

Optimasi Kontrol untuk Variabel *Flow Rate* dan Temperatur *Furnace* Berbasis Solusi Persamaan *Riccati*

Moch. Rusli¹, Tri Nurwati², Faldano Bastian Tarigan³

^{1, 2, 3} Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya

Email: rusli@ub.ac.id, trinurti@ub.ac.id, faldano31@gmail.com

Abstract—The steam generated by the furnace must be maintained at a temperature of 370-375°C and should not exceed 375°C for preventing the cracking of waste oil. One of the control systems that can be used to control furnace temperature is the optimal control system with the Linear Quadratic Regulator method (LQR). The application of LQR is able to speed up a steady state time in a system. The system performance has met the optimization requirements, namely, the steady state flow rate value is 349.9 g / s or 97,194 kg / hour, the tr flow rate value is 1.4 seconds, the ts flow rate value is 11 seconds, and the flow rate Mp value is 0.021%. Then the temperature steady state value is 370.9°C, the temperature tr value is 8 seconds, the temperature ts value is 20.5 seconds, the Mp temperature value is 0%, and the temperature Ess value is 0.9861%.

Index Terms—furnace, LQR (Linear Quadratic Regulator), temperature, flow rate.

Abstrak—Uap yang dihasilkan *furnace* harus dijaga pada suhu 370-375°C dan tidak boleh melebihi 375°C untuk mencegah terjadinya *cracking* pada *waste oil*. Salah satu sistem kontrol yang dapat digunakan untuk mengontrol suhu *furnace* adalah sistem kontrol optimal dengan metode *Linear Quadratic Regulator* (LQR). Penerapan LQR mampu mempercepat waktu keadaan mantap pada sistem. Performansi sistem telah memenuhi syarat keoptimalan yaitu, nilai *steady state flow rate* sebesar 349.9 g/s atau 97.194 kg/jam, nilai *tr flow rate* sebesar 1.4 detik, nilai *ts flow rate* sebesar 11 detik, dan nilai *Mp flow rate* sebesar 0.021%. Kemudian nilai *steady state* suhu sebesar 370.9°C, nilai *tr* suhu sebesar 8 detik, nilai *ts* suhu 20.5 detik, nilai *Mp* suhu 0%, dan nilai *Ess* suhu sebesar 0.9861%.

Kata Kunci—*furnace*, LQR (*Linear Quadratic Regulator*), suhu, *flow rate*

I. PENDAHULUAN

Atmosferik merupakan proses memisahkan fraksi-fraksi yang terkandung dalam minyak menjadi produk tertentu berdasarkan rentang titik didihnya pada tekanan atmosfer dengan menggunakan energi panas. Pada proses ini terjadi pemanasan minyak mentah oleh *HE* (*heat exchanger*), kemudian akan dilakukan pemanasan lanjut oleh *furnace*. Pada *furnace* minyak yang telah terdehidrasi (*dehydrated oil*) mengalami pemanasan maksimal hingga suhunya 370-375°C. Hal ini bertujuan untuk mencapai suhu optimum pada tabung distilasi sehingga fase cair dan fase uap akan terpisah dengan baik.

Dalam pengoperasian *furnace*, uap yang dihasilkan *furnace* harus dijaga pada suhu 370-375°C dan tidak boleh melebihi 375°C untuk mencegah terjadinya

cracking pada *waste oil*. Suhu keluaran perlu dijaga karena adanya gangguan berupa perbedaan suhu material yang masuk kedalam *furnace* sehingga menyebabkan perubahan suhu di dalam *furnace*. Untuk menjaga suhu *waste oil*, diperlukan *primary sensing element* yang digunakan untuk mengukur suhu keluaran *furnace* dan mengkonversi hasil pengukuran tersebut dalam bentuk arus 4-20 mA. Kemudian hasil konversi tersebut dibaca oleh controller untuk menghasilkan sinyal kontrol yang digunakan sebagai masukan controller *flow rate*. Controller *flow rate* ini akan memberikan aksi kontrol terhadap *valve* untuk mengatur banyaknya *fuel gas* atau *fuel oil* yang masuk pada *furnace* sehingga suhu keluaran *furnace* tidak akan melebihi 375°C [1].

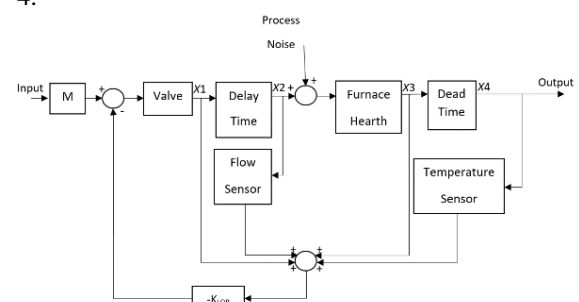
Salah satu sistem kontrol yang dapat digunakan adalah sistem kontrol optimal dengan metode LQR (*Linear Quadratic Regulator*). Sistem kontrol optimal dengan metode LQR ini dapat digunakan baik di sistem linier maupun nonlinier, dengan satu atau banyak keluaran. Selain itu pada sistem kontrol LQR, kondisi dan gangguan sistem sangat diperhatikan untuk dapat mencapai hasil yang lebih baik. Dalam metode LQR, struktur kontroler dibentuk oleh rangkaian *state feedback controller* dengan metode perhitungan regulasi [2].

II. PERANCANGAN SISTEM

A. Penyusunan Model Sistem

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

1. Menentukan Sistem yang akan diteliti dan komponen-komponen yang menyusun sistem tersebut
2. Menyusun model matematis instrument penyusun sistem dan pemodelan Plant dengan metode Sistem Identifikasi sehingga diperoleh fungsi alih plant.
3. Fungsi Alih sistem yang telah didapatkan diubah ke bentuk persamaan keadaan (*state space*).
- 4.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

B. Spesifikasi Desain

Spesifikasi desain yang diinginkan pada perancangan dan simulasi sistem yaitu:

1. *Error steady state* < 2%, karena sistem yang baik memiliki respon dengan batasan nilai eror 0-2%.
2. *Maximum overshoot* 2%, karena jika terdapat *overshoot* terlalu besar pada pengendalian temperatur bisa membahayakan sistem secara keseluruhan.
3. *Settling time* < 30 detik.
4. Memiliki *flow rate* seminimal mungkin.

C. Pemodelan Matematis Sistem

Dalam proses penurunan model matematis sistem, terdapat tiga macam cara pendekatan yang dapat dipergunakan.

1. Menyajikan model matematis sistem dengan menggunakan persamaan diferensial.
2. Menggunakan pendekatan fungsi alih (*transfer function*).
3. Pendekatan ruang keadaan (*state space*).

D. Pemodelan Furnace

Proses pengendalian temperatur dalam *furnace* dapat dinyatakan dalam persamaan hukum kesetimbangan energi, dimana laju energi panas yang masuk dikurangi laju energi panas yang keluar sama dengan laju energi yang terakumulasi.

$$Q_{in} - Q_{out} = Q_{ac}$$

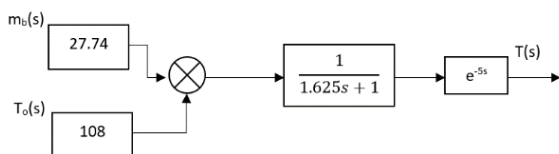
$$m_b C_b T_b - m_o C_o (T - T_o) = M_o C_o \frac{dT}{dt}$$

$$m_b(t) C_b T_b - m_o C_o (T(t) - T_o(t)) = M_o C_o \frac{dT(t)}{dt}$$

$$m_b(t) C_b T_b + m_o C_o T_o(t) = M_o C_o \frac{dT(t)}{dt} + m_o C_o T(t)$$

Dengan memasukkan nilai konstanta pada persamaan yang didapatkan dari data teknis, kemudian ditransformasi Laplace, maka diperoleh persamaan

$$T(s) = \left[\frac{1}{1.625s+1} \right] (27,74 m_b(s) + T_o(s))$$



Gambar 2. Diagram Blok Furnace

E. Pemodelan Valve

Fungsi alih dari valve dapat dinyatakan sebagai sistem orde satu.

$$\frac{m(s)}{i(s)} = \frac{G_T}{T_{CV}s+1}$$

Untuk menjalankan *valve*, sinyal keluaran kontroler harus melalui transduser I/P yang mengubah besaran arus dengan rentang nilai 4-20 mA menjadi besaran tekanan dengan nilai 0,2-1 bar atau 2,9-14,5 psi.

Maka Gain Transduser berdasarkan data adalah sebagai berikut:

$$K_T = \frac{Span_{out}}{Span_{in}} = \frac{(14.5-2.9)psi}{(20-4)mA} = 0.725 psi/mA$$

Sedangkan gain valve adalah sebagai berikut:

$$K_V = \frac{\Delta flow output}{\Delta tekanan input} = \frac{(0.61-0)Kg}{(14.5-2.9)psi} = 0.0525Kg/psi$$

Sehingga gain total valve adalah hasil kali K_T dan K_V , seperti berikut :

$$K_{total} = K_T \cdot K_V = 0.725 \cdot 0.0525 = 0.038$$

Konstanta waktu dari valve yaitu:

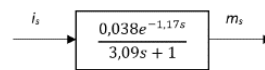
$$T_{CV} = 3(1 + 0.03) = 3.09s$$

Waktu tunda (*delay time*) dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$\tau = \frac{A \cdot L}{q}$$

$$\tau = \frac{31,67 \cdot 10^{-4} \cdot 20}{54,1 \cdot 10^{-3}} = 1,17s$$

Sehingga didapatkan diagram blok untuk valve bahan bakar seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Diagram Blok Valve Bahan Bakar

F. Pemodelan Flow Sensor-Transmitter

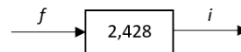
Besaran fisik yang diukur sensor yang berasal dari suatu proses harus dikonversi ke besaran tegangan atau arus yang sesuai dengan masukan standar dari kontroler. Penguatan *flow sensor-transmitter* didefinisikan sebagai:

$$K_F = \frac{output range}{input range}$$

Berdasarkan data teknis yang didapatkan, maka didapatkan gain transmitter sebagai berikut:

$$K_F = \frac{20-4}{6,588} = 2,428 mAs/Kg$$

Sehingga didapatkan diagram blok untuk flow-transmitter seperti pada gambar.



Gambar 4. Diagram Blok Flow-Transmitter

G. Pemodelan Transduser

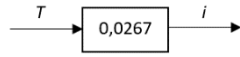
Penguatan transduser didefinisikan sebagai berikut:

$$K_{transduser} = \frac{span output}{span input}$$

Berdasarkan data teknis yang didapatkan, maka didapatkan gain transduser sebagai berikut:

$$K_{\text{transduser}} = \frac{16}{600} = 0,0267 \text{ mA}/^{\circ}\text{C}$$

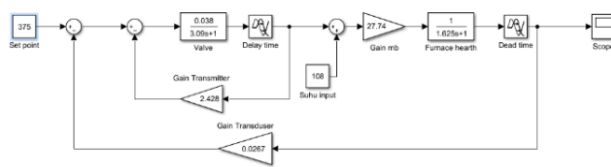
Sehingga didapatkan diagram blok untuk flow-transmitter seperti pada gambar



Gambar 5. Diagram Blok Transduser

H. Penyusunan Model State Space (Ruang Keadaan)

Dari pemodelan pada masing-masing komponen plant, dapat disusun blok diagram sistem keseluruhan untuk mencari persamaan keadaannya.



Gambar 6. Diagram Keseluruhan Sistem

Maka didapatkan 4 model state space dibawah ini :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.323x_1 + 0.0122u \\ \dot{x}_2 &= 3.418x_1 - 1.709x_2 \\ \dot{x}_3 &= -0.341x_1 + 0.341x_2 - 0.323x_3 \\ \dot{x}_4 &= 0.8x_3 - 0.4x_4 \\ y &= -x_3 + x_4 \end{aligned}$$

Kemudian dengan merubah masing-masing state ke dalam bentuk blok diagram state space, maka dapat digambarkan seperti pada Gambar 7.

Maka, bentuk umum persamaan keadaan menjadi :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ Y &= Cx + Du \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.323 & 0 & 0 & 0 \\ 3.418 & -1.709 & 0 & 0 \\ -0.341 & 0.341 & -0.323 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & -0.4 \end{bmatrix}$$

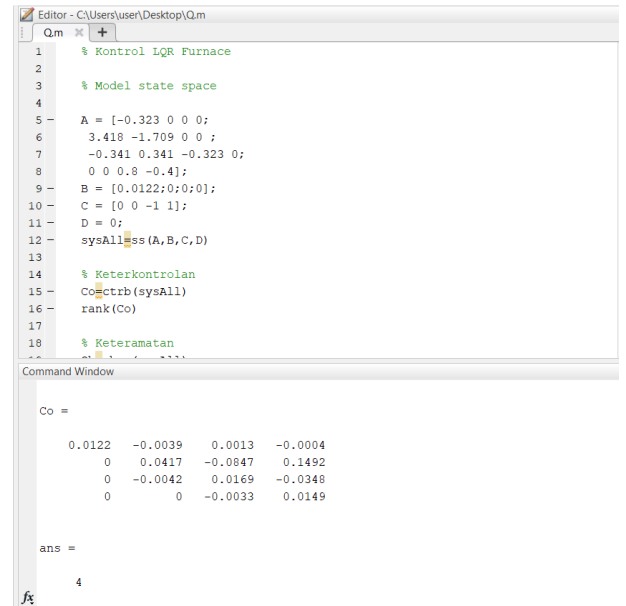
$$B = \begin{bmatrix} 0.0122 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

$$D = [0]$$

I. Keterkendalian (Controllable)

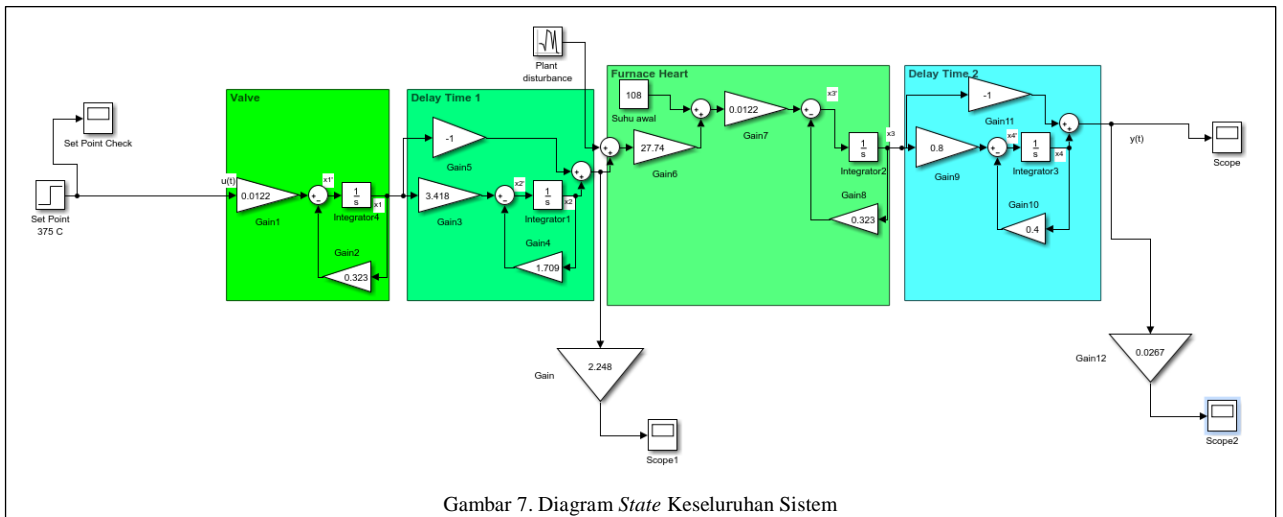
Dengan menggunakan program matlab diperoleh matriks uji keterkendalian sebagai berikut:



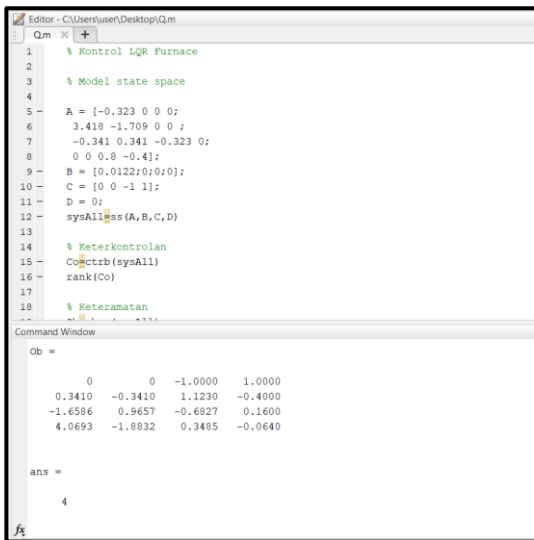
Gambar 8. Matlab Keterkendalian (Controllable)

J. Keteramatan (Observable)

Dengan menggunakan program matlab diperoleh matriks uji keteramatan sebagai berikut:



Gambar 7. Diagram State Keseluruhan Sistem



Gambar 9. Matlab Keteramatan (Observable)

K. Perancangan Kontrol Optimal LQR

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

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

Untuk sistem linear dengan time invariant:

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

Sinyal kontrol optimal hasil dari umpan balik dirumuskan sebagai berikut:

$$u(t) = -K_{LQR}x(t)$$

Dengan K_{LQR} adalah:

$$K_{LQR} = R^{-1}B^T s$$

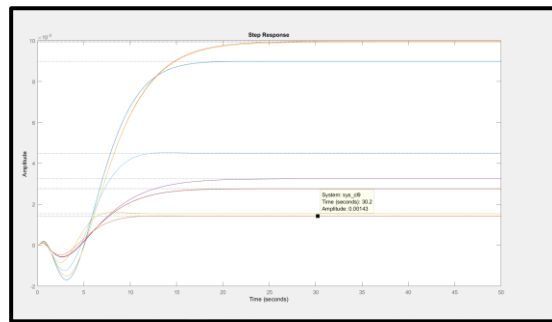
Dimana s adalah matriks definit positif yang merupakan solusi dari persamaan *Riccati*:

$$A^T s + sA + Q - sBR^{-1}B^T s = 0$$

Dengan melakukan pemilihan terhadap nilai Q dan R guna memenuhi kriteria skenario sistem yang diinginkan akan didapatkan nilai s yang merupakan solusi dari persamaan *Riccati*.

L. Penentuan Matriks Q dan R

Pada penelitian ini, diharapkan penggunaan energi yang tidak terlalu besar sehingga nilai R tidak diperbesar, melainkan nilai Q yang diperbesar agar memenuhi kriteria sistem yang diinginkan. Pemilihan matriks bobot Q ini berdasarkan nilai luasan kurva eror paling pada kawasan waktu. Dengan bantuan program matlab, maka didapatkan data pada gambar berikut.

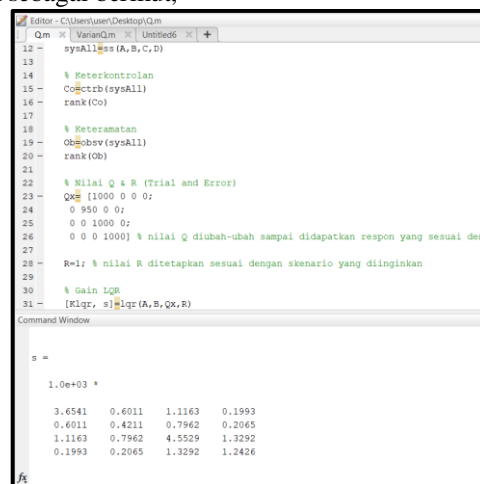


Gambar 10. Kurva Variasi Nilai Q

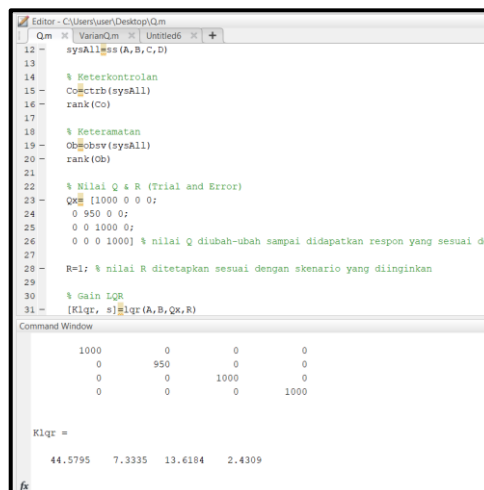
$$Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 950 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix} \text{ dan } R = [1].$$

M. Respon Sistem dengan Umpan Balik LQR

Dengan menggunakan bantuan software program matlab, maka didapatkan nilai matriks P dan matriks umpan balik LQR sebagai berikut,



Gambar 11. Nilai Matriks P



Gambar 12. Nilai LQR Gain

Hasil optimasi dengan menggunakan metode *LQR* memiliki respon temperatur *furnace* paling optimal pada matrik bobot

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 200 \end{bmatrix} \text{ dan } R = [1].$$

Dengan nilai Q dan R yang telah ditetapkan dilakukan penyelesaian permasalahan LQR pada program matlab yang menghasilkan nilai matriks

$$P=1.0e+0.3 * \begin{bmatrix} 2.7452 & 0.4448 & 0.2152 & 0.0468 \\ 0.4448 & 0.3083 & 0.1223 & 0.0428 \\ 0.2152 & 0.1223 & 0.6698 & 0.2741 \\ 0.0468 & 0.0428 & 0.2741 & 0.2496 \end{bmatrix}$$

dan nilai matriks gain umpan balik

$$K_{LQR}=[33.4910 \quad 5.4268 \quad 2.6253 \quad 0.5713]$$

yang kemudian menghasilkan sinyal umpan balik optimal $u(t)$ pada sistem.

Dengan menggunakan paket program matlab didapatkan nilai DC gain yang kemudian menghasilkan nilai prefilter gain seperti pada gambar berikut.

```

Editor - C:\Users\User\Desktop\Qm
Qm  VariasiQm  Untitled6
26  0 0 0 1000] % nilai Q diubah-ubah sampai didapatkan respon yang sesuai den
27
28  R=1; % nilai R ditetapkan sesuai dengan skenario yang diinginkan
29
30  % LQR gain
31  [Klqr, s]=lqr(A,B,Q,R)
32  % State Space gain Kc
33  Bc = [B];
34  Cc = [C];
35  Dc = [D];
36  Ac1 = [(A-B*Klqr)];
37  sys_c1 = ss(Ac1,Bc,Cc,Dc)
38
39  step(sys_c1)
40
41  % DC Gain
42  kdc=dcgain(sys_c1)
43
44  % Prefilter
45  Kpre=1/kdc
    
```

Command Window

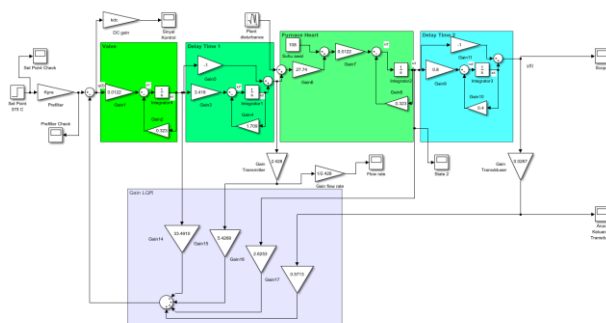
```

kdc =
    0.0100

Kpre =
    99.6771
    
```

Gambar 13. Nilai DC Gain dan Prefilter Gain

Dengan memasukkan seluruh nilai yang telah didapatkan ke dalam rangkaian simulasi, maka simulasi dapat dijalankan. Adapun gambar rangkaian simulasi adalah sebagai berikut.

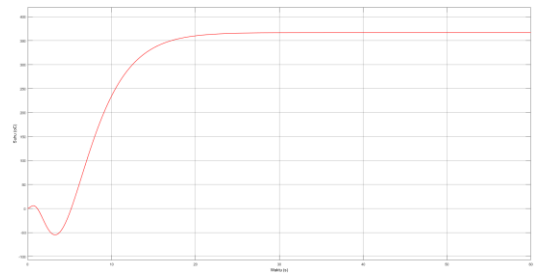


Gambar 14. Blok Diagram Sistem Umpan Balik LQR

III. HASIL DAN ANALISIS

A. Grafik Suhu Keluaran Pada Setpoint 375°C Tanpa Gangguan.

Sistem awalnya diamati dengan kondisi masukan hanya setpoint pada 375°C.

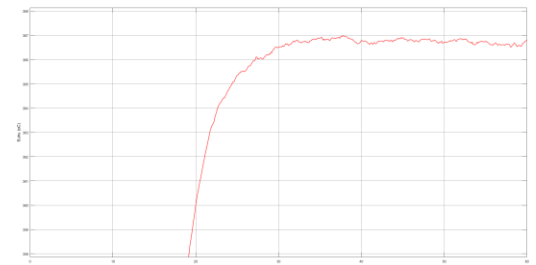


Gambar 15. Hasil Matlab simulink respon sistem dengan umpan balik LQR pada setpoint 375°C tanpa gangguan

Dari gambar grafik dapat dilihat nilai steady output suhu furnace adalah 366°C.

B. Grafik Suhu Keluaran Pada Setpoint 375°C Dengan Gangguan Acak.

Ditambahkan blok gangguan acak ke dalam rangkaian diagram blok sehingga menghasilkan gambar grafik seperti berikut.

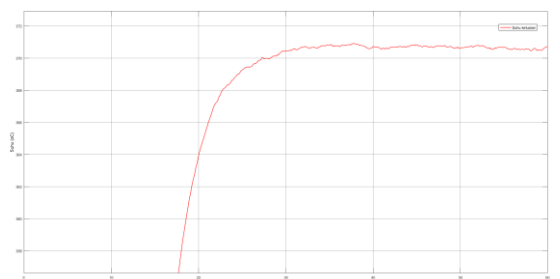


Gambar 16. Hasil Matlab simulink Grafik suhu keluaran pada setpoint 375°C dengan gangguan acak

Dari gambar grafik dapat dilihat dengan adanya gangguan acak yang terjadi, kondisi sistem menjadi tidak stabil pada nilai *Steady state*-nya.

C. Grafik Suhu Keluaran Pada Setpoint 375°C dengan Gangguan Acak dan Nilai Suhu Awal 108°C

Kemudian parameter nilai suhu awal yang digunakan di lapangan, dimasukkan ke dalam rangkaian dan kemudian diamati.

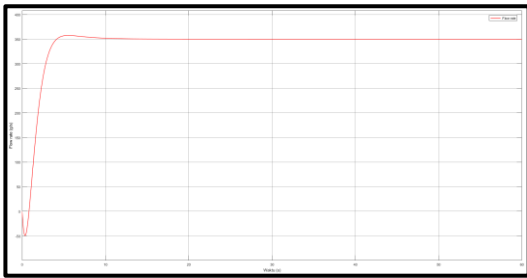


Gambar 17. Hasil Matlab simulink Grafik suhu keluaran pada setpoint 375°C dengan gangguan dan suhu awal 108°C

Dari grafik dapat dilihat bahwa semakin besar nilai input suhu awal maka nilai *Steady state* akan semakin besar pula.

D. Grafik Flow rate Pada Setpoint 375°C dengan Gangguan Acak dan Nilai Suhu Awal 108°C

Berikutnya, diamati flow rate bahan bakar dari flow sensor. Berikut merupakan grafik hasil simulasi.

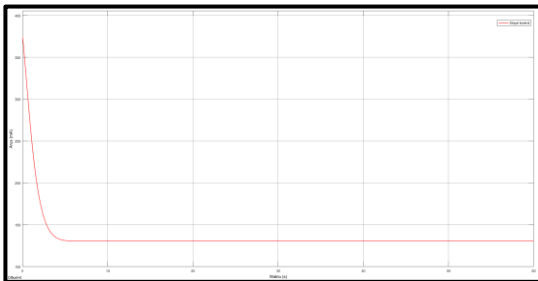


Gambar 18. Hasil *Matlab* simulink Grafik *flow rate* pada setpoint 375°C dengan gangguan dan suhu awal 108°C

Terlihat pada gambar, flow rate bahan bakar mengalami keadaan *steady* pada nilai 349.9 g/s, atau 97.194 kg/jam, dengan nilai $t_r=1.4$ detik, $t_s=11$ detik, dan $M_p=0.021\%$.

E. Grafik Sinyal Kontrol Pada Setpoint 375°C dengan Gangguan Acak dan Nilai Suhu Awal 108°C

Kemudian, dari hasil pengamatan pada program simulink didapatkan pula grafik sinyal kontrol seperti berikut.



Gambar 19. Hasil *Matlab* simulink Grafik sinyal kontrol pada setpoint 375°C dengan gangguan dan suhu awal 108°C

Dari grafik nilai arus sinyal kontrol adalah 130.7mA.

IV. KESIMPULAN

Pemilihan matriks Q dan R dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*). Dengan syarat, matriks Q adalah matriks Pimetris, semidefinit positif dan real ($Q > 0$). Sedangkan matriks R adalah matriks simetris, definit positif dan real ($R > 0$).

Performansi sistem telah memenuhi syarat keoptimalan sebuah sistem, kemudian output flow rate dan suhu telah memenuhi keinginan, yaitu flow rate: nilai *Steady state*=349.9 g/s atau 97.194 kg/jam, $t_r=1.4$ detik, $t_s=11$ detik, $M_p=0.021\%$, dan suhu: nilai *steady state*=370.9°C, $t_r=8$ detik, $t_s=20.5$ detik, $M_p=0\%$, $Ess=0.9861\%$.

REFERENSI

- [1] Rakhmad, M. 2017. Desain Dan Simulasi Kontrol Optimal *LQG (Linear Quadratic Gaussian)* Dalam Pengendalian Flow Dan Temperatur Furnace Di PT. Alp Petro Industry. Skripsi: Jurusan Elektro Unibraw, Malang.
- [2] Anderson n Moore. 1989. *Optimal Control Linier Quadratic Metohods*. USA : Prentice-hall, Inc.
- [3] Coughanowr, D. R. 1991. *Process System Analysis And control*. McGraw-Hill Inc., USA.
- [4] Gopal, M. 1987. *Modern Control System Theory*. John Wiley and Sons, Inc.
- [5] Gunterus, F. 1994. *Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo.
- [6] Houpis, C. & D' Azzo J. 1988. *Linear Control Systems Analysis and Design*. McGraw- Hill Inc., USA.
- [7] Kurniawan, I. B. 2005. Penerapan Kendali Optimal dengan Metode LQR pada Boiler di PT. Camarin Eka Laksana. Skripsi: Jurusan Elektro Unibraw, Malang.
- [8] Lewis, F.L. dan Symons, V.L. 1995. *Optimal Control*. Toronto : Jhon Wiley and Sons, Inc.
- [9] Ogata, Katsuhiko. 1992. *Teknik Control Automatik (Sistem Pengaturan) Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.