

repository.ub.ac.id

**PERANCANGAN DAN SIMULASI KONTROL OPTIMAL  
DENGAN METODE *LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)*  
DALAM PENGENDALIAN TEMPERATUR ALAT PENGERING  
GABAH BERENERGI SEKAM DI JURUSAN MESIN FAKULTAS  
TEKNIK UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**SKRIPSI**

*Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik*



**Disusun oleh :**

**AKHMAD YUS ZAINI**

**0001060273-63**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG**

**2007**



**PERANCANGAN DAN SIMULASI KONTROL OPTIMAL  
DENGAN METODE *LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)*  
DALAM PENGENDALIAN TEMPERATUR ALAT PENGERING  
GABAH BERENERGI SEKAM DI JURUSAN MESIN FAKULTAS  
TEKNIK UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :  
**AKHMAD YUS ZAINI**  
0001060273-63

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dipl. Ing. Ir. M. Rusli**  
NIP. 131 653 473

**Fitriana Suhartati, ST.MT.**  
NIP. 132 206 527

repository.ub.ac.id

**PERANCANGAN DAN SIMULASI KONTROL OPTIMAL  
DENGAN METODE *LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)*  
DALAM PENGENDALIAN TEMPERATUR ALAT PENGERING  
GABAH BERENERGI SEKAM DI JURUSAN MESIN FAKULTAS  
TEKNIK UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

Disusun oleh :

**AKHMAD YUS ZAINI**  
0001060273-63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus  
pada tanggal 3 Agustus 2007

**DOSEN PENGUJI**

**Goegoes Dwi N, ST. MT.**  
NIP. 132 318 316

**Ir. Purwanto, MT.**  
NIP. 131 574 847

**Ir. Erni Yudaningtyas, MT.**  
NIP. 131 879 035

**Ir. Retnowati**  
NIP.131 124 656

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Elektro

**Ir. Heru Nurwarsito, M.Kom.**  
NIP. 131 879 033



## KATA PENGANTAR

السَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللَّهِ وَبَرَكَاتُهُ

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena hanya dengan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Perancangan Dan Simulasi Kontrol Optimal Dengan Metode *Linear Quadratic Regulator (LQR)* Dalam Pengendalian Temperatur Alat Pengering Gabah Berenergi Sekam Di Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya“.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam penulisan skripsi ini antara lain:

1. Ayah, Ibu , Mbak Titin dan Yunia yang selalu memberikan motivasi, semangat, dan kasih sayang demi keberhasilan penulis.
2. Bapak Dipl.Ing. Ir. M. Rusli serta Ibu Fitriana S, ST. MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan pengarahan selama proses penyusunan sampai terwujudnya skripsi ini.
3. Bapak Ir. H. Heru Nurwasito, M.Kom sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya, serta bapak Rudi Yuwono, ST. MT sebagai Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Barwijaya.
4. Bapak Dipl-Ing. Ir. M. Rusli sebagai KKDK Sistem Kontrol.
5. Nova, Domi, Wijaya, Heri, Asih, Wachidi, Anas, dan semua teman-teman WEB 2000 yang selalu memberi masukan dan motivasi yang sangat berguna

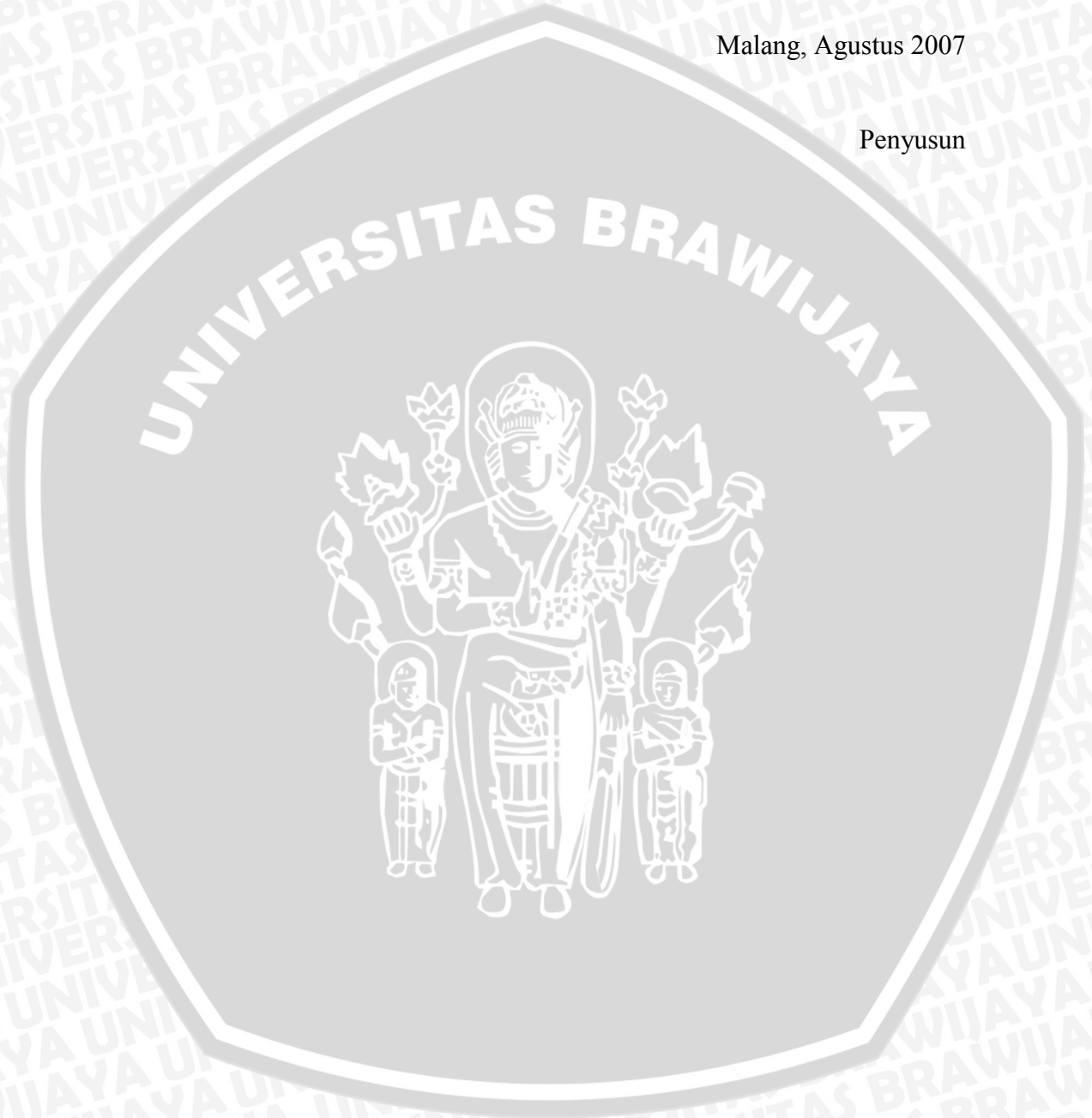
Penulis sudah berusaha untuk menyelesaikan skripsi ini sebaik mungkin. Namun penulis juga menyadari tiada yang sempurna di dunia ini, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan demi pengembangan skripsi ini.

Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan.

وَالسَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللَّهِ وَبَرَكَاتُهُ

Malang, Agustus 2007

Penyusun



# UNIVERSITAS BRAWIJAYA

---

“Ya Allah, ampunilah dosa kami dan kedua orang tua kami, dan sayangilah mereka sebagaimana mereka menyayangi kami di waktu kecil”

Kupersembahkan skripsi ini kepada:

Ayahanda dan Ibunda Tercinta  
Dengan diiringi ucapan terima kasih tiada hingga  
Atas Doa dan Kasih sayangnya yang selalu menyertai



## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	iv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	vi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penulisan.....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	2
<b>BAB II PENERINGAN GABAH DAN SISTEM KONTROL OPTIMAL</b>	
2.1 Pengeringan Gabah .....	4
2.1.1. Proses Pengeringan.....	4
2.1.2. Gabah.....	5
2.1.3. Kelembaban.....	5
2.1.4. Temperatur Udara Pengerin.....	6
2.1.5. Aliran Udara.....	6
2.2. Sistem Kontrol Optimal.....	7
2.2.1 Konsep Sistem Kontrol.....	7
2.2.2 Konsep <i>State</i> Dalam Sistem Kontrol.....	8
2.2.3 Keterkendalian dan Keteramatan.....	12
2.2.3.1 Keterkendalian.....	12
2.2.3.2 Keteramatan.....	13
2.2.4 Konsep Sistem Kontrol Optimal.....	13
2.2.4.1 Optimasi Sistem.....	15
2.2.5 Respon Dinamis Sistem.....	17
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1. Alat Penelitian.....	20
3.2. Rancangan Penelitian.....	20

3.2.1. Pengumpulan Data.....	20
3.2.2. Pemodelan Matematik Sistem.....	20
3.2.3. Analisis Optimal Sistem.....	21
3.2.4. Simulasi Sistem.....	21
3.3. Cara Kerja Penelitian.....	22

#### **BAB IV PEMODELAN SISTEM**

4.1. Pemodelan Alat Pengering Gabah.....	23
4.2. Fungsi Alih Ruang Pembakaran.....	25
4.3. Fungsi Alih Pipa Penukar Kalor.....	26
4.4. Fungsi Alih Ruang Pengering.....	26
4.5. Fungsi Alih Katub Kendali.....	27
4.6. Fungsi Alih Saluran Udara Panas.....	28
4.7. Sistem <i>Loop</i> Terbuka.....	29
4.8. Uji Keterkontrolan dan Keteramatan Sistem.....	29

#### **BAB V PENGENDALIAN OPTIMAL DAN SIMULASI SISTEM**

5.1 Desain Kontroler Menggunakan Metode <i>Linear Quadratic Regulator</i> (LQR).....	32
5.1.1. Metode <i>Linier Quadratic Regulator</i> (LQR).....	32
5.1.2 Penentuan Matriks Bobot Q dan R.....	33
5.1.3 Matriks umpan balik LQR.....	35
5.2. Simulasi Sistem.....	36
5.2.1 Respon Alat Pengering Gabah Sebelum Diberi Umpan Balik... ..	36
5.2.2 Respon Alat Pengering Gabah Dengan Umpan Balik LQR.....	37
5.2.3 Respon Alat Pengering Gabah Dengan Gangguan.....	43

#### **BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN**

6.1. Kesimpulan.....	45
6.2. Saran.....	45

<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	47
-----------------------------	----

<b>LAMPIRAN</b> .....	49
-----------------------	----



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem dinamika.....	9
Gambar 2.2 Representasi sistem dalam bentuk persamaan ruang keadaan.	14
Gambar 2.3 Luasan <i>control area</i> untuk sistem diredam lebih.....	14
Gambar 2.4 Sistem kontrol optimal dengan umpan balik keadaan ( <i>state feedback</i> ).....	17
Gambar 2.5 Respon sistem kurang teredam ( <i>underdamped</i> ).....	18
Gambar 4.1 Instalasi Alat Pengering.....	24
Gambar 4.2. Aliran Energi pada Alat Pengering Gabah.....	25
Gambar 4.3 Blok simulasi alat pengering gabah pada simulink.....	29
Gambar 5.1 Respon sistem dengan sinyal masukan 4 mA sebelum diberi umpan balik optimal.....	37
Gambar 5.2 Respon sinyal pengendali $u(k)$ .....	38
Gambar 5.3 Respon sistem dengan masukan unit step setelah diberi. umpan balik optimal.....	38
Gambar 5.4.1 Respon sistem untuk $Q = 500$ dan $R = 0,01$ .....	40
Gambar 5.4.2 Respon sistem untuk $Q = 550$ dan $R = 0,01$ .....	40
Gambar 5.4.3 Respon sistem untuk $Q = 625$ dan $R = 0,01$ .....	40
Gambar 5.4.4 Respon sistem untuk $Q = 650$ dan $R = 0,01$ .....	41
Gambar 5.4.5 Respon sistem untuk $Q = 750$ dan $R = 0,01$ .....	41
Gambar 5.4.6 Respon sistem untuk $Q = 800$ dan $R = 0,01$ .....	41
Gambar 5.4.7 Respon sistem untuk $Q = 600$ dan $R = 0,001$ .....	42
Gambar 5.4.8 Respon sistem untuk $Q = 600$ dan $R = 0,006$ .....	42
Gambar 5.4.9 Respon sistem untuk $Q = 600$ dan $R = 0,05$ .....	42
Gambar 5.4.10 Respon sistem untuk $Q = 600$ dan $R = 0,1$ .....	43
Gambar 5.5 Respon sistem untuk perubahan temperatur lingkungan dari $28^{\circ}\text{C} - 26^{\circ}\text{C}$ .....	43
Gambar 5.6 Respon sistem untuk perubahan temperatur lingkungan dari $28^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .....	44

**DAFTAR TABEL**

Tabel 5.1 Hasil optimasi sistem untuk berbagai matriks Q dan R..... 34

Tabel 5.2 Hasil optimasi sistem pada pengendalian temperatur  
untuk berbagai matriks Q dan R..... 39



## ABSTRAK

Akhmad Yus Zaini, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Agustus 2007, Perancangan Dan Simulasi Kontrol Optimal Dengan Metode *Linear Quadratic Regulator (LQR)* Dalam Pengendalian Temperatur Alat Pengereng Gabah Berenergi Sekam Di Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Dosen Pembimbing : Dipl. Ing. Ir. M. Rusli dan Fitriana Suhartati, ST. MT.

Kualitas pengeringan gabah sangat dipengaruhi oleh temperatur, kelembaban relatif (RH) dan laju udara pengering. Temperatur merupakan faktor yang paling menentukan keberhasilan pada proses pengeringan karena besarnya temperatur udara pengering menjadi parameter kritis, yang akan berpengaruh pada kenampakan dan keseragaman produk yang dikeringkan serta lama pengeringan. Pada pengeringan gabah untuk konsumsi, temperatur yang aman adalah 45°C-55°C

Pengendalian temperatur pada alat pengering gabah dirancang menggunakan kontrol optimal dengan metode Linear Quadratic Regulator (LQR). Prinsip pengendalian dengan metode LQR adalah dengan meminimumkan indeks performansi sistem dengan menentukan nilai Q dan R terlebih dahulu. Perancangan simulasi pengendalian dilakukan dengan program Matlab 7.0 dengan menentukan terlebih dahulu pemodelan dari sistem alat pengering gabah.

Dari hasil analisis dan simulasi diperoleh hasil yang paling optimal pada nilai matrik bobot  $Q = 600$  dan matrik bobot  $R = 0,01$ . Respon sistem optimal tanpa gangguan mencapai keadaan mantap  $t_s$  sebesar 44 detik dengan *error steady state* sebesar 0%. Sedangkan respon sistem optimal dengan adanya gangguan mencapai keadaan mantap  $t_s$  sebesar 46 detik dengan *error steady state* sebesar 3,26%





## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sekam merupakan limbah padi yang selama ini kurang dimanfaatkan. Untuk memanfaatkan limbah sekam tersebut maka dibuat alat pengering gabah yang menggunakan sekam sebagai bahan bakar / sumber energi dalam proses pengeringan gabah. Sedangkan limbah karbon hasil pembakaran bisa langsung dibuang karena tidak terlalu mengganggu lingkungan atau dapat dimanfaatkan untuk keperluan lain, seperti abu gosok, dan sebagainya.

Kualitas pengeringan sangat dipengaruhi oleh temperatur, kelembaban relatif (RH) dan laju udara pengering. Temperatur merupakan faktor yang paling menentukan keberhasilan pada proses pengeringan karena besarnya temperature udara pengering menjadi parameter kritis, yang akan berpengaruh pada kenampakan dan keseragaman produk yang dikeringkan serta lama pengeringan. Pada pengeringan gabah untuk konsumsi, temperatur yang aman adalah 45°C-55°C.

Semakin tinggi temperatur yang digunakan untuk pengeringan, maka semakin tinggi energi yang digunakan dan semakin cepat laju pengeringan. Akan tetapi pengeringan yang terlalu cepat dapat merusak bahan, yaitu menyebabkan pengerasan pada permukaan bahan. Disamping itu, penggunaan temperatur yang terlalu tinggi dapat merusak daya fisiologi biji-bijian.

Mengingat bahwa temperatur udara pengering sulit dikontrol secara manual, maka perlu diterapkan pengendali temperatur pada alat pengering berenergi sekam. Salah satu metode kontrol yang dapat digunakan sebagai alternatif adalah *Linear Quadratic Regulator* (LQR).

### 1.2 Rumusan Masalah

Berdasar uraian pada latar belakang di atas, maka dapat disusun rumusan masalah sebagai berikut :

- 1). Bagaimana merancang sebuah kontroler optimal pada pengering gabah berenergi sekam?
- 2). Bagaimana mensimulasikan pengendalian *flow* pengering gabah berenergi sekam menggunakan kendali optimal dengan metode LQR?

### 1.3 Batasan Masalah

Dalam penyusunan skripsi ini dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut :

- Temperatur yang digunakan pada proses pengeringan dibatasi sesuai dengan kondisi bahan (gabah), yaitu pada temperatur 45°-55°C.
- Penurunan model sistem pengeringan gabah berdasarkan pada persamaan keseimbangan energi.
- Laju udara pengering pada sistem alirannya konstan, yaitu  $V_p=14,5$  m/s
- Simulasi dilakukan dengan menggunakan paket program Matlab

### 1.4 Tujuan Penulisan

Tujuan yang akan dicapai dari pengerjaan skripsi ini adalah memberikan alternatif lain dengan metode LQR pada sistem pengaturan temperatur ruang pengering agar sesuai dengan temperatur yang diinginkan

### 1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang dipakai pada pembuatan skripsi ini adalah :

**Bab I :       Pendahuluan**

Bab ini terdiri atas latar belakang, tujuan, rumusan masalah, batasan masalah dan sistematika pembahasan.

**Bab II :       Dasar teori**

Bab ini berisi dasar teori tentang sistem pengeringan gabah dan optimal kontrol dengan metode *Linear Quadratic Regulator*.

**Bab III:       Metodologi penelitian**

Pada bab ini membahas mengenai metode penelitian yang dilakukan untuk mencapai sasaran penelitian.

**Bab IV : Pemodelan dan optimasi sistem**

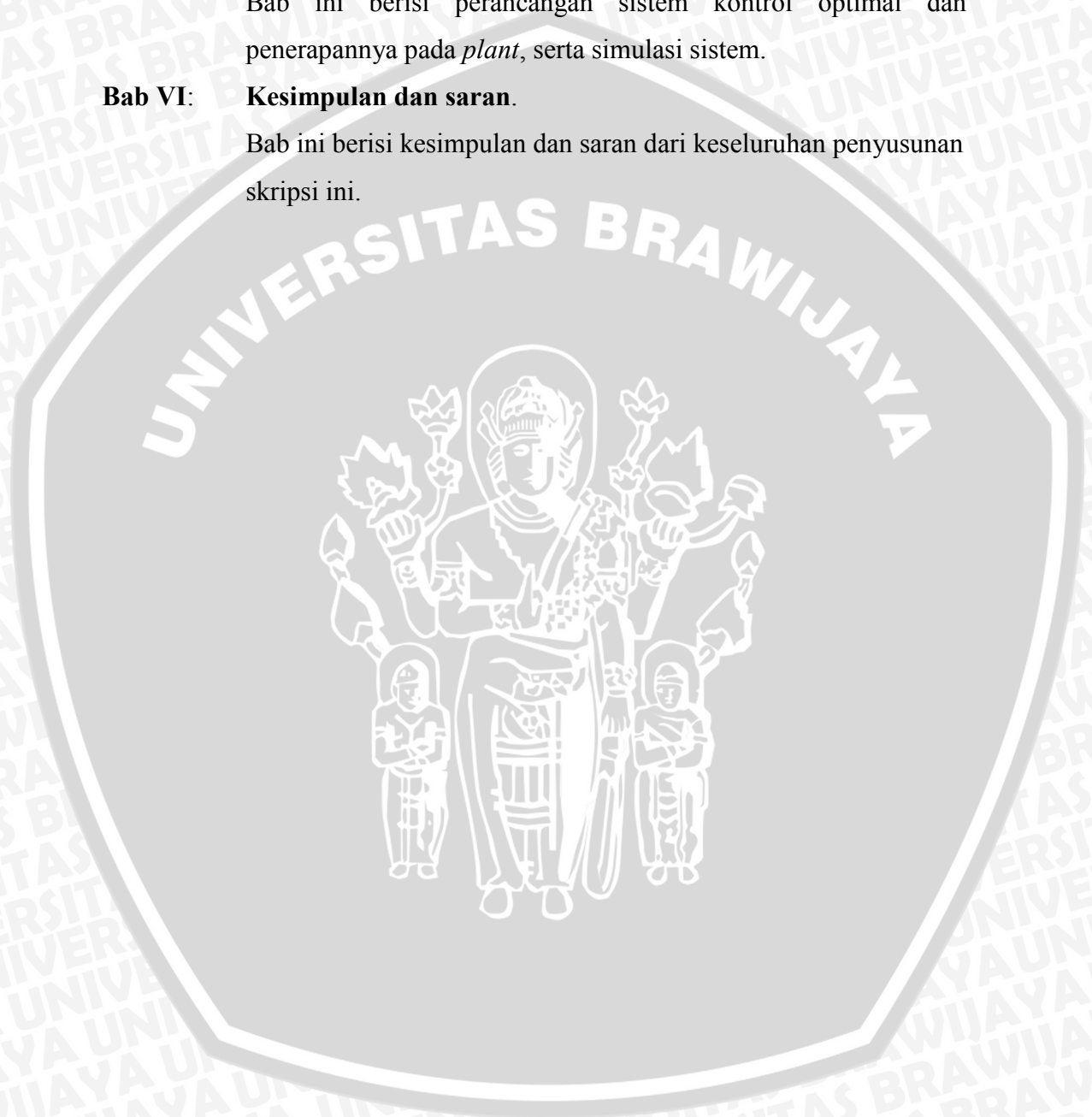
Bab ini berisi pembahasan mengenai penurunan rumus alat pengering gabah berikut bentuk persamaan ruang keadaan.

**Bab V : Pengujian dan simulasi sistem**

Bab ini berisi perancangan sistem kontrol optimal dan penerapannya pada *plant*, serta simulasi sistem.

**Bab VI: Kesimpulan dan saran.**

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari keseluruhan penyusunan skripsi ini.





## BAB II

### PENGERINGAN GABAH DAN SISTEM KONTROL OPTIMAL

#### 2.1. Pengeringan Gabah

##### 2.1.1. Proses Pengeringan

Proses pengeringan merupakan suatu proses pemindahan atau pengeluaran kandungan air bahan sehingga mencapai kadar tertentu dengan tujuan memperlambat kecepatan kerusakan saat penyimpanan. Beberapa kendala yang berpengaruh diantaranya: (1) temperatur, (2) kelembaban udara lingkungan, (3) kecepatan aliran udara pengering, (4) besarnya prosentase kandungan air yang ingin dijangkau, (5) energi pengeringan dan (6) kapasitas pengeringannya. (Suharto, 1991)

Jumlah air dalam suatu bahan biasanya dinyatakan dalam bentuk persen dan disebut kadar air bahan. Ada dua metode untuk menggambarkan kadar air suatu bahan, yaitu kadar air basis basah dan kadar air basis kering. (Hall, 1980).

Pada proses pengeringan, panas digunakan untuk menguapkan air dari biji-bijian dan menggerakkan udara untuk membawa air yang telah diuapkan. Laju pengeringan antara lain ditentukan oleh kadar air awal, temperatur pengeringan, temperatur udara sekitar dan kelembaban relatif (RH). Metode pengeringan, tipe pengering dan efisiensi dari peralatan juga mempengaruhi laju pengeringan. (Wimberley, 1982)

Tujuan dari dilakukannya pengeringan, terutama terhadap hasil agroindustri adalah untuk mengurangi kadar air bahan sampai batas tertentu, dimana perkembangan mikroorganisme dan kegiatan enzim yang dapat menyebabkan pembusukan terhambat atau terhenti, sehingga dapat disimpan untuk waktu yang lama.

Proses pengeringan terbagi menjadi tiga kategori: (Earle, 1982)

- 1) Pengering udara dan pengeringan yang berhubungan langsung di bawah tekanan atmosfer. Pada pengeringan ini panas dipindahkan menembus bahan, baik dari udara maupun dari permukaan yang dipanaskan.

- 2) Pengeringan hampa udara. Pada pengeringan ini panas dipindahkan secara konduksi dan terjadi lebih cepat pada tekanan rendah.
- 3) Pengeringan beku. Pada pengeringan ini uap disublimasikan keluar dari bahan pangan beku.

Sedangkan faktor-faktor yang mempengaruhi penguapan dinyatakan sebagai berikut: ( Earle, 1982)

- 1 Laju pemanasan waktu energi (panas) dipindahkan pada bahan
- 2 Jumlah panas yang dibutuhkan untuk menguap tiap kg air
- 3 Temperatur maksimum pada bahan
- 4 Tekanan pada saat terjadi penguapan
- 5 Perubahan lain yang mungkin terjadi di dalam bahan selama proses penguapan berlangsung

### 2.1.2. Gabah

Gabah adalah butiran dari biji tanaman padi yang sudah terlepas dari bulir-bulirnya. Gabah merupakan salah satu tahapan pengolahan padi untuk menjadi bahan pangan yang disebut beras. Gabah terdiri dari butiran padi yang masih terbungkus oleh kulit yang disebut sekam. Gabah pada umumnya memiliki kelembaban sekitar 24%.

Kelembaban yang ditargetkan dari proses pengeringan adalah 14%. Kelembaban relatif ruang pengering pada saat kelembaban gabah 14%, tercapai keseimbangan dengan udara pengering yang memiliki kelembaban relatif 75%. Masa jenis gabah basah kurang lebih 625 kg/m<sup>3</sup>. (Winarno, 1995)

### 2.1.3. Kelembaban

Kelembaban menunjukkan banyaknya kandungan air per satuan berat bahan. Ada dua metode untuk penentuan kadar air, yaitu *wet basis* (berdasarkan berat basah bahan) dan *dry basis* (berdasarkan berat kering bahan). Karena berat basah bahan selalu berubah-ubah, digunakan berat kering bahan. (Taib, 1988)

#### i) Kelembaban absolut

Kelembaban absolut adalah berat uap air tiap satuan volume udara (besarnya tidak dipengaruhi oleh berat udara). Kelembaban absolut biasa



ditunjukkan dengan gram air tiap meter kubik udara atmosfer pada temperatur yang spesifik. (Alonso, 1990)

#### ii) Kelembaban Relatif

Kelembaban relatif adalah rasio antara jumlah aktual uap air yang mampu ditampung oleh udara atmosfer dibanding jumlah yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi jenuh. Kelembaban relatif dipengaruhi temperatur dan tekanan atmosfer. (Alonso, 1990)

#### 2.1.4. Temperatur Udara Pengering

Temperatur udara berkaitan erat dengan tekanan uap air di udara. Pada alat pengering, terjadi proses pemanasan udara tanpa menambah atau mengurangi jumlah air yang dikandungnya. Pada pengeringan gabah untuk konsumsi, temperatur udara yang aman adalah 45° C-55° C.

#### 2.1.5. Aliran Udara

Aliran udara dalam proses pengeringan padi berfungsi untuk mengangkut uap air yang dilepaskan oleh bahan keudara akibat adanya pemanasan selama proses pengeringan. Karena air yang dikeluarkan dari bahan dalam bentuk uap, maka harus secepatnya dipindahkan dan dijauhkan dari bahan. Jika tidak, air akan menjenuhkan atmosfer pada permukaan bahan, sehingga memperlambat pengeluaran air selanjutnya.

Aliran udara yang cepat akan membawa uap air dari permukaan bahan dan mencegah air tersebut menjadi jenuh dipermukaan bahan. Selain itu, juga berfungsi untuk menghantarkan panas dari *heater* ke ruang plenum, kemudian dari plenum ke bahan. Jadi besar kecilnya laju aliran udara akan mempengaruhi kecepatan laju pengeringan pada padi. Pergerakan ini dibantu oleh sebuah *blower*. (Brooker, 1981).



## 2.2. Sistem Kontrol Optimal

### 2.2.1 Konsep Sistem Kontrol

Sistem adalah kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama-sama dan melakukan suatu sasaran tertentu. Sistem tidak dibatasi hanya untuk sistem fisik saja. Konsep sistem dapat digunakan pada gejala yang abstrak dan dinamis. Kontrol berarti mengukur nilai dari variabel sistem yang dikontrol dan menerapkan variabel yang dimanipulasi ke sistem untuk mengoreksi atau membatasi penyimpangan nilai yang diukur dari nilai yang dikehendaki.

Sistem kontrol merupakan sebuah sistem yang terdiri atas satu atau beberapa peralatan yang berfungsi untuk menengendalikan sistem lain yang berhubungan dengan sebuah proses. Variabel yang dikontrol adalah besaran atau keadaan yang diukur dan dikontrol, dalam keadaan normal variabel yang dikontrol adalah keluaran dari sistem. Variabel yang dimanipulasi adalah besaran atau keadaan yang diubah oleh kontroler untuk mempengaruhi nilai variabel yang dikontrol.

Kontrol umpan balik mengacu pada suatu operasi, yang dengan adanya gangguan, cenderung mengurangi perbedaan antara keluaran dari sistem dan suatu acuan masukan. Sistem yang mempertahankan hubungan yang ditentukan antara keluaran dan beberapa masukan acuan, dengan membandingkannya dan dengan menggunakan perbedaan sebagai alat kontrol dinamakan sistem kontrol umpan balik. Sistem kontrol umpan balik sering disebut sistem kontrol loop tertutup. Praktisnya, istilah kontrol umpan balik dan kontrol loop tertutup dapat saling dipertukarkan penggunaannya.

Pada sistem kontrol loop tertutup, sinyal kesalahan yang bekerja, yaitu perbedaan antara sinyal masukan dan sinyal umpan balik (yang mungkin sinyal keluarannya sendiri atau fungsi dari sinyal keluaran dan turunannya), disajikan ke kontroler sedemikian rupa untuk mengurangi kesalahan dan membawa keluaran sistem ke nilai yang dikehendaki. Istilah sistem kontrol loop tertutup selalu berarti penggunaan aksi kontrol umpan balik untuk mengurangi kesalahan sistem.

Sedangkan suatu sistem yang keluarannya tidak mempunyai pengaruh terhadap aksi kontrol disebut sistem kontrol loop terbuka. Sistem kontrol loop

terbuka keluarannya tidak dapat digunakan sebagai perbandingan umpan balik dengan masukan. Jadi untuk tiap masukan acuan berhubungan dengan kondisi operasi tertentu, sebagai akibat ketetapan dari sistem tergantung pada kalibrasi. Dengan adanya gangguan, sistem kontrol loop terbuka tidak dapat melakukan tugas seperti yang diharapkan. Sistem kontrol loop terbuka dapat digunakan hanya jika hubungan antara masukan dan keluaran diketahui dan tidak terdapat gangguan internal maupun eksternal.

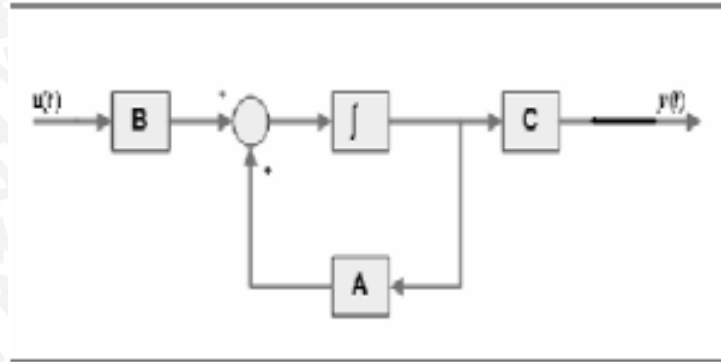
Suatu kelebihan dari sistem kontrol loop tertutup adalah penggunaan umpan balik yang membuat respons sistem relatif kurang peka terhadap gangguan eksternal dan perubahan internal pada parameter sistem. Jadi mungkin dapat digunakan komponen-komponen yang relatif kurang teliti dan murah untuk mendapatkan pengontrolan *plant* dengan teliti, hal ini tidak mungkin diperoleh pada sistem loop terbuka. Dari segi kestabilan, sistem kontrol loop terbuka lebih mudah dibuat karena kestabilan bukan merupakan persoalan utama. Sebaliknya kestabilan selalu merupakan persoalan utama pada sistem kontrol loop tertutup karena cenderung terjadi kesalahan akibat koreksi berlebih yang dapat menimbulkan osilasi pada amplitudo konstan ataupun berubah.

Untuk sistem dengan masukan yang telah diketahui sebelumnya dan tidak ada gangguan, maka disarankan untuk menggunakan kontrol loop terbuka. Sistem kontrol loop tertutup hanya mempunyai kelebihan hanya jika terdapat gangguan yang tidak dapat diramal dan atau perubahan yang tidak dapat diramal pada komponen sistem. (Ogata, 1997)

### 2.2.2. Konsep *State* Dalam Sistem Kontrol

Untuk menganalisa sistem pengendalian optimal, terlebih dahulu harus didapatkan persamaan (model matematika) dari sistem yang akan mewakili unjuk kerja dari sistem tersebut. Dari persamaan ini kemudian direpresentasikan ke dalam persamaan ruang-keadaan.





**Gambar 2.1** Sistem dinamika

Sumber : Ogata K., 1997:66

Pada sistem dinamika yang ditunjukkan Gambar 2.1., keluaran  $y(t)$  untuk  $t \geq t_1$  tergantung pada nilai  $y(t_1)$  dan masukan  $u(t)$  untuk  $t \geq t_1$ . Sistem dinamika harus melibatkan elemen-elemen yang mengingat nilai masukan untuk  $t \geq t_1$ . Karena *integrator* dalam sistem kontrol waktu kontinyu bekerja sebagai alat pengingat (*memory device*), maka keluaran dari *integrator* demikian dianggap sebagai variabel yang menentukan kedudukan internal dari sistem dinamika. Jadi, keluaran dari *integrator* bekerja sebagai *variabel keadaan*. Jumlah variabel keadaan untuk menentukan dinamika sistem secara lengkap adalah sama dengan jumlah *integrator* yang terlibat dalam sistem (Ogata, 1997:67).

Anggap sistem dengan banyak masukan, banyak keluaran melibatkan  $n$  integrator. Anggap juga bahwa terdapat  $r$  masukan  $u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t)$ , dan  $m$  keluaran  $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$ . Ditetapkan bahwa  $n$  keluaran integrator sebagai variabel keadaan  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ . Sehingga sistem dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \dot{x}_1(t) &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \dots \dots \dots (2.1) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \dot{x}_n(t) &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \end{aligned}$$

dan keluaran  $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$  diberikan oleh:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= g_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ y_2(t) &= g_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \dots \dots \dots (2.2) \end{aligned}$$





$$y_m(t) = g_m(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t)$$

Jika didefinisikan

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}, \quad f(x, u, t) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \end{bmatrix}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \end{bmatrix}, \quad g(x, u, t) = \begin{bmatrix} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \end{bmatrix}$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_r(t) \end{bmatrix},$$

maka persamaan (2.1) dan (2.2) menjadi

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x, u, t) \text{ atau } \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= g(x, u, t) \text{ atau } y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Pada Persamaan (2.3), bila fungsi vektor  $f$  dan/atau  $g$  berubah terhadap waktu  $t$ , maka sistem disebut sistem yang bervariasi terhadap waktu. Dan sebaliknya bila vektor  $f$  dan  $g$  tidak berubah terhadap waktu  $t$ , maka sistem tersebut disebut sistem *time invariant*. Bentuk ruang-keadaan dari sistem *time invariant* dapat ditinjau dari sistem orde ke- $n$  berikut:

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = u \quad (2.4)$$

Dengan mengingat bahwa pengetahuan mengenai

$y(0), \dot{y}(0), \dots, y^{(n-1)}(0)$ , bersama-sama dengan masukan  $u(t)$  untuk  $t \geq 0$ , menentukan secara lengkap perilaku yang akan datang dari sistem, maka dapat dipilih  $y(t), \dot{y}(t), \dots, y^{(n-1)}(t)$  sebagai himpunan  $n$  variabel keadaan.



Didefinisikan

$$\begin{aligned} x_1 &= y \\ x_2 &= \dot{y} \\ &\dots \\ &\dots \\ x_n &= y^{(n-1)} \end{aligned}$$

sehingga persamaan (2.1) dapat ditulis sebagai:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ &\dots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n \end{aligned}$$

$$\dot{x}_n = -a_n x_1 - \dots - a_1 x_n + u$$

atau

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \tag{2.5}$$

di mana

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Persamaan keluarannya menjadi

$$y = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$



atau

$$y = Cx \dots\dots\dots (2.6)$$

di mana

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

Persamaan differensial orde pertama, Persamaan (2.5), adalah persamaan keadaan dan persamaan aljabar, Persamaan (2.6) adalah persamaan keluaran.

**2.2.3. Keterkendalian dan Keteramatan**

Konsep keterkendalian dan keteramatan memegang peranan penting pada sistem kontrol optimal multivariabel. Syarat keterkendalian dan keteramatan menentukan adanya penyelesaian lengkap dari persamaan kontrol optimal.

Keterkendalian berkaitan dengan masalah perancangan penempatan pole. Dengan keterkendalian menunjukkan bahwa sistem dapat dikontrol dan semua pole dari sistem dapat ditempatkan di lokasi yang diinginkan. Keteramatan berhubungan dengan perancangan *state estimator*. Dengan adanya keteramatan, maka bagi sistem yang tidak dapat menginformasikan seluruh variabel *state*-nya, dapat digunakan sebuah *estimator* yang dapat mengestimasi semua *state* agar dapat dirancang sistem yang memiliki informasi *state* secara lengkap.(BC. Kuo, 1987)

**2.2.3.1. Keterkendalian**

Suatu sistem dikatakan dapat dikendalikan jika sistem tersebut dimungkinkan untuk mendapatkan suatu vektor kendali *u*, yang dalam waktu berhingga dapat membawa sistem tersebut dari suatu kondisi awal *x(0)* ke kondisi lain *x(f)*

**Matriks keterkendalian  $[B \ | \ AB \ | \ \dots \ A^{(n-1)}B \ ]$  ..... (2.7)**

Agar sistem dapat dikendalikan, maka:

1. tidak ada kolom yang merupakan kelipatan kolom lainnya
2. nilai determinannya tidak sama dengan nol





### 2.2.3.2. Keteramatan

Suatu sistem dikatakan dapat teramati apabila setiap keadaan awal  $x(0)$  dapat ditentukan oleh pengamat  $y(kT)$  selama periode waktu terhingga

$$\text{Matriks keteramatan } [C^T \mid A^T C^T \mid \dots \mid (A^T)^{n-1} C^T] \dots \dots \dots (2.8)$$

Agar sistem dapat diamati, maka:

1. tidak ada kolom yang merupakan kelipatan kolom lainnya
2. nilai determinannya tidak sama dengan nol

### 2.2.4. Konsep Sistem Kontrol Optimal

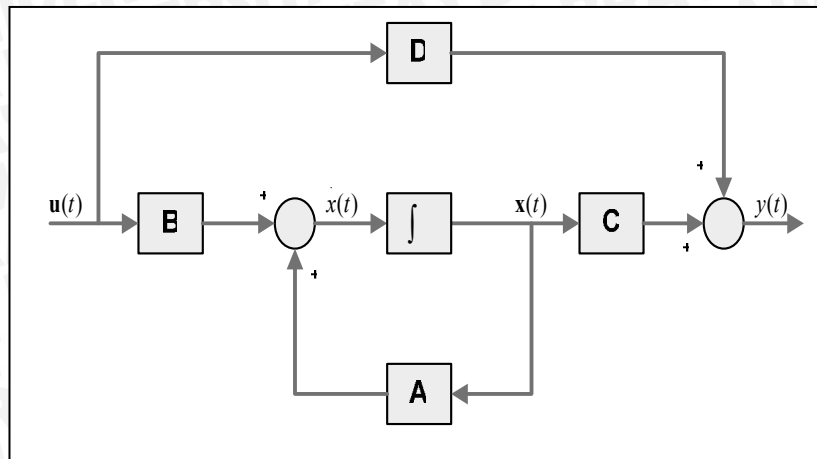
Sistem optimal adalah sistem yang mempunyai unjuk kerja terbaik (*best performance*) terhadap suatu acuan tertentu. Sistem kontrol optimal memerlukan adanya suatu kriteria optimasi yang dapat meminimumkan hasil pengukuran dengan deviasi perilaku sistem terhadap perilaku idealnya. (Lewis, 1996)

Pengukuran tersebut dilakukan dengan menentukan *indeks performansi*, yang merupakan suatu fungsi dari suatu harga yang dapat dianggap menunjukkan seberapa besar kinerja sistem yang sesungguhnya sesuai dengan kinerja yang diinginkan. *Indeks performansi* merupakan tolok ukur suatu sistem kontrol optimal. Sistem akan optimal bila *indeks performansi* adalah minimum.

Supaya sistem tersebut dapat dikontrol, maka perlu dibuat model matematis yang menghubungkan antara masukan dan keluaran. Pada sistem kontrol optimal, yang banyak digunakan adalah persamaan keadaan. Dalam persamaan keadaan, persamaan diferensial dari sistem yang semula berorde  $n$ , diubah menjadi  $n$  buah persamaan diferensial berorde satu secara simultan, dan ditulis dalam notasi vektor matriks

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

$$y = Cx + Du$$



**Gambar 2.2** Representasi sistem dalam bentuk persamaan ruang keadaan.

Sumber : Ogata, 1997 : 257

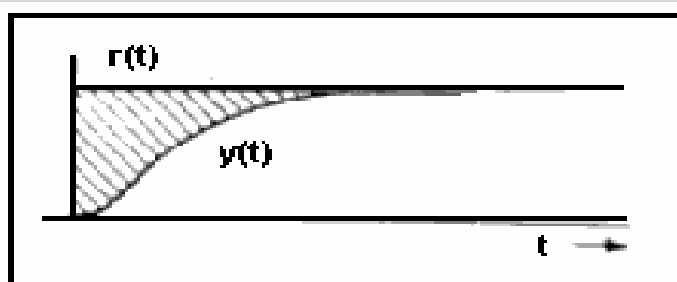
Hubungan persamaan keadaan dengan fungsi alih sistem:

$$T(s) = C(sI - A)^{-1} B + D$$

Dengan menggunakan model persamaan keadaan, maka sistem kontrol optimal dapat diterapkan pada sistem atau proses yang lebih kompleks.

Cara untuk mengukur kualitas respon transien pada sistem kontrol yang diberi input *unit step* yaitu dengan *control area*. Performansi sistem terbaik ditandai apabila harga keluaran  $y(t)$  mendekati nilai *setting*  $r(t)$ , sehingga luasan *error*  $E = Y - C$  (mendekati nol).

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 berfungsi sebagai tolok ukur untuk meminimumkan luasan *error*. Contoh luasan *control area* bisa dilihat pada gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Luasan *control area* untuk sistem diredam lebih.

Sumber : D'Azzo Houppis, 1988:546

### 2.2.4.1. Optimasi Sistem

Di dalam perancangan sistem pengendalian optimal, diperlukan adanya kriteria optimasi yang dapat meminimumkan deviasi hasil pengukuran perilaku sistem dibandingkan dengan perilaku idealnya.

Pengukuran tersebut dilakukan dengan menentukan suatu tolok ukur, yang disebut *indeks performansi* atau disebut juga *cost function*, yang merupakan suatu fungsi dari nilai yang dapat dianggap menunjukkan seberapa besar kinerja sistem yang sesungguhnya, apakah sesuai dengan kinerja sistem yang diinginkan.

Adalah sangat penting untuk memilih *indeks performansi* yang sesuai, karena *indeks performansi* tersebut menentukan elemen-elemen dari pengendali optimal yang akan digunakan. Tujuan dari pemilihan *indeks performansi* adalah untuk mendapatkan sinyal kontrol  $u(k)$  yang nantinya akan meminimumkan *indeks performansi* suatu sistem.

Berikut adalah persamaan-persamaan yang digunakan dalam pengendalian optimal. Dengan sistem:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \dots\dots\dots\end{aligned} \quad (2.9)$$

dan hukum pengendalian optimal:

$$u = -Kx \dots\dots\dots \quad (2.10)$$

serta *indeks performansi* linier kuadratik yang didefinisikan sebagai berikut:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \dots\dots\dots \quad (2.11)$$

Di mana Q dan R adalah matrik bobot yang dipilih berdasarkan apa yang dibutuhkan untuk dioptimalkan, dari *state* yang dikehendaki.

Q = matriks simetris, semi definit positif, real ( $Q \geq 0$ )

R = matrik simetris, definit positif, real ( $R > 0$ )

Substitusi persamaan (2.10) ke persamaan (2.9) dihasilkan:

$$\dot{x} = Ax - BKx = (A - BK)x \dots\dots\dots \quad (2.12)$$

Substitusi persamaan (2.10) ke persamaan (2.11) menghasilkan:

$$J = \int_{t_0}^{\infty} [x^T Qx + x^T K R Kx] dt$$



$$= \int x^T [Q + K^T RK] x dt \dots\dots\dots (2.13)$$

Pembahasan berikutnya memberikan pemecahan masalah pengoptimalan.

Ditetapkan bahwa:

$$x^T (Q + K^T RK)x = -\frac{d}{dt} (x^T Px) \dots\dots\dots (2.14)$$

Selanjutnya dihasilkan:

$$\begin{aligned} x^T (Q + K^T RK)x &= \dot{x}Px - x^T Px \\ &= -x^T [(A - BK^T)P + P(A - BK)]x \dots\dots\dots (2.15) \end{aligned}$$

Dengan membandingkan kedua ruas persamaan di atas dan memperhatikan bahwa persamaan tersebut harus memenuhi untuk setiap nilai  $x$ , disyaratkan bahwa:

$$(A - BK^T)P + P(A - BK) = -(Q + K^T RK) \dots\dots\dots (2.16)$$

mengingat bahwa  $x(\infty) = 0$ , maka indeks kinerja dapat ditulis sebagai:

$$J = x^T(0) Px(0) \dots\dots\dots (2.17)$$

Untuk mendapatkan pemecahan masalah kontrol optimal kuadratik, dapat dilakukan proses perhitungan sebagai berikut:

Diasumsikan:  $Q = T^T T$ , maka persamaan (2.16) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A^T P + PA + [TK - (T^T)^{-1} B^T P^T]^T [TK - (T^T)^{-1} B^T P] \\ - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \dots\dots\dots (2.18) \end{aligned}$$

Untuk meminimumkan J terhadap K mensyaratkan peminimuman:

$$X^T [TK - (T^T)^{-1} B^T P]^T [TK - (T^T)^{-1} B^T P] x \text{ terhadap } K. TK = (T^T)^{-1} B^T P,$$

sehingga

$$K = T^{-1} (T^T)^{-1} B^T P = R^{-1} B^T P \dots\dots\dots (2.19)$$

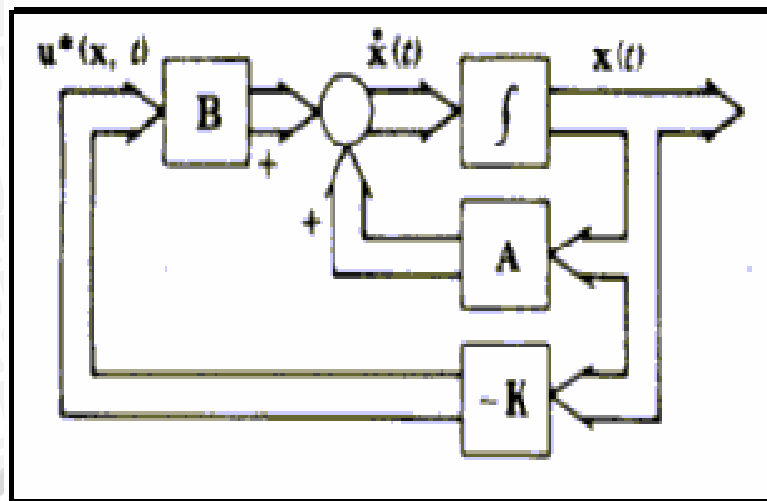
Dari persamaan di atas, didapatkan hukum pengendalian optimal sebagai berikut:

$$u(t) = -Kx(t) = -R^{-1} B^T Px(t) \dots\dots\dots (2.20)$$

Matriks P pada (2.19) harus memenuhi persamaan (2.16), sehingga

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \dots\dots\dots (2.21)$$

Persamaan (2.21) di atas, disebut persamaan Riccati.



**Gambar 2.4** Sistem kontrol optimal dengan umpan balik keadaan(*state feedback*)

Sumber: D’Azzo Houppis, 1998:553

### 2.2.5. Respon Dinamis Sistem

Pendefinisian kriteria performansi berdasarkan grafik respon sistem diperlihatkan pada gambar dibawah (gambar 2.10). Harga 1 pada gambar tersebut menunjukkan nilai *setpoint* atau harga akhir yang ingin dicapai oleh sistem.

Dalam pembahasan mengenai sistem kontrol, masalah yang menjadi pokok perhatian adalah : ( Ogata, 1997)

- Kestabilan dan kemampuan sistem meredam gangguan. Sistem yang stabil mempunyai akar-akar persamaan karakteristik di sebelah kiri bidang  $s$ .
- Time delay* ( $t_d$ ) : waktu yang dibutuhkan oleh respon untuk mencapai  $\frac{1}{2}$  harga akhir pada saat lonjakan pertama.
- Timen rise* ( $t_r$ ): waktu yang dibutuhkan oleh respon untuk naik dari 10% menjadi 90%, 5% menjadi 95%, atau 0% menjadi 100% dari nilai akhir. Untuk sistem orde dua redaman kurang (*underdamped*), biasanya digunakan waktu naik 0-100%, sedangkan untuk sistem redaman lebih (*overdamped*), biasanya digunakan waktu naik 10-90%.
- Time settling* ( $t_s$ ) : waktu yang dibutuhkan oleh respon untuk mencapai harga tertentu dan tetap dalam nilai akhir (biasanya 5% atau 2%)

$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (\text{kriteria } 2\%) \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

$$t_s = \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad (\text{kriteria } 5\%) \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

e. *Maximum overshoot* ( $M_p$ ) : overshoot maksimum adalah nilai puncak kurva tanggapan diukur dari satuan. Apabila nilai akhir keadaan tunak tanggapannya jauh dari satu, maka biasa digunakan persen overshoot maksimum, dan didefinisikan oleh :

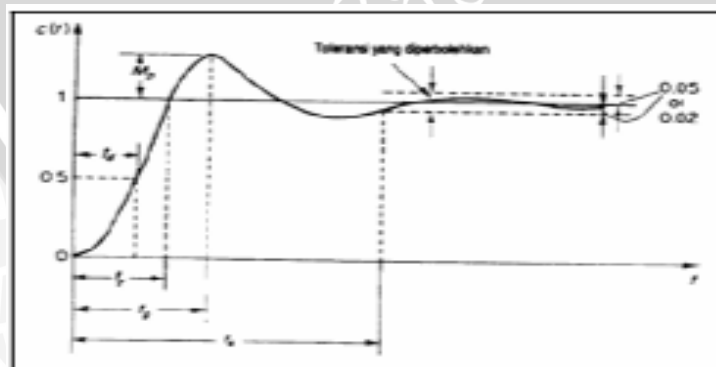
$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

f. *Time peak* ( $t_p$ ) : waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai lonjakan maksimum.

g. *Error Steady State*: sinyal kesalahan yang merupakan selisih dari nilai referensi dengan nilai sebenarnya pada waktu tak terhingga. Secara ideal, respon ideal yang dihasilkan oleh sistem pada keadaan tunak ( $t \rightarrow \infty$ ) harus berimpit dengan *setpoint* yang diberikan. Dalam praktek, kondisi ideal tersebut tidak mungkin dicapai. Pada keadaan tunak selalu terdapat selisih antara respon dinamik sistem dengan nilai *setpoint*. Selisih inilah yang kemudian didefinisikan sebagai *error steady state* ( $e_{ss}$ ). Dengan kata lain  $e_{ss}$  menunjukkan tingkat akurasi akhir sistem.

$$e_{ss} = \frac{\text{nilai.sebenarnya} - \text{nilai.referensi}}{\text{nilai.referensi}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

Contoh ini bisa dilihat secara jelas pada gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Respon sistem kurang teredam (*underdamped*)

Sumber : Ogata K, 1997:286





- $M_p$  = overshoot maximum
- $t_p$  = tim peak
- $t_d$  = time delay
- $t_s$  = time settling
- $t_r$  = time rise



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam pengerjaan skripsi ini adalah:

1. Seperangkat *personal computer* dengan prosesor Intel Celeron 2,26 GHz dan sistem operasi Windows XP.
2. Program MATLAB.

### 3.2. Rancangan Penelitian

Dalam skripsi ini dilakukan simulasi untuk melihat kinerja kontrol optimal dengan metode *Linear Quadratic Regulator* dalam pengendalian temperatur alat pengering gabah berenergi sekam. Untuk merealisasikan tujuan yang ingin dicapai dalam penulisan skripsi ini, langkah-langkah yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

#### 3.2.1. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan diperoleh dari data sekunder skripsi Sri Agustiningtyas “Simulasi Pengendalian Temperatur Alat Pengering Gabah Berenergi Sekam Di Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy” dan data primer yang diambil dari Laboratorium Tenaga Surya dan Energi Alternatif Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Data-data tersebut meliputi sistem yang akan diteliti, parameter-parameter, dan komponen-komponen yang menyusun sistem tersebut.

#### 3.2.2. Pemodelan Matematik 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 mentransformasi-*Laplace* kannya dengan menganggap bahwa syarat awal sama dengan nol, maka akan didapatkan fungsi alih sistem.

- Merubah fungsi alih sistem yang telah didapat ke bentuk persamaan ruang-keadaan.

### 3.2.3. Analisis Optimal Sistem

Analisis optimal bertujuan untuk mendapatkan *gain* kontrol yang memenuhi syarat-syarat pengendalian 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. Jika ya, maka proses dapat dilanjutkan.
2. Menentukan *indeks performansi* sistem. *Indeks performansi* adalah suatu tolok ukur yang menyatakan seberapa baik kinerja sistem. Semakin mendekati kinerja suatu sistem dengan *indeks performansi*, maka semakin baik sistem tersebut.
3. Menentukan matriks bobot Q dan R. Penentuan matriks bobot Q dan R ini dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*).
4. Mendapatkan matriks umpan balik LQR
  - Menentukan matriks Riccati dari matriks bobot Q dan R yang telah ditentukan sebelumnya.
  - Matriks umpan balik LQR digunakan untuk memperoleh hukum kontrol optimal yang menghasilkan sinyal kontrol  $u(k)$

### 3.2.4. 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 tanpa dan dengan sinyal kendali optimal.



### 3.3. Cara Kerja Penelitian

Dalam usaha untuk mencapai tujuan dan menjawab rumusan masalah dalam skripsi ini, dilakukan tahap-tahap pengerjaan sebagai berikut:

#### 1. Studi Literatur

Untuk menganalisa masalah kontrol optimal pada *plant*, dilakukan dengan menghimpun informasi dari buku dan jurnal-jurnal yang berkaitan. Serta beberapa di antaranya diperoleh dari internet.

#### 2. Studi lapangan

Berupa pencarian data *plant* dan data setiap komponen yang terpasang pada *plant*, yang dilakukan secara langsung terjun pada obyek yang diteliti.

#### 3. Pengolahan Data

Menggunakan data yang telah didapat untuk membentuk persamaan matematis dan fungsi alih sistem guna mendapatkan solusi kontrol optimalnya.

#### 4. Pengujian dan analisis

Melakukan simulasi sehingga dapat dilakukan analisis respon sistem untuk mengetahui respon sistem terhadap *set point*.

#### 5. Menarik kesimpulan

Penarikan kesimpulan dari analisis kontrol optimal sistem dan respon waktu berdasarkan hasil pengujian dan simulasi, serta saran-saran mengenai proses pengendalian temperatur pada alat pengering gabah berenergi sekam untuk perbaikan sistem di masa mendatang.

## BAB IV

### PEMODELAN SISTEM

Pemodelan adalah upaya untuk menyatakan sistem dari bentuk fisik menjadi bentuk persamaan matematika. Untuk tujuan itu, dilakukan upaya dengan menyusun hubungan-hubungan fisik dari sistem sesungguhnya dengan menggunakan hukum-hukum ilmu alam (fisika dan/atau kimia).

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

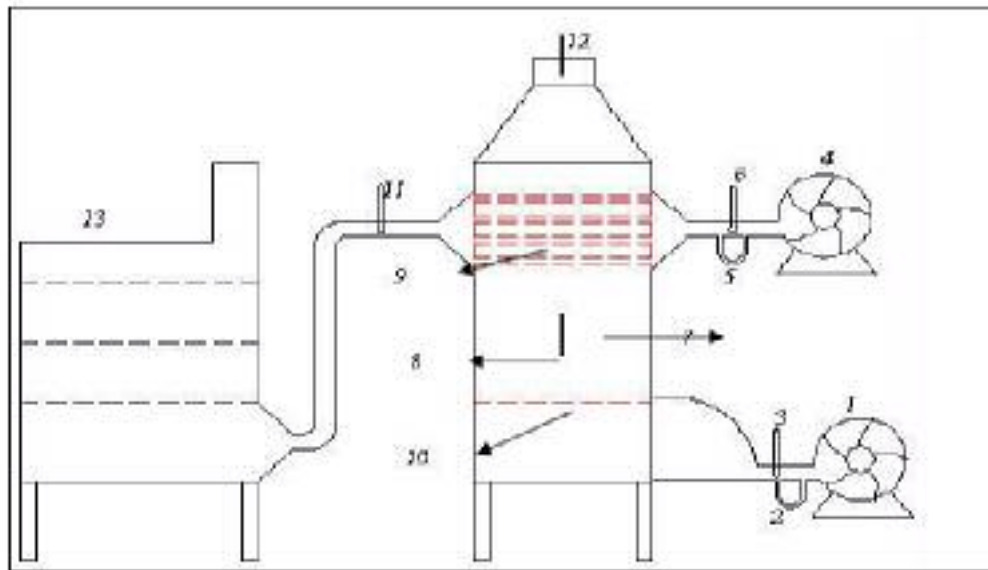
#### 4.9. Pemodelan Alat Pengering Gabah

Pada sistem pengeringan gabah ini, pemodelan sistem pengeringan disusun berdasarkan keseimbangan energi. Simulasi model keseimbangan energi digunakan untuk menghitung perubahan temperatur ruang pengering dan pengendalian temperatur ruang pengering. Keseimbangan energi mengikuti kaidah berikut, yaitu jumlah energi yang masuk sama dengan jumlah energi yang keluar.

Dalam penyusunan model keseimbangan energi digunakan asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. Laju aliran udara pada sistem alirannya dianggap tetap, yaitu  $V_p = 14,5$  m/s
2. Panas yang diterima blower dianggap tidak ada, karena nilainya relatif konstan dan sangat kecil
3. Kerugian panas yang relatif kecil pada sistem dapat diabaikan.

Instalasi alat pengering gabah secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Instalasi Alat Pengering Gabah

**Sumber :** Laboratorium Tenaga Surya dan Energi Alternatif

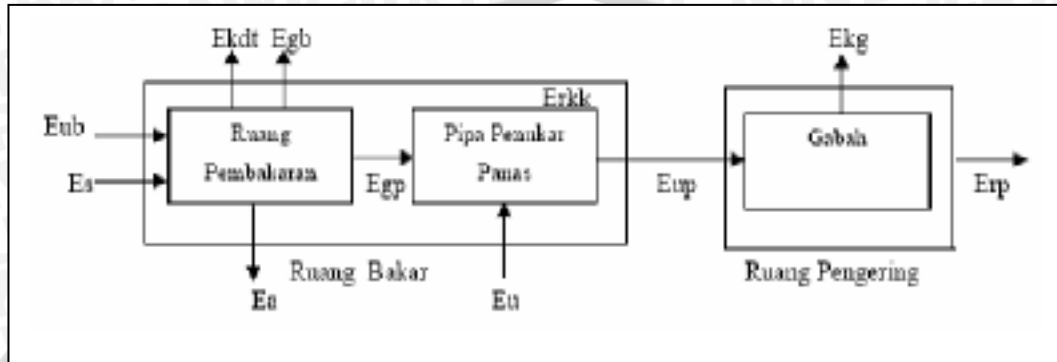
Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Keterangan :

1. *Blower* udara pembakaran
2. Pipa pitot
3. Termometer udara masuk ruang bakar
4. *Blower* udara masuk *heat exchanger*
5. Pipa pitot
6. termometer udara masuk *heat exchanger*
7. Termokopel ruang bakar
8. Ruang Bakar
9. Pipa penukar kalor / *heat exchanger*
10. Bed
11. Termometer udara keluar *heat exchanger*
12. Termokopel cerobong
13. Ruang pengering



Dalam skripsi ini, sistem alat pengering gabah dibagi menjadi 3 sub-sistem, yaitu : (1) ruang pembakaran, (2) pipa penukar kalor, dan (3) ruang pengering. Skema proses pengeringan dan persamaan keseimbangan energi yang terjadi pada masing-masing sub-sistem pengeringan gabah adalah sebagai berikut:



**Gambar 4.2.** Aliran Energi pada Alat Pengering Gabah

Sumber : Perancangan

Keterangan:

- Es : Energi sekam
- Eub : Energi udara pembakaran
- Ekdt : Energi keluar dinding tungku
- Egb : Energi gas buang
- Ea : Energi abu sekam
- Erkk : Energi radiasi, konveksi, konduksi
- Egp : Energi gas panas
- Eu : Energi udar masuk heat exchanger
- Eup : Energi udara pengeringan
- Ekg : Energi keluar gabah
- Erp : Energi ruang pengering

#### 4.10. Fungsi Alih Ruang Pembakaran

Aliran energi yang terjadi adalah sebagai berikut : (Waris, 1999)

$$Es + Eub = Egb + Ekdt + Ea + Erkk + Egp$$

Eub dapat diabaikan karena nilainya sangat kecil. Egb, Ekdt, Ea dan Erkk dapat dianggap sebagai energi hilang (Eh)

$$E_s = E_h + E_{gp} \quad (4.1)$$

Sedangkan efisiensi termal tungku dapat dinyatakan

$$\eta_t = \frac{E_s - E_h}{E_s} = \frac{E_{gp}}{E_s} = \frac{E_{gp}}{m_s \cdot LHV} \quad (4.2)$$

$$E_{gp} = \eta_t \cdot m_s \cdot LHV$$

Keterangan :

$\eta_t$  =efisiensi termal tungku (%)

$m_s$  =massa alir bahan bakar sekam ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

LHV =Low Heat Value ( $\text{kkal} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

#### 4.11.Fungsi Alih Pipa Penukar Kalor

Aliran energi yang terjadi adalah sebagai berikut :

$$E_{gp} + E_u = E_{up} \quad (4.3)$$

Bila persamaan (4.2) disubsitusikan ke persamaan (4.3), maka didapat:

$$E_{up} = \eta_t \cdot m_s \cdot LHV + E_u \quad (4.4)$$

#### 4.12.Fungsi Alih Ruang Pengering

Aliran energi yang terjadi adalah sebagai berikut :

$$E_{rp} = E_{up} - E_{kg} \quad (4.5)$$

Bila persamaan (4.4) disubsitusikan ke persamaan (4.5), maka didapat :

$$E_{rp} = \eta_t \cdot m_s \cdot LHV + E_u - E_{kg}$$

Dimana :

$$E_{rp} = (m_{he} \cdot C_p)_{rp} \cdot \frac{dT_{rp}}{dt}$$

$$E_u = v_p \cdot \rho \cdot C_p \cdot T_1$$

$$E_{kg} = v_{\rho} \cdot \rho \cdot C_{p_{rp}} \cdot T_{rp}$$

Sehingga didapatkan persamaan keseimbangan energi alat pengering gabah sebagai berikut:

$$E_{rp} = \eta_t \cdot m_s \cdot LHV + E_u - E_{kg}$$

$$(m_{he} \cdot C_p)_{rp} \cdot \frac{dT_{rp}}{dt} = \eta_t \cdot m_s \cdot LHV + V \rho \cdot \rho \cdot C_{p_{he}} \cdot Tl - v_{\rho} \cdot C_{p_{he}} \cdot T_{rp} \quad (4.6)$$

Dengan menggunakan transformasi Laplace, maka persamaan (4.6) menjadi :

$$\left[ (m_{he} \cdot C_p)_{rp} s + v_{\rho} \cdot \rho \cdot C_{p_{rp}} \right] Trp(s) = \eta_t \cdot LHV \cdot M(s) + v_{\rho} \cdot \rho \cdot C_{p_{he}} \cdot Tl(s) \quad (4.7)$$

Dengan menganggap  $Trp(s)$  sebagai keluaran dan  $M(s)$  sebagai masukan, maka diperoleh fungsi alih alat pengering :

$$\frac{Trp(s)}{M(s)} = \frac{\eta_t \cdot LHV}{(m_{he} \cdot C_{p_{rp}})s + v_{\rho} \cdot \rho \cdot C_{p_{rp}}}$$

$$\frac{Trp(s)}{Tl(s)} = \frac{v_{\rho} \cdot \rho \cdot C_{p_{he}}}{(m_{he} \cdot C_{p_{rp}})s + v_{\rho} \cdot \rho \cdot C_{p_{rp}}} \quad (4.8)$$

Keterangan :

$C_{p_{rp}}$  = Kalor jenis udara ruang pengering ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )

$C_{p_{he}}$  = Kalor jenis udara *heat exchanger* ( $\text{kJ} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )

$V_{\rho}$  = Kecepatan udara masuk *heat exchanger* ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$Tl$  = Temperatur lingkungan ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{rp}$  = Temperatur ruang pengering ( $^{\circ}\text{C}$ )

$m_{he}$  = Massa alir udara *heat exchanger* ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

#### 4.13. Fungsi Alih Katub Kendali

*Control valve* berfungsi untuk mengubah variabel yang dikendalikan menjadi sinyal keluaran aktuator yaitu suatu gerakan mekanik dalam *valve* yang akan mengatur laju aliran fluida dan sekaligus merupakan suatu elemen yang berfungsi untuk memanipulasi variabel proses.

Fungsi alih katub kendali sebagai fungsi alih sistem orde satu yaitu :



$$\frac{X(s)}{U_u(S)} = \frac{K_{cv}}{T_{cv}s + 1} \tag{4.9}$$

Keterangan :

X (s) = Posisi katub kendali

$U_u$  (s) = Besar arus yang masuk katub kendali

$K_{cv}$  = Gain katub kendali

$T_{cv}$  = Konstanta dari katub kendali

Nilai gain katub kendali diperoleh dari :

$$K_{cv} = \frac{\Delta x}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta i} = \frac{3}{0,12} \cdot \frac{0,12}{16} = 0,1875 \text{ inch/mA} \tag{4.10}$$

Keterangan :

$\Delta x$  = Posisi katub kendali maksimum

$\Delta p$  = Selisih tekanan masukan dan keluaran

$\Delta i$  = Selisih arus masukan dan keluaran

Dengan mengambil nilai konstanta waktu pada spesifikasi teknis, maka fungsi alih keluaran untuk katub kendali adalah sebagai berikut :

$$\frac{X(s)}{U_u(s)} = \frac{0,1875}{41,65s + 1} \tag{4.11}$$

#### 4.14. Fungsi Alih Saluran Udara Panas

Letak ruang pembakaran dengan ruang pengering dapat saling berjauhan, akibatnya terjadi penundaan pengukuran temperatur atau aksi kontrol selama t detik. Jika t sangat kecil, maka fungsi alih saluran udara panas adalah :

$$G(s) = \frac{1}{ts + 1} \tag{4.12}$$

Diman nilai t didapat dari

$$t = \frac{s}{v} \text{ dengan nilai } v = \frac{m_{he}}{\rho \cdot A}$$



Keterangan :

$t$  = Waktu yang dibutuhkan panas untuk merambat (s)

$s$  = Panjang saluran dari ruang bakar sampai ruang pengering (m)

$v$  = Kecepatan udara yang mengalir di dalam saluran ( $\text{ms}^{-1}$ )

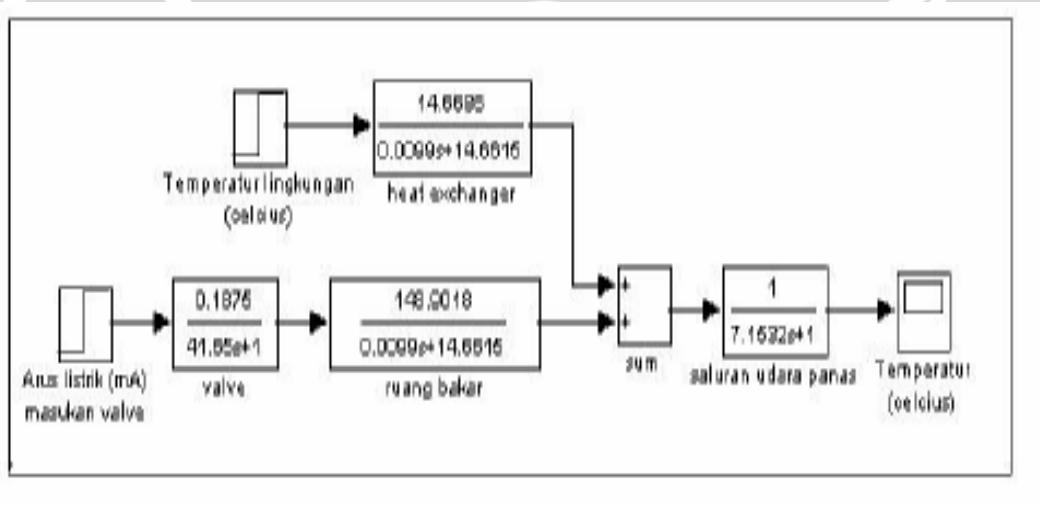
$m_{he}$  = Massa alir udara heat exchanger ( $\text{kg.s}^{-1}$ )

$\rho$  = Massa jenis fluida yang dialirkan ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$A$  = Luas penampang saluran ( $\text{m}^2$ )

#### 4.15. Sistem Loop Terbuka

Dari persamaan di atas, diperoleh blok simulasi sistem alat pengering gabah berenergi sekam pada simulink sebagai berikut :



**Gambar 4.3** Blok simulasi alat pengering gabah pada simulink

**Sumber** : Perancangan

#### 4.8. Uji Keterkontrolan dan Keteramatan Sistem

Hal pertama yang harus dilakukan dalam mendesain sistem melalui metode ruang keadaan adalah memeriksa keteramatan dan keterkontrolan dari sistem tersebut.

Untuk sistem yang mempunyai keterkontrolan lengkap, matriks kontrolabilitasnya adalah:

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

harus mempunyai rank matriks-n. Rank matriks adalah jumlah baris/kolom yang bebas. Sedangkan matriks keteramatannya adalah:

$$\mathbf{O}_B = [\mathbf{C}^T \mid \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T \mid \dots \mid (\mathbf{A}^T)^{n-1} \mathbf{C}^T]$$

juga harus mempunyai rank n. Karena matriks keterkontrolan dan keteramatan sistem adalah matriks 3 x 3, maka rank matriks pun harus 3.

Untuk mengetahui rank-matrik, terlebih dulu kita harus mengubah bentuk fungsi alih sistem menjadi bentuk persamaan ruang-keadaan (*state-space*). Dengan paket program MATLAB, didapatkan bentuk ruang-keadaan sistem adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,024 & 0 & 0 \\ 14949,98 & -1472,04 & 0 \\ 0 & 0,1398 & -0,1398 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0,0045 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

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

$$D = [0]$$

Sehingga bentuk umum persamaan keadaan menjadi:

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

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,024 & 0 & 0 \\ 14949,98 & -1472,04 & 0 \\ 0 & 0,1398 & -0,1398 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,0045 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = Cx + Du$$

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



maka matriks kontrolabilitasnya adalah:

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

$$\mathbf{C}_T = \begin{bmatrix} 0,0045 & -0,0001 & 0 \\ 0 & 67,2749 & -99033 \\ 0 & 0 & 9 \end{bmatrix}$$

Dan matriks keteramatannya adalah :

$$\mathbf{O}_B = [\mathbf{C}^T \mid \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T \mid \dots \mid (\mathbf{A}^T)^{n-1} \mathbf{C}^T]$$

$$\mathbf{O}_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2090 \\ 0 & 0.1398 & -205.8 \\ 1 & -0.1398 & 0 \end{bmatrix}$$

Karena bentuk persamaan ruang-keadaan sistem telah diketahui, maka rank matrik dapat dicari. Dengan paket program MATLAB, didapatkan bahwa  $rank(co)=3$  dan  $rank(ob)=3$ . Yang berarti bahwa nilai rank matrik sama dengan orde sistem, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem memenuhi syarat keterkontrolan dan keteramatan.

## BAB V

## PENGENDALIAN OPTIMAL DAN SIMULASI SISTEM

5.1 Desain Kontroler Menggunakan Metode *Linear Quadratic Regulator* (LQR)5.1.1. Metode *Linier Quadratic Regulator* (LQR)

Metode optimasi *linear quadratic regulator* (LQR) bertujuan untuk mendapatkan sinyal pengendali  $u(t)$  yang akan memindahkan suatu *state* sistem linier dari kondisi awal  $x(t_0)$  menuju ke suatu kondisi akhir  $x(t)$  yang akan meminimumkan suatu *indeks performansi* kuadratik

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [X^T Q X + U^T R U] dt \quad (5.1)$$

dari sistem yang dinyatakan dengan:

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

dengan hukum pengendalian optimal

$$u = -Kx \quad (5.3)$$

(Ogata jilid 2, 1997 : 411)

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 matriks umpan balik optimal dimana  $K = R^{-1} B^T P$ , dengan  $P$  diperoleh dengan menyelesaikan persamaan riccati:

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

Solusi dari problem regulator optimal menyertakan batasan-batasan sebagai berikut :

- ◆ Tidak ada *error* aktuator
- ◆ Tidak ada gangguan random pada *plant*
- ◆ Seluruh informasi *plant* dapat diindra oleh sensor
- ◆ Seluruh parameter *plant* dapat diketahui dengan pasti

Perhitungan ini dilakukan dengan jalan memasukkan persamaan Riccati yang telah diturunkan pada bab sebelumnya. Sedangkan matrik pembobotan  $Q$  dan  $R$  ditentukan secara sembarang, dengan syarat seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Dari persamaan Riccati tersebut, akan dapat diketahui matrik  $P$ .

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

### 5.1.2 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 berordo  $3 \times 3$  yang ditulis sebagai persamaan (5.5).

$$Q = \begin{bmatrix} q & 0 & 0 \\ 0 & q & 0 \\ 0 & 0 & q \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

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 berordo  $1 \times 1$  yang ditulis sebagai persamaan (5.6).

$$R = [r] \quad (5.6)$$



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  $K_c$  digunakan bantuan program Matlab. Untuk mendapatkan *gain*  $K_c$ , terlebih dahulu harus memilih matriks bobot  $Q$  dan  $R$ . Pemilihan matriks bobot  $Q$  dan  $R$  ini dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*)

Dari perhitungan tersebut diperoleh nilai matriks penguatan (*gain*) umpan balik optimal untuk sistem tersebut seperti pada tabel (5.1).

Tabel 5.1 Hasil optimasi sistem untuk berbagai matriks  $Q$  dan  $R$

Sumber: Hasil Perhitungan

No	Q	R	Nilai Sisa Relatif
1	500	0,01	2,0646e-015
2	550	0,01	6,6278e-015
3	600	0,01	1,9606e-016
4	625	0,01	3,0147e-015
5	650	0,01	4,6423e-015
6	750	0,01	3,6930e-016
7	800	0,01	6,5599e-015
8	600	0,001	2.2538e-015

9	600	0,004	6.5393e-015
10	600	0,006	2.5611e-016
11	600	0,007	5.5171e-016
12	600	0.025	5,2281e-015
13	600	0.05	7,9658e-015
14	600	0,075	4.2076e-014
15	600	0,1	3,9769e-015

Dengan mengubah-ubah nilai q sedangkan r tetap bernilai 0,01. Dari tabel dapat dilihat bahwa nilai sisa relatif terkecil dihasilkan oleh q = 600. Proses selanjutnya, nilai r yang diubah-ubah dengan q tetap bernilai 600. Dan nilai sisa relatif terkecil dihasilkan oleh r = 0,006. Sehingga dapat ditetapkan bahwa kombinasi matriks bobot Q dan R yang menghasilkan nilai sisa relatif terkecil adalah:

$$Q = \begin{bmatrix} 600 & 0 & 0 \\ 0 & 600 & 0 \\ 0 & 0 & 600 \end{bmatrix}; \text{ dan } R = [0,01]$$

### 5.1.3 Matriks 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:

$$P = 1.0e+003 * \begin{bmatrix} 5.5502 & 0.0021 & 0.2219 \\ 0.0021 & 0.0002 & 0.0002 \\ 0.2219 & 0.0002 & 1.7892 \end{bmatrix}$$

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

$$K_c = 1.0e+003 * [2.4976 \quad 0.0009 \quad 0.0999]$$

Matriks umpan balik  $K_c$  tersebut di atas, digunakan untuk memperoleh hukum pengendalian optimal yang menghasilkan sinyal pengendali  $u(k)$  yang optimal.

## 5.2. Simulasi Sistem

Simulasi kendali optimal terhadap pengendalian temperatur alat pengering gabah berenergi sekam dilakukan terhadap sistem yang telah dimodelkan. Simulasi dilakukan dengan bantuan program Matlab, simulasi ini dilakukan untuk mengamati respon sistem terhadap sinyal masukan dan gangguan.

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, dapat dengan mudah mengamati waktu menetap pada keadaan mantap (*settling time,  $t_s$* ), dan error pada keadaan mantap (*error steady state,  $e_{ss}$* ).

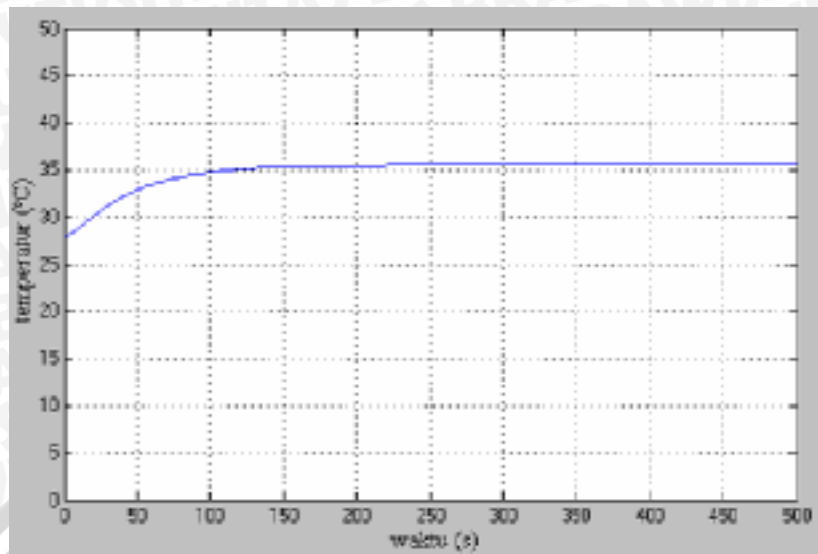
Untuk mengetahui keandalan sistem saat diberi umpan balik, maka pada sub bab ini akan ditampilkan grafik sistem tanpa umpan balik *LQR* dan dengan menggunakan umpan balik *LQR*, sehingga keduanya dapat dibandingkan.

### 5.2.1 Respon Alat Pengering Gabah Sebelum Diberi Umpan Balik

Respon alat pengering gabah sebelum diberi umpan balik didapatkan dengan simulasi menggunakan program matlab. Adapun blok diagram sistem yang digunakan untuk simulasi terdapat pada gambar 4.3.

Gambar 5.1 berikut adalah gambar hasil simulasi alat pengering gabah tanpa umpan balik *LQR*.





**Gambar 5.1** Respon sistem dengan masukan step sebesar 45 °C sebelum diberi umpan balik optimal

**Sumber :** Hasil simulasi

Pada Gambar 5.1 dapat diamati, sistem memiliki waktu keadaan mantap (*time settling*) sebesar 263 detik dengan *error steady state* sebesar 20,82 %.

Dari Gambar 5.1 terlihat bahwa sistem tanpa umpan balik membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai *steady state* dan *error* nya besar. Agar sistem menjadi lebih baik dengan waktu untuk mencapai *steady state* yang lebih singkat, serta *error steady state* yang kecil, maka diperlukan adanya pengendalian optimal dengan metode *Linear Quadratic Regulator*.

### 5.2.2 Respon Alat Pengering Gabah Dengan Umpan Balik LQR

Setelah menentukan matriks bobot Q, R dan mendapatkan *gain* optimal K, maka simulasi dapat dilakukan. Karena keluaran sistem yang diinginkan berada pada suhu 45 °C, maka untuk mendapatkan keluaran yang diinginkan tersebut akan digunakan filter untuk mengukur masukan frekuensinya.

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

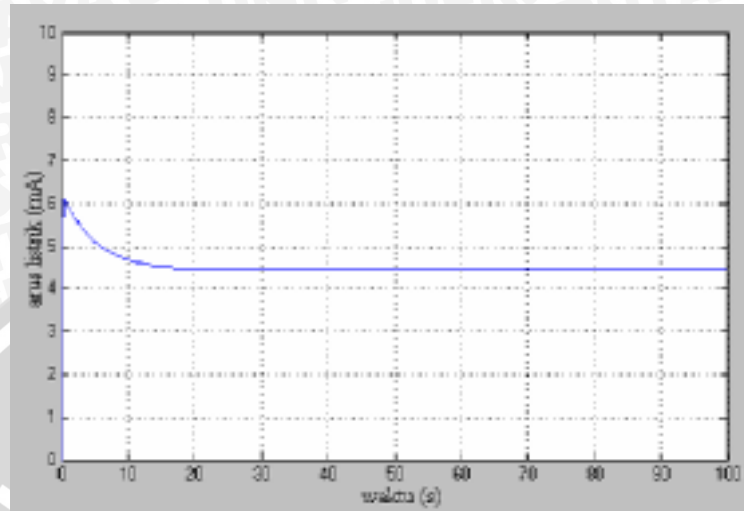
$$M = [C(BK - A)^{-1}B]^{-1}$$

Dengan menggunakan bantuan program matlab, maka didapatkan :

$$M = [347.2492]$$

repository.ub.ac.id

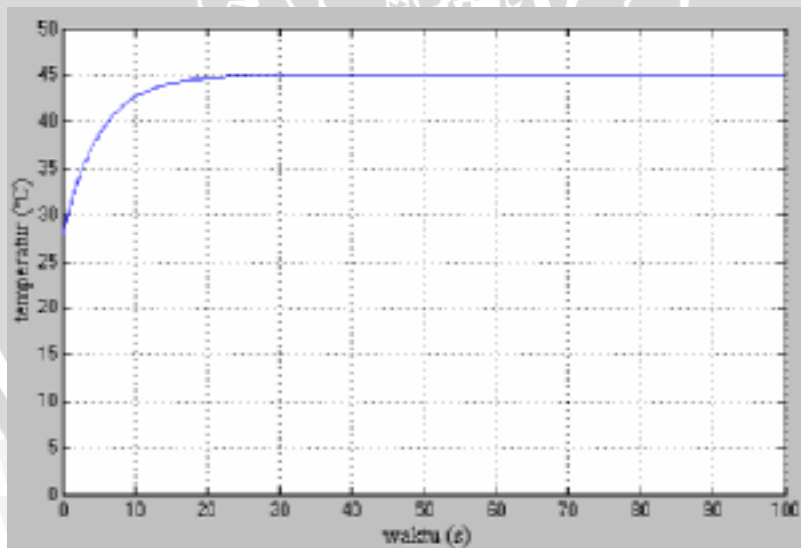
Pemberian umpan balik LQR pada  $Q = 600$  dan  $R = 0,01$  kepada sistem akan menghasilkan sinyal pengendali  $u(t)$  yang berupa arus listrik yang mengendalikan valve seperti pada gambar 5.2 berikut:



**Gambar 5.2** Respon sinyal pengendali  $u(k)$

Sumber : Hasil simulasi

Gambar 5.3 berikut adalah gambar hasil simulasi alat pengering gabah dengan umpan balik LQR pada  $Q = 600$  dan  $R = 0,01$ .



**Gambar 5.3** Respon sistem dengan masukan *step* sebesar  $45^{\circ}\text{C}$  setelah diberi umpan balik optimal

Sumber : Hasil simulasi

Dari hasil simulasi grafik gambar 5.3 dapat diamati, dengan nilai matriks bobot  $Q = 600$  dan  $R = 0,01$  sistem dengan masukan *step* sebesar  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  akan memiliki waktu keadaan mantap (*time settling*) sebesar 44 detik dan *error steady state* sebesar 0 %

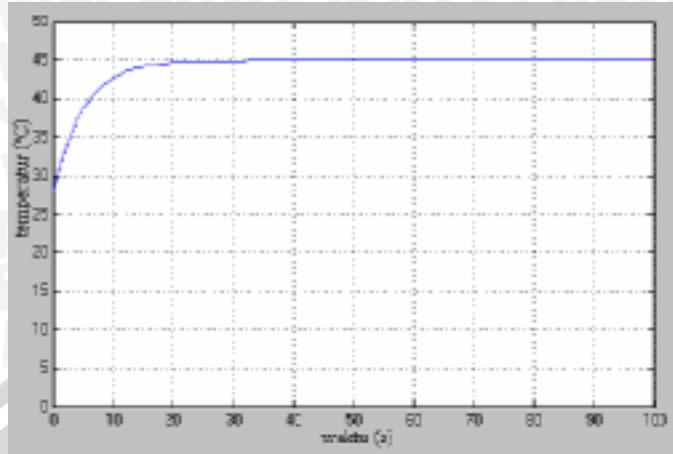
Berikut ini adalah Tabel hasil optimasi sistem untuk matriks bobot dengan berbagai nilai  $Q$  dan  $R$

Tabel 5.2 Hasil optimasi sistem pada pengendalian temperatur untuk berbagai matriks  $Q$  dan  $R$

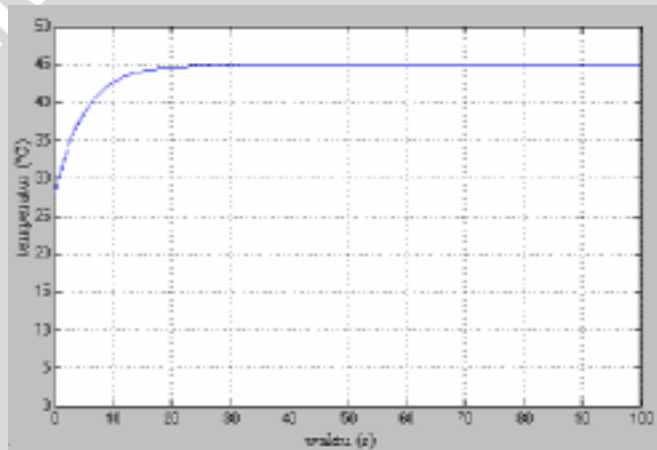
No	Q	R	Settling Time (s)	Ess (%)
1	500	0.01	46	0,02 %
2	550	0.01	45	0,02 %
3	600	0.01	44	0 %
4	625	0.01	44	0 %
5	650	0.01	43	0,02 %
6	750	0.01	42	0 %
7	800	0.01	41	0,02 %
8	600	0.001	40	0,04 %
9	600	0.006	41	0,02 %
10	600	0.05	45	0 %
11	600	0.1	47	0 %



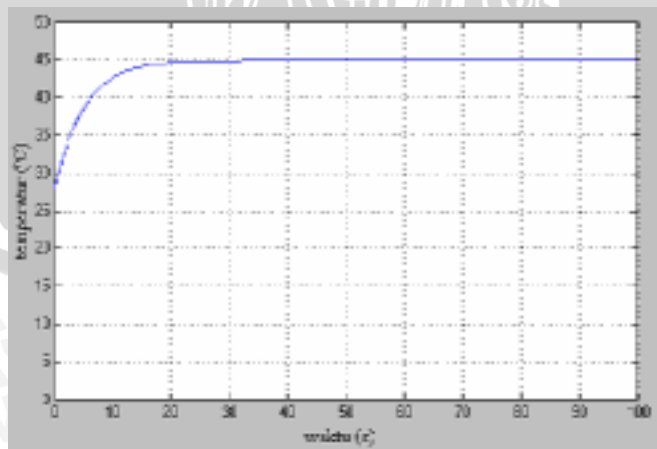
Berikut adalah grafik hasil simulasi dengan berbagai harga Q dan R :



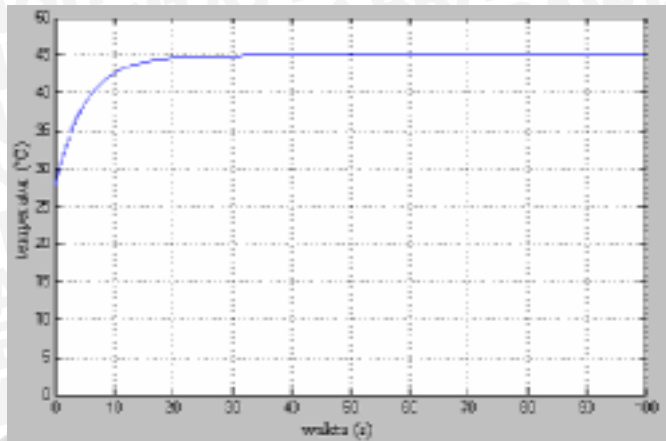
Gambar 5.4.1 Respon sistem untuk  $Q = 500$  dan  $R = 0,01$   
Sumber : Hasil simulasi



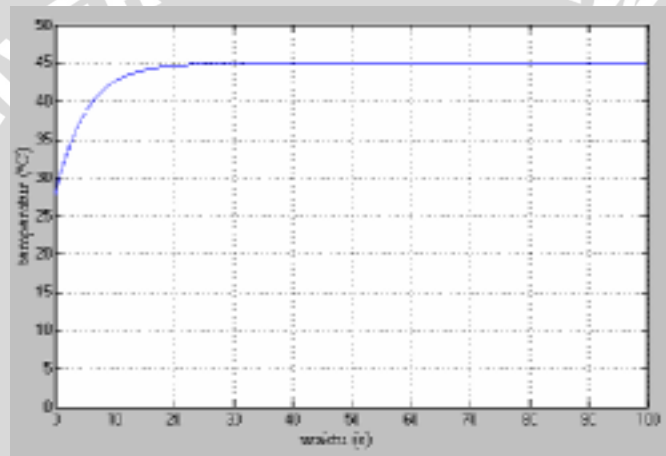
Gambar 5.4.2 Respon sistem untuk  $Q = 550$  dan  $R = 0,01$   
Sumber : Hasil simulasi



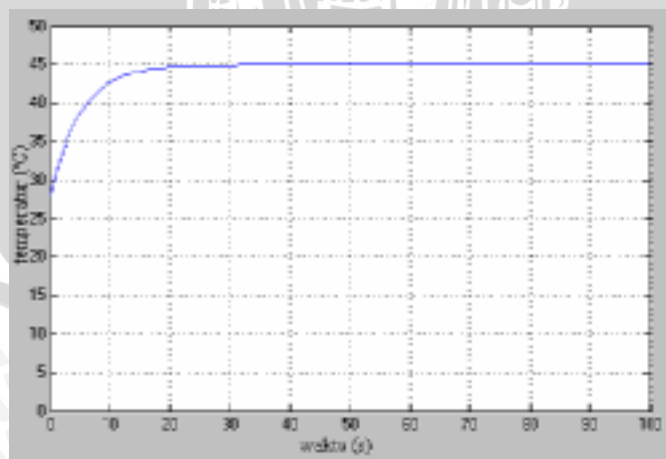
Gambar 5.4.3 Respon sistem untuk  $Q = 625$  dan  $R = 0,01$   
Sumber : Hasil simulasi



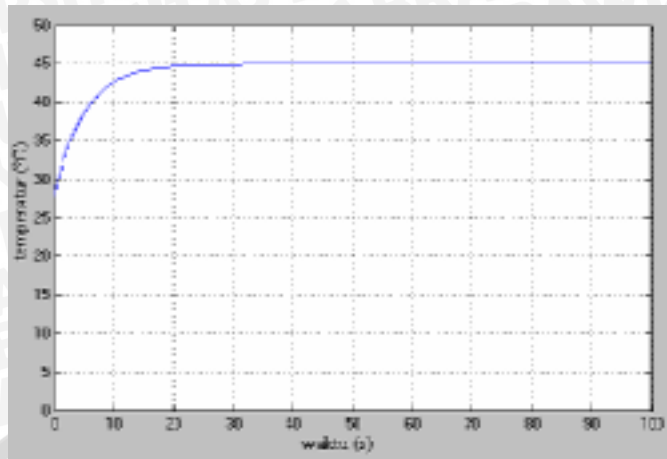
Gambar 5.4.4 Respon sistem untuk  $Q = 650$  dan  $R = 0,01$   
 Sumber : Hasil simulasi



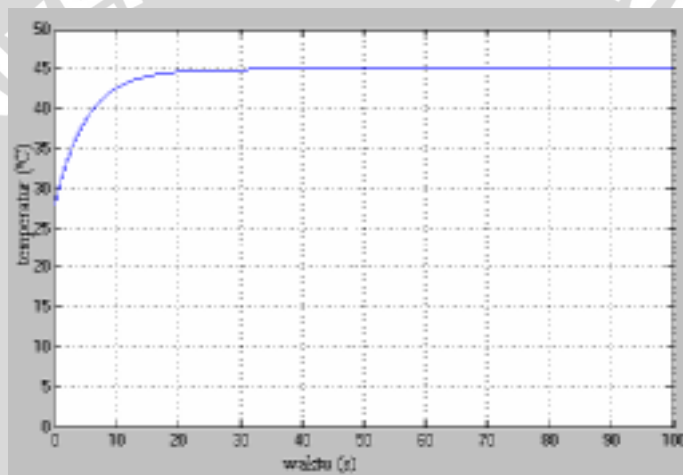
Gambar 5.4.5 Respon sistem untuk  $Q = 750$  dan  $R = 0,01$   
 Sumber : Hasil simulasi



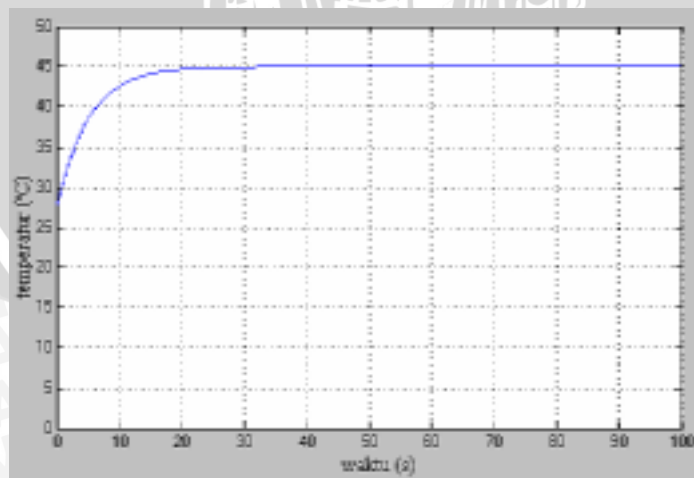
Gambar 5.4.6 Respon sistem untuk  $Q = 800$  dan  $R = 0,01$   
 Sumber : Hasil simulasi



Gambar 5.4.7 Respon sistem untuk  $Q = 600$  dan  $R = 0,001$   
 Sumber : Hasil simulasi

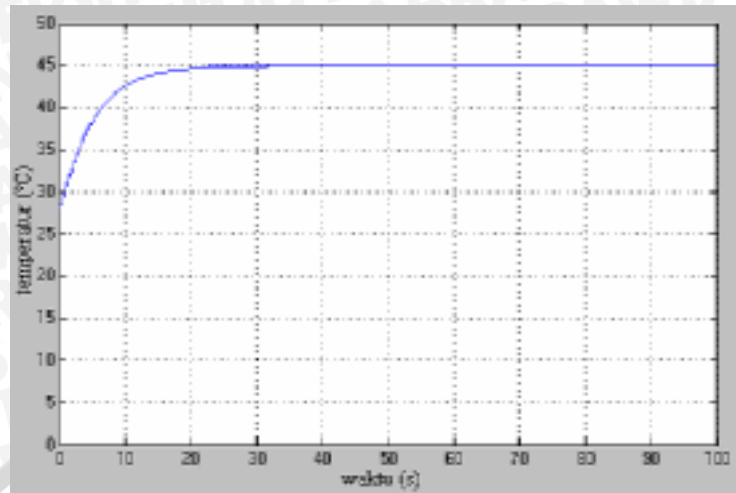


Gambar 5.4.8 Respon sistem untuk  $Q = 600$  dan  $R = 0,006$   
 Sumber : Hasil simulasi



Gambar 5.4.9 Respon sistem untuk  $Q = 600$  dan  $R = 0,05$   
 Sumber : Hasil simulasi

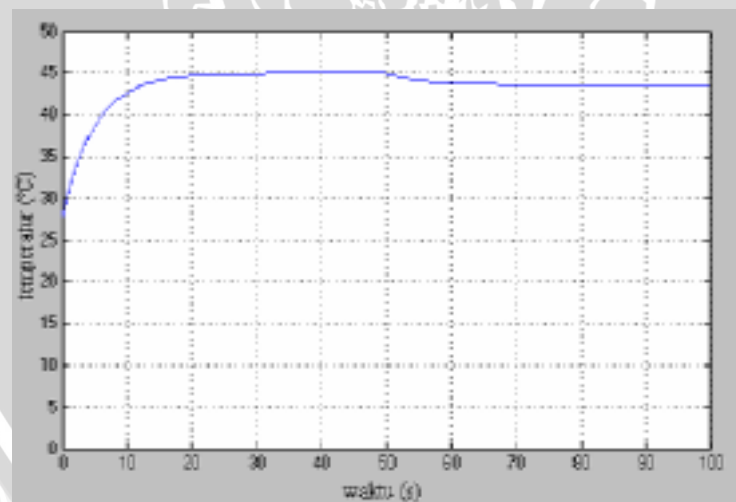




Gambar 5.4.10 Respon sistem untuk  $Q = 600$  dan  $R = 0,1$   
Sumber : Hasil simulasi

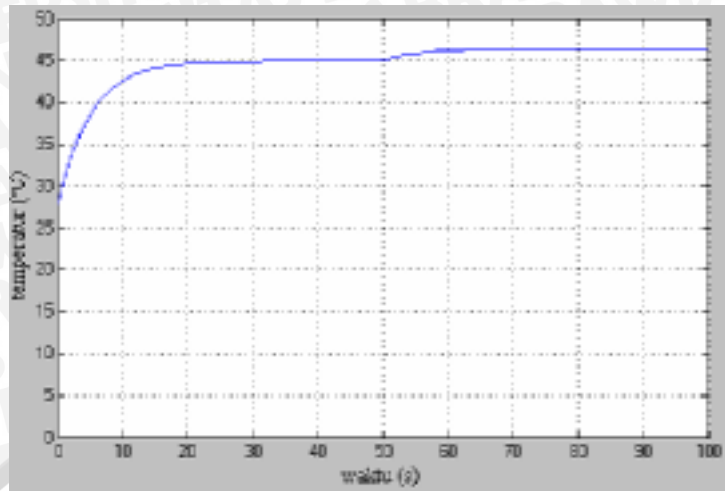
### 5.2.3 Respon Alat Pengering Gabah Dengan Gangguan

Gangguan pada alat pengering gabah terjadi karena adanya perubahan temperatur lingkungan. Dengan gangguan tersebut didapat respon temperatur alat pengering gabah seperti pada gambar 5.5 dan 5.6 berikut :



Gambar 5.5 Respon sistem untuk perubahan temperatur lingkungan  
dari  $28^{\circ}\text{C}$  ke  $26^{\circ}\text{C}$  pada detik ke 50

Sumber : Hasil simulasi



Gambar 5.6 Respon sistem untuk perubahan temperatur lingkungan dari 28 °C ke 30 °C pada detik ke 50

Sumber : Hasil simulasi

Dari hasil simulasi grafik gambar 5.5 dapat diamati bahwa dengan perubahan suhu lingkungan dari 28 °C ke 26 °C pada detik ke 50 maka sistem memiliki waktu pulih sebesar 29 detik dengan *error steady state* sebesar 2,22 %. Sementara dari hasil simulasi grafik gambar 5.6 dapat diamati bahwa dengan perubahan suhu lingkungan dari 28 °C ke 30 °C pada detik ke 50 maka sistem memiliki waktu pulih sebesar 31 detik dengan *error steady state* 3,26 %. Sehingga diperoleh waktu pulih rata-rata sistem dengan gangguan berupa perubahan temperatur lingkungan adalah 30 detik dengan *error steady state* rata-rata sebesar 2,74 %

## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1. Kesimpulan

Dari hasil keseluruhan analisa yang telah dilakukan pada skripsi ini, maka dapat disimpulkan bahwa penerapan pengendalian optimal terhadap alat pengering gabah dapat dilakukan dengan baik. Dengan melihat hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil optimasi dengan menggunakan metode *LQR* memiliki respon alat pengering gabah paling optimal pada matrik bobot  $Q = 600$  dan  $R = 0,01$
2. Pengaruh pengendalian optimal dengan metode *LQR* pada pengontrolan temperatur alat pengering gabah menghasilkan respon waktu yang lebih cepat dan *error steady state* yang lebih kecil. Pengendalian optimal dengan metode *LQR* pada kondisi tanpa gangguan menghasilkan *error steady state* 0 % dan *time settling* sebesar 44 detik.
3. Pada simulasi dengan gangguan, pengendali *LQR* dapat mengatasi gangguan. Dengan gangguan berupa perubahan temperatur lingkungan, pengendali *LQR* mampu mengatasi gangguan dengan waktu pulih rata-rata sebesar 30 detik dan *error steady state* rata-rata sebesar 2,74 %

#### 6.2 Saran

1. Pemilihan matrik bobot  $Q$  dan  $R$  pada skripsi ini dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*), yang membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mendapatkan hasilnya. Oleh sebab itu perlu dikembangkan metode yang lebih baik untuk mendapatkan nilai matrik bobot  $Q$  dan  $R$



2. Metode optimasi  $LQR$  memiliki kekurangan tidak dapat mengatasi gangguan acak (*noise*) pada sistem. Untuk mengatasi hal tersebut digunakan metode optimasi  $LQG$  yang memperhitungkan gangguan acak.



## DAFTAR PUSTAKA

- Agustiningtyas, S. 2005. *Simulasi Pengendalian Temperatur Alat Pengering Gabah Berenergi Sekam Di Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy*. Skripsi. Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Malang
- Alonso, M, dan Finn, Edward J. 1990. *Dasar-dasar Fisika Universitas*. Jilid 1. Penerbit Erlangga. Jakarta
- Arya Djoni, I. M.. 1987. *Mekanika Fluida 1*. Diklat Jurusan Teknik Mesin ITS. ITS. Surabaya
- Brooker, D.W.,F.W., Bakker, Arkema and C.W. Hall. 1992. *Drying Storage of Grains and Oilseeds*. An AVI Book. New York
- Coughanowr, D. 1991. *Process System Analysis And control*. Mc Graw-Hill.Inc. USA
- Earle. 1982. *Satuan Operasi Dalam Pengolahan Makanan*. Terjemahan Zein Nasution. Sastra Husada . Jakarta.
- Follinger, O. 1994. *Regelungstechnik:Emfuhung in die Methoden Und thre Anwendung*. Huthig Buch Verlag. Heidelberg.
- Gopal, M. 1987. *Modern Control System Theory*. John Wiley & Sons (SEA) Pte.Ltd. Singapura
- Gunterus, F. 1994. *Falsafah Dasar : Sistem Pengendalian Proses*. PT Elex Media Komputindo. Jakarta .
- Hall, C.W. 1980. *Drying and Storage of Agrucultural Crops*. AVI Publishing Company Inc. Westport
- Houpis, D. 1988. *Linier Control Systems Analysis and Design*. McGraw-Hill,Inc. USA.
- Lapidus, L. 1967. *Optimal Control of Engineering Processes*. Blaisdell Publishing Company. Toronto
- Lewis, F.L. 1996. *Optimal Control*. John Wiley & Sons, Inc. Kanada.
- Ogata, K. 1997. *Teknik Kontrol Automatik Jilid I*. Penerbit Erlangga. Jakarta
- Ogata, K. 1997. *Teknik Kontrol Automatik Jilid II*. Penerbit Erlangga. Jakarta

Shahian, B.dan Hassul, M. 1993. *Control System Using MATLAB*. Prentice Hall, Inc.. New Jersey

Soeharto. 1991. *Teknologi Pengawetan Pangan*. Rineka Cipta. Jakarta

Soloman, S. 1994. *Automatic Data Collection System*. McGraw-Hill.Inc. USA

Taib.G dan G. Said. 1988. *Operasi Pengeringan Pada Pengolahan Hasil Pertanian*. PT. Mediyatama Sasana Perkasa. Jakarta

Winarno, A. 1999. *Studi Penerapan Logika Fuzzy pada Pengontrolan Suhu Alat Pengering Gabah Berenergi Sekam*. Thesis. Program Studi Instrumentasi dan Kontrol Program Pasca Sarjana ITB. Bandung

Wimberley, J.E. 1982. *Technical Handbook for the paddy rice Postharvest Industry in Developing Countries*. IRRI. Los Banos.

Winarno, S. 1995. *Pengaruh Ukuran Diameter Pasir dan Kecepatan Fluida Terhadap Unjuk Kerja FBC Bahan Bakar Sekam*. Skripsi. FTUB. Malang





## Perhitungan Kecepatan Udara Yang Melewati Pipa dan Efisiensi Tungku

### 1. Kecepatan Udara Yang Melewati Pipa

$$\text{Rumus : } v = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h \left( \frac{\rho_a}{\rho_f} - 1 \right)} \quad (\text{I Made Arya Djoni : 214})$$

Dengan :

- $v$  = Kecepatan Udara ( $\text{m.s}^{-1}$ )
- $g$  = Percepatan Gravitasi ( $g = 10 \text{ m.s}^{-1}$ )
- $\Delta h$  = Beda Tekanan Dalam Saluran ( $\Delta h = 12,6 \text{ mm} = 0,126 \text{ m}$ )
- $\rho_a$  = Massa Jenis Fluida Ukar, ( $\rho_a = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ )
- $\rho_f$  = Massa Jenis Udara ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

### 2. Efisiensi Tungku Sekam

$$\text{Rumus : } \eta = \frac{Q_b}{Q_m} \times 100\%$$

$$\text{Dimana : } Q_b = m_{he} \cdot C_{p_{he}} \cdot \Delta T_{he}$$

$$Q_m = m \cdot LHV$$

Dengan :

- $\eta$  = Efisiensi Tungku Sekam (%)
- $Q_b$  = Panas Yang Dipindahkan Oleh *Heat Exchanger* ( $\text{kJ.s}^{-1}$ )
- $Q_m$  = Kalor Yang Masuk ( $\text{kJ.s}^{-1}$ )
- $m_{he}$  = Laju Aliran Massa Fluida Kerja ( $\text{kg.s}^{-1}$ )
- $C_{p_{he}}$  = Panas Jenis Penukar Kalor ( $\text{kJ.kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )
- $\Delta T_{he}$  = Perbedaan Temperatur di *Heat Exchanger* ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $m$  = Massa Alir Bahan Bakar Sekam ( $\text{kg.s}^{-1}$ )
- LHV = Nilai Bakar Terendah / *Low Heat Value* ( $\text{LHV} = 15268,38 \text{ kJ.kg}^{-1}$ )

## Data Teknis Peralatan

### Data Teknis *Control Valve* (Purnomo, 2003)

Body Size	= 24 inch
Tipe	= Butterfly
Karakteristik	= Equal percentage
Tipe Aktuator	= Diaphragm
Posisi <i>stem</i> valve maksimum	= 3 inch
Kostanta Waktu	= 41,65 detik
Input Signal	= 4 – 20 mA
Tekanan Masukan	= 0,25 kg.g/cm <sup>2</sup> = 3,55 Psi
Tekanan Keluaran	= 0,13 kg.g/cm <sup>2</sup> = 1,85 Psi



Tabel Propertis Udara

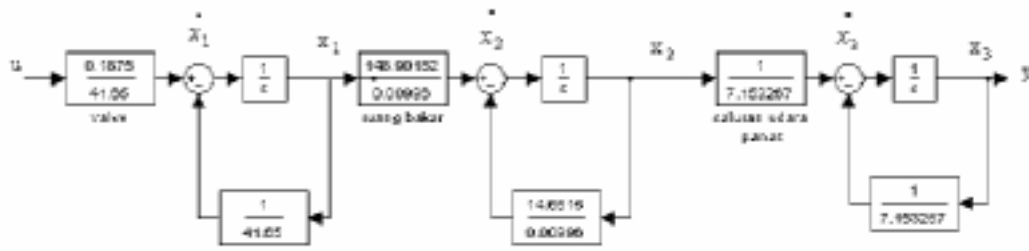
Sifat Udara pada Tekanan Atmosfer

T, °C	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Cp, J/(kg.K)	K, W/(m.K)	$\mu$ , Pa.s	$\alpha$ , m <sup>2</sup> /s	Pr
0	1.292	1006	0.0242	1.72x 10 <sup>-5</sup>	1.86x10 <sup>-5</sup>	0.72
20	1.204	1006	0.0257	1.81	2.12	0.71
40	1.127	1007	0.0272	1.90	2.40	0.70
60	1.059	1008	0.0287	1.99	2.69	0.70
80	0.999	1010	0.0302	2.09	3.00	0.70
100	0.946	1012	0.0318	2.18	3.32	0.69
120	0.898	1014	0.0333	2.27	3.66	0.69
140	0.854	1016	0.0345	2.34	3.98	0.69
160	0.815	1019	0.0359	2.42	4.32	0.69
180	0.779	1022	0.0372	2.50	4.67	0.69
200	0.746	1025	0.0386	2.57	5.05	0.68
220	0.715	1028	0.0399	2.64	5.43	0.68
240	0.688	1032	0.0412	2.72	5.80	0.68
260	0.662	1036	0.0425	2.79	6.20	0.68
280	0.638	1040	0.0437	2.86	6.59	0.68
300	0.616	1045	0.0450	2.93	6.99	0.68

Dari J.A. Duffie, dan Wm. A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes* ( New York : John Wiley, 1980 ), hlm 705. Digunakan dengan izin.







$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{1}{41,65} x_1 + \frac{0,1875}{41,65} u \\ &= -0,024 x_1 + 0.0045 u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \frac{148,9018}{0.0099} x_1 - \frac{14,6615}{0.0099} x_2 \\ &= 14949,98 x_1 - 1472,04 x_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= \frac{1}{7,1532} x_2 - \frac{1}{7,1532} x_3 \\ &= 0,1398 x_2 - 0,1398 x_3 \end{aligned}$$

$$y = x_3$$

dengan menggunakan persamaan :

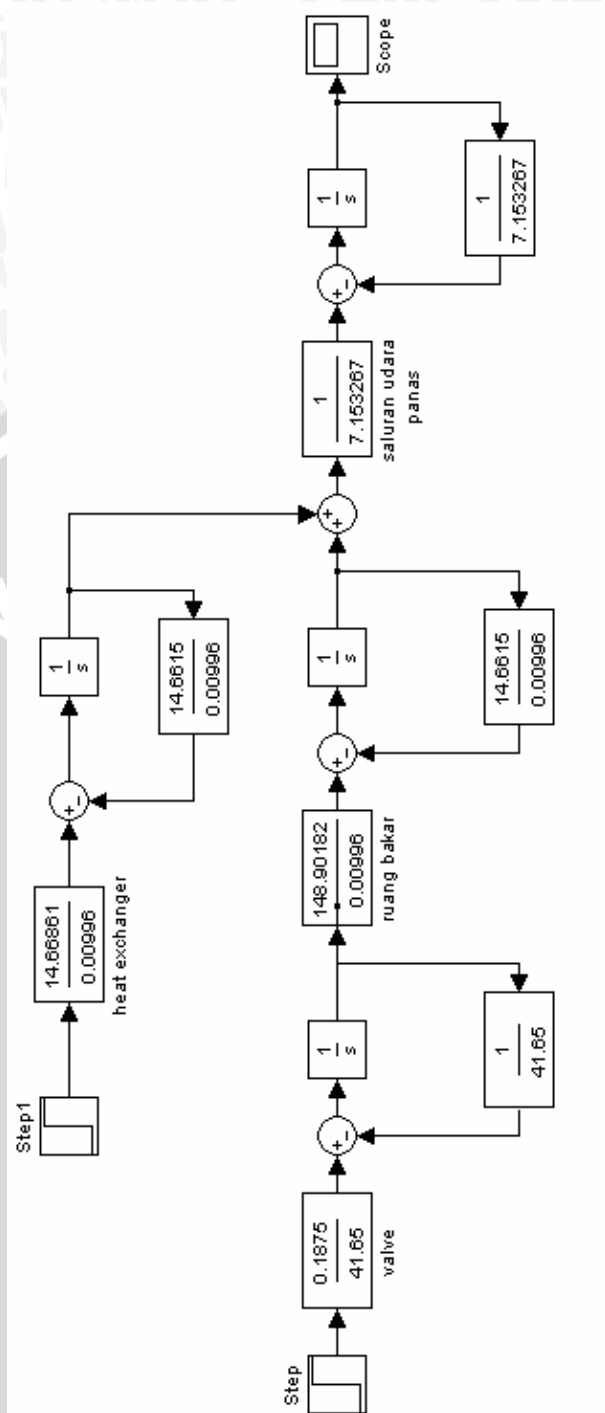
$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \text{dan} \quad y = Cx + Du$$

maka diperoleh matriks sebagai berikut :

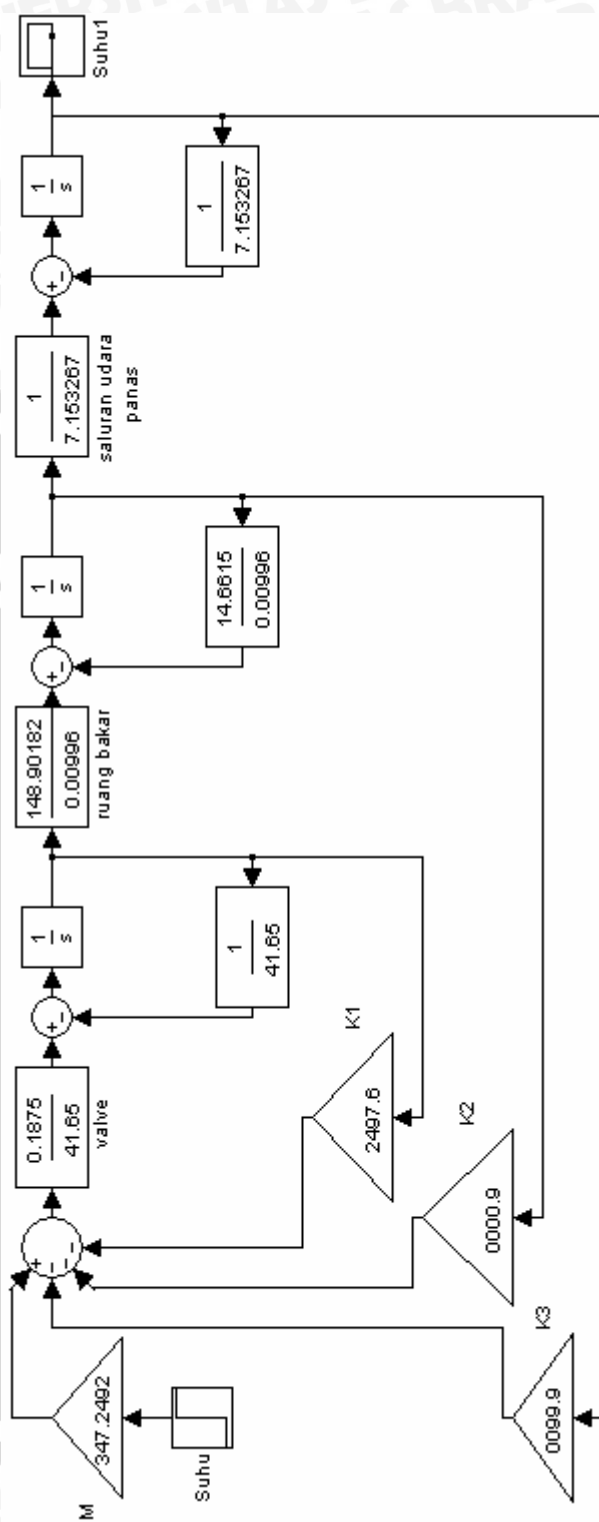
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,024 & 0 & 0 \\ 14949,98 & -1472,04 & 0 \\ 0 & 0,1398 & -0,1398 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0045 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

dan

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

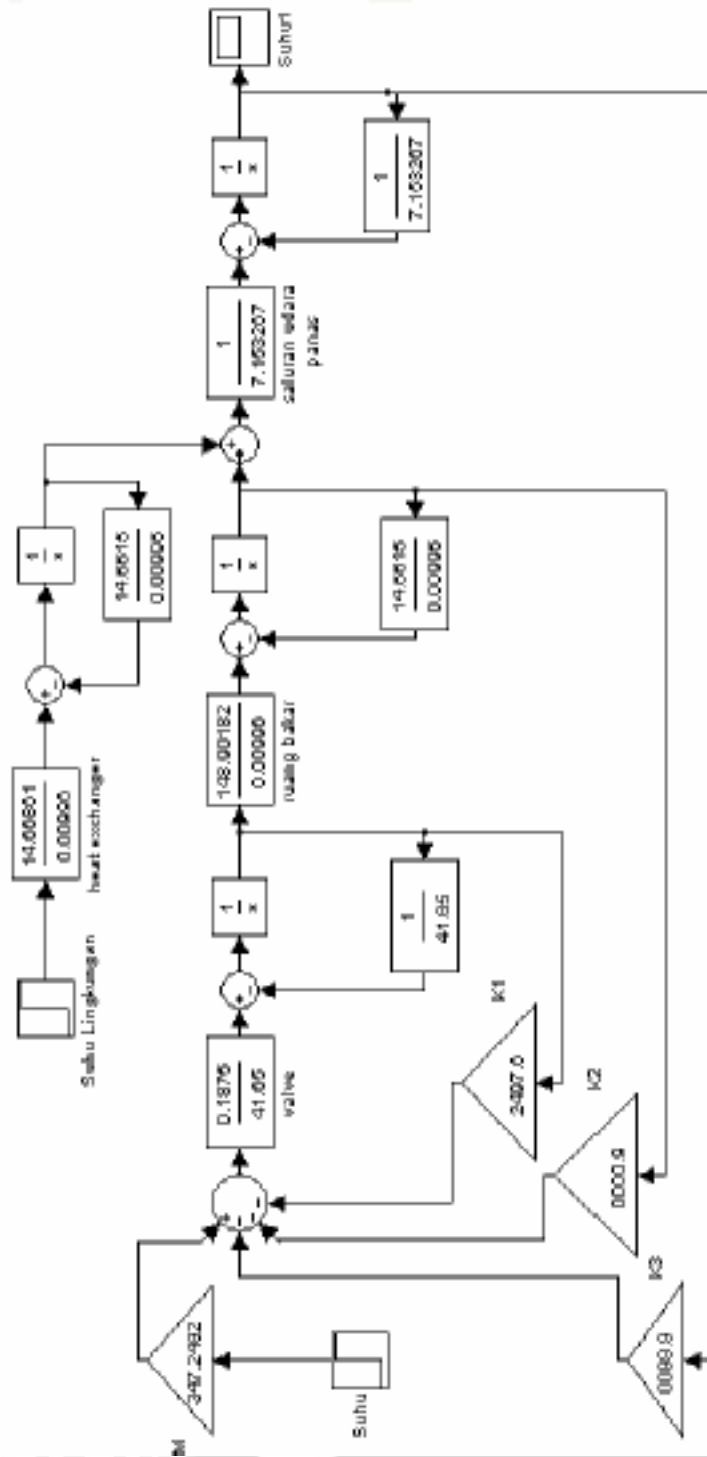


Gambar Simulasi Sistem Tanpa Umpan Balik



Gambar Simulasi Sistem Dengan Umpan Balik





Gambar simulasi sistem dengan umpan balik dan gangguan

**Listing Program M File**

**Tes Controlable dan Observable**

A=[-0.024 0 0;  
14949.98 -1472.04 0;  
0 0.1398 -0.1398]

B=[0.0045;  
0;  
0]

C=[0 0 1]

D=[0]

Co=ctrb(A,B)

rank(Co)

Ob=obsv(A,C)

rank(Ob)

**Mencari Matriks Bobot Q dan R**

A=[-0.024 0 0;  
14949.98 -1472.04 0;  
0 0.1398 -0.1398]

B=[0.0045;  
0;  
0]

C=[0 0 1]

D=[0]

q0=600

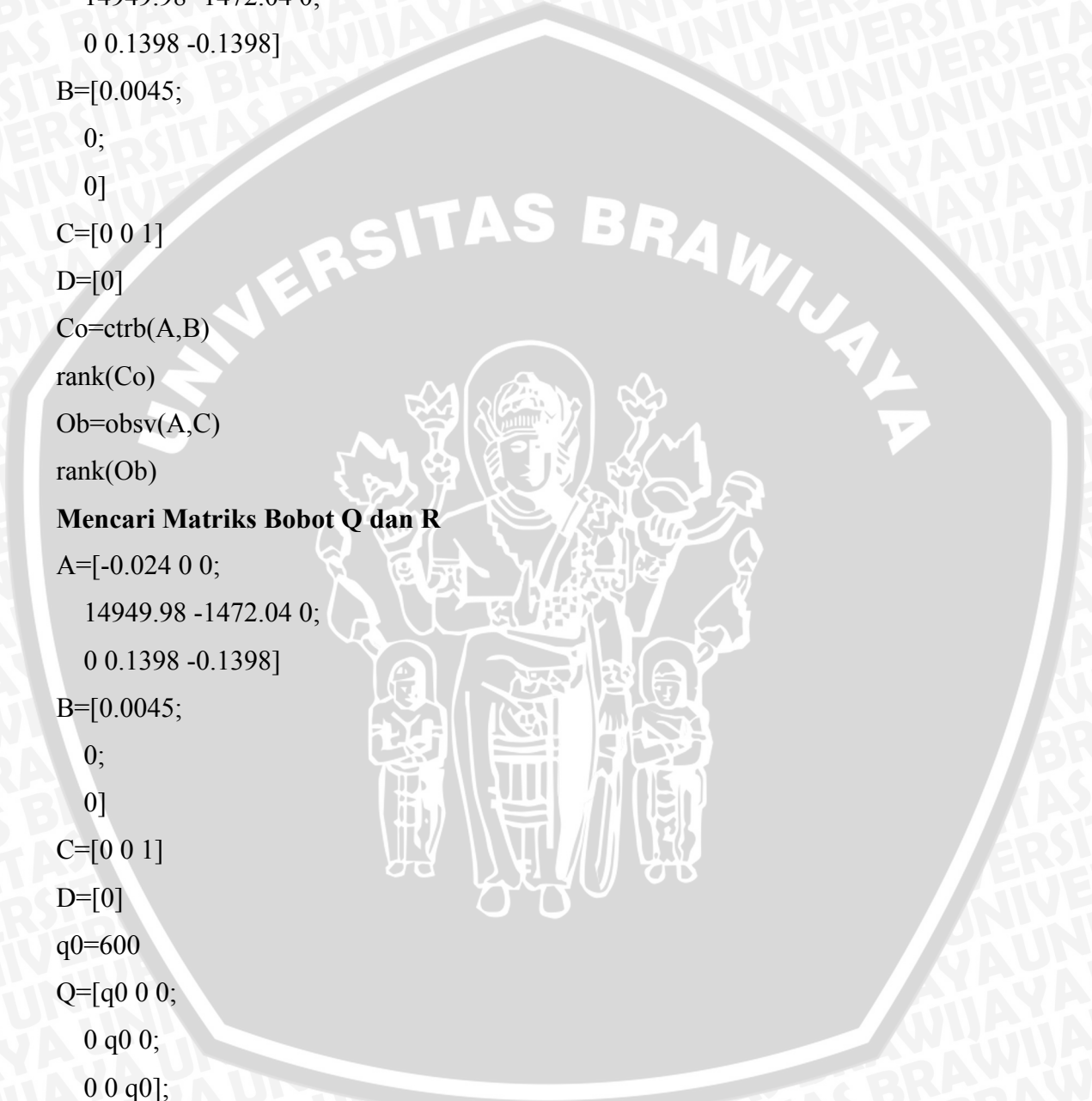
Q=[q0 0 0;  
0 q0 0;  
0 0 q0];

r0=0.01

R=[r0];

[P,E,K,RR]=care(A,B,Q,R);

RR



**Mencari Nilai K dan M**

$$A = \begin{bmatrix} -0.024 & 0 & 0 \\ 14949.98 & -1472.04 & 0 \\ 0 & 0.1398 & -0.1398 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0045 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

$$D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

$$q_0 = 600$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_0 & 0 & 0 \\ 0 & q_0 & 0 \\ 0 & 0 & q_0 \end{bmatrix}$$

$$r_0 = 0.01$$

$$R = \begin{bmatrix} r_0 \end{bmatrix}$$

$$[P, E, K, RR] = \text{care}(A, B, Q, R);$$

$$K$$

$$M = \text{inv}(C * \text{inv}(B * K - A) * B)$$

