

Simulasi Perancangan Pengendalian Temperatur Dengan Metode Linear Quadratic Regulator (LQR)

Ahmad Fahmi

Abstrak: Proses peleburan terdapat beberapa proses pengendalian, salah satu proses yang paling utama adalah proses pengendalian temperatur. Pada proses pengendalian temperatur umumnya menggunakan kontroler PID untuk mengatur bahan bakar. Perancangan pengendalian temperatur dengan metode Linear Quadratic Regulator (LQR) untuk mengatasi lambatnya sistem dalam mencapai kestabilan disebabkan orde sistem yang besar. Penerapan LQR ini mampu mempercepat waktu keadaan mantap pada sistem. Hasil pengujian dengan menggunakan metode LQR memiliki respon temperatur paling optimal pada matrik bobot $Q = 0,001$ dan $R = 11$ terbukti dari nilai sisa relative residual (rr) nya paling kecil yaitu sebesar $3.2008e-014$, dan respon yang dihasilkan memiliki nilai settling time (ts) sebesar 2000 detik, lebih cepat sebesar 700 detik dari ts kontroler PID. Error steady state (ess)nya juga lebih mendekati nol, yaitu sebesar 0,17%, sedangkan untuk pengujian dengan beban nol dan pengujian dengan beban dengan sinyal uji pulsa nilai ess adalah nol. Pada pengujian sistem, terdapat lonjakan, tetapi tidak terlalu berpengaruh pada kerja sistem secara keseluruhan, dapat dilihat dari nilai ess yang mendekati nol. Performansi sistem dengan adanya pengendalian optimasi ini, jika beban bertambah maka temperatur akan turun, sebaliknya jika beban berkurang maka temperatur akan naik.

Kata Kunci: PID, Linear Quadratic Regulator (LQR)

Salah satu proses pengendalian yang terdapat di dalam proses peleburan adalah proses pengendalian temperatur peleburan. Pada proses pengendalian temperatur dapur ini, suhu terus menerus dipantau agar tetap stabil dan sesuai dengan standar yang dibutuhkan, agar dapat meleburkan, panas di dalam dapur ditingkatkan hingga mencapai suhu, $T = \pm 1570$ °C. Temperatur tetap dijaga agar tidak turun atau naik hingga 10 °C dari set point, dan temperatur pada dinding dapur tidak boleh melebihi 1600 °C, karena dapur peleburan memiliki batas temperatur maksimal sebesar 1600 °C.

Pada metode Linear Quadratic Regulator ini, dengan menetapkan nilai matrik bobot Q dan R , dan mencari nilai indeks performansi yang paling minimum, maka diharapkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur yang diinginkan menjadi lebih cepat dan dapat memperkecil error steady state (ess).

Dengan kelebihan tersebut maka metode ini sesuai jika diterapkan pada sistem peleburan dengan plant temperatur furnace. Dengan metode LQR diharapkan performansi pada proses pengendalian temperatur akan menjadi optimal, sehingga dihasilkan cairan yang sesuai dengan standar.

Permasalahan yang akan dibahas dan dicari solusinya adalah sebagai berikut :

Bagaimana merancang dan menentukan parameter sistem kendali optimal yaitu dengan menentukan nilai Q dan R pada pengendalian temperatur, dengan menggunakan metode Linear Quadratic Regulator, sehingga sistem dapat bekerja secara optimal untuk menghasilkan temperatur sesuai dengan nilai yang diinginkan, lebih cepat mencapai steady state dan memperkecil error steady state.

Bagaimana performansi sistem dengan adanya pengendalian optimasi ini.

Penerapan metode LQR pada sistem kendali temperatur ditujukan untuk mengoptimalkan sinyal kendali sehingga dapat meminimumkan luasan error. Dengan luasan error yang minimum diharapkan dapat memperkecil error steady state (ess) dan mempercepat waktu yang dibutuhkan pengendali untuk mencapai temperatur yang diinginkan. Pada pengendalian temperatur umumnya menggunakan kontroler PID, namun pada pelaksanaannya hanya menggunakan kontroler proporsional dan integral. Kontroler ini digunakan untuk mengatur bukaan katub udara, dan katub minyak. Aliran udara diukur besarnya oleh sebuah

venturi dan dilinierkan oleh sebuah *square root executor*, sehingga akan diperoleh aliran udara yang konstan sesuai dengan set point yang diinginkan. Hasil pengukuran aliran udara ini juga disalurkan ke sebuah *ratio controller*. *Ratio controller* berfungsi untuk mengatur besarnya perbandingan aliran udara dan aliran minyak, sehingga besarnya aliran minyak akan selalu tetap perbandingannya dengan aliran udara sekunder. Besarnya aliran minyak diukur oleh sebuah flowmeter.

Pada pengendalian temperatur ini, udara memiliki pengaruh yang dominan jika dibandingkan dengan minyak, karena dalam proses ini jika temperatur kurang dari set point, maka bukaan katub udara diperbesar sehingga laju aliran udara bertambah sedangkan laju aliran minyak langsung menyesuaikan dengan diatur oleh *ratio controller*. Jika ternyata hasil pembakaran kurang baik, maka perbandingan antara udara dan minyak dapat diubah dengan jalan mengubah perbandingan *ratio setter*.

Sistem adalah kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama-sama dan melakukan suatu sasaran tertentu. Kontrol berarti menerapkan mengukur nilai dari variabel sistem yang dikontrol dan menerapkan variabel yang dimanipulasi ke sistem untuk mengoreksi atau membatasi penyimpanan nilai yang diukur dari nilai yang dikehendaki. (Ogata jilid I, 1996 : 4)

Sistem kontrol merupakan sebuah sistem yang terdiri atas satu atau beberapa peralatan yang berfungsi untuk mengendalikan sistem lain yang berhubungan dengan sebuah proses. Tujuan sistem kontrol dikenal sebagai sistem regulator, yang bertujuan mempertahankan keluaran sistem pada tingkat yang telah ditetapkan. Suatu sistem dapat dikatakan tidak stabil jika keluarannya tidak dapat dikendalikan (Kuo, B.C, 1998). Suatu kelebihan dari sistem kontrol loop tertutup adalah penggunaan umpan balik yang membuat respon sistem relatif kurang peka terhadap gangguan eksternal dan perubahan internal pada parame-

ter 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 (Ogata jilid I, 1996 : 4-6).

Sistem kontrol proses adalah gabungan serta kerja alat-alat pengendalian otomatis. Sedangkan semua peralatan yang membentuk sistem pengendalian disebut instrumentasi pengendalian proses. Ada banyak parameter yang dikendalikan di dalam suatu proses. Diantaranya yang paling umum adalah tekanan di dalam sebuah vessel atau pipa, aliran (flow) di dalam pipa, suhu (temperature) di unit proses seperti heat exchanger, atau permukaan zat cair (level) di sebuah tangki. Pada sistem pengendalian otomatis terdapat komponen-komponen pokok seperti elemen proses, elemen pengukuran (*sensing elemen dan transmitter*), elemen *controller (control unit)*, dan *final control element* atau *control valve*. Dalam bentuk matematis, semua kotak elemen diisi dalam persamaan matematik yang merupakan transfer *function* elemen-elemen tersebut.

Karakteristik performansi suatu sistem seringkali dinyatakan dalam bentuk respon transien terhadap masukan berupa unit step (tangga satuan). Jika respon terhadap masukan unit step diketahui, maka setiap respon akan dapat dihitung secara matematis. Respon transien suatu sistem terhadap masukan berupa sinyal unit step bergantung pada syarat awal. Untuk dapat membandingkan respon transien dari berbagai macam sistem, hal yang biasa dilakukan adalah menggunakan syarat awal standar bahwa sistem mula-mula dalam keadaan diam, sehingga semua keluaran dan semua turunan terhadap waktunya pada awal respon akan sama dengan nol. Selanjutnya karakteristik respon secara mudah dapat dibandingkan. Respon transien suatu sistem kontrol sering

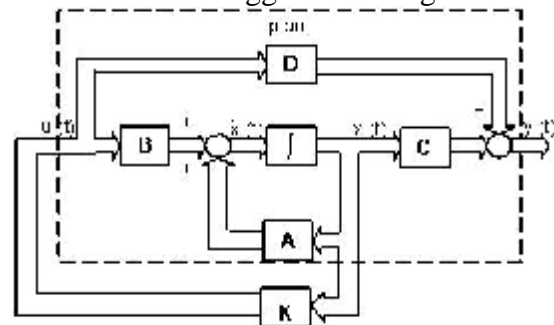
kali menunjukkan suatu osilasi teredam sebelum mencapai keadaan mantapnya.

State keadaan suatu sistem dinamik adalah sekelompok variabel terkecil (disebut variabel keadaan) sehingga pengetahuan dari variabel tersebut pada $t = t_0$, dengan masukan untuk $t \geq t_0$, secara lengkap menentukan kelakuan sistem untuk $t \geq t_0$.

Konsep keterkendalian dan keteramatan diperkenalkan pertama kali oleh Kalman, memiliki peranan penting dalam aspek teori dan praktis pada kendali modern. Syarat keterkendalian dan keteramatan menentukan keberadaan suatu solusi terhadap masalah kendali optimal. Hal inilah yang membedakan antara kendali modern dan kendali klasik. Pada kendali klasik, teknik perancangan dilakukan dengan metode coba-coba (*trial-error*), sehingga perancang sulit sekali menentukan ada atau tidaknya solusi kendali tersebut. Sedangkan pada teori kendali optimal dapat dengan mudah diketahui apakah solusi perancangan kendali ada atau tidak untuk parameter sistem dan tujuan perancangan. (Kuo, B.C. 1998). Indeks performansi adalah bilangan yang menunjukkan tingkat kebaikan kinerja sistem. Suatu sistem kontrol dikatakan optimal jika nilai parameter yang dipilih sedemikian rupa, sehingga pemilihan indeks performansi minimum atau maksimum tergantung keadaannya. Nilai optimal parameter tergantung secara langsung pada indeks performansi yang dipilih (Ogata, 1992:305). Sistem Kontrol Optimal adalah sistem kontrol yang mempunyai unjuk kerja terbaik (best performance) terhadap suatu acuan tertentu. Sistem kontrol mempunyai tolak ukur, artinya sistem tersebut mengacu pada suatu referensi (Houpis. D'Azzo, 1995).

Hal utama yang perlu diperhatikan pada teori kontrol optimal adalah penggunaan persamaan keadaan yang menjelaskan ciri atau karakteristik dari sistem dinamik (plant) yang akan dikontrol (Gopal, 1987 : 419). Indeks performansi tersebut juga bisa dikatakan costfunctional atau fungsi akhir,

yang menjelaskan bagaimana performansi sistem diantara t_i dan waktu akhir t_f (Rowland, 1986: 458). Linear Quadratic Control merupakan salah satu metode dalam perancangan sistem kendali optimal. Plant diasumsikan sebagai sistem linier, dalam bentuk persamaan keadaan dan fungsi objektif adalah fungsi kuadratik dari keadaan dan sinyal input kendali. Permasalahan dapat dirumuskan dan dipecahkan pada kawasan frekuensi menggunakan fungsi alih.



Gambar 1 Sistem Kontrol Optimal dengan Umpan Balik Keadaan (State Feedback)

Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah suatu metode optimasi untuk menentukan sinyal masukan yang akan membawa suatu sistem linier dari kondisi awal $x(t_0)$ ke suatu kondisi $x(t)$ yang akan meminimumkan suatu indeks kinerja yaitu indeks performansi kuadratis. Kelebihan penggunaan formula linear quadratic adalah pada kemudahan analisa dan pengimplementasiannya. Beberapa masalah yang biasa diselesaikan dengan metode ini adalah masalah minimisasi waktu, minimisasi bahan bakar, dan lain-lain.

$$J = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt$$

(1)

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

(2)

dengan:

J = indeks performansi

Q = matrik simetris, semi definit real ($Q > 0$)

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

Q dan R merupakan matrik-matrik pembobot yang dipilih berdasarkan kebutuhan utama dari state yang dikehendaki (Ogata

jilid II, 1996 : 411). Formulasi dan solusi masalah LQR pada waktu berhingga, dengan nilai umpanbalik keadaan dinyatakan:

$$u(t) = -[K]x(t)$$

$$K(t) = R^{-1}B^T P$$

(3)

dengan P adalah solusi persamaan Riccati. Gambar 1 merupakan representasi dari sistem dalam bentuk state yang menggunakan kontroler dengan metode LQR.

Untuk menilai apakah performansi suatu sistem adalah optimal, dibutuhkan kriteria dimana kualitas performansi bisa diukur. Kriteria ini dikenal sebagai indeks performansi yang dihitung dengan menggunakan integral dari fungsi penyimpangan keluaran sistem yang sebenarnya

METODE

Pemodelan Sistem

Langkah-langkah yang dilakukan untuk membuat model matematis sistem antara lain adalah sebagai berikut: (1) Menentukan sistem yang akan diteliti dan komponen-komponen yang menyusun sistem tersebut, (2). 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-laplacekanya, maka akan didapatkan fungsi alih sistem. Fungsi alih sistem ini, kemudian diubah ke bentuk persamaan ruang keadaan (*state space*), (3). Membuat blok skema sistem pengendalian dengan menggunakan Linear Quadratic Regulator (LQR) untuk pengendalian temperatur.

Perancangan Linear Quadratic Regulator (LQR)

Adapun langkah-langkah dalam perancangan LQR meliputi: (1). Menentukan persamaan keadaan dari fungsi alih plant, (2). Membuktikan keterkendalian dan keteramatan sistem. Dari

fungsi alih sistem yang telah diubah ke bentuk persamaan keadaan, dilakukan pemeriksaan, apakah sistem memenuhi syarat keterkendalian dan keteramatan. Jika tidak maka sistem tidak dapat dikontrol, jika ya maka proses dapat dilanjutkan, (3). Menentukan indeks performansi sistem. Indeks performansi adalah suatu tolak ukur yang menyatakan seberapa baik kinerja sistem. Semakin mendekati kinerja suatu sistem dengan indeks performansi, maka semakin baik sistem tersebut, (4). Menentukan matriks bobot Q dan R. Penentuan matriks bobot Q dan R ini dilakukan secara trial and error yang pemilihannya berdasarkan nilai sisa relatif paling sedikit. Perhitungan nilai sisa relatif ini menggunakan program MATLAB, (5). Mendapatkan matriks umpan balik LQR dengan cara menyelesaikan persamaan Riccati dan hukum kontrol optimal.

$$K(t) = R^{-1}B^T P$$

Pengujian dan Simulasi Hasil Rancangan

Simulasi sistem dilakukan dengan menggunakan fasilitas-fasilitas yang tersedia pada perangkat lunak program MATLAB 6.5.1, langkah-langkah pengujian dan simulasi sistem adalah sebagai berikut: (1) Pengujian dilakukan untuk respon sistem tanpa kontroler, respon sistem dengan kontroler tanpa beban, juga sistem dengan kontroler dan beban, (2) Kriteria hasil optimasi akan optimal atau tidak didasarkan pada kriteria performansi untuk respon sistem yang terdapat didasar teori.

HASIL

Hasil Pengendalian Temperatur

Katub Kendali Udara

Pada pengendalian temperatur furnace ini kontrol valve udara adalah kontrol valve jenis diafragma. Dengan data teknis yang diperoleh, adalah sebagai berikut:

T_{cv} = konstanta waktu = 7,5 menit = 450 s

Flow maks = 1920000 lt/jam = 3456 kg/jam = 0,96 kg/s

Berat jenis udara = 0,0018 kg/lt

Span output = 15 – 3 Psi

Span input = 20 – 4 mA

Nilai penguatan valve untuk karakteristik aliran linier berdasarkan data teknis adalah:

$$G_v = \frac{F \max}{psi} = \frac{0,96}{12} = 0,08 \text{ kg / s } psi^{-1}$$

(4)

Untuk berikutnya konstanta waktu ini dapat dimasukkan ke dalam persamaan fungsi alih dari katub pengendali:

$$\frac{F(s)}{U(s)} = \frac{0,08}{450s + 1} \text{ kg / s } psi^{-1}$$

(5)

Katub Kendali Minyak

Pada pengendalian temperatur furnace ini kontrol valve minyak adalah kontrol valve jenis diafragma. Dengan data teknis yang diperoleh, adalah sebagai berikut:

T_{cv} = konstanta waktu = 7,5 menit = 450 s

Flow maks = 1248 lt/jam = 1148 kg/jam = 0,319 kg/s

Berat jenis minyak = 0,92 kg/lt

Span output = 15 – 3 Psi

Span input = 20 – 4 mA

Nilai penguatan valve untuk karakteristik aliran linier berdasarkan data teknis adalah:

$$G_v = \frac{F \max}{psi} = \frac{0,319}{12} = 0,0265 \text{ kg / s } psi^{-1}$$

(6)

Untuk berikutnya konstanta waktu ini dapat dimasukkan ke dalam persamaan fungsi alih dari katub pengendali:

$$\frac{F(s)}{U(s)} = \frac{0,0265}{450s + 1} \text{ kg / s } psi^{-1}$$

(7)

Model Matematis Transduser (Arus-Tekanan)

Dari data teknis diperoleh bahwa ΔP (span) adalah bahwa 3 – 15 psi memberi kesetaraan arus listrik 4 – 20 mA.

Sehingga:

$$span_{output} = (20 - 4) \text{ mA} = 16 \text{ mA}$$

$$span_{input} = (15 - 3) \text{ psi} = 12 \text{ psi}$$

didapatkan:

$$K_1 = \frac{15 - 3 \text{ psi}}{20 - 4 \text{ mA}} = 0,75 \text{ psi / mA}$$

Model Matematis Transduser (Suhu-Arus)

Dari data teknis diperoleh bahwa ΔT (span) adalah bahwa 1700°C – 800°C memberi ke setaraan arus listrik 4 – 20 mA.

Sehingga:

$$span_{output} = (20 - 4) \text{ mA} = 16 \text{ mA}$$

$$span_{input} = (1700 - 800) \text{ }^\circ\text{C} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$$

didapatkan

$$K_2 = \frac{16 \text{ mA}}{900 \text{ }^\circ\text{C}}$$

(9)

Model Matematis Transduser (Arus-Suhu)

Dari data teknis diperoleh bahwa bahwa arus listrik (4 – 20) mA memberi kesetaraan temperatur 1700°C – 800°C.

Sehingga :

$$span_{output} = (1700 - 800) \text{ }^\circ\text{C} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$span_{input} = (20 - 4) \text{ mA} = 16 \text{ mA}$$

didapatkan

$$K_3 = \frac{900 \text{ }^\circ\text{C}}{16 \text{ mA}}$$

(10)

Model Matematis Transduser (Tegangan - Arus)

Dari data teknis diperoleh bahwa tegangan (0 – 10)mV memberi kesetaraan arus listrik (4 – 20) mA.

Sehingga :

$$span_{output} = (20 - 4) \text{ mA} = 16 \text{ mA}$$

$$span_{input} = (10 - 0) \text{ mV} = 10 \text{ mV}$$

didapatkan

$$K_4 = \frac{16}{10} \text{ mA/mV} \quad (11)$$

Model Matematis Termokopel

Pada pengendalian temperatur furnace ini, sensor temperatur yang digunakan adalah termokopel. Jenis termokopel yang dipakai adalah termokopel tipe B. Fungsi alih elemen sensor dapat didekati sebagai elemen orde satu.

$$\frac{T_i(s)}{T_o(s)} = \frac{K_T}{t_T s + 1} \quad (12)$$

Dengan Keterangan:

K_T = gain transmitter

τ_T = konstanta waktu = 5 menit = 300 s

Jika nilai span output adalah (10 - 0) mV dan nilai span input adalah (1700 - 800)°C, maka:

$$K_T = \frac{\text{span output}}{\text{span input}} \quad (13)$$

(Frans Gunterus, 1994)

$$K_T = \frac{\text{span keluaran}}{\text{span var iabel terukur}} = \frac{(10 - 0) \text{ mV}}{(1700 - 800)^\circ \text{C}} = 0,0111 \text{ mV} / ^\circ \text{C} \quad (14)$$

4)

Sehingga didapatkan nilai fungsi alih dari termokopel sebagai berikut:

$$\frac{T_i(s)}{T_o(s)} = \frac{0,0111}{300 s + 1} \text{ mV} / ^\circ \text{C} \quad (15)$$

Model Matematis Sistem Secara Keseluruhan

Dari pemodelan pada masing-masing peran kat pada subbab sebelumnya dapat disusun kedalam blok diagram sistem secara keseluruhan. Untuk mengamati respon furnace secara keseluruhan, sebelumnya harus diketahui keadaan awal furnace. Hal ini dilakukan untuk mengevaluasi model dan mengamati respon dari furnace. Dari gambar blok diagram fungsi alih sistem secara

keseluruhan pada Gambar 2 didapatkan persamaan fungsi alih sebagai berikut: fungsi alih pada persamaan (16) harus diubah dulu ke dalam persamaan keadaan, agar kontroler dengan metode LQR dapat dirancang.

Perancangan Menggunakan Metode Linear Quadratic Regulator (LQR)

Perancangan sistem kendali optimal dilakukan dengan simulasi terhadap sistem yang telah dimodelkan. Dalam perancangan kontroler dengan menggunakan metode LQR meliputi langkah-langkah sebagai berikut: (1). Menentukan persamaan keadaan dari fungsi alih plant, (2). Membuktikan keterkendalian dan keteramatan sistem, (3) Menentukan indeks performansi sistem. Indeks performansi adalah suatu tolak ukur yang menyatakan seberapa baik kinerja sistem. Semakin mendekati kinerja suatu sistem dengan indeks performansi, maka semakin baik sistem tersebut, (4). Menentukan matriks bobot Q dan R. Penentuan matriks bobot Q dan R ini dilakukan secara trial and error yang pemilihannya berdasarkan nilai sisa relatif paling sedikit, (5). Mendapatkan matriks umpan balik LQR dengan cara menyelesaikan persamaan Riccati dan menerapkan hukum kontrol optimal.

$$K(t) = R^{-1} B^T P$$

Persamaan Keadaan dari Fungsi Alih Plant Bentuk fungsi alih pada Gambar 2 diubah menjadi bentuk persamaan keadaan (state space), agar kontroler dapat dirancang dan didapatkan suatu kontrol yang optimal. Matriks keadaan dan keluaran sistem adalah sebagai berikut:

Matriks keadaan sistem pada persamaan (17) menghasilkan keluaran pada persamaan (18).

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{461486s^4 + 693984s^3 + 26166668s^2 + 57,397s}{12150s^7 + 82217205s^6 + 20716052s^5 + 5262,649s^4 + 28,653s^3 + 0,0378s^2} \dots\dots (16)$$

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

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0033 & 105424 & 1782469 & 0,7519 & -2,5802 & 0 & 0 \\ 0 & -0,7519 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0002 \\ 0 & 0 & -0,7519 & 0 & 0 & 0,0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,7519 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,7519 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0022 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0022 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0,0133 & 0 \\ 0,0133 & 0 \end{bmatrix} u \dots\dots (17)$$

$$y = Cx + D$$

$$y = [0,0033 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} + [0 \ 0] \dots\dots (18)$$

Uji Keterkendalian dan Keteramatan Sistem
 Dalam penggunaan kontrol optimal digunakan fungsi alih dalam bentukruang keadaan, sehingga diperlukan suatu pembuktian keterkendalian an keteramatan pada sistem untuk membuktikan apakah sistem dapat dikontrol dan dapat diamati.
Pembuktian Keterkendalian Sistem (Control lability)
 Matrik keterkendalian:
 $co = [B \ | \ AB \ | \ A(n-1)B] \dots\dots (19)$
 Dengan menggunakan program Matlab matriks keterkendalian diperoleh dengan cara sebagai berikut :
 $co = ctrb (A,B);$
 $Rank (co) = 7$
 $Det co = 1$
 Nilai determinan tidak sama dengan nol karena matriks keterkendalian memiliki full

rank yaitu 7 sebesar 1. Dengan demikian dapat disimpulkan sistem dapat dikendalikan (controllable).

Pembuktian Keteramatan Sistem
 Matriks keteramatan (observability matrix):
 $ob = [CT|ATCT \ | \ | \ (AT)n-1CT] \dots\dots (20)$

Dengan menggunakan program Matlab matriks keteramatan diperoleh dengan cara sebagai berikut:

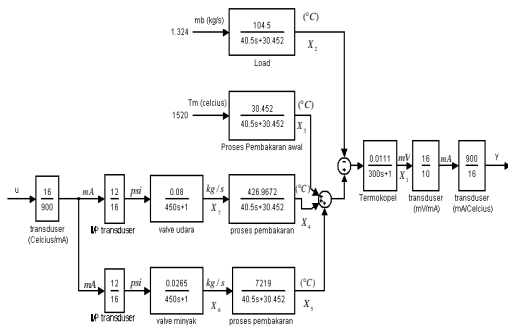
$ob = obsv (A,C);$
 $Rank (ob) = 5$
 $Det ob = 2.2368e-103$

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 pada persamaan (21).
 Setelah diperoleh penyelesaian persamaan Riccati, maka dengan menggunakan paket

program Matlab pula, didapatkan matriks umpan balik sebagai berikut:

$$K = \begin{bmatrix} 0,0005 & 0,0074 & 0,1259 & 0,0005 \\ -0,0018 & 0,0036 & 0,0009 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Gambar 3 adalah gambar sistem setelah diberi umpan balik K.



Gambar 3 Blok Diagram Sistem Keseluruhan

PEMBAHASAN

Pmbahasan Simulasi Sistem Tanpa Umpan Balik LQR

Pada sub bab ini akan diperlihatkan respon sistem furnace tanpa umpan balik LQR. Pada bab sebelumnya telah ditentukan bahwa keluaran sistem yang diamati adalah temperatur furnace, maka gambar yang disajikan di sini adalah keluaran tersebut berdasarkan masukan yang berupa temperatur furnace yaitu sebesar 1570°C dan suhu awal furnace sebesar 1520°C.

Gambar 4 merupakan unjuk kerja sistem tanpa kontroler yang memiliki performansi sistem sebagai berikut:

- Waktu naik (rise time), tr: 1500 detik
- Waktu penetapan (settling time), ts:3400 detik
- Maximum overshoot, Mp: 0%
- Error steady state, ess : 36%

Pembahasan Simulasi Sistem Dengan Kontroler
Simulasi Sistem Dengan Kontroler Pada Saat Beban Nol

Simulasi sistem dengan kontroler pada saat beban nol bertujuan untuk menganalisa kea daan sistem sebelum diberi beban. Respon sistem dengan beban nol adalah sebagai berikut:

Gambar 5 merupakan unjuk kerja sistem de ngan Q = 0,001 dan R = 11 yang memiliki performansi sistem sebagai berikut:

- Waktu naik (rise time), tr:1100 detik
- Waktu penetapan (settling time), ts: 2000 detik.
- Maximum overshoot, Mp: 0%
- Error steady state, ess: 0%

Pada pengujian dengan beban nol dapat dilihat bahwa respon memiliki error steady state (ess) sebesar 0 %.

Simulasi Sistem Dengan Kontroler Pada Sa at Beban 1,324 kg/s.

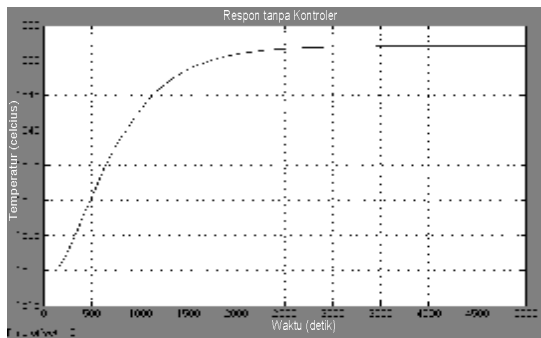
Pada sistem dengan beban sebesar 1,324 kg/s dilakukan empat kali pengujian, yang bertujuan untuk menganalisa sistem dengan pola gangguan yang berbeda. Pengujian per tama beban dianggap konstan (tidak berubah terhadap waktu), pengujian kedua dengan si nyal uji step, dan pengujian ketiga dengan si nyal uji pulsa. Dibawah ini adalah respon ha sil pengujian sistem dengan beban konstan.

Gambar 6 merupakan unjuk kerja sistem dengan beban konstan sebesar 1,324 kg/s yang memiliki performansi sistem sebagai berikut: Waktu naik (rise time), tr: 1100 detik

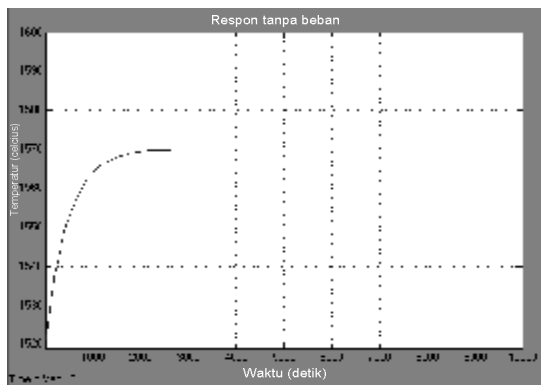
- Waktu penetapan (settling time), ts (2%).....: 2000 detik
 - Maximum overshoot, Mp: 0%
 - Error steady state, ess : 0, 17%
- Pengujian kedua dengan sinyal uji step sebagai beban dengan step time sebesar 2500 detik. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 7.

Gambar 7 Respon sistem dengan kontroler dengan beban 1,324 kg/s Setpoint 1570°C
 Gambar 7 merupakan unjuk kerja sistem dengan beban sebesar 1,324 kg/s yang memiliki performansi sistem sebagai berikut:

Waktu naik (rise time), t_r : 1100 detik
 Waktu penetapan (settling time), t_s (2%): 2000 detik, Maximum overshoot, M_p : 0%, Error steady state, ess : 0,18%
 Waktu pemulihan: 1000 detik.



Gambar 4 Respon sistem tanpa kontroler dengan Setpoint 1570°C

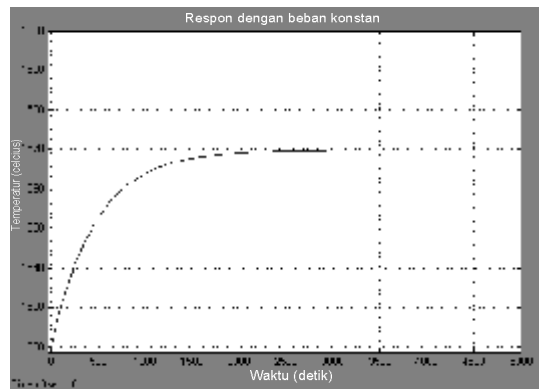


Gambar 5 Respon sistem dengan beban nol $Q=0,001$ dan $R=11$ Setpoint 1570°C

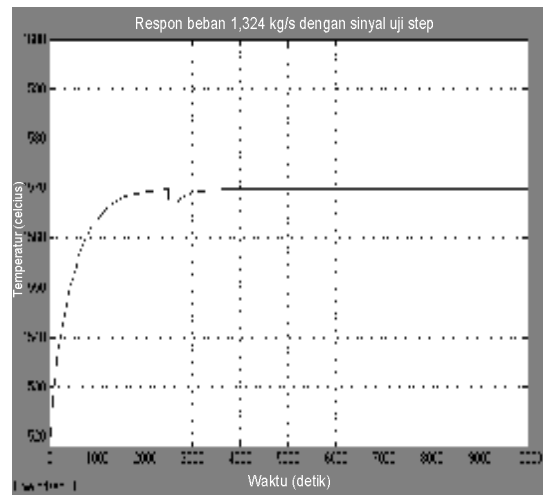
Pada kenyataannya pola gangguan yang terjadi pada plant tidaklah konstan, jika pemasukan bahan baku naik, maka temperatur furnace akan turun, dan jika pemasukan bahan baku tidak berubah, temperatur furnace akan tetap berada pada keadaan sebelumnya (sesuai dengan setpoint). Sehingga dalam hal ini pola gangguan dapat diumpamakan sebagai pola gangguan pulsa. Gambar 8 respon furnace dengan pola gangguan pulsa: Gambar 7 merupakan unjuk kerja sistem dengan beban sebesar 1,324 kg/s yang

memiliki performansi sistem sebagai berikut:

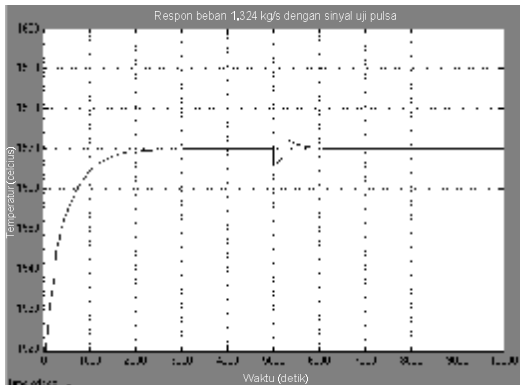
Waktu naik (rise time), t_r : 1100 detik
 Waktu penetapan (settling time), t_s (2%): 2000 detik
 Maximum overshoot, M_p : 0%
 Error steady state, ess : 0,18%
 Waktu pemulihan: 1000 detik



Gambar 6 Respon sistem dengan beban konstan $Q=0,001$ dan $R=11$ Setpoint 1570°C



Gambar 7 Respon sistem dengan kontroler dengan beban 1,324 kg/s Setpoint 1570°C



Gambar 8 Respon sistem dengan kontroler dengan beban 1,324 kg/s Setpoint 1570°C

Pada kenyataannya pola gangguan yang terjadi pada plant tidaklah konstan, jika pemasukan bahan baku naik, maka temperatur furnace akan turun, dan jika pemasukan bahan baku tidak berubah, temperatur furnace akan tetap berada pada keadaan sebelumnya (sesuai dengan setpoint). Sehingga dalam hal ini pola gangguan dapat diumpamakan sebagai pola gangguan pulsa. Gambar 8 respon furnace dengan pola gangguan pulsa: Gambar 8 respon furnace dengan pola gangguan pulsa

Gambar 8 merupakan unjuk kerja sistem dengan beban sebesar 1,324 kg/s yang memiliki performansi sistem sebagai berikut:

Waktu naik (rise time), t_r : 1100 detik

Waktu penetapan (settling time),

$t_s(2\%)$: 2000 detik

Maximum overshoot, M_p : 0%

Error steady state, ess : 0%

Waktu pemulihan: 1000 detik

Dari Gambar 7 dan 8 dapat dilihat bahwa untuk pola gangguan step dan pulsa kontroler masih dapat mengatasi dengan baik, meskipun terdapat lonjakan tetapi sistem dapat mencapai setpoint dengan waktu pemulihan yang tidak begitu lama dan error steady state (ess) sangat kecil sekali. Jadi kontroler dapat bekerja secara optimal dengan melihat respon sistem lebih cepat

mencapai steady state dan error steady state kecil.

KESIMPULAN

Dari hasil keseluruhan analisa yang telah dilakukan ini, maka dapat disimpulkan bahwa penerapan pengendalian optimal terhadap pengendalian temperatur dapat dilakukan dengan baik. Dengan melihat hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut: Hasil optimasi dengan menggunakan metode LQR memiliki respon temperatur furnace paling optimal pada matrik bobot $Q = 0,001$ dan $R = 11$ terbukti dari nilai ss relative residual (rr) nya paling kecil yaitu sebesar $3.2008e-014$, dan respon yang dihasilkan memiliki nilai settling time (t_s) sebesar 2000 detik, lebih cepat sebesar 700 detik dari t_s data dari pabrik. Error steady state (ess)nya juga lebih mendekati nol, yaitu sebesar 0,17% (untuk pengujian beban dengan sinyal uji step) dapat dilihat pada Gambar 5, sedangkan untuk pengujian dengan beban nol dan pengujian dengan beban dengan sinyal uji pulsa nilai ess adalah nol. (berdasarkan Gambar 6 dan Gambar 8).

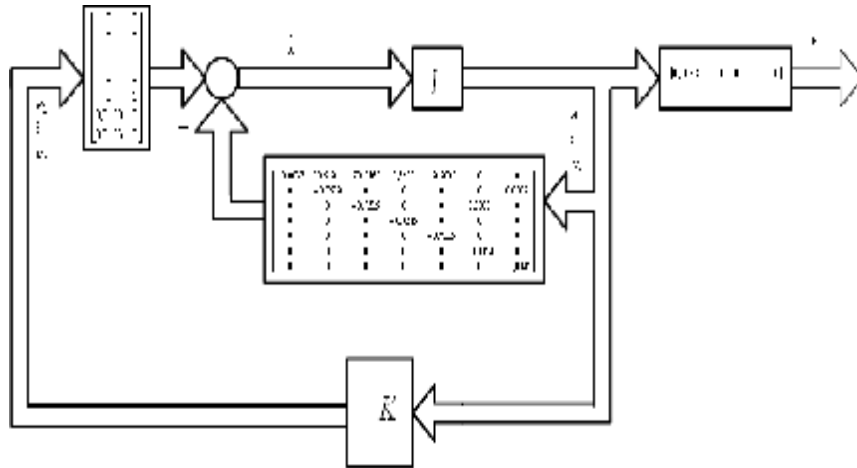
Pada pengujian sistem (beban 1,324 kg/s) terdapat lonjakan, tetapi tidak terlalu berpengaruh pada kerja sistem secara keseluruhan, dapat dilihat dari nilai ess yang mendekati nol. (berdasarkan Gambar 8).

Pada pengujian dengan beban berubah, jika beban bertambah maka temperatur akan turun, sebaliknya jika beban berkurang maka temperatur akan naik. (berdasarkan Gambar 8)

Saran

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. Optimasi dilakukan secara online, agar dapat diketahui respon sistem secara riil.

$$P=1,0e+003^* \begin{bmatrix} 0,0001 & 0,0021 & 0,0353 & 0,0001 & -0,0005 & 0,0004 & 0,0001 \\ 0,0021 & 0,0293 & 0,4989 & 0,0021 & -0,0072 & 0,0052 & 0,0009 \\ 0,0353 & 0,4989 & 8,3664 & 0,0353 & -0,1211 & 0,0882 & 0,0157 \\ 0,0001 & 0,0021 & 0,0353 & 0,0001 & -0,0005 & 0,0004 & 0,0001 \\ -0,0005 & -0,0072 & -0,1211 & -0,0005 & 0,0018 & -0,0013 & -0,0002 \\ 0,0004 & 0,0052 & 0,0882 & 0,0004 & -0,0013 & 0,0025 & 0,0004 \\ 0,0001 & 0,0009 & 0,0157 & 0,0001 & -0,0002 & 0,0004 & 0,0003 \end{bmatrix} \quad (21)$$



Gambar 3 Blok Sistem dengan Umpan Balik K

Daftar Rujukan

- Coughanowr, D. R. 1991. *Process System Analysis And control*. USA. Mc Graw-Hill.Inc
- Gopal, M. 1987. *Modern Control System Theory*. Singapura: John Wiley & Sons (SEA) Pte.Ltd.
- Gunterus, F. 1994. *Falsafah Dasar : Sistem Pengendalian Proses*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo.
- Houpis, D'Azzo. 1988. *Linear Control Systems Analysis and Design Conventional and Modern*. USA: McGraw-Hill,Inc.
- Houpis, D'Azzo. 1995. *Linear Control Systems Analysis and Design*. USA: McGraw-Hill,Inc.
- ISO 9002 KEMA, *Company Profile, PT. IGLAS (Persero)*.
- Kuo, B. C. 1995. *Teknik Kontrol Automatik Jilid I*. Jakarta : PT. Prentice Hall,inc.
- Lewis, F.L. 1996. *Optimal Control*. Kanada: John Wiley & Sons, Inc.
- Ogata, K. 1992. *Teknik Kontrol Automatik Jilid I*. Jakarta: Penerbit Erlangga.