. Dalam satu tetapan waktu, kurva respon eksponensial dari 0 sampai 63,2% pada nilai akhir. Dalam dua tetapan waktu respon mencapai 86,5% dari nilai akhir. Pada $t = 3T, 4T,$ dan $5T$ respon mencapai 95%, 98,2%, dan 99,3% dari nilai akhir. Jadi, untuk $t \geq 5T$, respon tetap dalam 0,7% dari nilai akhir. Dalam praktek perkiraan yang mungkin dari respon waktu adalah panjang waktu dan kurva respon yang diperlukan untuk mencapai 0,7% nilai akhir atau lima kali tetapan.



Gambar 2.7. Kurva Respon Eksponensial

Sumber : Ogata, 1996: 275

Jika disederhanakan, konsep *root locus* adalah jika fungsi alih *loop* tertutup :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{KG}{1 + KGH} = \frac{A}{Bs + 1} \quad (2.10)$$

dengan B adalah konstanta waktu atau *pole loop* tertutup berada di $-1/B$, sesuai persamaan karakteristik : $Bs+1 = 0$, $Bs = -1$. Jadi saat $s = -\frac{1}{B}$, untuk sistem orde satu dapat dikatakan

bahwa $\frac{C(s)}{R(s)}$ akan mempunyai *settling time* sebesar :

$$t_s = 5B \quad (2.11)$$

(Ogata, 1996 :275)

2.8. Konsep Ruang Keadaan (*State Space*)

Proses pemodelan sistem akan selalu dilakukan dalam mendesain sistem kontrol. Model dapat berupa diagram blok, diagram aliran sinyal, maupun dalam bentuk persamaan matematika. Model matematika sebuah sistem didefinisikan sebagai kumpulan informasi dalam bentuk persamaan matematika yang mewakili sistem fisik yang ditinjau. Kebanyakan sistem yang dibahas merupakan sistem yang dimodelkan dalam bentuk persamaan diferensial linier tidak berubah terhadap waktu (*linear time invariant*). Melalui persamaan tersebut dapat diperoleh hubungan *input-output* melalui fungsi alihnya yang diselesaikan dengan metode transformasi Laplace.

Terdapat satu metode lagi untuk memodelkan sistem, yang dikenal dengan metode ruang keadaan (*state space*). Model ini merupakan persamaan diferensial yang ditulis dalam bentuk yang spesifik. Model ruang keadaan merupakan sekumpulan persamaan diferensial orde satu yang saling berhubungan dan ditulis dalam notasi matriks vektor.

Bentuk umum ruang keadaan (*state space*) sebuah sistem adalah sebagai berikut :

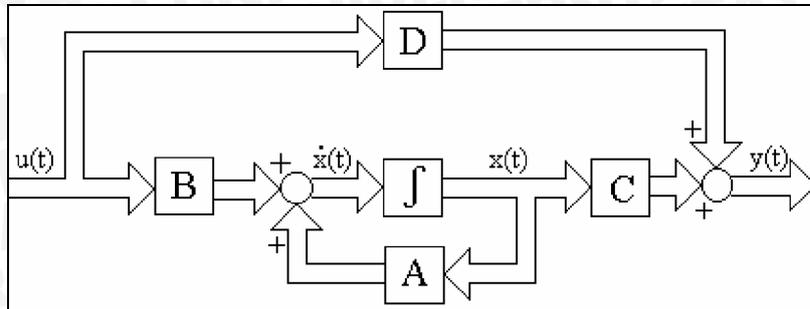
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (2.12)$$

dimana :

- $\mathbf{x}(t)$ = vektor state (n – vektor)
- $u(t)$ = vektor kontrol (m – vektor)
- $y(t)$ = vektor keluaran (p – vektor)
- \mathbf{A} = matriks orde n x n
- \mathbf{B} = matriks orde n x m
- \mathbf{C} = matriks orde p x n
- \mathbf{D} = matriks orde p x n

(Philips, C. 1997)

Dalam persamaan ini, persamaan diferensial dari sistem yang semula berorde n diubah menjadi n buah persamaan diferensial berorde satu secara simultan, ditulis dalam notasi vektor matriks.



Gambar 2.8. Representasi sistem dalam bentuk persamaan state

Sumber : Ogata, 1997:68

Metode ruang keadaan banyak digunakan dalam menganalisa sistem, karena mempunyai banyak keuntungan antara lain:

- Notasinya mudah, kompak, dan dapat dibentuk menjadi persamaan matriks vektor.
- Dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dan tingkah laku sistem dengan tepat.

Hubungan persamaan keadaan dengan fungsi alih sistem :

$$T(s) = C(SI - A)^{-1}B + D \quad (2.13)$$

(Kurniawan, 2005:10)

2.9. Analisis Kestabilan Sistem

Stabilitas sistem ditentukan oleh tanggapan sistem terhadap masukan (*input*) dan gangguan (*disturbances*). Stabilitas sistem linier dapat didefinisikan sebagai keluaran terhingga (*finite*) untuk masukan yang terhingga sedangkan ketidakstabilan sistem linier didefinisikan keluaran yang tidak berhingga (*infinite*) untuk masukan berhingga (Shahian, 1993:7).

Salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui stabilitas sistem adalah dengan melihat letak kutub-kutub model sistem pada bidang- s . Kutub-kutub itu merupakan akar-akar karakteristik matriks keadaan A yang diperoleh dengan menyelesaikan persamaan $|sI - A| = 0$ untuk setiap s . Sistem dikatakan stabil jika dan hanya jika kutub-kutub model sistem tersebut berada di sebelah kiri sumbu imajiner pada bidang- s , dengan kata lain bagian nyata dari akar-akar karakteristik merupakan bilangan negatif (Philips, 1997).

2.10. Keterkendalian dan Keteramatan

Syarat awal desain sistem kontrol optimal adalah harus terpenuhinya syarat keterkendalian dan keteramatan. Sistem dikatakan dapat terkendali secara lengkap jika dalam kurun waktu $t_0 \leq t \leq t_1$ terdapat masukan pengendali $u(t)$ yang dapat mengendalikan $x(t)$ untuk berubah dari keadaan $x(t_0)$ menuju nilai tertentu pada $x(t_1)$. Definisi ini menyatakan secara tidak langsung bahwa $u(t)$ dapat mempengaruhi setiap variabel keadaan pada persamaan $\dot{x} = Ax + Bu$. Sistem terkendali secara sempurna jika dan hanya jika matriks uji keterkendalian (*controllability matrix*) :

$$C_0 = [B \mid AB \mid \dots \mid A^{n-1}B] \quad (2.14)$$

mempunyai rank sama dengan orde sistem (Ogata, 1997:276).

Sistem dikatakan dapat diamati secara lengkap, jika setiap keadaan awal $x(t_0)$ dapat ditentukan dari pengamatan keluaran $y(t)$ pada selang waktu tertentu $t_0 \leq t \leq t_1$. Definisi secara tidak langsung menyatakan bahwa setiap $x(t)$ mempengaruhi keluaran $y(t)$. Sistem dikatakan memenuhi syarat keteramatan jika dan hanya jika matriks uji keteramatan (*observability matrix*) :

$$O_b = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

mempunyai rank sama dengan orde sistem (Ogata, 1997:278).

2.11. Konsep Sistem Kontrol Optimal

Suatu sistem dikatakan optimal bila sistem tersebut mempunyai unjuk kerja terbaik (*best performance*) terhadap suatu acuan tertentu. Sistem kontrol optimal mempunyai tolok ukur, artinya sistem tersebut harus sesuai terhadap suatu referensi. Dinamika sistem yang akan dikontrol digambarkan oleh sekumpulan persamaan *state* yang dapat ditulis dalam bentuk ruang keadaan (*state space*):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.16)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.17)$$

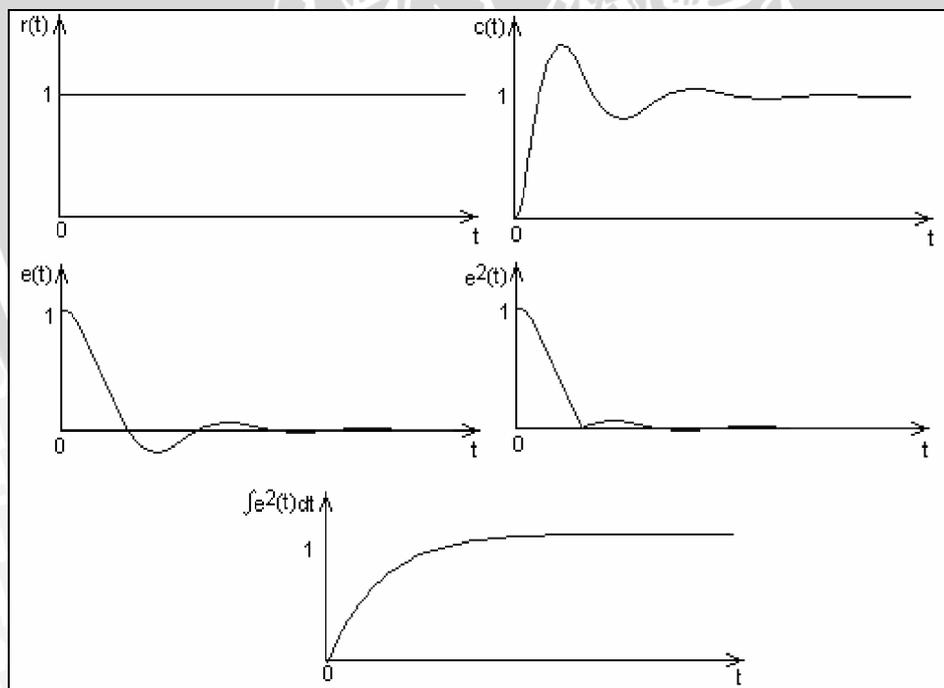
Permasalahan umum dalam kontrol optimal adalah:

- Pada sistem (*plant*) yang akan dikendalikan, suatu fungsi kontrol $u^*(t)$ yang akan bekerja pada *plant* merupakan aksi kontrol terbaik. Terbaik artinya selain memenuhi kriteria desain tertentu juga memenuhi kendala-kendala yang ada.
- Bagaimana merealisasikan fungsi kontrol tersebut di atas ke dalam suatu kontroler. Pengendali deterministik membutuhkan variabel keadaan secara lengkap untuk membangkitkan sinyal kontrol optimal dengan jalan meminimumkan suatu fungsi yang disebut *cost function*. *Cost Function* ini mewakili indeks performansi yang harus dicari solusinya untuk mendapatkan hasil yang optimal (Yamin, 2004:7).

2.11.1. Indeks Performansi

Indeks performansi merupakan tolok ukur suatu kontrol optimal. Sistem akan optimal bila nilai indeks performansinya minimum.

$$J = \int_{t_i}^{t_f} L(x, u, t) dt \text{ bila } J \text{ minimum, maka sistem optimal.}$$



Gambar 2.9. Indeks performansi terhadap waktu
Sumber : Ogata, 1997:321

Definisi sinyal error adalah selisih antara input dan output sistem. Salah satu cara untuk meminimumkan sinyal error adalah dengan meminimumkan luasannya pada kawasan waktu. Secara matematika dapat didefinisikan sebagai berikut (D'Azzo, 1988)

$$\emptyset J_1 = \int_0^{\infty} e dt \Rightarrow \text{Integral Error (IE)}$$

$$\emptyset J_2 = \int_0^{\infty} te dt \Rightarrow \text{Integral of Time Multiplied by Error}$$

$$\emptyset J_3 = \int_0^{\infty} e^2 dt \Rightarrow \text{Integral of Square Error (ISE)}$$

$$\emptyset J_4 = \int_0^{\infty} |e| dt \Rightarrow \text{Integral of Absolute Value of Error (IAE)}$$

$$\emptyset J_5 = \int_0^{\infty} t|e| dt \Rightarrow \text{Integral of Time multiplied by Absolute Value of Error (ITAE)} \quad (2.18)$$

2.11.2. Metode Matematis Untuk Memecahkan Masalah Kontrol Optimal

1. Persamaan aljabar Riccati : digunakan untuk mengoptimalkan sistem yang linier.
2. Persamaan Hamiltonian Pontryagin : dapat digunakan untuk mengoptimalkan sistem yang linier maupun tak linier.

2.12. Optimasi Sistem

2.12.1. Optimasi Tanpa Kendala

Suatu fungsi minimum pada titik x^* bila turunan $f(x)$ di titik x^* adalah:

$$\frac{df(x^*)}{dx} = 0 \text{ dan } \frac{d^2 f(x^*)}{dx^2} > 0 \quad (2.19)$$

Untuk fungsi orde n , $F(k) = f(k_1, k_2, \dots, k_n)$, dimana $f(k)$ kontinyu untuk semua harga k , maka:

$$\text{Vektor gradien : } \frac{\partial f}{\partial k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial k_1} \\ \frac{\partial f}{\partial k_2} \\ \frac{\partial f}{\partial k_n} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Matrik Hessian (H) :

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 J}{\partial k_1^2} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_1 \partial k_2} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_1 \partial k_n} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial k_2 \partial k_1} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_2^2} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_2 \partial k_n} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial k_n \partial k_1} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_n \partial k_2} & \frac{\partial^2 J}{\partial k_n^2} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Syarat agar fungsi minimum, maka matriks Hessian harus definit positif. Suatu matrik dikatakan definit positif jika dan hanya jika semua nilai eigen dari matrik A adalah positif ($\lambda > 0$) (Lewis, 1995).

2.12.2. Optimasi Dengan Kendala

2.12.2.1. Metode Lagrange

$$\text{Fungsi Lagrange } L(x, \lambda) = f(x) + \lambda g(x) \quad (2.22)$$

$f(x)$ merupakan fungsi tujuan dan $g(x)$ merupakan fungsi kendala.

Dengan harga ekstrim x^* terdapat harga ekstrim λ yang memenuhi (Lewis, 1995) :

$$\frac{\partial L}{\partial x} = 0 \text{ dan } \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \quad (2.23)$$

2.12.2.2. Metode Hamiltonian

Pemecahan masalah kontrol optimal mencari $u^*(t)$ yang menyebabkan sistem $x^*(t) = f[x(t), u(t), t]$, dengan $x \in R^n, x \in R^p$ mencapai trayektori $x^*(t)$ yang meminimumkan:

$$J = h[x(t), t] + \int_{t_0}^{t_1} [g[x(t), u(t), t]] dt \quad (2.24)$$

Langkah-langkah penyelesaian Metode Hamiltonian (Lewis, F. 1995) :

Ø Mencari bentuk Hamiltonian

$$H(x, u, \lambda, t) = g(x, u, t) + \lambda f(x, u, \lambda, t) \quad (2.25)$$

$H(x, u, \lambda, t)$ = Model Hamiltonian

$g(x, u, t)$ = persamaan kendala

$f(x, u, \lambda, t)$ = model state sistem

- Ø Menentukan persamaan kontrol

$$\frac{\partial H(x,u,\lambda,t)}{\partial u} = 0 \quad (2.26)$$

$$u^*=u(x,\lambda,t)$$

- Ø Menentukan Hamiltonian

$$H^*(x,\lambda,t)=H(x,u^*,\lambda,t) \quad (2.27)$$

- Ø Persamaan *state*

$$\dot{x}(t) = \frac{\partial x^*(x,\lambda,t)}{\partial \lambda} \quad (2.28)$$

- Ø Persamaan *costate*

$$\dot{\lambda}(t) = \frac{-\partial H^*(x,\lambda,t)}{\partial x} \quad (2.29)$$

Penyelesaian persamaan *state* dan *costate* disubstitusikan kembali ke persamaan u^* untuk memperoleh vektor kontrol optimal.

2.13. Controller Algebraic Riccati Equations (CARE)

Untuk sistem linier, *time invariant*, dapat diturunkan dari persamaan Aljabar Riccati untuk mencari solusi optimal sebagai berikut (Lewis, 1995) :

- Ø $J = \frac{1}{2} \int_0^t [X^T Q X + U^T R U] dt$

- Ø $H(x,u,\lambda,t) = g(x,u,t) + \lambda^T f(x,u,\lambda,t)$

- Ø $H(x,u,\lambda,t) = \frac{1}{2} (x^T Q x + u^T R u) + \lambda^T (A x + B u)$

- Ø Kondisi Optimal : $\frac{\partial H}{\partial U} = 0$

- Ø Persamaan *state* : $\dot{x} = \frac{\partial H}{\partial \lambda}$

- Ø Persamaan *costate* : $\dot{\lambda}' = -\frac{\partial H}{\partial x}$

Dengan menggunakan aturan diferensiasi matriks dan vektor, persamaan tersebut menjadi :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ -\dot{\lambda} &= Qx + A^T\lambda \\ u^* &= -R^{-1}B^T\lambda\end{aligned}$$

dengan u^* merupakan vektor kontrol optimal.

Persamaan diatas disubstitusikan kedalam persamaan state, didapatkan :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}' \\ \dot{\lambda}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -BR^{-1}B^T \\ -Q & -A^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix}$$

Jika $\lambda = Px$, kemudian dilakukan diferensiasi pada kedua ruas diperoleh :

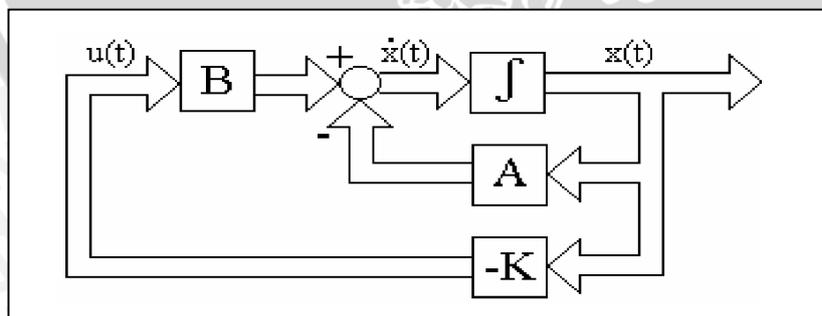
$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{dP}{dt}x + P\frac{dx}{dt} = \frac{dP}{dt}x + PAx - PBR^{-1}B^TPx = -Qx - A^TPx \quad (2.30)$$

Persamaan diatas harus dapat memenuhi semua nilai x . Syarat cukup untuk kontrol optimal matriks P harus memenuhi :

$$\frac{dP}{dt} = A^TP + PA + Q - PBR^{-1}B^TP = 0 \quad (2.31)$$

Persamaan diatas dikenal dengan Persamaan Riccati. Persamaan Riccati merupakan persamaan diferensial orde satu yang bersifat non linier. Solusi masalah LQR pada waktu berhingga (*finite*), dengan nilai umpan balik keadaan, dinyatakan (Lewis, 1995) :

$$\begin{aligned}u(t) &= -K \cdot x(t) \\ K &= R^{-1}B^TP\end{aligned} \quad (2.32)$$



Gambar 2.10. Sistem Kontrol Optimal dengan umpan balik keadaan (*state feedback*)

Sumber : D’Azzo, 1996: 553

2.13.1. Persamaan Riccati Bentuk Umum

2.13.1.1. Bentuk Perkalian Silang (*Cross Product*)

Formulasi LQR dapat dibawa ke bentuk umum, seperti bentuk perkalian silang (*cross product*) dan regulator dengan sebuah derajat kebebasan

Ø Bentuk *cross product cost function* (Lewis, 1995) :

$$\begin{aligned} J(u) &= \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u) dt \\ J &= \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q & N \\ N^T & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} dt \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u + x^T N u + u^T N^T x) dt \end{aligned} \quad (2.33)$$

Persamaan Riccati dalam bentuk *cost product* adalah:

$$A^T S + SA - (SB + N)R^{-1}(B^T S + N^T) + Q = 0 \quad (2.34)$$

$$u = -Kx \quad (2.35)$$

$$K = R^{-1}(B^T S + N^T) \quad (2.36)$$

Dengan syarat matriks (A,B) *Controllable* dan *observable*.

Jika nilai matriks korelasi $N=0$, maka persamaan Riccati dalam bentuk *cross product* akan menjadi persamaan Riccati bentuk biasa.

2.13.1.2. Regulator Dengan Penetapan Derajat Kebebasan

Dengan memodifikasi persamaan Riccati dan fungsi biaya (*cost function*) dimungkinkan untuk merancang sebuah regulator dengan menetapkan lokasi kutub α *units* disebelah kiri sumbu imajiner, α adalah bilangan positif dan skalar.

Bentuk fungsi biaya (*cost function*) setelah dimodifikasi menjadi (Lewis, 2004) :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} e^{2\alpha t} (u^T R u + x^T Q x) dt \quad (2.37)$$

Kemudian bentuk persamaan Riccati juga mengalami perubahan menjadi :

$$(A + \alpha I)^T P + P(A + \alpha I) + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (2.38)$$

Dengan P merupakan solusi persamaan Riccati.

2.13.2. Filter Kalman

Filter Kalman adalah sebuah observer, karena filter kalman pada dasarnya adalah *low-pass filter*, maka mempunyai kemampuan yang cukup baik untuk meredam gangguan.

Persamaan dinamik untuk plant diberikan sebagai berikut (Lewis, F. 1995) :

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + Gw \quad (2.39)$$

$$y = C\tilde{x} + v \quad (2.40)$$

dengan $w(t)$ adalah gangguan proses yang mengganggu kinerja dari plant, sedangkan $v(t)$ adalah gangguan perhitungan, misalkan gangguan sensor. Persamaan di atas dapat disimbolkan sebagai:

$$\tilde{x}(0) \approx (\tilde{x}_0, P_0) \quad \text{dengan } \tilde{x}_0 \text{ adalah nilai } mean \text{ dan } P_0 \text{ adalah kovarian.}$$

Sedangkan perhitungan error kovarian dengan menggunakan *Algebraic Riccati Equation* (ARE) menghasilkan

$$AP + PA^T + GQG^T - PC^T R^{-1} CP = 0 \quad (2.41)$$

dengan *gain filter Kalman* $L = PC^T R^{-1}$

didapatkan persamaan filter dinamik

$$\dot{\tilde{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (2.42)$$

2.13.3. Perancangan *Linear Quadratic Gaussian* (LQG)

Linear Quadratic Regulator (LQR) dan filter Kalman dapat digunakan bersama untuk merancang sebuah regulator yang dinamis. Prosedur ini dinamakan *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) (Lewis, F. 1995).

Misalkan *plant* dan keluaran yang dihitung diberikan sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw \quad (2.43)$$

$$y = Cx + v \quad (2.44)$$

dengan $x(t) \in R^n$, $u(t)$ adalah kontrol input, $w(t)$ adalah *process noise*, dan $v(t)$ adalah *measurement noise*. Misalkan kontrol *full state-feedback* adalah:

$$u = -Kx + r \quad (2.45)$$

dengan $r(t)$ adalah referensi masukan., maka penguatan *state-feedback* K dipilih menggunakan teknik yang sama seperti dalam LQR. Jika persamaan 2.45 disubstitusikan ke persamaan 2.43 maka didapatkan:

$$\dot{\bar{x}} = (A - BK)x + Br + Gw \quad (2.46)$$

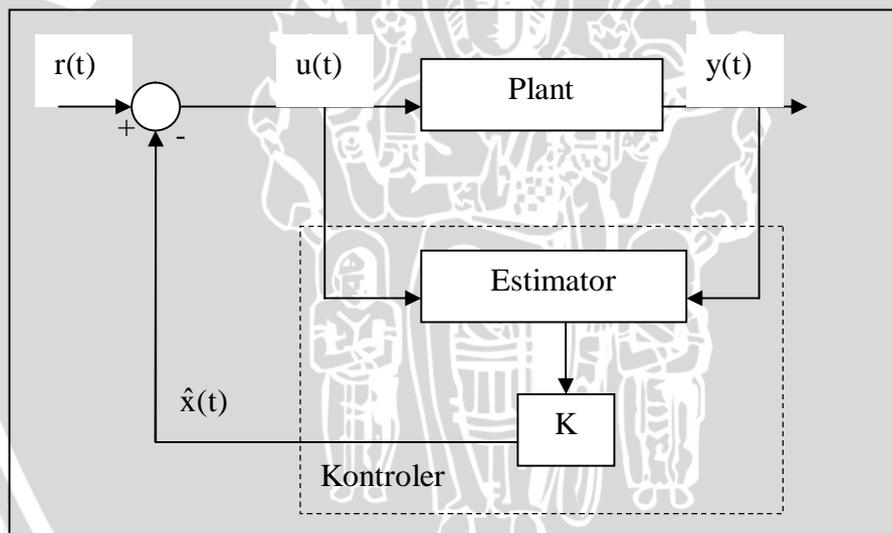
Misalkan Kalman filter adalah:

$$\dot{\bar{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \quad (2.47)$$

maka penguatan filter L dipilih dari teknik yang sudah dibahas sebelumnya, jadi meskipun semua *state* tidak dapat diukur dan persamaan 2.45 tidak dapat diimplementasikan, kita dapat mengumpan balikkan $\hat{x}(t)$ daripada *actual state* $x(t)$.

$$\text{Jika } u = -K\hat{x} + r \quad (2.48)$$

maka bagan *loop* tertutup yang menggunakan kontroler ini ditunjukkan dalam gambar 2.9, yang terpenting dari hasil ini adalah *state-feedback* K dan penguatan *observer* L dapat dirancang terpisah untuk menghasilkan *plant*, sifat *loop* tertutup yang diinginkan, dan sifat *observer*nya.



Gambar 2.11. Regulator dengan *observer* dan *state feedback*

Sumber : Anderson, 1989:208

Dimana

$$F(s) = C[SI - (A - BK)]^{-1} B \quad (2.57)$$

merupakan matriks pengalih dari pengaturan keadaan tanpa *filter*.

Berdasarkan persamaan (2.52) berlaku

$$u_s(s) = Mw(s) \quad (2.58)$$

Dimana M dianggap konstan. Dari persamaan (2.56) dan (2.58) dapat dihasilkan persamaan berikut

$$Y(s) = F(s)Mw(s) \quad (2.59)$$

Kemudian $w(t)$ dimasukkan sehingga menghasilkan $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t)$ terhadap nilai w_∞ yang secara realitas setelah beberapa saat dapat diterima. Dengan cara ini keadaan stasioner dapat tergambar. Jika keadaan stasioner itu ditandai dengan indeks, maka dari persamaan (2.59) berdasarkan rumus nilai akhir dari transformasi Laplace dihasilkan

$$Y_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} Y(s) = \lim_{s \rightarrow 0} F(s) \cdot M \cdot \lim_{s \rightarrow 0} sW(s)$$

Karena $\lim_{s \rightarrow 0} sW(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = w_\infty$

$$Y_\infty = F(0)Mw_\infty \quad (2.60)$$

Seharusnya $Y_\infty = w_\infty$, dan bahkan untuk vektor yang mana saja w , jadi harus berlaku

$$F(0)M = I \quad (2.61)$$

Diasumsikan $q = p$, jadi diumpamakan bahwa jumlah faktor pengatur sama dengan jumlah faktor angka, maka yang terjadi adalah $F(0)$ berbentuk persegi empat atau dapat dikatakan pula bahwa $F(0)$ reguler. Karena persamaan (2.56) dalam keadaan stasioner berlaku

$$Y_\infty = F(0)u_{s_\infty} \quad (2.62)$$

Nilai inversi dari faktor kemudi dapat dipilih sehingga setiap vektor yang diharapkan y dari faktor pengaturan muncul melalui pemilihan u yang cocok. Kemudian dari persamaan (2.61) dihasilkan

$$M = F(0) = [C(BK - A)^{-1} B]^{-1}$$

Sehingga matriks filter dapat diketahui dengan syarat bahwa K telah dihitung (Follinger, 1994:467).

BAB III

METODOLOGI

Untuk merealisasikan tujuan yang ingin dicapai dalam penulisan skripsi ini, langkah-langkah yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

3.1. Pengumpulan Data

Mendapatkan data-data sistem yang akan ditinjau meliputi parameter-parameter dan komponen yang menyusun sistem tersebut yaitu *steam drum*, turbin, pompa, dan *control valve*.

3.2. Pemodelan Matematis Sistem

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan model matematis sistem antara lain adalah sebagai berikut:

- Menentukan sistem yang akan diteliti dan komponen-komponen yang menyusun sistem tersebut
- Setelah diketahui komponen-komponen penyusun sistem beserta parameter-parameternya, maka sistem dapat dimodelkan menjadi sebuah persamaan matematis. Dengan memasukkan data-data sistem pada persamaan matematis tersebut, dan dengan transformasi Laplace, maka akan didapatkan fungsi alih sistem. Fungsi alih sistem ini kemudian diubah menjadi bentuk persamaan ruang-keadaan.

3.3. Analisis Optimal Sistem

Analisis optimal bertujuan untuk mendapatkan *gain* kontrol optimal dan *estimator* yang memenuhi syarat-syarat pengontrolan optimal.

1. Dari fungsi alih sistem yang telah diubah ke bentuk persamaan keadaan, dilakukan pemeriksaan, apakah sistem memenuhi syarat keteramatan dan keterkontrolan. Jika tidak, maka berarti sistem tidak dapat dikontrol.
2. Menentukan indeks performansi sistem. Indeks performansi adalah suatu tolok ukur yang menyatakan seberapa optimal kinerja sistem.

3. Menentukan matriks bobot Q dan R. Penentuan matriks bobot Q dan R ini dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*), yang pemilihannya berdasarkan nilai sisa relatif terkecil. Perhitungan nilai sisa relatif ini menggunakan program MATLAB.
4. Mendapatkan matriks *gain* umpan balik LQR
 - Menentukan matriks Riccati dari matriks bobot Q dan R yang telah ditentukan sebelumnya.
 - Mendapatkan matriks *gain* umpan balik K.
5. Penyusunan regulator LQG
 - Melakukan perhitungan estimator (*filter* Kalman) hingga didapatkan *state* estimasi $\hat{x}(t)$ dan matriks *gain estimator* L.
 - Menggunakan *state* estimasi $\hat{x}(t)$ dan matriks *gain* umpan balik LQR yaitu K untuk memberikan sinyal kontrol umpan balik optimal u.

3.4. Simulasi Sistem

Simulasi sistem dilakukan dengan menggunakan fasilitas-fasilitas yang tersedia pada perangkat lunak program MATLAB, antara lain *simulink* dan *control toolbox*. Dari hasil simulasi tersebut, dapat dibandingkan respon sistem dengan sinyal kendali optimal dengan umpan balik LQR dan LQG.

3.5. Kesimpulan dan Saran

Penarikan kesimpulan dari analisis optimal dan respon waktu sistem berdasarkan hasil pengujian dan simulasi serta saran-saran mengenai proses pengendalian *level steam drum* untuk perbaikan sistem di masa mendatang.



BAB IV

PEMODELAN SISTEM

4.1. Definisi Pemodelan Sistem

Pemodelan (*modelling*) berarti menyatakan suatu sistem dari dunia nyata (*real world*) ke dalam bentuk persamaan matematis. Pemodelan juga dapat diartikan sebagai usaha menirukan kelakuan proses dengan tujuan untuk memahaminya. Hal tersebut dilakukan dengan menyusun hubungan-hubungan fisik dari sistem sesungguhnya dengan menggunakan hukum-hukum ilmu alam (Anggraini, 2005).

Bagian terpenting dari model fungsi alih adalah persamaan karakteristik. Persamaan karakteristik sistem sangat menentukan kelakuan (respon) sistem tersebut. Jika model matematis sistem telah diketahui, maka grafik tanggapan sistem dapat diketahui pula dengan jalan melakukan simulasi terhadap model sistem tersebut. Kemudian langkah berikutnya adalah proses validasi. Pada proses ini data hasil simulasi tersebut dibandingkan dengan data yang berasal dari proses sebenarnya. Jika model tersebut telah cocok (*valid*), proses dapat dilanjutkan ke arah desain dan pembuatan *prototype* (Anggraini, 2005).

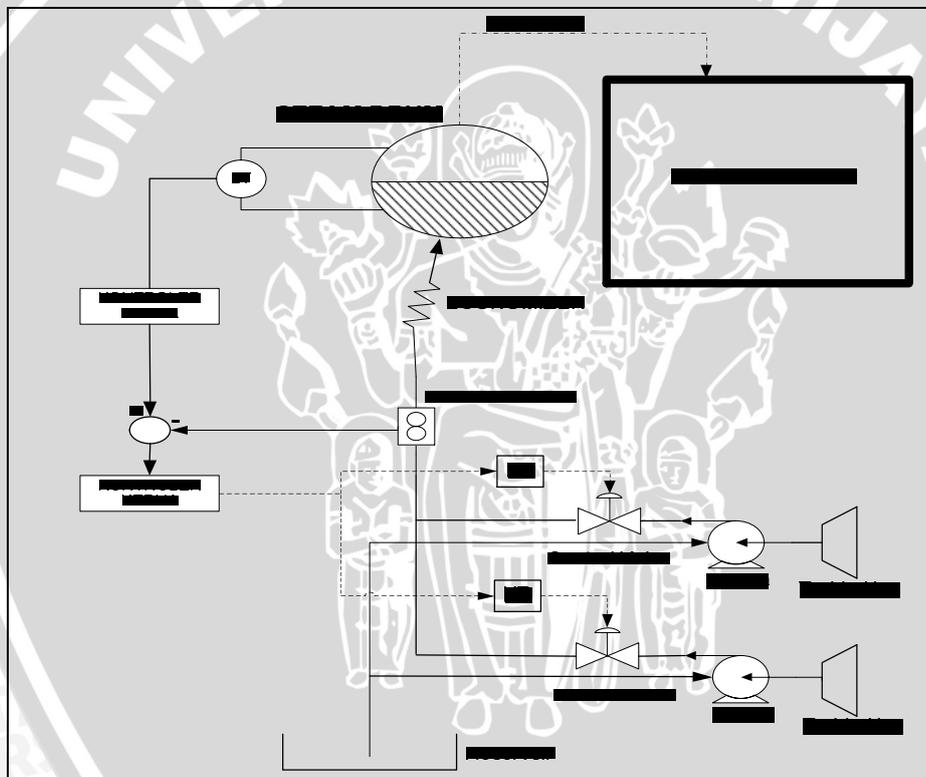
Dalam proses penurunan model matematis sistem, terdapat tiga macam cara pendekatan yang dapat dipergunakan. Yang pertama adalah menyajikan model matematis sistem dengan menggunakan persamaan diferensial. Yang kedua adalah dengan menggunakan pendekatan fungsi alih (*transfer function*), dan yang ketiga adalah pendekatan ruang keadaan (*state space*). Dalam masalah kendali optimal, akan lebih menguntungkan jika menggunakan pendekatan ruang keadaan (Anggraini, 2005).

4.2. Pemodelan Sistem

Model matematis sistem diperlukan untuk simulasi yang bertujuan untuk mendapatkan respon dinamik sistem. Langkah pertama untuk mendapatkan model matematis sistem adalah dengan menurunkan persamaan matematis untuk setiap komponen yang menyusun sistem tersebut.

Sistem pengendalian *level* dan *flow* pada *steam drum* terdiri dari beberapa komponen yang menyusunnya. Komponen-komponen tersebut antara lain adalah *steam drum*, kontroler, transduser, *valve*, dan *transmitter*. Skema loop tertutup sistem ditunjukkan pada Gambar 4.1.

Steam drum berfungsi memisahkan uap basah (*feedwater*) menjadi uap kering (*saturated steam*) dan air. *Level* uap basah pada *steam drum* memiliki nilai *set point* tertentu agar menghasilkan uap kering yang masuk menuju *boiler*. *Level* (h) dari uap basah dalam *steam drum* diukur dengan *level transmitter* pada *steam drum* kemudian dibandingkan dengan *set point level* (h_{sp}), jika terdapat *error* maka kontroler pertama akan menghitung besarnya koreksi yang diperlukan yaitu *flow* keluaran *Control valve*. *Control valve* (%) mengatur *flow feedwater* dari *reservoir* menuju *steam drum*. *Flow* (\dot{m}) dari *feedwater* diukur oleh *flow transmitter* kemudian dibandingkan dengan *set point flow* keluaran *control valve* (\dot{m}_{sp}), jika terdapat *error* maka kontroler kedua akan menghitung besarnya koreksi yang diperlukan yaitu prosentase bukaan *control valve* (%).



Gambar 4.1. Skema Loop Tertutup Pengendalian *Level* pada *Steam Drum* dan *Feedwater Flow*

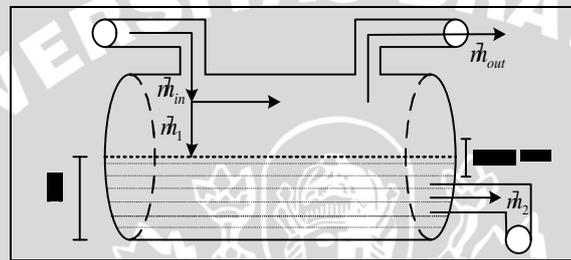
Sumber: Perancangan

4.2.1. Fungsi Alih *Steam Drum*

Steam Drum merupakan instrumen berbentuk silinder yang diletakkan dalam posisi horisontal. Ukuran drum ditentukan oleh kebutuhan ruang untuk pemisahan uap dan piranti pengeringan yang diperlukan dalam produksi uap kering. Untuk unit ini, *steam drum* yang dipakai berdiameter 1778 mm dengan panjang 30022,8 mm. Dalam pembuatannya

digunakan pelat berlapis dua. Setengah bagian atas mempunyai ketebalan 203,2 mm karena harus mempunyai ketebalan yang cukup untuk menahan beberapa tabung *riser* dan tabung penghubung dengan *superheater*. Sedangkan setengah bagian bawah mempunyai ketebalan 166,2 mm.

Pada gambar 4.2 tampak bahwa posisi *steam drum* pada kondisi riil tidak berdiri tegak secara vertikal tetapi berada pada posisi horisontal. Seperti dijelaskan bahwa *steam drum* berfungsi pada proses pemisahan uap dengan menjaga *level* air yang ada di dalamnya setinggi -9 inch dari garis tengah lingkaran atau 660,4 mm dari dasar *steam drum* sesuai Gambar 2.2. Toleransi ketinggian yang diperbolehkan adalah $\pm 50,8$ mm dari titik nol.



Gambar 4.2. Model Steam Drum
Sumber : ABB Manual Book

Keterangan gambar :

- \dot{m}_1 = flow total uap yang masuk ke *steam drum* (kg/s)
- \dot{m}_2 = flow air yang keluar dari *steam drum* (kg/s)
- \dot{m}_{in} = flow uap basah yang masuk ke *steam drum* (kg/s)
- \dot{m}_{out} = flow uap kering yang keluar dari *steam drum* (kg/s)
- h = ketinggian air pada *steam drum* (m)

Proses pada *steam drum* juga menggunakan hukum kesetimbangan massa, yaitu *laju massa masuk – laju massa keluar = laju perubahan massa* (Coughanowr, 1991 : 64-65).

Dalam Buku Pedoman Operasi *Steam Drum (Manual Book)* yang dimiliki PT. IPMOMI telah ditetapkan bentuk fungsi alih *steam drum* adalah :

$$H_{sd}(s) = \frac{(k_{sd1}\tau_{sd} + k_{sd2})s + k_{sd1}}{s(1 + \tau_{sd}s)} \dot{m}_{in}(s) \quad (4.1)$$

Dengan :

- $H_{sd}(s)$ = Ketinggian (m)
- $\dot{m}_{in}(s)$ = Laju aliran massa *feedwater* (kg/s)
- k_{sd} = Penguatan *Steam Drum*

τ_{sd} = Konstanta waktu *Steam Drum*

Dari hasil pengamatan di lapangan, diperoleh nilai-nilainya adalah :

k_{sd1}	k_{sd2}	τ_{sd}
1	2,7	2,1

Dengan memasukkan nilai-nilai tersebut pada fungsi alih, diperoleh :

$$H_{sd}(s) = \frac{(1 \cdot 2,1 + 2,7)s + 1}{s(1 + 2,1s)} \dot{m}_{in}(s)$$

$$H_{sd}(s) = \frac{4,8s + 1}{2,1s^2 + s} \dot{m}_{in}(s) \quad (4.2)$$

4.2.2. Fungsi Alih Katup Pengendali (*control valve*)

Katup pengendali terdiri dari sebuah devais pneumatik yang menggerakkan tangkai (*stem*) katup sebagai fungsi tekanan pada diafragma. Tangkai katup memposisikan *plug* dimana posisi *plug* membatasi *flow* fluida yang mengalir melalui *control valve* tersebut. *Flow* uap panas lanjut untuk menggerakkan turbin uap ditentukan oleh prosentase bukaan *control valve*, pada sistem pengendalian ini digunakan *control valve* jenis *globe valve* yang memiliki karakteristik linier dan dilengkapi dengan aktuator diafragma. Fungsi alih dari *valve* dapat dinyatakan sebagai sistem orde satu sebagai berikut (Coughanowr, D. 1991:124 – 127):

$$\frac{\dot{m}(s)}{U(s)} = \frac{G_T}{T_{CV}s + 1} \quad (4.3)$$

dengan $\dot{m}(s)$ = laju aliran massa (kg/s)
 $U(s)$ = sinyal kendali elektrik (mA)
 G_T = *gain* total dari *valve*
 T_{CV} = konstanta waktu *valve*

Konstanta waktu *valve* dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_{CV} = T_V \cdot (\Delta V + R_V) \quad (4.4)$$

dengan T_V = *stroke time* (s)
 R_V = perbandingan konstanta waktu dengan *stroke time*
 ($R_V = 0,3$ untuk aktuator piston dan $R_V = 0,03$ untuk aktuator diafragma)
 ΔV = fraksi perubahan posisi *valve*

$$= \frac{\text{flow}_{\text{maks}} - \text{flow}_{\text{min}}}{\text{flow}_{\text{maks}}} = \frac{(293,02 \text{ kg/s} - 276,9 \text{ kg/s})}{293,02 \text{ kg/s}} = 0,055$$

Karena sinyal kendali berupa sinyal elektrik, sedangkan katup kendali hanya menerima sinyal pneumatik, sehingga untuk menjalankan *valve* tersebut sinyal keluaran kontroler harus melalui transduser I/P yang mengubah besaran arus dengan nilai 4-20 mA menjadi besaran tekanan dengan nilai 3-15 psi.

Maka *gain* transduser adalah sebagai berikut:

$$K_T = \frac{\text{Span}_{\text{keluaran}}}{\text{Span}_{\text{masuk}}} = \frac{15 - 3 \text{ Psi}}{20 - 4 \text{ mA}} = 0,75 \text{ Psi/mA}$$

Penguatan *valve* untuk karakteristik aliran linier adalah :

$$K_V = \frac{\text{range flow}_{\text{output}}}{\text{range tekanan}_{\text{input}}} = \frac{(293,02 - 276,9 \text{ kg/s})}{(15 - 3 \text{ Psi})} = 1,33 \text{ kg/s Psi}$$

Sehingga *gain* total *valve*:

$$G_T = K_T \cdot K_V = 0,75 \cdot 1,33 = 1 \text{ kg/s} \cdot \text{mA}$$

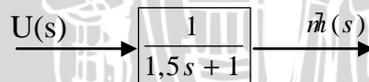
dan konstanta waktu *valve* adalah:

$$T_{CV} = T_V (\Delta V + R_V) = 17,6(0,055 + 0,03) = 1,5$$

Maka fungsi alih *valve* adalah :

$$\frac{\dot{m}(s)}{U(s)} = \frac{G_T}{T_{CV}s + 1} = \frac{1}{1,5s + 1} \tag{4.5}$$

Dalam bentuk diagram blok adalah sebagai berikut:



Gambar 4.3. Diagram blok *control valve*

4.2.3. Fungsi Alih *Level Transmitter*

Gain penguatan *sensor-transmitter* didefinisikan sebagai $K = \frac{\text{span}_{\text{output}}}{\text{span}_{\text{input}}}$. Dari data

teknis diperoleh bahwa *level* maksimum sebesar 1,889m dan *level* minimum sebesar 0,431m, memberi kesetaraan arus listrik 4 – 20 mA (Soloman, 1994). Sehingga penguatan *level transmitter* adalah :

$$K_t = \frac{20 - 4 \text{ mA}}{1,889 - 0,431 \text{ m}} = 35 \text{ mA/m} \tag{4.6}$$



Gambar 4.4. Diagram blok level transmitter

Keterangan : h = ketinggian (m)
 u = sinyal elektrik (mA)

4.2.4. Fungsi Alih Flow Transmitter

Gain penguatan *sensor-transmitter* didefinisikan sebagai $K = \frac{\text{span}_{\text{output}}}{\text{span}_{\text{input}}}$. Dari data teknis diperoleh bahwa $\Delta \dot{m}$ (span) adalah 550 – 600 kg/s memberi kesetaraan arus listrik 4 – 20 mA (Soloman, 1994:307). Sehingga penguatan *flow transmitter* adalah :

$$K_t = \frac{20 - 4 \text{ mA}}{600 - 550 \text{ kg/s}}$$

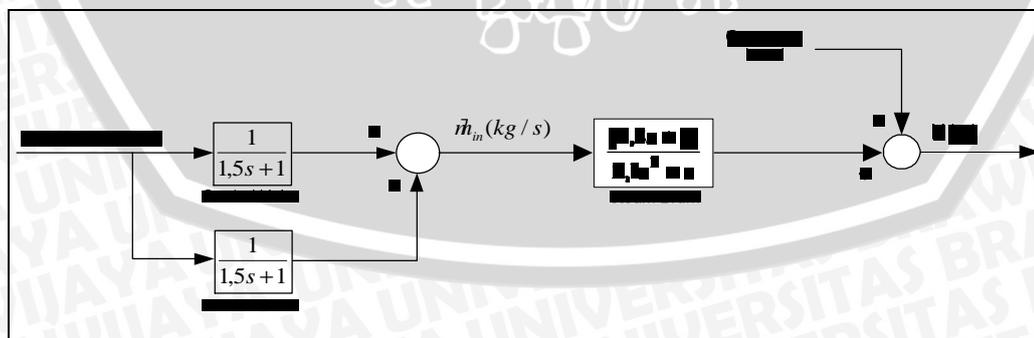
$$K_t = \frac{16}{50} = 0,32 \text{ mA} \cdot \text{s} / \text{kg} \tag{4.7}$$



Gambar 4.5. Diagram blok level transmitter

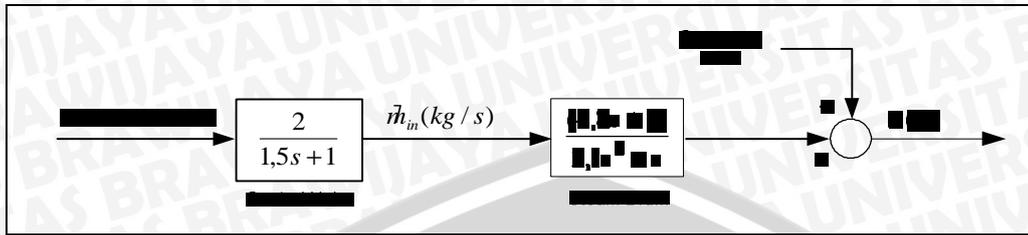
Keterangan : f = flow fluida (kg/s)
 u = sinyal elektrik (mA)

Berikut ini adalah diagram blok dari *control valve* dan *steam drum*. Terdapat dua buah *control valve* dan *steam drum* yang merupakan aliran utama dari proses *feedwater*.



Gambar 4.6. Blok Diagram Loop Terbuka Kontrol Level dan Flow
 Sumber : Perancangan

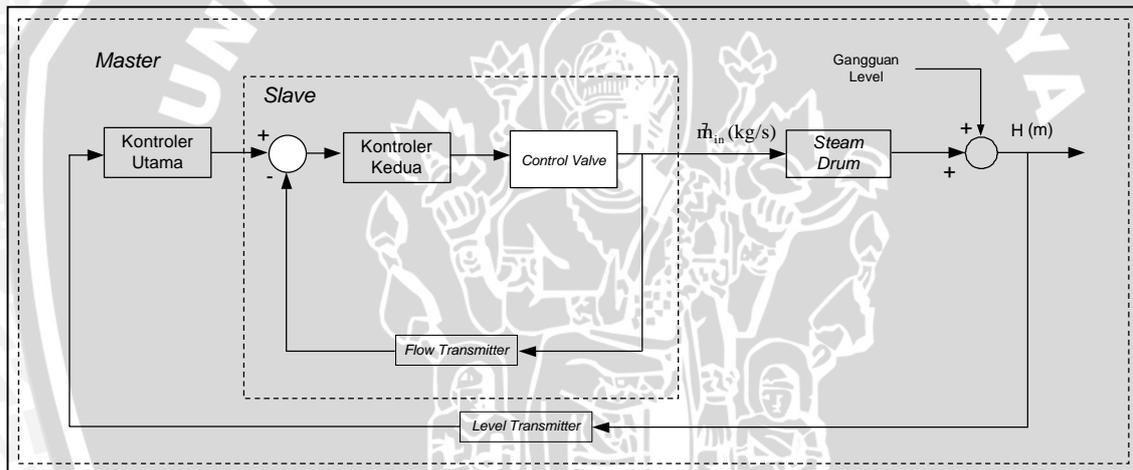
Pada diagram blok bagian *control valve* masing-masing mempunyai beban kerja 50 % sehingga blok diagram *loop* terbuka sistem *level* dan *flow* dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 4.7. Diagram Blok *Loop* Terbuka Kontrol *Level* dan *Flow*
Sumber : Perancangan

4.3. Perancangan Kontrol *Flow*

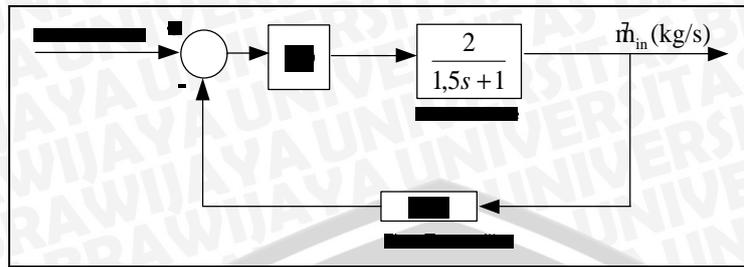
Sistem pengendalian *level* dan *flow* tersusun dengan menggunakan konfigurasi kaskade seperti pada diagram blok berikut



Gambar 4.8. Diagram Blok *Loop* Tertutup Kaskade *Level* dan *Flow*
Sumber : Perancangan

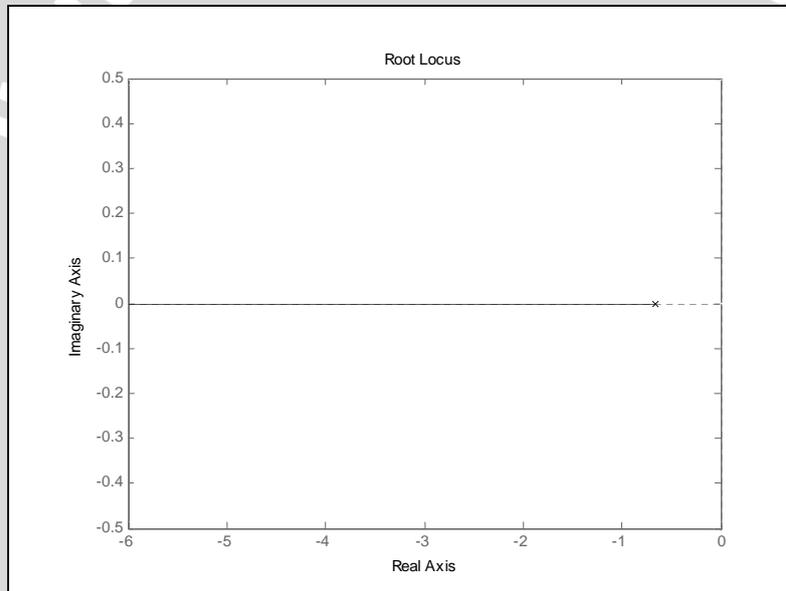
Kontrol *flow* merupakan *loop* tertutup pada *loop slave* dari sistem pengendalian *level* dan *flow*. Pada kontrol *flow* diperlukan respon sistem yang cepat sehingga perlu ditentukan besarnya nilai penguatan K_p . Keluaran dari kontrol *flow* adalah laju massa dari *feedwater* untuk mensuplai *steam drum* agar *level steam drum* berada pada nilai yang telah ditentukan. Pemilihan kontroler proporsional bertujuan untuk mempercepat respon *control valve*, jadi prioritas pengendalian adalah pada *settling time* yang cepat agar kontroler *slave* dapat segera mengoreksi *plant slave* sehingga tidak mempengaruhi *plant master*.

Penentuan konstanta proporsional dilakukan dengan metode *root locus* dari *loop slave* seperti dalam gambar 4.9



Gambar 4.9. Diagram Blok *Loop* Tertutup Kontrol *Flow*
Sumber : Perancangan

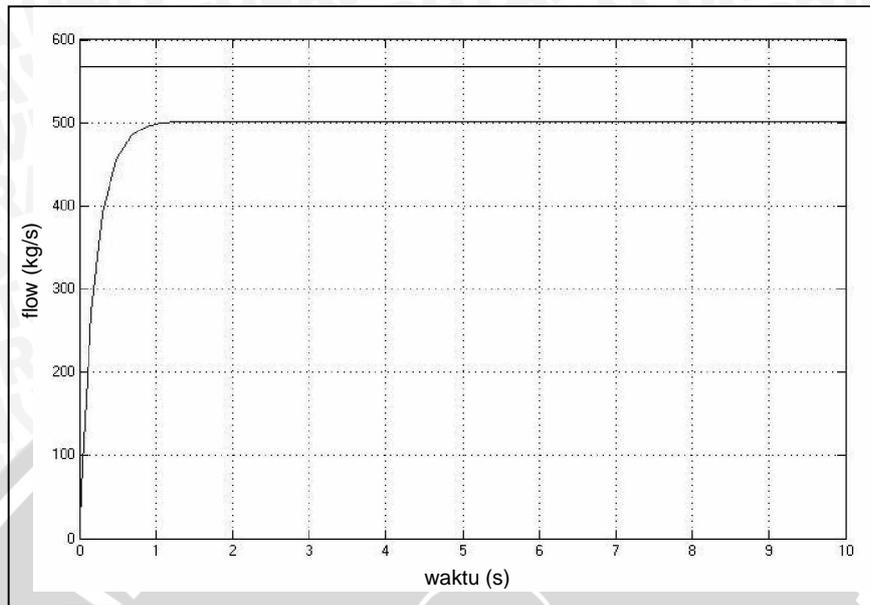
Fungsi alih maju dari *loop slave* adalah $G(s)H(s) = \frac{0,64}{1,5s + 1}$. Dengan bantuan program MATLAB, dari fungsi alih tersebut diperoleh grafik *root locus* sebagai berikut:



Gambar 4.10. Diagram *Root Locus* Kontrol *Flow*
Sumber : Perancangan

Diinginkan *settling time* sebesar 1 detik. Sesuai persamaan 2.11, fungsi alih *loop* tertutup $\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{2K_p / (1 + 0,64K_p)}{1,5 / (1 + 0,64K_p)s + 1}$ memiliki konstanta waktu $\tau = \frac{1}{5}$ dan akar penyebut di $s = -\frac{(1 + 0,64K_p)}{1,5} = -5$. Nilai penguatan yang dipilih sebagai konstanta proporsional adalah 10,2.

Respon *loop* slave setelah diberi penguatan proporsional dan diberi masukan *step* sebesar 578 kg/s adalah sebagai berikut



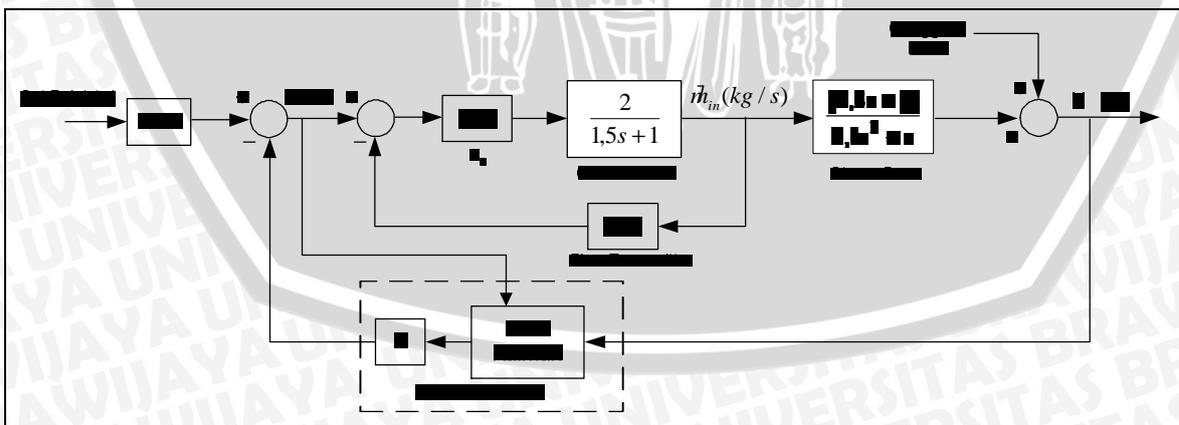
Gambar 4.11. Respon *Loop* Tertutup Kontrol *Flow* dengan nilai $K_p=10,2$ dan setpoint 578 kg/s

Sumber : Perancangan

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa pada respon sistem terdapat *settling time* sebesar 1 detik dan *error steady state* 13,5 %. Hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya penguatan proporsional (K_p), *loop* slave dapat memberikan respon yang cukup cepat.

4.4. Penyusunan Model *State Space* (Ruang Keadaan)

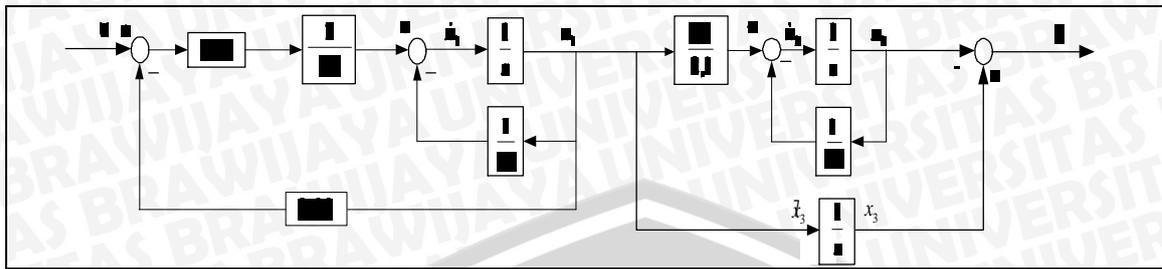
Diagram blok keseluruhan sistem adalah sebagai berikut



Gambar 4.12. Diagram Blok Keseluruhan Sistem

Sumber : Perancangan

Setelah tahap pemodelan masing-masing parameter, kemudian data-data dimasukkan dalam diagram blok untuk mencari persamaan keadaannya.



Gambar 4.13. Diagram Blok *State Space* Sistem
Sumber : Perancangan

Berdasarkan Gambar 4.15 maka diperoleh *state* sistem sebagai berikut :

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{1,5}x_1 + (10,2 \cdot \frac{2}{1,5})(u - 0,32x_1) = -5,02x_1 + 13,6u$$

$$\dot{x}_2 = \frac{2,7}{2,1}x_1 - \frac{1}{2,1}x_2$$

$$\dot{x}_3 = x_1$$

$$y = -x_2 + x_3$$

(4.20)

Bentuk umum persamaan keadaan menjadi :

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + Bu$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5,02 & 0 & 0 \\ 1,28 & -0,48 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 13,6 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

(4.21)

$$y = C\vec{x} + Du$$

$$y = [0 \quad -1 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [0]u$$

(4.22)

4.5. Keterkendalian dan Keteramatan

Dari subbab 2.10 disebutkan bahwa suatu sistem dikatakan terkendali secara sempurna jika dan hanya jika matriks keterkendalian:

$$Co = [B \mid AB \mid \dots \mid A^{(n-1)}B]$$

mempunyai rank sama dengan orde sistem (rank Co=n)

Dengan menggunakan program MATLAB diperoleh matriks uji keterkendalian sebagai berikut:

$$Co = \begin{bmatrix} 13,6 & -68,27 & 342,72 \\ 0 & 17,41 & -95,74 \\ 0 & 13,6 & -68,27 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Dari perhitungan matriks uji keterkendalian di atas, didapatkan rank matriks uji keterkendalian adalah 3. Jadi sistem tersebut mempunyai rank matriks uji keterkendalian yang besarnya sama dengan orde sistem, sehingga sistem dikatakan dapat terkendali secara penuh.

Dari subbab 2.10 disebutkan bahwa suatu sistem akan teramati jika dan hanya jika memenuhi matriks uji keteramatan sebagai berikut

$$Ob = [C \mid CA \mid \dots \mid CA^{(n-1)}]^T$$

mempunyai rank sama dengan orde sistem (rank $Ob=n$)

Dengan menggunakan program MATLAB diperoleh matriks uji keteramatan sebagai berikut:

$$Ob = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ -0,28 & 0,48 & 0 \\ 2,02 & -0,23 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Dari perhitungan matriks uji keteramatan di atas, didapatkan rank matriks uji keteramatan adalah 3. Jadi sistem tersebut mempunyai rank matriks uji keteramatan yang besarnya sama dengan orde sistem, sehingga sistem dapat teramati secara penuh.

BAB V

PENGENDALIAN OPTIMAL DAN SIMULASI SISTEM

5.1. Formulasi Permasalahan Optimal

Permasalahan optimal yang dibahas adalah bagaimana mengatur besar arus listrik yang masuk pada *control valve* yang mempengaruhi laju aliran dari *feedwater*, sehingga dapat meminimumkan *error steady state* atau kesalahan keadaan mantap yang terjadi pada *level steam drum* dengan melalui beberapa batasan antara lain :

- *Range* kerja *level* pada *steam drum* antara 0,61 – 0,71 m.
- Laju aliran maksimum *feedwater* sebesar 586,04 kg/s.

5.2. Perancangan Kontroler

Pada Bab II telah dijelaskan bahwa perancangan kontroler dengan metode *state space* menggunakan 2 langkah perancangan yang saling tidak terkait, dan dapat dilaksanakan secara terpisah, yaitu:

1. Metode perancangan kontroler secara teoritis dapat dilakukan jika diasumsikan bahwa semua *state* dapat diukur.
2. Berdasar pada kenyataan praktis bahwa seringkali tidak seluruh *state* dapat diukur maka digunakan metode perancangan yang memperkirakan seluruh *state* berdasarkan sebagian *state* yang terukur yang disebut perancangan *estimator*.

5.2.1. Perancangan Kontroler Optimal

Perancangan pengendali optimal, yang dalam hal ini model disajikan dalam bentuk ruang keadaan, bertujuan untuk membentuk mendapatkan sinyal pengendali optimal $u(k)$. Dengan indeks performansi kuadratik dirumuskan sebagai berikut (Ogata, K. 1995):

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (5.1)$$

dari sistem yang dinyatakan dengan :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (5.2)$$

dengan hukum pengendalian optimal

$$U(k) = -Kx(k) \quad (5.3)$$

Dimana :

- Q dan R adalah matriks bobot yang pemilihannya dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*). Syarat matriks Q adalah matriks simetris, semidefinit positif dan real ($Q \geq 0$), sedangkan matriks R adalah matriks simetris, definit positif dan real ($R > 0$).
- K adalah matrik umpan balik optimal dimana $K = -R^{-1}B^T P$, dengan P diperoleh dengan menyelesaikan persamaan riccati :

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \tag{5.4}$$

Matrik P adalah matrik solusi dari persamaan Riccati. Jika nilai-nilai matrik P telah diketahui, kemudian disubstitusikan ke persamaan $K = -R^{-1}B^T P$. Sehingga dapat diketahui nilai matrik umpan balik optimal (K) yang meminimumkan *cost function* J .

5.2.2. Penentuan Matriks Bobot Q dan R

Matriks bobot adalah matriks Q dan R . Pemilihan matriks Q dan R dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*). Dengan syarat, matriks Q adalah matriks simetris, semidefinit positif dan real ($Q \geq 0$). Matriks Q merupakan matriks berorde 3×3 yang ditulis sebagai

$$Q = \begin{bmatrix} q & 0 & 0 \\ 0 & q & 0 \\ 0 & 0 & q \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

Matriks Q adalah matriks diagonal dengan komponen-komponennya q , dan bila diadakan pemisahan akan diperoleh matriks identitas yang dikalikan dengan konstanta q .

Sedangkan matriks R adalah matriks simetris, definit positif dan real ($R > 0$). Matriks R merupakan matriks berorde 1×1 yang ditulis sebagai

$$R = [r] \tag{5.6}$$

Matriks R adalah matriks diagonal dengan komponen-komponennya r , dan bila diadakan pemisahan akan diperoleh matriks identitas yang dikalikan dengan konstanta r .

Dengan matriks bobot Q dan R ditentukan berdasarkan pada pedoman pemilihan matriks bobot sebagai berikut:

- Makin besar Q , maka makin besar pula harga elemen matriks umpan balik K , dan mempercepat *steady state*
- Makin besar R , maka harga matriks umpan balik K makin kecil sehingga sistem mengalami keterlambatan mencapai *steady state*. Tetapi, matriks R berkaitan dengan pemakaian energi, sehingga jika nilai elemen matriks R diperbesar, maka akan semakin menghemat energi.

Untuk menghitung besarnya nilai penguatan (*gain*) optimal K , dan *gain estimator* L , digunakan bantuan program Matlab. Untuk mendapatkan *gain* K dan L , terlebih dahulu harus memilih matriks bobot Q dan R . Pemilihan matriks bobot Q dan R ini berdasarkan nilai sisa relatif yang paling kecil. Perhitungan nilai sisa relatif tersebut dapat dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*). Yaitu dengan mengubah-ubah nilai matriks Q , sedangkan matriks R tetap bernilai 10. Dari tabel dapat dilihat bahwa nilai sisa relatif terkecil dihasilkan oleh matriks $Q=750$. Proses selanjutnya, nilai matriks R yang diubah-ubah dengan nilai matriks Q tetap. Dan nilai sisa relatif terkecil dihasilkan oleh matriks $R=10$. Sehingga dapat ditetapkan bahwa kombinasi matriks bobot Q dan R yang menghasilkan nilai sisa relatif terkecil adalah

$$Q = \begin{bmatrix} 750 & 0 & 0 \\ 0 & 750 & 0 \\ 0 & 0 & 750 \end{bmatrix}, \text{ dan } R = [10]. \quad (5.7)$$

Dengan melakukan pemilihan nilai sisa relatif paling kecil, diharapkan akan memperoleh perbaikan karakteristik sistem.

Berikut ini adalah tabel yang menunjukkan nilai sisa relatif untuk berbagai nilai matriks bobot Q dan R .

No	Q	R	Nilai Sisa Relatif
1	450	25	$1,0583 \cdot 10^{-15}$
2	500	25	$1,9034 \cdot 10^{-15}$
3	550	25	$1,2547 \cdot 10^{-15}$
4	600	25	$1,7579 \cdot 10^{-15}$
5	650	25	$1,5237 \cdot 10^{-15}$
6	700	25	$1,4555 \cdot 10^{-15}$
7	750	25	$7,5610 \cdot 10^{-16}$
8	800	25	$2,0967 \cdot 10^{-15}$
9	750	1	$6,3338 \cdot 10^{-15}$
10	750	5	$5,1611 \cdot 10^{-15}$
11	750	10	$4,1456 \cdot 10^{-16}$
12	750	15	$1,1846 \cdot 10^{-15}$
13	750	20	$1,8953 \cdot 10^{-15}$
14	750	30	$8,3432 \cdot 10^{-16}$
15	750	35	$1,2065 \cdot 10^{-15}$
16	750	45	$7,1303 \cdot 10^{-16}$
17	750	50	$1,8153 \cdot 10^{-15}$

Tabel 5.1. Nilai sisa relatif untuk berbagai matriks bobot Q dan R .

Sumber: Hasil Perhitungan

5.3. Simulasi Sistem

Verifikasi perancangan sistem kendali optimal dilakukan dengan simulasi terhadap sistem yang telah dimodelkan. Simulasi dilakukan dengan bantuan program Matlab. Simulasi ini dilakukan untuk mengamati respon sistem terhadap gangguan dan sinyal referensi.

Respon transien sistem dapat diketahui dengan memberikan sinyal uji tertentu. Sinyal uji yang lazim dipakai adalah sinyal masukan tangga satuan (*unit step*). Sinyal uji ini memberikan respon yang mudah diamati dan dianalisis. Dari respon dengan masukan *unit step* ini, kita dapat dengan mudah mengamati waktu naik (*rise time, t_r*), lonjakan maksimum (*maximum overshoot, M_p*), *settling time (t_s)*, dan kesalahan keadaan mantap sistem (*error steady state, e_{ss}*).

Untuk mengetahui keandalan sistem saat diberi umpan balik, maka pada sub bab ini akan ditampilkan grafik sistem dengan menggunakan umpan balik LQR dan LQG, sehingga keduanya dapat dibandingkan. Seluruh grafik di bab ini menggambarkan besarnya amplitudo (*level*) sebagai fungsi waktu.

5.3.1. Respon Sistem Dengan Umpan Balik LQR

Untuk mendapatkan matriks umpan balik LQR, maka terlebih dahulu harus didapatkan penyelesaian persamaan Riccati. Dalam usaha untuk mendapatkan penyelesaian persamaan Riccati ini, melibatkan matriks bobot Q dan R , yang nilainya telah ditetapkan sebelumnya. Dengan menggunakan bantuan paket program Matlab, maka didapatkan penyelesaian persamaan Riccati dan matriks umpan balik LQR sebagai berikut:

$$P = \begin{bmatrix} 6,2 & 2,4 & 6,4 \\ 2,4 & 673,8 & -579,5 \\ 6,4 & -579,5 & 1501,7 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Setelah diperoleh penyelesaian persamaan Riccati, maka dengan menggunakan paket program Matlab pula, didapatkan matriks umpan balik sebagai berikut:

$$K = [8,41 \quad 3,21 \quad 8,66] \quad (5.9)$$

Matriks umpan balik K tersebut di atas, digunakan untuk memperoleh hukum pengendalian optimal yang menghasilkan sinyal pengendali yang optimal $u^*(t)$.

Setelah menentukan matrik bobot Q , R dan mendapatkan gain optimal K , maka simulasi dapat dilakukan. Karena keluaran sistem yang diinginkan adalah *level steam drum*

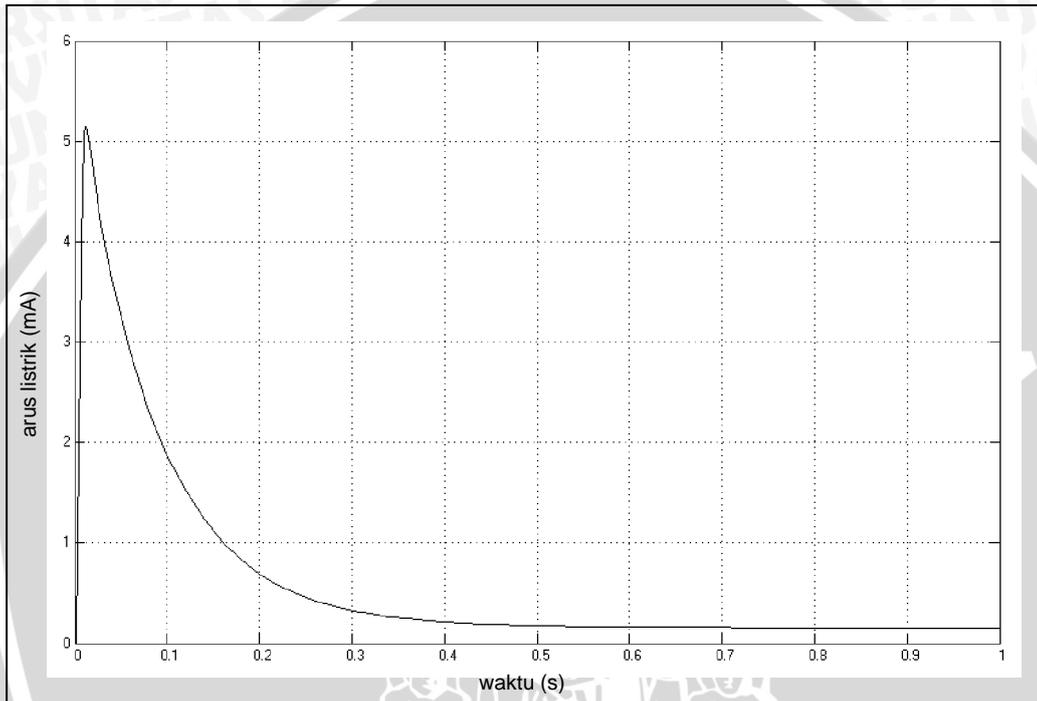
0,66 m, maka untuk mendapatkan keluaran yang diinginkan tersebut akan digunakan filter untuk mengukur masukan referensinya.

Persamaan filter yang akan digunakan adalah (Follinger, 1994 : 467) :

$$M = [C(BK - A)^{-1} B]^{-1} \quad (5.10)$$

Dengan menggunakan bantuan paket program Matlab, maka didapatkan :

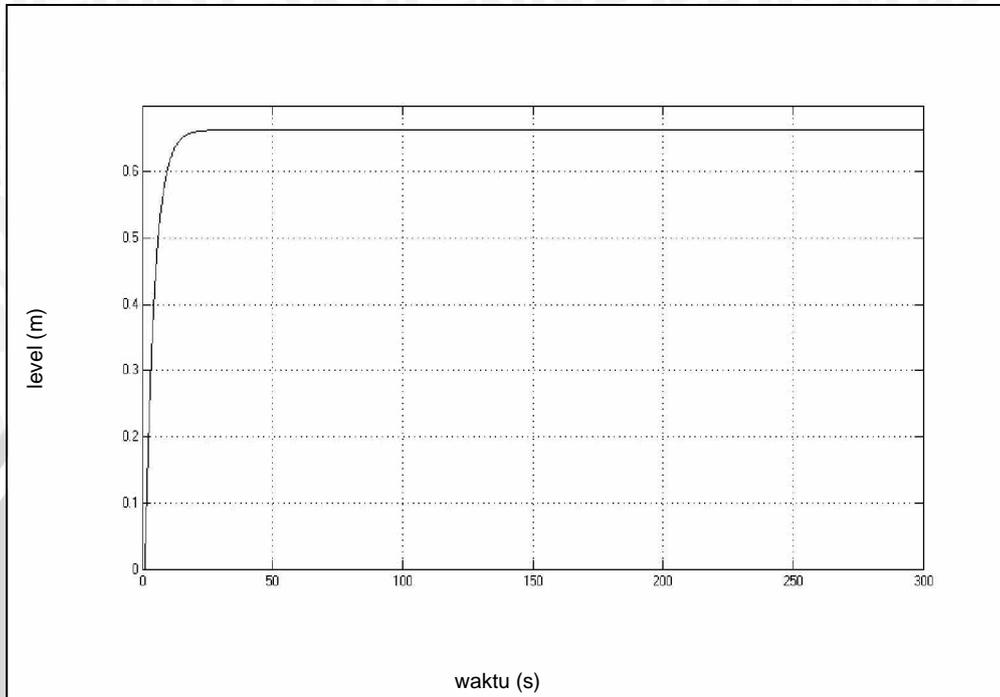
$$M = [8,7] \quad (5.11)$$



Gambar 5.1. Sinyal Kontrol Optimal dengan *set point* 0,66m dan umpan balik LQR

Sumber: Hasil Simulasi

Setelah didapatkan matriks umpan balik yang dapat mengoptimalkan sistem, diperoleh *level steam drum* dengan performansi yang lebih baik. Kondisi tersebut dapat dilihat dari grafik respon sistem setelah diberi umpan balik LQR berikut:



Gambar 5.2. Respon sistem dengan umpan balik LQR pada *set point* 0,66m
Sumber: Hasil Simulasi

Dari grafik dapat diketahui bahwa

<i>Maximum overshoot</i> (<i>peak amplitude</i>) (%)	<i>Settling time</i> (<i>detik</i>)	<i>Rise time</i> (<i>detik</i>)	<i>Steady State</i> <i>Error</i> (%)
0	24	7,85	0,43

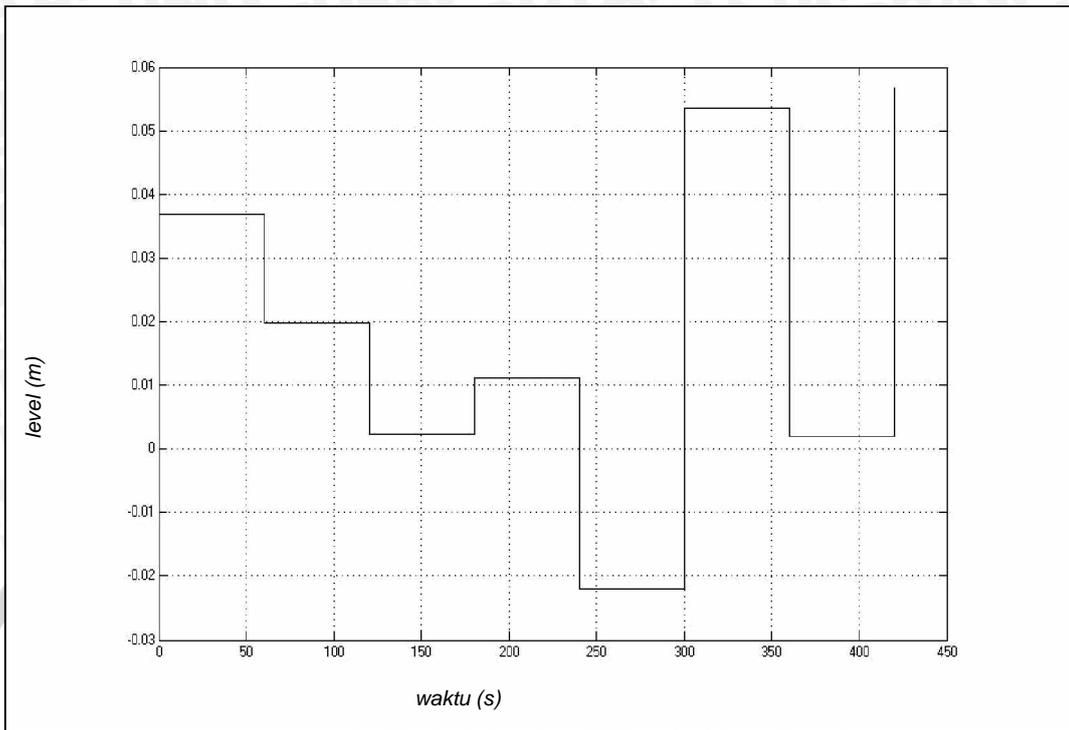
Tabel 5.3. Respon sistem dengan umpan balik LQR pada *set point* 0,66m

Pada grafik respon sistem dengan umpan balik LQR, performansi sistem adalah tercapainya keadaan mantap dalam waktu 24 detik, *rise time* sebesar 7,85 detik, dan terdapat kesalahan keadaan mantap sebesar 0%.

5.3.2. Respon Sistem Terhadap Gangguan

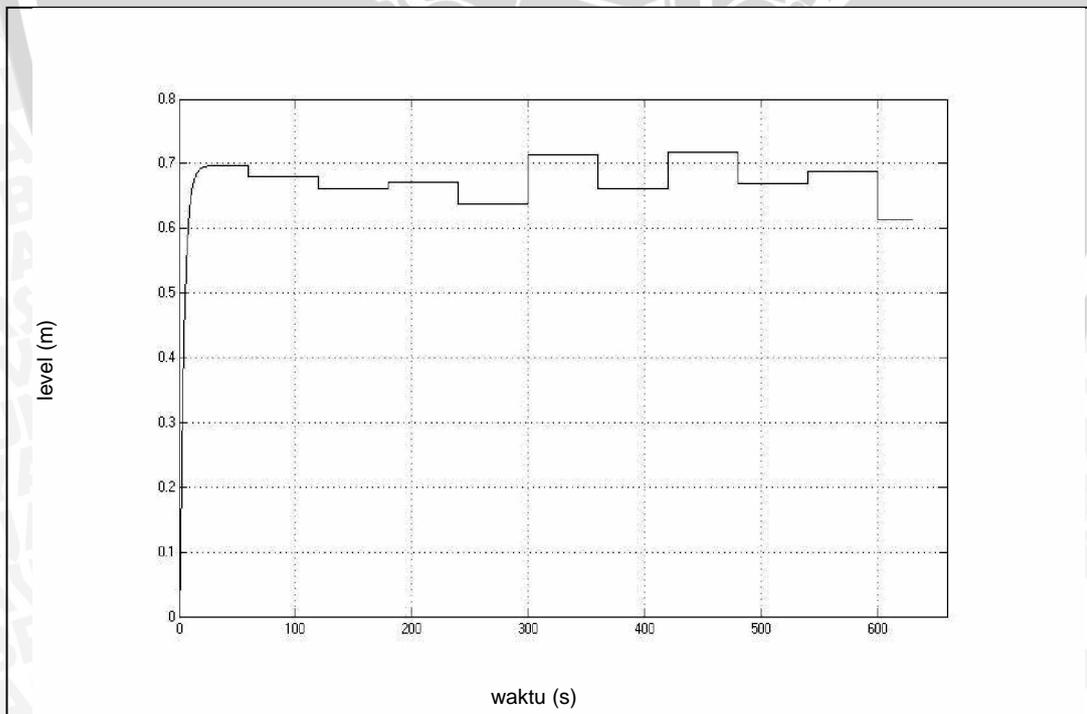
Umpan balik LQR dan *estimator* Kalman mempunyai cara penyelesaian yang serupa. Untuk mendapatkan matriks umpan balik *estimator* maka terlebih dahulu harus didapatkan penyelesaian persamaan Riccati. Dalam mendapatkan penyelesaian persamaan Riccati ini, diperlukan matriks R_w dan R_v yang nilainya telah ditentukan sebelumnya.

Simulasi gangguan dengan variasi gangguan dan ketelitian sensor yang diwakili oleh matriks $R_w=0.001$ dan $R_v=0.065$ ditunjukkan pada grafik berikut



Gambar 5.3. Simulasi gangguan perubahan level steam drum
Sumber: Hasil Simulasi

Dan grafik respon sistem terhadap gangguan adalah



Gambar 5.4. Respon sistem dengan umpan balik LQR pada set point 0,66m terhadap gangguan
Sumber: Hasil Simulasi

Grafik respon sistem terhadap gangguan di atas menunjukkan bahwa pada sistem terdapat error rata-rata sebesar 9,09 % (0,06m).

5.3.3. Respon Sistem Dengan Umpan Balik LQG

Sistem pengendalian LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) bertujuan untuk mempertahankan keluaran pada kondisi setimbang. LQG merupakan perbaikan dari metode LQR, karena LQG adalah metode optimalisasi yang memperhitungkan pengaruh *noise*, jadi metode LQG adalah kombinasi dari metode LQR dan *estimator* (Filter Kalman).

Estimator diharapkan dapat mengoptimalkan sistem, agar diperoleh performansi sistem yang lebih baik. Dengan menggunakan paket program Matlab, didapatkan penyelesaian persamaan Riccati sebagai berikut:

$$P = \begin{bmatrix} 0,0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0011 & 0,0003 \\ 0 & 0,0003 & 0,0085 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Setelah diperoleh penyelesaian persamaan Riccati, juga dengan paket program Matlab, didapatkan matriks *gain estimator*

$$L = \begin{bmatrix} -0,0001 \\ -0,0121 \\ 0,1265 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Dengan bantuan paket program Matlab, diperoleh model *state space* yang akan membentuk regulator LQG sebagai berikut:

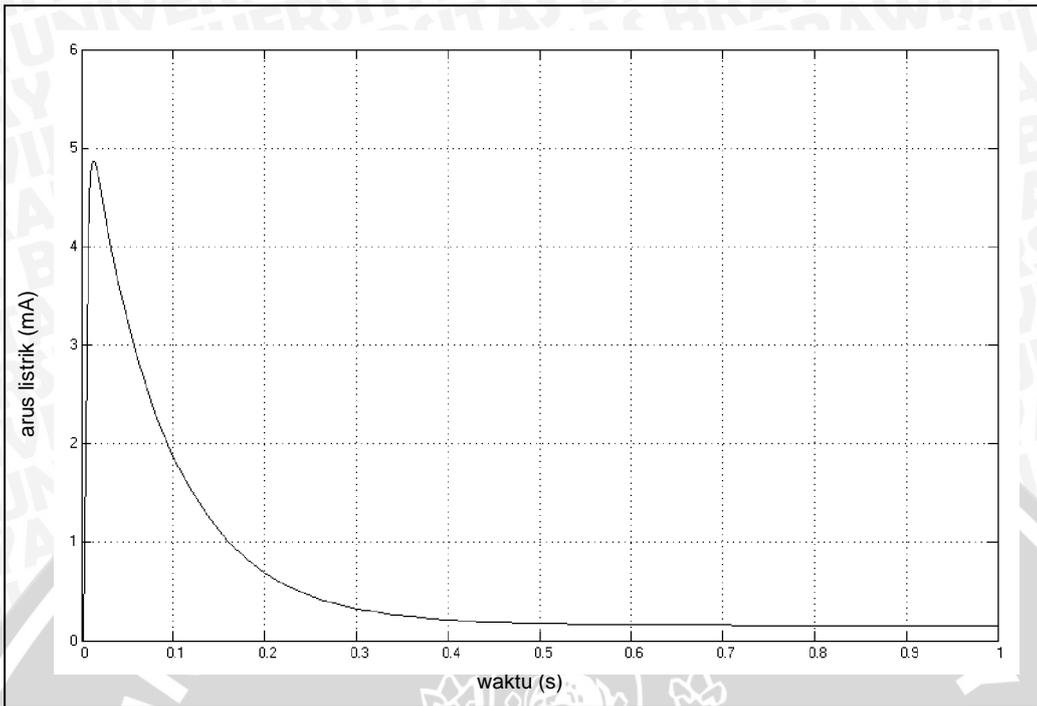
$$A_{LQG} = \begin{bmatrix} -5,02 & -0,0001 & 0,0001 \\ 1,28 & -0,4921 & 0,0121 \\ 1 & 0,1265 & -0,1265 \end{bmatrix}$$

$$B_{LQG} = \begin{bmatrix} 13,6 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{LQG} = [8,41 \quad 3,21 \quad 8,66]$$

$$D_{LQG} = [0] \quad (5.11)$$

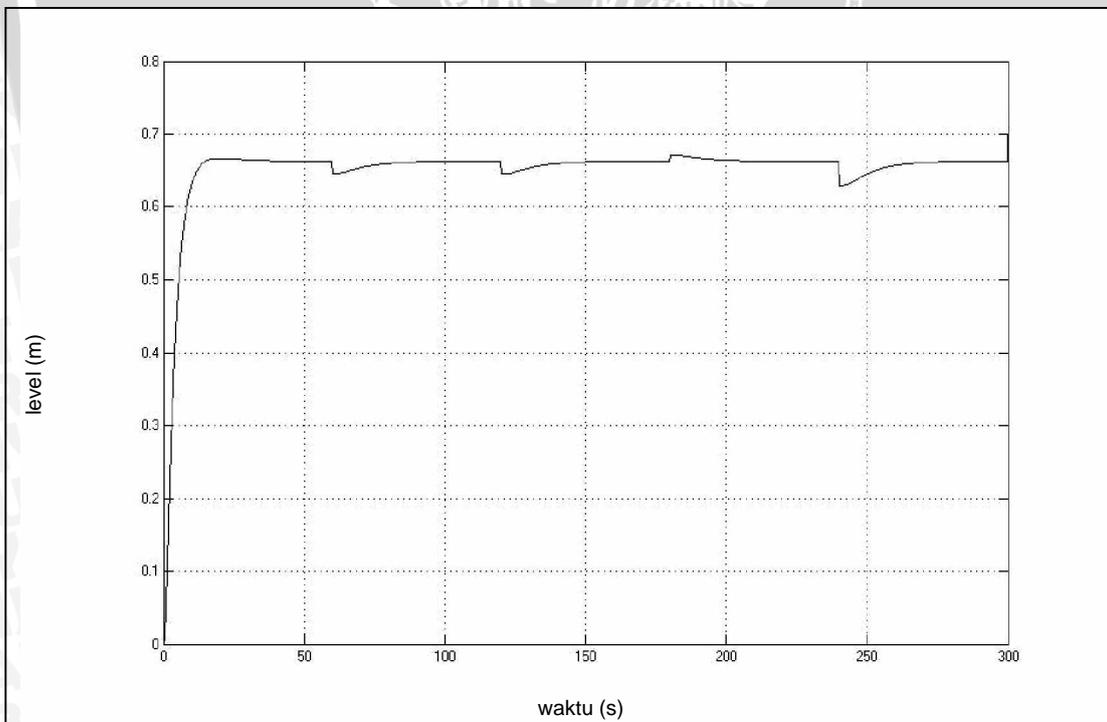
Sinyal kontrol optimal dengan kontroler LQG diberikan pada gambar berikut:



Gambar 5.5. Sinyal pengendali optimal dengan kontroler LQG pada *set point* 0,66m

Sumber: Hasil Simulasi

Respon sistem dengan kontroler LQG diberikan pada gambar berikut:



Gambar 5.6. Respon sistem dengan kontroler LQG pada *set point* 0,66m terhadap gangguan

Sumber: Hasil Simulasi

Dari grafik dapat diketahui bahwa

<i>Maximum overshoot</i> (<i>peak amplitude</i>) (%)	<i>Settling time</i> (<i>detik</i>)	<i>Rise time</i> (<i>detik</i>)	<i>Steady State</i> <i>Error</i> (%)
0	25,5	7,75	0,45

Tabel 5.4. Respon sistem dengan kontroler LQG pada *set point* 0,66m

Dari Gambar 5.6 dan Tabel 5.4 di atas, terlihat bahwa sistem dengan umpan balik LQG lebih lambat mencapai kondisi setimbangnya. Jika dibandingkan dengan respon sistem dengan umpan balik LQR, kelebihan dari penerapan metode LQG adalah dapat meminimumkan pengaruh gangguan yang terjadi pada sistem.



BAB VI PENUTUP

6.1. Kesimpulan

Dari proses perancangan, simulasi dan analisa pada sistem *steam drum* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan pengendalian optimal dengan metode *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) dapat dilakukan dengan baik. Dengan melihat hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Untuk mendapatkan suatu pengendalian optimal pada pengendalian *level steam drum* dilakukan penyelesaian permasalahan LQR yang menghasilkan matriks umpan balik $K = [8,41 \quad 3,21 \quad 8,66]$ dimana akan menghasilkan sinyal umpan balik optimal $u(t)$ pada sistem.
2. Penggunaan estimator optimal (filter kalman) dapat memperbaiki performansi sistem terhadap gangguan dan dengan menyelesaikan persamaan Riccati pada estimator maka diperoleh matriks umpan balik estimator $L = \begin{bmatrix} -0,0001 \\ -0,0121 \\ 0,1265 \end{bmatrix}$.
3. Perbaikan performansi sistem pada *steam drum* dapat dicapai dengan sebuah pendekatan optimal menggunakan metode LQG. Pengaruh pengendalian optimal dengan metode LQG pada *steam drum* dengan gangguan acak menghasilkan *rise time* sebesar 7,75 detik, *settling time* sebesar 25,5 detik, dan kesalahan keadaan mantap sebesar 0,45 %. Jadi, penerapan kendali optimal pada *steam drum* menghasilkan respon yang cukup baik.

6.2. Saran

1. Pemilihan matriks bobot Q dan R pada skripsi ini dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*) yang membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mendapatkan hasilnya, juga dengan akurasi yang rendah. Oleh karena itu perlu memasukkan faktor *constraints* (kendala) untuk mendapatkan nilai matriks bobot Q dan R tersebut.

2. Perancangan kendali optimal dengan metode *Linear Quadratic Gaussian* yang masih dalam tahap simulasi ini, dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menerapkannya pada sistem fisik yang sesungguhnya dengan lebih memperhatikan faktor kendala yang terjadi di lapangan.



Daftar Pustaka

- Anonim, 1996, *ABB Boiler Operation*.
- Anderson, B., 1989, *Optimal Control – Linear Quadratic Methods*, Prentice-Hall Inc., USA.
- Anggraini, N., 2005, *Desain Kontroler Menggunakan Metode Linear Quadratic Regulator (LQR) Untuk Pengontrolan Suhu Uap Pada Solar Boiler Once Through Mode*, Skripsi: Jurusan Elektro Unibraw, Malang.
- Coughanowr, D. R., 1991, *Process System Analysis And control*, McGraw-Hill Inc., USA.
- Dharma, I. N., 2003, *Analisis Penerapan Hybrid Fuzzy-PI Untuk Memperbaiki Pengendalian Level Air Dalam Steam Drum Boiler di PLTU Paiton Unit 7 & 8*, Skripsi: Jurusan Elektro Unibraw, Malang.
- El-Wakil, M. M., 1985, *Powerplant Technology*, McGraw-Hill Inc., USA.
- Follinger, O., 1994, *Regelungstechnik : Einfuehrung in die Methoden Und ihre Anwendung*, Huthig Buch Verlag, Heidelberg.
- Gunterus, F., 1994, *Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses*, PT. Elex media Komputindo, Jakarta.
- Houpis, C. & D’Azzo J., 1988, *Linear Control Systems Analysis and Design*, McGraw-Hill Inc., USA.
- Kurniawan, I. B., 2005, *Penerapan Kendali Optimal dengan Metode LQG pada Boiler di PT. Camarin Eka Laksana*, Skripsi: Jurusan Elektro Unibraw, Malang.
- Lammers, T., 1998, *Steam Plant Operation*, McGraw-Hill Inc., USA.
- Lewis, F. L. & Syrmos, V. L., 1995, *Optimal Control*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Ogata, K., 1996, *Teknik Kontrol Automatik Jilid I*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Ogata, K., 1996, *Teknik Kontrol Automatik Jilid II*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Philips, C. L., & Harbor, R. D., 1996, *Dasar-Dasar Sistem Kontrol Jilid I*, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Soloman, S., 1994, *Sensors and Control Systems in Manufacturing*, McGraw-Hill Inc., Singapore.
- Shahian, B. & Hassul, M., 1993, *Control System Using Matlab*, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Yamin, R. P., 2004, *Desain Regulator LQG/LTR pada sistem Gerak Longitudinal Pesawat Terbang Boeing 747*, Skripsi: Jurusan Elektro Unibraw, Malang.

Lampiran 1 : Spesifikasi Instrumen

Steam Drum

Panjang : 30,0228 m
Diameter : 1,778 m
Vendor : Asea Brown Boveri (ABB)

Control Valve

Tipe : L0371V2P1
Karakteristik Aliran : Linier
Material : Carbon Steel ASTM A216 WCB
Aksi : Air to Open (ATO)
Ukuran Valve : 14"
Flow Rate : 293,02 kg/s – 276,9 kg/s
Aktuator : Diafragma
Range : 3-15 Psi
Waktu Stroking : 17,6 s
Vendor : ABB – Kent Introl Ltd.

Level Transmitter

Model : 3051S2L
Range : 0,431 m – 0,889 m
Sinyal Keluaran : 4 -20 mA
Vendor : Rosemount

Flow Transmitter

Model : 3095MV
Range : 550 kg/s – 600 kg/s
Sinyal Keluaran : 4 -20 mA
Vendor : Rosemount

I/P Transducer

Model : VPT 05/06/07
Input : 4 - 20 mA
Output : 3 - 15 Psi
Vendor : Yamatake - Honeywell

Lampiran 2 : Listing Program Matlab M-File

Mencari keterkontrolan dan keteramatan sistem

```
A=[-5.02 0 0;  
    1.28 -0.48 0;  
    1 0 0]  
B=[13.6;  
    0;  
    0]  
C=[0 -1 1]  
D=[0]  
Co=ctrb(A,B)  
rank(Co)  
Ob=obsv(A,C)  
rank(Ob)
```

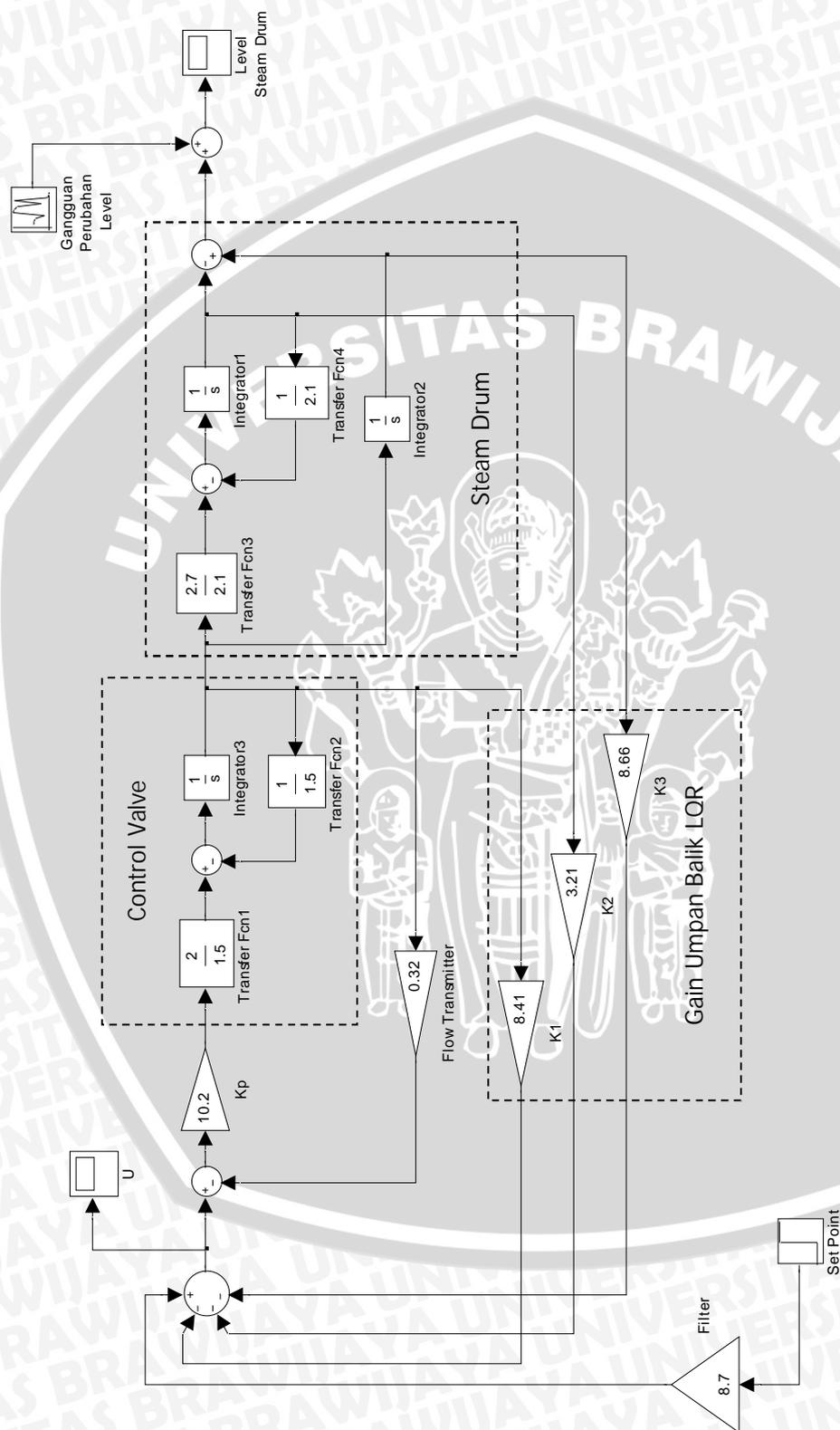
Mencari matriks bobot Q dan R

```
A=[-5.02 0 0;  
    1.28 -0.48 0;  
    1 0 0];  
B=[13.6;  
    0;  
    0];  
C=[0 -1 1];  
D=[0];  
qo=750;  
Q=[qo 0 0;0 qo 0;0 0 qo];  
R=10;  
[P,E,K,S]=care(A,B,Q,R);
```

Mencari matriks gain filter Kalman

```
A=[-5.02 0 0;  
    1.28 -0.48 0;  
    1 0 0];  
B=[13.6;  
    0;  
    0];  
C=[0 -1 1];  
D=[0];  
qo=0.001;  
Q=[qo 0 0;0 qo 0;0 0 qo];  
ro=0.065;  
R=[ro];  
[P,E,L,S]=care(A',C',Q,R)
```

Lampiran 3 : Diagram Blok Kontrol Level dengan Metode LQR



Lampiran 4 : Diagram Blok Kontrol Level dengan Metode LQG

