

APLIKASI KONTROL OPTIMAL LQG UNTUK PENGENDALIAN WATER LEVEL STEAM DRUM BOILER Di PG. Kebon Agung Malang Jawa Timur

Rudito Prayogo.¹, M Aziz Muslim.ST.MT.PhD. ², Ir. Purwanto.MT.²

¹Mahasiswa Teknik Elektro Univ. Brawijaya, ²Dosen Teknik Elektro Univ. Brawijaya

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: ruditoprayogo@rocketmail.com

Abstrak—*Steam drum* adalah bagian penting dari *boiler*, di dalamnya terjadi proses perubahan dari air menjadi uap (*steam*) berlangsung secara kontinyu. Level air pada *steam drum boiler* harus dijaga pada *NWL (Normally Water Level)*, level tidak boleh terlalu rendah atau tinggi dari *NWL*. *Level drum* yang terlalu rendah bisa menyebabkan terjadinya panas berlebih (*overheated*) pada *boiler tubes* sehingga *tubes* bisa menjadi rusak. Sebaliknya *level drum* yang terlalu tinggi akan menyebabkan kualitas *steam* yang dihasilkan kurang bagus (banyak mengandung air/basah), hal ini dapat menyebabkan korosi pada peralatan yang menggunakan *steam* sebagai penggerakannya. Perubahan *water level* pada *steam drum* bisa terjadi akibat, perubahan kebutuhan *steam* yang digunakan pada proses produksi. Sistem pengendalian *water level* pada *steam drum*, mempunyai gangguan berupa perubahan kebutuhan *steam* ataupun *noise* dari pembacaan sensor ketinggian. Salah satu metode sistem kontrol optimal yang dapat mengkompensasi kedua masalah tersebut, adalah kontrol optimal dengan metode LQG (*Linier Quadratic Gaussian*). Digunakannya metode kontrol optimal LQG, bertujuan untuk mengoptimalkan kemampuan yang dimiliki oleh *valve* agar dapat mengatasi gangguan yang diberikan oleh perubahan laju *steam* dan pengukuran yang dikotori *noise*. Sehingga level dari *steam drum* bisa dipertahankan di dalam *range* yang diperbolehkan. Dari hasil percobaan, respon *water level* memiliki $T_s=1100$ s dan $Ess=0.067\%$ saat *mode* pertama. Ketika *mode* kedua $Ess=0.13\%$.

Kata Kunci : *NWL, disturbance, LQG*.

I. PENDAHULUAN

Pabrik Gula Kebon Agung Pada tahun 2009 hingga sekarang mampu memproduksi gula sebanyak lebih dari 100.000 ton per tahunnya [1].

Proses produksi yang dilakukan di PG Kebon Agung melibatkan mesin-mesin uap seperti Penggerak *Cane Cutter I* dan *Cane Cutter II*, Penggerak HDS, Penggerak Gilingan dan Penggerak Generator Listrik (PLTU). Keseluruhan mesin-mesin tersebut memerlukan uap sebagai tenaga penggerakannya, dimana produksi uap dilakukan oleh boiler sebagai salah satu peralatan proses [2].

Pada bagian boiler terdapat suatu bagian yang bernama *steam drum*, bagian ini berfungsi sebagai tempat pemisahan antara uap dan air [3]. Di dalam

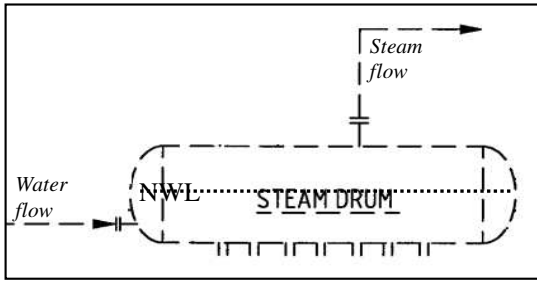
steam drum pula proses perubahan dari air menjadi uap (*steam*) berlangsung secara kontinyu. Dalam proses pembentukan *steam* ini, variabel yang sangat penting untuk dilakukan pengontrolan secara kontinyu adalah level air di dalam *steam drum*. Level air pada *steam drum boiler* dijaga pada *NWL (Normally Water Level)*, level air tidak boleh terlalu rendah atau terlalu tinggi dari *NWL*. *Level drum* yang terlalu rendah bisa menyebabkan terjadinya panas berlebih (*overheated*) pada *boiler tubes* sehingga *tubes* bisa menjadi rusak/bengkok/bocor. Sebaliknya *level drum* yang terlalu tinggi akan menyebabkan pemisahan air dan *steam* dalam drum tidak sempurna sehingga kualitas *steam* yang dihasilkan kurang (banyak mengandung air/basah), hal ini dapat menyebabkan korosi pada turbin-turbin yang menggunakan *steam* sebagai penggerakannya [2].

Perubahan *water level* pada *steam drum* bisa terjadi akibat, perubahan kebutuhan uap panas (*steam*) yang digunakan pada proses produksi. Pada konsep sistem pengendalian proses yang di bahas pada [4], menjelaskan bahwa perubahan yang terjadi akibat kebutuhan proses produksi, dinyatakan sebagai *Load/Disturbance* pada sistem pengendalian proses.

Sistem pengendalian *water level* pada *steam drum*, mempunyai gangguan berupa *load* dari kebutuhan *steam* ataupun *noise* dari pembacaan sensor ketinggian. Salah satu metode sistem kontrol optimal yang dapat mengkompensasi kedua masalah tersebut, adalah kontrol optimal dengan metode LQG (*Linier Quadratic Gaussian*) [5]. Permintaan *steam* untuk proses produksi yang berubah-ubah, akan mengakibatkan perubahan level hingga melewati batas maksimum yang diperbolehkan ataupun level tidak sesuai dengan *NWL*, jika kontroler tidak bisa memprediksi seberapa besar perubahan *load* yang terjadi. Sulitnya memprediksi perubahan *load*, seringkali mengakibatkan penggantian nilai parameter kontroler saat proses berlangsung. Hal semacam ini bisa diatasi dengan menggunakan kontroler yang dapat memprediksi seberapa besar gangguan yang terjadi pada sistem. Salah satu metode yang bisa diterapkan adalah kontrol optimal dengan metode LQG.

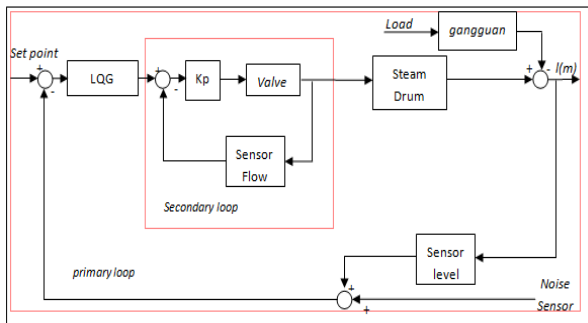
II. PEMODELAN SISTEM

Skema dari *steam drum boiler* dapat dilihat dalam gambar 1



Gambar 1 Steam Drum

Dalam gambar 1 ditunjukkan bahwa masukan *steam drum* berupa laju air dan keluarannya berupa laju *steam*. Tujuan dari skripsi ini adalah merancang suatu kontrol optimal yang dapat mempertahankan *water level* di NWL, sehingga tidak membahayakan kerja sistem. Dalam memenuhi tujuan tersebut digunakan diagram blok sistem keseluruhan seperti dalam gambar 2

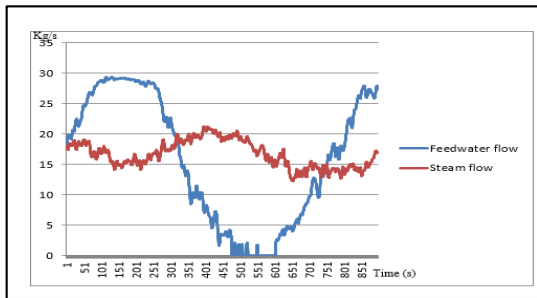


Gambar 2 diagram blok sistem

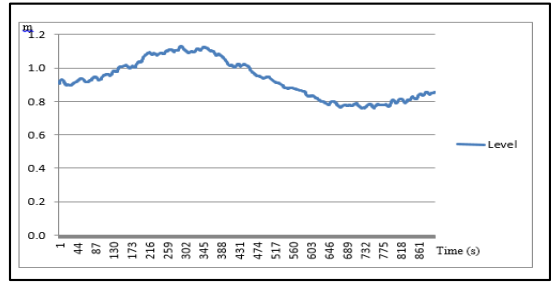
Dalam gambar 2 dapat dilihat sistem mempunyai 2 kontroler dan membentuk suatu kontrol *cascade*. Hal ini dikarenakan PG Kebon Agung menggunakan *valve petitioner*, yang fungsinya sama dengan kontrol proporsional [4]. Setelah didapatkan diagram blok sistem diperlukan untuk mencari model matematis dari setiap komponen.

A. Pemodelan *Water Level Steam Drum*

Pemodelan *steam drum* dilakukan dengan cara identifikasi sistem dengan menggunakan program MATLAB fungsi *ident*. *Input* dari proses identifikasi berupa selisih antara *water flow* dan *steam flow*. Sedangkan *output* berupa *water level*. Sebelum menunjukkan grafik dari *input* dan *output* terlebih dahulu ditunjukkan data yang langsung didapat dari hasil pengamatan di pabrik.

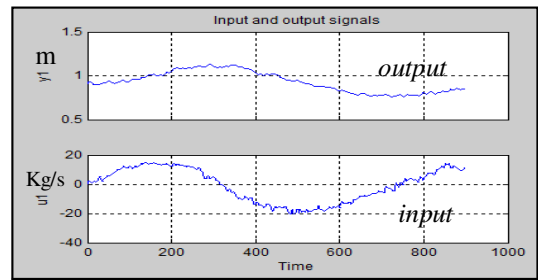


Gambar 3 Grafik *feedwater flow* dan *steam flow*



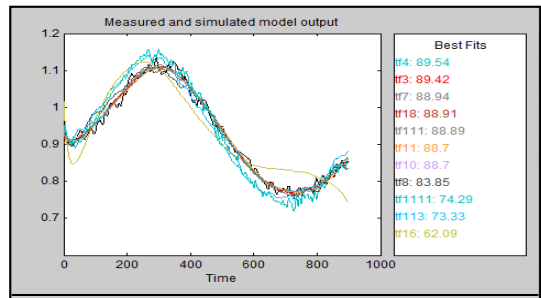
Gambar 4 Grafik *water level*

Dari data yang ditunjukkan dalam grafik 3 dan 4 didapatkan *input* dan *output* proses identifikasi yang ditunjukkan dalam gambar 5



Gambar 5 *Input dan output* proses identifikasi

Hasil identifikasi ditunjukkan dalam gambar 6

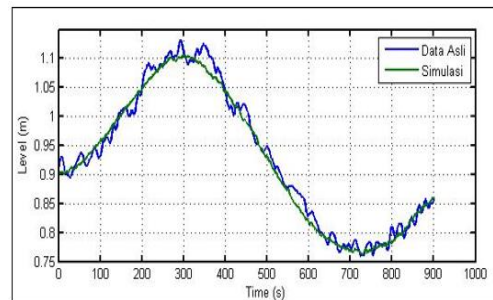


Gambar 6 Hasil identifikasi

Dari hasil identifikasi ditunjukkan didapatkan fungsi alih ketinggian air *steam drum* seperti berikut :

$$G(s) = \frac{0.001922s^3 + 0.0002912s^2 + 1.307e-05s + 1.214e-07}{s^3 + 0.1557s^2 + 0.001819s + 9.755e-17} \tag{1}$$

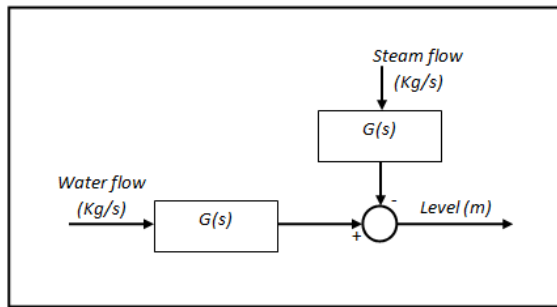
Hasil validasi yang didapat dari fungsi alih dalam persamaan (1) dapat dilihat dalam gambar 7



Gambar 7 Validasi pe modelan

Error rata-rata yang didapat dari hasil validasi sebesar 1.2 %. Mengingat *input* dari identifikasi

adalah selisih antara *feedwater flow* dan *steam flow*, diagram blok dari *water level steam drum* ditunjukkan dalam gambar 8



Gambar 8 Diagram blok *water level steam drum*

B. Pemodelan Kontrol Valve

1. Pemodelan Valve

Pada sistem pengendalian ini digunakan kontrol valve jenis *globe valve* yang memiliki karakteristik *equal percentage* dan dilengkapi dengan actuator diafragma. Fungsi alih dari valve dapat dinyatakan sebagai sistem orde satu sebagai berikut [6].

$$\frac{\dot{m}(s)}{i(s)} = \frac{G_T}{T_{CV}s+1} \quad (2)$$

Dengan :

$\dot{m}(s)$ = Laju aliran massa (Kg/s)

$i(s)$ = Sinyal elektrik (mA)

G_T = Gain total dari valve

T_{CV} = Konstanta waktu valve

Konstanta waktu valve dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$T_{CV} = T_V \cdot (\Delta V + R_V) \quad (3)$$

$$G_C = K_T \cdot K_V \quad (4)$$

Dengan :

T_V = Time Stroke (s)

R_V = Perbandingan konstanta waktu dengan *time stroke* ($R_V = 0,03$ untuk actuator diafragma)

ΔV = Fraksi perubahan posisi valve

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{flowmaks} - \text{flowmin}}{\text{flowmaks}} \\ &= \frac{33,3 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right) - 5,13 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right)}{33,3 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right)} = 0,85 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

$$G_T = K_T \cdot K_V \quad (5)$$

Dengan :

K_T = Gain Transduser

K_V = Gain Valve

Fungsi transduser adalah mengubah besaran arus dengan nilai 4-20 mA menjadi besaran tekanan dengan nilai 3-15 psi. Gain transduser adalah :

$$K_T = \frac{\text{Span}_{out}}{\text{Span}_{in}} = \frac{15-3 \text{ psi}}{20-4 \text{ mA}} = 0,75 \frac{\text{psi}}{\text{mA}}$$

Sedangkan penguatan untuk Valve adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} K_V &= \frac{\Delta \text{besar bukaan valve}}{\Delta \text{sinyal pressure}} \cdot \frac{\Delta \text{flow(kerja)}}{\Delta \text{bukaan valve(kerja)}} \\ &= \frac{0,43}{12} \cdot \frac{28,16-11,01}{0,39-0,18} = 2,92 \frac{\text{Kg}}{\text{psi.s}} \end{aligned}$$

$$G_T = 2,19$$

Nilai G_T telah didapat, sedangkan konstanta waktu valve adalah :

$$T_{CV} = 3 \cdot (0,03 + 0,85) = 2,64$$

Sehingga fungsi alih dari valve adalah :

$$\frac{\dot{m}(s)}{i(s)} = \frac{2,19}{2,64s+1}$$

2. Pemodelan Flow sensor

Jenis sensor yang digunakan untuk mengukur laju masa air yang masuk *steam drum* di PG. Kebon Agung adalah *differential pressure transmitter*. Jenis ini memanfaatkan perbedaan tekanan antara dua lubang untuk menghitung laju air menuju *steam drum*. Range pengukuran yang mampu dilakukan adalah 0-180 ton/jam (50 Kg/s), sedangkan keluarannya berupa arus sebesar 4-20 mA.

Nilai gain dari sensor dapat dihitung dengan persamaan 2.6 [7].

$$K_{sf} = \frac{\text{range of instrument output}}{\text{range of instrument input}} \quad (6)$$

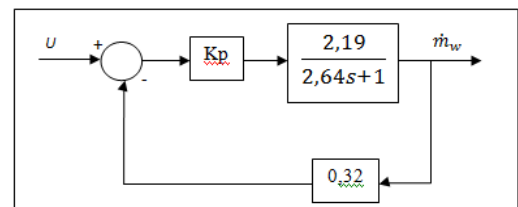
$$K_{sf} = \frac{20-4}{50-0} = \frac{16}{50} = 0,32 \frac{\text{mA}}{\frac{\text{Kg}}{\text{s}}}$$

Jadi gain dari flow sensor adalah :

$$\frac{i(s)}{\dot{m}(s)} = 0,32$$

3. Pemberian Konstanta Kp

Pemakaian *valve petitioner* dalam suatu valve sama seperti valve yang dilengkapi dengan kontroler proposional [4]. Oleh karena itu pemodelan kontrol valve secara lengkap, merupakan sistem pengendalian laju air. Diagram blok laju pengendalian laju air dapat dilihat dalam gambar 2.8.

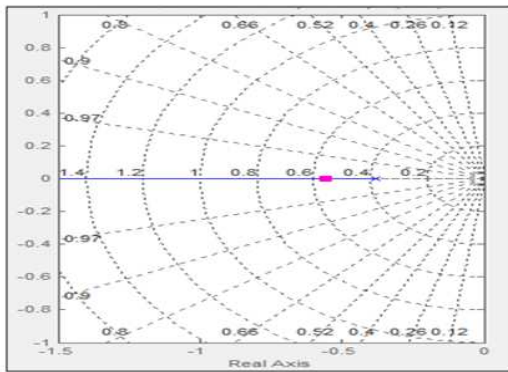


Gambar 9 Diagram blok pengendalian laju air

Fungsi alih dari diagram blok dalam gambar 9 adalah :

$$\frac{U(s)}{\dot{m}_w(s)} = \frac{Kp \cdot 2,19}{2,64s+1+0,7008Kp} \quad (7)$$

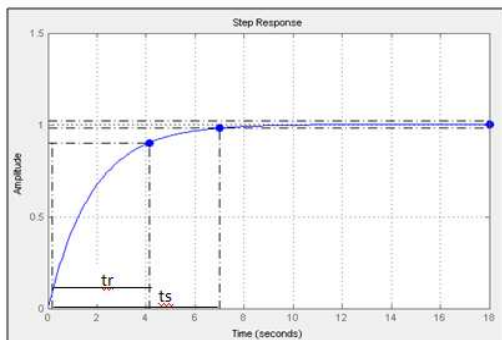
Dengan menggunakan batuan program MATLAB maka didapatkan nilai Kp sebesar 0,674, dan diagram akarnya ditunjukkan dalam gambar 10.



Gambar 10 Diagram akar pengendalian laju air

- x = pole openloop sistem
- o = pole closeloop sistem

Semakin akar digeser ke kiri, maka penguatan akan semakin besar. Dengan nilai Kp ini didapat respon sistem dengan masukan tangga satuan seperti gambar 11.



Gambar 11 Respon masukan tangga satuan

Dari gambar 11 terlihat keluaran sistem mempunyai *settling time* sebesar 7 detik, dan *error steady state* sebesar 0.25%.

C. Pemodelan Flow Sensor

Jenis sensor yang digunakan untuk mengukur ketinggian level air dalam *steam drum* di PG. Kebon Agung adalah *differential pressure transmitter*. Jenis ini memanfaatkan perbedaan tekanan yang ada di dalam *steam drum*. Dari data teknik diperoleh bahwa sensor level dapat bekerja pada range (-250mm – 250mm) dari nilai *set point*, atau memiliki *span* sebesar 500mm. Nilai tersebut akan dirubah menjadi besaran arus dengan range 4-20 mA, ketika masuk menuju kontroler. Nilai *gain* dari sensor dapat dihitung dengan persamaan (8) : [7].

$$K_{sl} = \frac{\text{range of instrument output}}{\text{range of instrument input}} \quad (8)$$

Jadi nilai *gain* dari sensor level adalah :

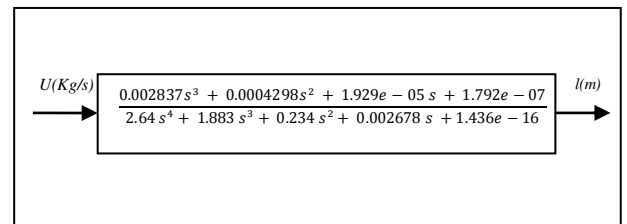
$$K_{ls} = \frac{20-4}{0.5} = 32 \frac{\text{mA}}{\text{m}}$$

$$\frac{i(s)}{l(s)} = 32$$

D. Pembentukan State Space

Setelah mendapatkan fungsi alih dari semua komponen penyusun sistem, langkah selanjutnya adalah

merubahnya kedalam bentuk *state space*. Pembentukan *state space* dibentuk dari fungsi alih *loop* terbuka sistem yang dapat dilihat dalam gambar 12.



Gambar 12 Diagram blok loop terbuka

Dari fungsi alih yang didapat dalam diagram blok dalam gambar 12 dapat dirubah ke dalam bentuk umum *state space* yaitu :

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ Y &= Cx + Du \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.7133 & -0.08864 & -0.001014 & -5.439e-17 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0.001075 \quad 0.0001628 \quad 7.307e-06 \quad 6.788e-08]$$

$$D = 0$$

III. DESAIN PEGENDALIAN, PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM

Pada tahap ini aka dilakukan perancangan sistem pengedali LQG setelah model sistem didapatkan. Perancang sistem pengedali menggunakan LQG merupakan gabungan dari LQR dan estimator kalman, dan penguatan dalam LQR dan estimator kalman dapat dicari secara terpisah.

A. Perancangan LQR

Langkah pertama yang akan dilakukan adalah mencari matriks umpan balik optimal K, yang akan meminimumkan indeks performansi

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (10)$$

Q dan R adalah matriks bobot yang pemilihannya disesuaikan dengan syarat batas sistem. Matriks Q dan R dapat dimasukkan ke dalam persamaan matriks tereduksi Riccati

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (11)$$

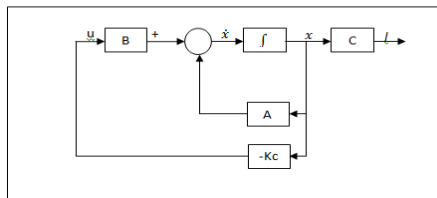
Solusi dari persmaan 3.2 adalah matrik definit positif P, yang digunakan untuk mencari matriks umpan balik optimal K dengan persamaan (11).

$$K = R^{-1}B^T P \quad (12)$$

yang akan menghasilkan hukum pengendalian optimal

$$U(t) = -Kx(t) \quad (13)$$

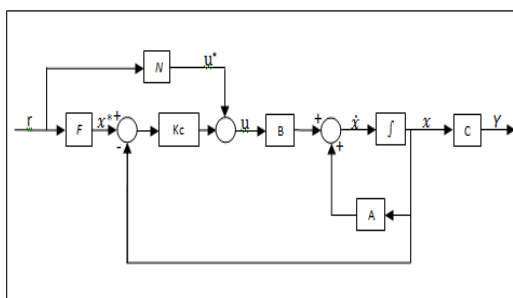
Sistem pengendalian menggunakan LQR dapat dilihat dalam gambar 13[8]



Gambar 13 diagram blok LQR
 Sumber: Gopal,M. , 1987 : 373

1. Perancangan LQR Mode Pertama

Mode pertama ini adalah mode ketika pengisian awal, yaitu gangguan berupa steam flow belum diberikan. Dalam pengisian awal ini level diberikan nilai set point sebesar 0.9 m. Sistem dengan menggunakan LQR dapat diberikan set point jika diagram blok dalam gambar 13 dirubah ke dalam gambar 14.



Gambar 14 diagram blok LQT
 Sumber: Hespansa, J, 2007

Diagram blok dalam gambar 14 disebut dengan *Linier Quadratic Tracking*. F adalah sebuah matrik $n \times j$ yang didapat dari n baris paling atas dan j kolom paling kanan dari matrik $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1}$, dan N adalah sebuah matrik $m \times j$ yang didapat dari m baris paling bawah dan j kolom paling kanan dari matrik $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1}$ [9]. Nilai dari j adalah samadengan m .

Dalam mode pertama ini diberikan batasan desain yang harus diperhatikan, yaitu :

- Batas maksimum level 0.9 m.
- Feed water flow maksimal yang bisa dialirkan sebesar 33.33 Kg/s.

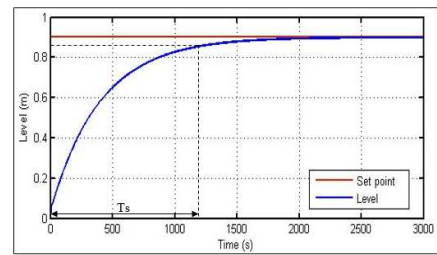
Syarat batas di atas digunakan untuk mencari nilai Q dan R dengan aturan Bryson [9].

$$Q_{ww} = \frac{1}{\text{nilai maksimal dari } l^2} \quad w \in \{1,2, \dots n\} \dots\dots(14)$$

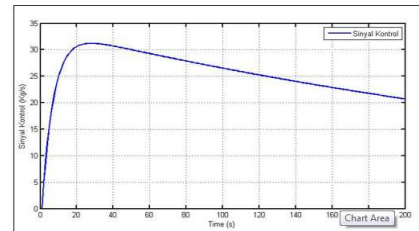
$$R_{vv} = \frac{1}{\text{nilai maksimal dari } u^2} \quad v \in \{1,2, \dots m\} \dots\dots(15)$$

Q_{ww} dan R_{vv} yang didapat adalah $Q_{ww}=1.23$ $R_{vv}=0.001$, namun aturan ini tidak selalu mendapatkan hasil yang benar. Aturan ini bisa digunakan untuk langkah awal mencari nilai Q dan R yang tepat.

Hasil simulasi nilai $Q_{ww}=1.23$ dan $R_{vv}=0.0009$ dapat dilihat dalam gambar 15



(a)



(b)

Gambar 15 (a) respon water level (b) keluaran sinyal kontrol

Dalam gambar 15 (a) terlihat bahwa respon water level memiliki settling time sebesar 1100 detik (waktu sistem ketika mencapai 95% dari harga akhir), 0% overshoot, dan memiliki error steady state sebesar 0.067%. Sinyal kontrol yang diberikan dalam gambar 15 (b) sesuai dengan syarat yang ditentukan. Nilai Kc yang didapat adalah : $Kc = 10^{-3} [3.7110 \ 1.8647 \ 0.2209 \ 0.0025]$

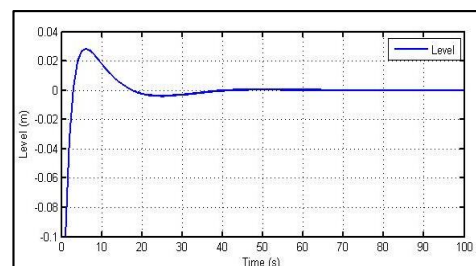
2. Perancangan LQR Mode Kedua

Perancangan LQR mode dua ini dirancang dengan anggapan bahwa sistem telah berada dalam keadaan setimbang, yaitu ketika water level telah mencapai 0.9 m. Dalam hal ini sistem akan mendapat gangguan berupa aliran steam. Ketika sistem mendapat gangguan, water level harus tetap berada di daerah range yang diperbolehkan, yaitu antara 0.8-1.5 m. Tentu saja dengan batas maksimal kemampuan laju aliran air yang diperbolehkan sebesar 33.33 Kg/s.

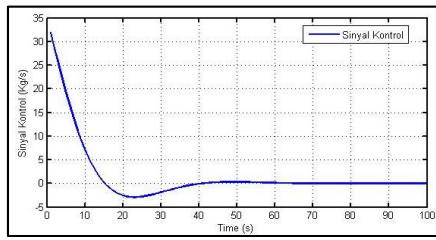
Langkah untuk mencari Kc dalam mode kedua ini sama dengan mode pertama. Namun syarat untuk mode kedua sedikit berbeda :

- Batas maksimal perubahan level 0.1 m
- Feed water flow maksimal yang bisa dialirkan sebesar 33.33 Kg/s.

Nilai Q dan R yang didapat adalah $Q_{ww}=100$ dan $R_{vv}=20000000$. Hasil dari simulasi dapat dilihat dalam gambar 16.



(a)

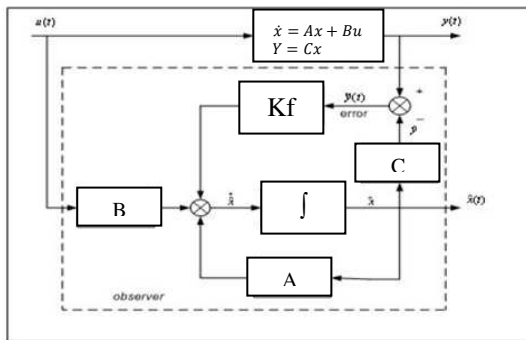


(b)
Gambar 16 (a) respon water level (b) Keluaran sinyal kontrol

Dalam gambar 16 (a) terlihat ketika *water level* diberi gangguan, yang mengakibatkan *level* turun sampai $-0.1m$, dapat diregulasi oleh kontroler dengan *settling time* 20 detik, *overshoot* sebesar 3.3% dan *error steady state* sebesar 0.05%. Sinyal kontrol yang diberikan dalam gambar 16 (b) sesuai dengan syarat yang ditentukan. nilai (penguatan K optimal) untuk $Q_{ww}=100$ dan $R_{vv}=20000000$ adalah: $Kc=[0.2007 \ 0.1633 \ 0.0326 \ 0.0022]$.

B. Perancangan Estimator

Diagram blok *estimator* dapat dilihat dalam gambar 17.



Gambar 17 Diagram blok estimator
Sumber : Gopal, M.,1987 : 601

Dengan estimasi *state* $x(t)$ dinotasikan oleh $\hat{x}(t)$, maka estimator didefinisikan oleh :

$$\hat{\dot{x}}(t) = A\hat{x} + Bu + K_f(y - C\hat{x}) \quad (16)$$

$\hat{y} = C\hat{x}$
Untuk mendapatkan nilai penguatan K_f , dibutuhkan matriks Q_n dan R_n , yang merepresentasikan gangguan pada sistem dan *noise* sensor. Setelah itu matriks Q_n dan R_n dimasukkan untuk menyelesaikan persamaan tereduksi Riccati [10]

$$AP + PA^T + Q_n - PC^T R_n^{-1} CP = 0 \quad (17)$$

Dimana

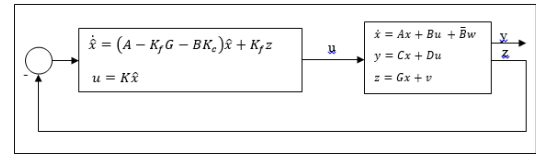
$$K_f = PC^T R^{-1} \quad (18)$$

Dengan menentukan nilai $Q_n= 100$ dan $R_n=0.0000005$ didapatkan nilai

$$K_f = 10^4 \begin{bmatrix} -15.1113 \\ 1.7088 \\ 32.6630 \\ 78.9270 \end{bmatrix}$$

C. Perancangan LQG

Setelah didapatkan *gain* LQR dan estimator. Maka LQG dapat disusun sesuai dengan diagram blok dalam gambar 18.



Gambar 18 Close Loop LQG
Sumber : Hespanha. J.P., 2007:24

$\bar{B}_w(t)$ adalah *noise* proses berupa laju *steam*, sedangkan $v(t)$ adalah *noise* dari sensor. Kontrol optimal $u(t)$ yang dihasilkan kontrol LQG adalah :[10]

$$u(t) = -K_c \hat{x}(t) \quad (19)$$

sehingga kontrol LQG membentuk suatu persamaan *state space* :

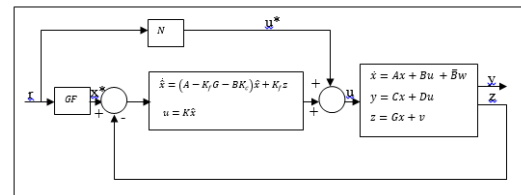
$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= (A - K_f G - BK_c) \hat{x} + K_f z \\ u &= K_c \hat{x} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Persamaan 20 dirubah menjadi persamaan 21 :

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A_{LQG} \hat{x} + B_{LQG} z \\ u &= C_{LQG} \hat{x} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

1. Perancangan LQG Mode Pertama

Seperti perancangan LQR pada *mode* pertama, perancangan LQG pada *mode* pertama diperlukan suatu *set point* atau masukan yang dikenakan pada sistem, sehingga blok diagramnya menjadi seperti dalam gambar 19 :



Gambar 19 Diagram blok sistem kontrol LQG/LQT
Sumber : Hespanha. J.P., 2007:31

Dengan memasukkan nilai-nilai matrik *plant* dan *gain* K_c dan K_f ke dalam persamaan 20 dan 21, akan didapat kontroler LQG *mode* pertama.

$$A_{LQG} = \begin{bmatrix} -486.3223 & -73.658 & -3.3031 & -0.0307 \\ 0.0015 & -0.1513 & -0.0068 & -0.0001 \\ -0.0051 & 0.9992 & -0.0000 & -0.0000 \\ -0.0870 & -0.0132 & 0.9994 & -0.0000 \end{bmatrix}$$

$$B_{LQG} = 10^4 \begin{bmatrix} 1.421 \\ 0.0029 \\ 0.0001 \\ 0.0003 \end{bmatrix}$$

$$C_{LQG} = 10^{-3} [3.7110 \ 1.8647 \ 0.2209 \ 0.0025]$$

$$D_{LQG} = [0]$$

2. Perancangan LQG Mode Pertama

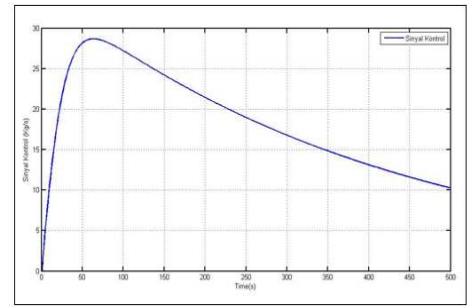
Perancangan LQG *mode* kedua, menggunakan diagram blok dalam gambar 18, namun cara mendapatkan persamaan kontrol LQG sama seperti *mode* pertama, sehingga didapat persamaan kontrol LQG :

$$A_{LQG} = \begin{bmatrix} -486.5192 & -73.8202 & -3.3355 & -0.0329 \\ 0.0015 & -0.1513 & -0.0068 & -0.0001 \\ -0.0051 & 0.9992 & -0.0000 & -0.0000 \\ -0.0870 & -0.0132 & 0.9994 & -0.0000 \end{bmatrix}$$

$$B_{LQG} = 10^4 \begin{bmatrix} 1.421 \\ 0.0029 \\ 0.0001 \\ 0.0003 \end{bmatrix}$$

$$C_{LQG} = [0.2007 \quad 0.1633 \quad 0.0326 \quad 0.0022]$$

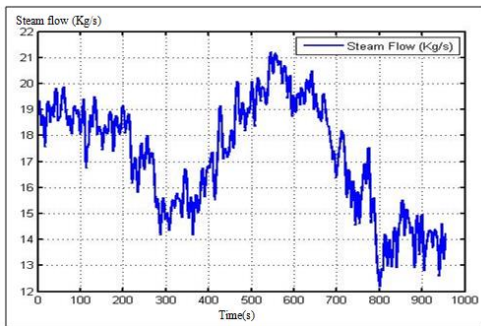
$$D_{LQG} = [0]$$



(b)
Gambar 22 (a) Water level (b) Sinyal kontrol

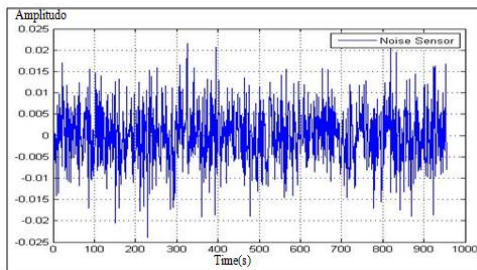
D. Respon Sistem Terhadap Gangguan

Sekarang akan dilihat respon sistem dengan menggunakan LQG ketika diberikan gangguan pada sistem. Gangguan berupa laju steam dan noise sensor. Gangguan laju steam diambil dari data dari pabrik. Adapun gangguan dapat dilihat dalam gambar 20.



Gambar 20 Laju steam

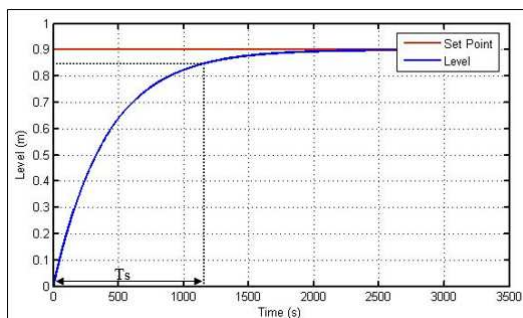
dan noise sensor diberikan dalam gambar 21.



Gambar 21 Noise sensor

1. Simulasi Mode Pertama dengan Kontrol LQG

Dalam mode pertama adalah ketika pengisian awal dilakukan dan sistem hanya mendapatgangguan berupa noise sensor. Hasil simulasi dapat dilihat dalam gambar 22.

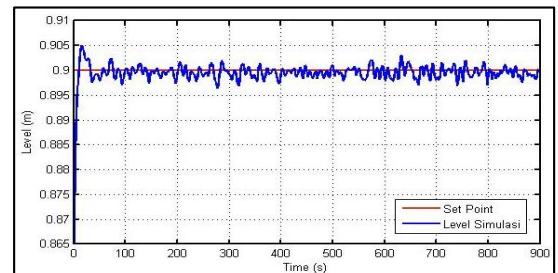


(a)

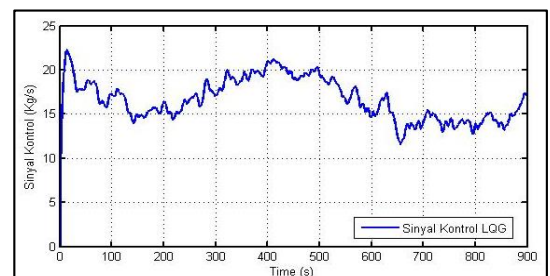
Dalam gambar 22 terlihat bahwa respon sistem tidak terpengaruh karena adanya gangguan dari noise sensor. Water level yang ditunjukkan dalam gambar 22 (a) mempunyai settling time sebesar 1100 detik dan error steady state sebesar 0.067%. Sedangkan dalam gambar 22 (b) ditunjukkan bahwa sinyal kontrol yang diberikan memenuhi syarat batas yang ditentukan.

2. Simulasi Mode Kedua dengan Kontrol LQG

Dalam simulasi mode kedua level dianggap telah mencapai keadaan setimbang. Gangguan yang diberikan pada sistem dalam mode ini adalah gangguan berupa laju steam dan noise sensor. Hasil simulasi dapat dilihat dalam gambar 23.



(a)



(b)

Gambar 23 (a) Water level (b) Sinyal kontrol

Dalam gambar 23 (a) terlihat bahwa level mempunyai error rata-rata sebesar 0.13%, dan error ini dapat ditoleransi karena level masih ada dalam range kerja yang disyaratkan. Dapat dilihat juga dalam gambar 23 (b), sinyal kontrol yang diberikan tidak melebihi batas maksimal yaitu sebesar 33.33 Kg/s.

IV PENUTUP

A. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dalam pembuatan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Terdapat dua *mode* dalam sistem pengendalian *water level steam drum*, sehingga didapatkan dua buah *gain* umpan balik LQR yang sesuai dengan syarat yang diberikan. Pencarian *gain* dilakukan dengan pemilihan matriks Q dan R yang tepat, sehingga didapatkan nilai *gain* umpan balik LQR sebagai berikut :
 - *Mode* Pertama

$$K_c = 10^{-3} \begin{bmatrix} 3.7110 & 1.8647 & 0.2209 & 0.0025 \end{bmatrix}$$
 - *Mode* Kedua

$$K_c = \begin{bmatrix} 0.2007 & 0.1633 & 0.0326 & 0.0022 \end{bmatrix}$$

- Penguatan Kf yang didapat adalah

$$K_f = 10^4 \begin{bmatrix} 1.4121 \\ 0.0029 \\ 0.0001 \\ 0.0003 \end{bmatrix}$$

- *Gain* kontroler LQR Kc dan *Estimator* Kf disusun sehingga didapatkan kontroler LQG, dan didapatkan hasil performansi sistem sebagai berikut :
 - *Mode* Pertama
Mode pertama adalah ketika dilakukan pengisian awal dalam *steam drum* dengan *set point* 0.9 m dan mendapat gangguan dari *noise* sensor. Respon sistem memiliki $T_s=1100s$, *error steady state* 0.067%, dan *overshoot* 0%.
 - *Mode* Kedua
Mode kedua adalah ketika sistem telah mencapai keadaan setimbang serta mendapat gangguan berupa laju *steam* dan *noise* sensor. Respon sistem menunjukkan bahwa *water level* tetap berada disekitar *NWL* dengan *error* rata-rata 0.13%.

B. Saran

- Penelitian dapat dikembangkan dan diaplikasikan ke dalam sistem yang nyata.
 - Dalam mencari nilai Q dan R yang tepat, dilakukan dengan merubah-ubah dua nilai tersebut, dan melihat respon yang dihasilkan. Hal ini membutuhkan waktu yang lama. Diharapkan dapat menggunakan metode lain yang bisa mempercepat dalam menemukan nilai Q dan R yang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim. 2103. *Kebutuhan Gula Nasional Mencapai 5,700 Juta Ton Tahun 2014*, (Online: <http://nuabah.blogspot.com/2010/10/cara-penulisan-daftar-pustaka-dari.html>, diakses tanggal 11 Desember 2013).
- [2] Caysar ,D.Dkk. 2013. “*Drum Level Kontrol Menggunakan Differential Pressure Transmitter Pada Yoshimine Water Tube Boiler Type H-3500 Di Pabrik Gula Kebon Agung Malang*”.Laporan PKL. Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya, Malang.
- [3] Nugraha, S.T. 2006. “*Penerapan Metode Kontrol Robust H_∞ Untuk Pengendalian Level Air Dan Feed Water Flow Pada Steam Drum Di PT.International Power Mitsui Operation and Maintenance Indonesia-Paiton*”. Skripsi, Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya, Malang.
- [4] Gunterus, F. 1994. “*Falsafah Dasar : Sistem Pengendalian Proses*”. Jakarta. PT Elex Media Komputindo.
- [5] Anderson n Moore. 1989 . “*Optimal Kontrol Linier Quadratic Methods*”. USA : Prentice-hall, Inc.
- [6] Coughanowr, D. R. 1991, “*Process Sistem Analysis and Kontrol*”. Prentice-Hall, USA.
- [7] Seborg, D. E., Edgar. T. F., and Millichamp. D. A. 2004. “*Process Dynamic and Kontrol*”. John Wiley and Sons, inc..
- [8] Ogata, K. 1984. “*Teknik Control Automatik (Sistem Pengaturan) Jilid 2*”. Jakarta. Erlangga.
- [9] Hespanha, J. P. 2007. “*LQG/LQR Kontroller Design*”.João Hespanha.
- [10] Lewis, Frank.L. 1995. “*Optimal Control*”. John Wiley and Sons, Inc.