

Research Article

Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal

Dista Yoel Tadeus¹, Budi Setiyono², Iwan Setiawan²

1. Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

2. Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

Abstract

Nuclear reactors is one of systems that have complex characteristics. To control the reactor power optimally, it needs an effective and efficient control system design. Optimal control system is designed based on the method of state feedback to provide optimum control signal based on predetermined performance index. Nuclear reactor dynamics are modeled by mathematical equations as an approach to model of real reactor. Power reactor to be controlled is modeled by a point kinetics method with one group of delay neutrons. Optimal control system design and simulation of the response of a nuclear reactor is accomplished using MATLAB. In the Linear Quadratic Regulator (LQR) control scheme with various value of q and r , the fastest response of control system in order to regulate output of the system occur at $q=0,0001$ and $r=20$. In the LQI control scheme with various value of w_0 , the fastest response of the system to reach the reference occur at $w_0=1$ where $q=0,0001$ and $r=10$. LQG control scheme with Tracking System is able to make the reactor power output to set point after the disturbance applied to system.

Keyword : Nuclear Reactor, Optimal Control, Kalman Filter

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi yang dibutuhkan manusia setiap tahunnya semakin meningkat, khususnya dalam penggunaan energi listrik. Energi nuklir sebagai pembangkit energi listrik menjadi pilihan yang baik dalam menangani krisis energi, selain karena biaya pembangkitan per dayanya relatif murah, energi nuklir adalah jenis energi yang sangat efisien. Inti dari proses pembangkitan energi nuklir terletak pada reaksi berantai yang terjadi di dalam reaktor nuklir.

Reaktor nuklir merupakan sebuah sistem yang memiliki banyak peubah yang saling mempengaruhi seperti daya, temperatur, dan konsentrasi *precursor* (fragmen fisi). Dengan demikian diperlukan sebuah sistem kendali reaktor daya yang efektif dan efisien. Salah satu metode kontrol modern adalah teknik kontrol optimal. Pada sistem-sistem yang rumit dan memiliki tingkat resiko yang tinggi, perancangan sistem kendali akan sangat riskan dan beresiko bila dilakukan langsung pada plant yang bersangkutan mengingat kita tidak mengetahui respon sistem secara pasti. Oleh karena itu diperlukan sebuah simulasi yang bisa digunakan sebagai pendekatan dalam perancangan sistem kendali.

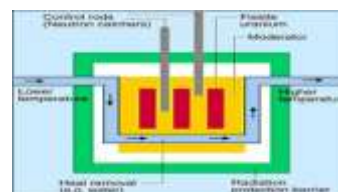
Pada penelitian ini, akan dibahas mengenai analisis dan simulasi sistem pengendalian daya pada reaktor nuklir dengan menggunakan teknik kendali optimal yang dirancang menggunakan metode *state feedback*. Reaktor daya yang akan dikendalikan dimodelkan dengan metoda kinetika titik dengan satu kelompok neutron kasip. Perancangan sistem kendali dan simulasi respon keluaran daya reaktor nuklir dilakukan di komputer melalui program MATLAB.

II. DASAR TEORI

2.1 Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir adalah tempat berlangsungnya fisi nuklir, yaitu sebuah proses di mana terjadi pembelahan inti atom berat akibat ditumbukkan oleh neutron, pembelahan ini

menghasilkan energi, inti atom yang lebih ringan, neutron tambahan dan photon dalam bentuk sinar gamma. Secara umum, skema sebuah reaktor nuklir dapat diperlihatkan melalui gambar berikut ini



Gambar 2.1 Reaktor nuklir

- 1) Elemen Bahan Bakar
Elemen bahan bakar ini berbentuk batang-batang tipis . Dalam suatu reaktor daya besar, ada ribuan elemen bahan bakar yang diletakkan saling berdekatan. Seluruh elemen bahan bakar dan daerah sekitarnya dinamakan teras reaktor. Umumnya, bahan bakar reaktor adalah uranium-235.
- 2) Moderator Neutron
Moderator merupakan material yang memperlambat kelajuan neutron dinamakan moderator. Moderator yang umum digunakan adalah air.
- 3) Batang Kendali
Batang kendali berfungsi mengendalikan daya reaktor. Batang kendali terbuat dari bahan-bahan penyerap neutron, seperti boron dan kadmium.
- 4) Pendingin
Energi yang dihasilkan oleh reaksi fisi meningkatkan suhu reaktor. Suhu ini dipindahkan dari reaktor dengan menggunakan bahan pendingin, misalnya air atau karbon dioksida.
- 5) Perisai Beton
Inti-inti atom hasil pembelahan dapat menghasilkan radiasi. Agar keamanan orang yang bekerja di sekitar reaktor

terjamin, maka umumnya reaktor dikungkungi oleh perisai beton.

2.2 Kedefinitan Fungsi Skalar

Fungsi skalar $V(x)$ disebut definit positif dalam suatu daerah Ω (yang mencakup titik asal ruang keadaan) jika $V(x) > 0$ untuk semua keadaan x yang berharga tidak nol dalam daerah Ω dan $V(0) = 0$. Fungsi skalar $V(x)$ disebut definit negatif jika $-V(x)$ definit positif.

Fungsi skalar $V(x)$ disebut semidefinit positif jika fungsi tersebut berharga positif di semua keadaan dalam daerah Ω kecuali dititik asal dan di suatu keadaan lain, di mana fungsi tersebut berharga nol.

Fungsi skalar $V(x)$ disebut semidefinit negatif jika $-V(x)$ definit positif.

Fungsi skalar $V(x)$ disebut indefinit jika dalam daerah Ω mempunyai baik harga positif maupun harga negatif, betapapun kecilnya daerah Ω tersebut.

Berikut ini adalah beberapa contoh fungsi skalar dan klasifikasinya sesuai dengan definisi di atas.

1. $V(x) = x_1^2 + x_2^2$ definit positif
2. $V(x) = (x_1 + x_2)^2$ semidefinit positif
3. $V(x) = -(x_1)^2$ definit negatif
4. $V(x) = x_1 - x_2^2$ indefinit

2.3 Kontrol Optimal

Secara umum, terdapat dua tujuan dari sistem kontrol, yaitu *Regulator System*, yaitu pada sistem kontrol ini kontrol optimal bertujuan meregulasi keluaran sistem terhadap suatu perubahan. Sedangkan *Tracking System*, yaitu pada sistem ini kontrol optimal bertujuan untuk “memaksa” *output* agar mengikuti *set point* yang diinginkan.

2.3.1 Skema Kendali LQR

LQR digunakan untuk menentukan penguatan umpan balik yang optimal yang meminimumkan indeks performansi dari sistem.

Untuk daerah waktu kontinu dengan infinite horizon, bentuk umum dari indeks performansi adalah sebagai berikut

$$\min_{u(t)} J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (2.1)$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad 0 \leq t < \infty \quad (2.2)$$

dimana, $Q \geq 0, R > 0$

solusi Riccati untuk persamaan di atas adalah

$$0 = A^T S + SA - SB R^{-1} B^T S + Q \quad (2.3)$$

maka konstanta umpan balik *state* dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut

$$K = R^{-1} B^T S \quad (2.4)$$

sehingga sinyal kontrol adalah

$$u(t) = -Kx(t) \quad (2.5)$$

2.3.2 Filter Kalman

Filter Kalman berfungsi sebagai *estimator state* pada *plant* yang terdapat *noise* di dalamnya. *Noise* yang dimaksud dapat digambarkan dengan adanya gangguan yang bersifat derau putih (*white noise*).

Jika diberikan sebuah model sistem:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Gw(t) \quad (2.6)$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t) \quad (2.7)$$

dimana,

u = sinyal kontrol

w = gangguan pada *plant*

v = *noise* pada *sensor*

w dan v diasumsikan sebagai *white noise* yang masing-masing memiliki kovariansi dengan matriks Q_f dan R_f .

Konstanta penguat filter Kalman dinyatakan sebagai

$$K_f = PC^T R_f^{-1} \quad (2.8)$$

Harga matriks P dapat dicari dengan menyelesaikan solusi persamaan Riccati:

$$AP + PA^T + GQ_f G^T - PC^T R_f^{-1} CP = 0 \quad (2.9)$$

Dengan adanya filter Kalman pada sistem, maka dinamika variabel yang terestimasi adalah

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_f [y_m(t) - C\hat{x}(t)] \quad (2.10)$$

2.3.3 Linear Quadratic Gaussian (LQG)

LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) adalah sebuah skema kendali optimal LQR yang menggunakan filter Kalman sebagai *estimator* variabel *state*.

2.3.4 Tracking Systems dengan Aksi Integral (LQI)

Pada *Tracking Systems*, sistem kontrol optimal bertujuan untuk “memaksa” *output* agar *output* yang dihasilkan sesuai dengan yang diinginkan.

Diberikan sebuah sistem

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.11)$$

dan persamaan output

$$y = Cx \quad (2.12)$$

Integral dari *tracking error* dihasilkan dengan mengikuti persamaan berikut ini

$$\dot{w} = r - y(t) = r - Cx(t) \quad (2.13)$$

Dengan mendefinisikan sebuah *augmented state error*

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ w \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

maka persamaan ruang keadaan *augmented state error* adalah

$$\dot{\hat{x}}(t) = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \hat{x} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \hat{u} \quad (2.15)$$

Indeks performansi yang sesuai adalah

$$J = \int_0^{\infty} \hat{x}^T Q \hat{x} + \hat{u}^T R \hat{u}, \quad Q \geq 0, R > 0 \quad (2.16)$$

dan hukum kontrol optimal adalah

$$\hat{u} = -K\hat{x} \quad (2.17)$$

dimana

$$K = R^{-1} \hat{B}^T S = [K_x K_w] \quad (2.18)$$

dan S adalah solusi persamaan Riccati

$$0 = \hat{A}^T S + S \hat{A} - S \hat{B} R^{-1} \hat{B}^T S + Q \quad (2.19)$$

III. PERANCANGAN

3.1 Plant Reaktor Nuklir

Sesuai dengan persamaan kinetika titik reaktor pada kesetimbangan awal, yaitu

$$\frac{d}{dt} \delta \bar{P} = \frac{\delta \rho}{\Lambda} - \frac{\beta}{\Lambda} \delta \bar{P} + \frac{\beta}{\Lambda} \delta \bar{c} \quad (3.1)$$

$$\frac{d}{dt} \delta \bar{c} = \lambda \delta \bar{P} - \lambda \delta \bar{c} \quad (3.2)$$

$$\text{dimana } \delta \bar{P} = \delta P / P_0 = (P - P_0) / P_0 \quad (3.3)$$

$$\text{dan } \delta \bar{c} = \delta c / c_0 = (c - c_0) / c_0 \quad (3.4)$$

dengan

$\delta \bar{P}$ = perubahan daya ternormalisasi

$\delta \bar{c}$ = perubahan konsentrasi fragmen fisi ternormalisasi

λ = tetapan peluruhan radioaktif neutron kasip efektif (s^{-1})

Λ = waktu hidup neutron cepat efektif (s)
 β = fraksi neutron kasip
 $\delta\rho$ = perubahan reaktivitas ($\Delta k / k$)

Terdapat umpan balik reaktivitas pada reaktor yaitu umpan balik temperatur.

Umpan balik temperatur terdiri dari dua macam yaitu:

- 1) Umpan balik temperatur bahan bakar.
 Koefisien temperatur bahan bakar dapat ditulis sebagai berikut

$$\alpha_f(T_f) = \frac{\delta\rho}{\delta T_f} \quad (3.5)$$

- 2) Umpan balik pada air pendingin yang juga berfungsi sebagai moderator.
 Koefisien temperatur pendingin dapat ditulis sebagai berikut

$$\alpha_c(T_c) = \frac{\delta\rho}{\delta T_c} \quad (3.6)$$

dimana

$\delta\rho$ = perubahan reaktivitas ($\Delta k / k$)
 α_f = koefisien temperatur bahan bakar ($\Delta k / k.C^{-1}$)

α_c = koefisien temperatur *moderator* ($\Delta k / k.C^{-1}$)

T_f = temperatur elemen bahan bakar ($^{\circ}C$)

T_c = temperatur rata-rata fluida pendingin

$(T_1 + T_2)/2$ ($^{\circ}C$)

Sedangkan model perpindahan panas pada reaktor dapat dituliskan melalui persamaan di bawah ini (Danupuyo,1996)

$$\delta P_c(t) = \Omega(\delta T_f - \delta T_c) \quad (3.7)$$

$$\delta P_e(t) = M(\delta T_1 - \delta T_e) \quad (3.8)$$

$$C_f \frac{d}{dt} \delta T_f = f_f P_{oa}(t) - \delta P_c(t) \quad (3.9)$$

$$C_c \frac{d}{dt} \delta T_1 = (1 - f_f) P_{oa}(t) + \delta P_c(t) - \delta P_e(t) \quad (3.10)$$

dimana,

$P_{oa}(t)$ = keseimbangan awal level daya (MW)

$P_c(t)$ = daya yang dipindahkan dari bahan bakar ke pendingin (MW)

$P_e(t)$ = daya yang dilepas dari pendingin (MW)

f_f = fraksi daya reaktor yang tersimpan dalam bahan bakar

Ω = koefisien perpindahan panas antara bahan bakar dengan pendingin ($MW.^{\circ}C$)

M = laju aliran massa dikalikan kapasitas panas air ($MW.^{\circ}C$)

T_f = temperatur elemen bahan bakar ($^{\circ}C$)

T_c = temperatur rata-rata fluida pendingin

$(T_1 + T_2)/2$ ($^{\circ}C$)

T_1 = suhu air yang keluar reaktor ($^{\circ}C$)

T_e = suhu air yang masuk reaktor ($^{\circ}C$)

$C_f = \mu_f$ = kapasitas panas total elemen bahan bakar ($MW.s.^{\circ}C$)

$C_c = \mu_c$ = kapasitas panas total fluida pendingin ($MW.s.^{\circ}C$)

Harga δT_e relatif kecil dan konstan sehingga dapat diabaikan.

Masukan reaktivitas dan umpan baliknya ke dalam persamaan kinetika dinyatakan oleh

$$\delta\rho = \delta\rho_{ext} + \alpha_f \delta T_f + \frac{\alpha_c \delta T_1}{2} \quad (3.11)$$

atau

$$\frac{d}{dt} \delta\rho = \frac{d}{dt} \delta\rho_{ext} + \alpha_f \frac{d}{dt} \delta T_f + \frac{\alpha_c \frac{d}{dt} \delta T_1}{2} \quad (3.12)$$

reaktivitas eksternal didefinisikan sebagai

$$\frac{d}{dt} \delta\rho_{ext} = \rho_w v_r \quad (3.13)$$

dimana ρ_w adalah *reactivity worth* batang kendali dan v_r kecepatan batang kendali.

Dalam bentuk persamaan *state space*, dinamika reaktor dayadapat dituliskan sebagai berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.14)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.15)$$

$$x = [\delta\bar{P} \quad \delta\bar{c} \quad \delta T_f \quad \delta T_1 \quad \delta\rho_{ext}]^T \quad (3.16)$$

$$u = v_r \quad (3.17)$$

dimana

$\delta\bar{P}$ = perubahan daya relatif

$\delta\bar{c}$ = perubahan konsentrasi fragmen fisi relatif

δT_f = perubahan suhu bahan bakar

δT_1 = perubahan suhu air pendingin

$\delta\rho_{ext}$ = perubahan reaktivitas eksternal

v_r = kecepatan batang kendali

$$A = \begin{bmatrix} -\beta/\Lambda & \beta/\Lambda & \alpha_f/\Lambda & \alpha_c/2\Lambda & 1/\Lambda \\ \lambda & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ f_f P_{oa}/\mu_f & 0 & -\Omega/\mu_f & \Omega/2\mu_f & 0 \\ (1-f_f)P_{oa}/\mu_c & 0 & \Omega/\mu_c & -(2M+\Omega)/2\mu_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

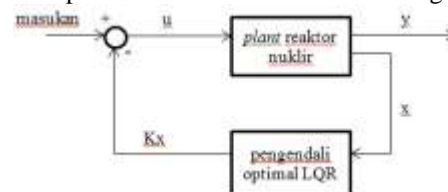
$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \rho_w \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.2 Perancangan pengendali optimal LQR

Pada perancangan pengendali optimal LQR, terlebih dahulu yaitu menentukan matriks bobot Q dan R yang selanjutnya digunakan untuk menentukan indeks performansi sistem. Matriks Q adalah matriks semidefinit positif dan matriks R adalah matriks definit positif. Matriks bobot Q dan R menentukan kepentingan relatif dari respon sistem yang diinginkan dan kebutuhan energi dari sinyal kontrol. Jika yang diinginkan adalah respon sistem yang cepat tanpa mempersoalkan kebutuhan energi yang dipakai maka harga matriks bobot Q haruslah dibuat besar, sehingga sistem kontrol mungkin memerlukan harga $u(t)$ yang terlalu besar. Hal ini tidak diinginkan karena setiap sistem fisik akan mengalami saturasi. Sedangkan jika yang diinginkan adalah penggunaan energi yang kecil maka harga matriks bobot R yang harus dibuat besar. Jadi harga matriks Q dan R ditentukan sesuai dengan kriteria yang diinginkan.

Pada perancangan sistem kendali daya reaktor nuklir, kriteria yang diinginkan adalah respon sistem yang tidak terlalu cepat dan penggunaan energi yang relatif kecil.

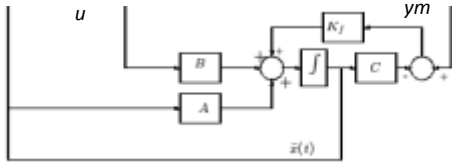
Dengan $Q = q \times I(5)$, dan $R = r$, dimana $I(n)$ merepresentasikan matrix identitas dengan ukuran n.



Gambar 3.1 Sistem kendali reaktor nuklir dengan skema kontrol LQR

3.3 Perancangan Filter Kalman

Langkah awal dalam perancangan filter Kalman adalah menentukan nilai matriks G dan matriks kovariansi Q_f dan R_f . Tujuan utama pada perancangan filter Kalman sendiri adalah menentukan penguatan Kalman K_f . Sedangkan untuk nilai Q_f yaitu $Q_f = q_f \cdot I(5)$, dimana $I(5)$ merepresentasikan matrix identitas dengan ukuran 5×5 . Nilai R_f diasumsikan sebagai $R_f = r_f$.

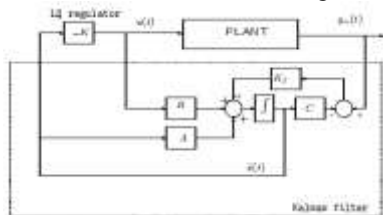


Gambar 3.2 Diagram blok filter Kalman

3.4 Perancangan pengendali optimal LQG

Adapun langkah-langkah dalam merancang sebuah sistem kendali LQG adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan hukum kontrol $u = -K\hat{x}(t)$, dengan $\hat{x}(t)$ adalah keluaran filter Kalman (*estimator*) yang mempunyai dinamika $\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_f[y_m(t) - C\hat{x}(t)]$
2. Mencari penguat umpan balik K dengan metode LQR
3. Mencari penguat filter Kalman K_f
4. Membuat skema kendali LQG sesuai gambar (3.3)



Gambar 3.3 Skema sistem kendali LQG

3.5 Perancangan pengendali optimal Tracking Systems (LQI)

Pada pengendali optimal *Tracking Systems*, langkah awal adalah membuat persamaan ruang keadaan *augmented state error*

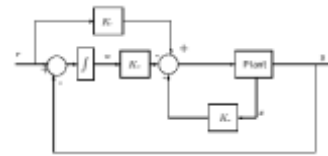
$$\dot{\hat{x}}(t) = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \hat{x} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \hat{u} \quad (3.4)$$

Kemudian menentukan matriks bobot Q dan R yang selanjutnya digunakan untuk menentukan indeks performansi sistem.

Matriks Q adalah matriks semidefinit positif dan matriks R adalah matriks definit positif. Pada perancangan sistem kendali daya reaktor nuklir, kriteria yang diinginkan adalah respon sistem yang tidak teralu cepat dan penggunaan energi yang relatif kecil. Matriks Q didefinisikan sebagai

$$Q = \begin{bmatrix} q \times I(5) & 0 \\ 0 & w_0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

dimana q adalah sebuah konstanta, $I(5)$ adalah matriks identitas dengan ukuran 5×5 , $R=r$ dan w_0 adalah konstanta bobot umpan balik.



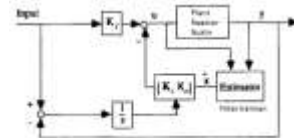
Gambar 3.4 Skema sistem kendali LQI

3.6 Perancangan pengendali optimal LQG dengan Tracking Systems (LQI)

Pada intinya skema kendali ini merupakan sebuah skema kendali *Tracking Systems* (LQI) yang menggunakan filter Kalman sebagai *estimator state*. Parameter yang harus dicari yaitu konstanta penguatan Kalman K_f dan konstanta umpan balik K_x dan K_w . Perhitungan konstanta penguat Kalman K_f sama dengan pada perancangan filter Kalman.

Adapun langkah-langkah dalam merancang sebuah sistem kendali LQG dengan *Tracking Systems* (LQI) adalah sebagai berikut:

1. Mencari penguat filter Kalman K_f
2. Mencari penguat umpan balik K_x dan K_w dengan metode LQI
3. Membuat skema kendali LQG dengan *Tracking Systems* (LQI) sesuai gambar (3.1)

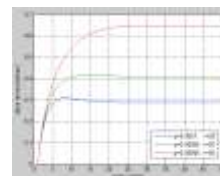


Gambar 3.5 Skema kendali LQG dengan Tracking System (LQI).

IV. SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Sistem Kendali Daya Reaktor dengan Skema Kendali LQR

Pada simulasi, dilakukan variasi matriks bobot Q dan R yaitu dengan mengubah-ubah nilai q dan r.



Gambar 4.1 Grafik respon daya reaktor dengan skema LQR dengan beberapa variasi matriks bobot Q dan R

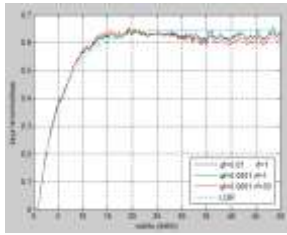
Gambar (4.1) menunjukkan respon daya reaktor terhadap beberapa variasi matriks bobot Q dan R. Sistem mendapat masukan *step* berupa kecepatan batang kendali relatif sebesar 0.1.

Untuk harga q yang semakin besar dengan harga r tetap memiliki arti bahwa energi yang diperlukan sinyal kontrol akan semakin besar..

Gambar (4.1) juga menunjukkan bahwa untuk harga r yang semakin besar dengan harga q tetap, maka energi yang diperlukan sinyal kontrol lebih kecil.

4.2 Sistem Kendali Daya Reaktor dengan Skema Kendali LQG

Pada simulasi, dilakukan variasi matriks bobot Q_f dan R_f yaitu dengan mengubah-ubah nilai q_f dan r_f dimana matriks bobot Q dan R dibuat tetap.

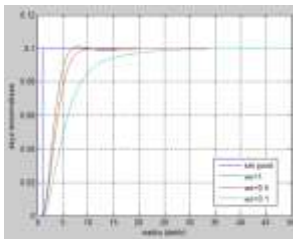


Gambar 4.2 Grafik respon daya reaktor dengan skema LQG dengan beberapa variasi matriks Q_f dan R_f

Perintah masukan *step* pada simulasi adalah berupa kecepatan batang kendali relatif sebesar 0.1. Dengan adanya *noise* pada sistem maka keluaran daya terdapat riak-riak. Skema kendali LQG telah mampu meregulasi perubahan yang terjadi pada sistem yang terdapat *noise* di dalamnya.

4.3 Sistem Kendali Daya Reaktor dengan Skema Kendali Tracking System (LQI)

Pada simulasi diasumsikan semua variabel *state* dari *plant* dapat diumpan-balikkan.

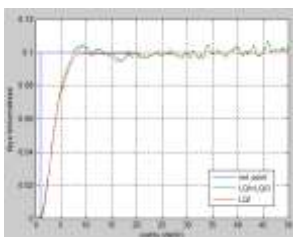


Gambar 4.3 Grafik respon daya reaktor terhadap variasi w_o pada skema kendali LQI

Pengaruh umpan balik daya reaktor dikendalikan oleh konstanta w_o . Untuk nilai w_o yang semakin besar respon daya reaktor menjadi semakin cepat menuju ke *set point*. Sebaliknya jika nilai w_o semakin kecil maka respon daya reaktor akan semakin lambat menuju ke *set point*.

4.4 Sistem Kendali Daya Reaktor dengan Skema Kendali LQG dengan Tracking System (LQI)

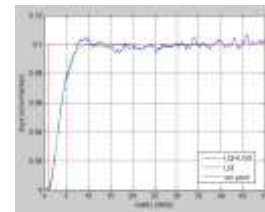
Skema kendali ini merupakan sebuah sistem kendali LQG yang dilengkapi dengan skema *Tracking System* (LQI).



Gambar 4.4 Grafik respon daya reaktor dengan skema LQG dengan *Tracking System* (LQI)

Dari gambar (4.4) tampak bahwa skema kendali LQG dengan *Tracking System* mampu membuat keluaran daya reaktor sesuai dengan *set point*. Pengaruh *noise* yang terdapat pada *plant* dan pada pengukuran tampak jelas pada gambar (4.4) yaitu berupa riak-riak. Secara keseluruhan, sistem kendali mampu memberikan unjuk kerja yang baik.

4.5 Respon Sistem Terhadap Gangguan pada Skema Kendali LQG dengan Tracking System (LQI)



Gambar 4.5 Grafik respon daya reaktor skema LQG dengan *Tracking System* (LQI) dengan gangguan

Gangguan yang masuk pada *plant* terjadi pada detik ke-25. Gangguan berasal dari perubahan temperatur lingkungan yang mengakibatkan perubahan temperatur air pendingin sebesar 50°C . Tampak bahwa keluaran daya sedikit menurun pada saat datang gangguan, namun sistem kendali mampu mengembalikan nilai keluaran daya reaktor menuju *set point*.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pada skema kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR), untuk harga q semakin besar dan harga r kecil, respon daya reaktor semakin cepat menuju ke titik stabilnya namun memiliki konsekuensi penggunaan energi yang besar.
2. Sensitivitas sistem kendali LQR ditentukan oleh harga q dan r , semakin besar harga q dan semakin kecil harga r maka semakin besar sensitivitas sistem kendali.
3. Skema kendali LQG mampu meregulasi daya reaktor yang terdapat *noise* di dalamnya. Hal ini ditandai dengan stabilnya daya keluaran reaktor walaupun terdapat riak-riak oleh karena *noise*.
4. Pengaruh umpan balik daya keluaran pada skema kendali LQI diwakili oleh nilai konstanta w_o . Untuk nilai w_o yang semakin besar respon daya reaktor menjadi semakin cepat menuju ke *set point*.
5. Skema kendali LQG dengan *Tracking System* mampu mengembalikan nilai keluaran daya reaktor menuju *set point* setelah sistem mendapat gangguan.

5.2 Saran

Untuk pengembangan sistem lebih lanjut, maka dapat diberikan saran-saran sebagai berikut:

1. Model dinamika reaktor nuklir yang Digunakan dapat dikembangkan dengan memperhitungkan efek peracunan Xenon.
2. Pengendalian daya reaktor nuklir dapat dikembangkan pada keadaan *start up* dan *shut down*.
3. Variasi perubahan matriks bobot Q dan R dapat diperbanyak untuk mendapatkan performa sistem yang terbaik yang sesuai dengan diinginkan.
4. Selain menggunakan skema kendali optimal yang telah digunakan pada penelitian ini, dapat dilakukan pengembangan skema kendali yaitu dengan menggunakan skema kendali lain seperti sistem kendali cerdas.

Daftar Pustaka

- [1] Achmad, B. *Simulasi Kendali Daya Reaktor Kartini Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan yang Menirukan Kerja Kendali Logika Samar*. 1998.
- [2] Danupoyo, Sarwo. *Optimasi Sistem Pengendali Reaktor Daya*. Lokakarya Komputasi Dalam Sains dan Teknologi Nuklir BATAN. 1998.
- [3] Hasan, Didi Gayani, Sudjatmi, Deden. *Analisis Kestabilan Reaktor Dengan Menggunakan Persamaan Liapunov*.
- [4] Hetrick, David. *Dynamics of Nuclear Reactors*, The University of Chicago Press. Chicago and London.
- [5] Lamarsh, J.R. 1972. *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, Addison-Wisley Publishing Company Inc. Massachusetts.
- [6] Lee, Yoon Joon. 1994. *The Control Rod Speed Design for the Nuclear Reactor Power Control Using Optimal Control Theory*. Journal of the Korean Nuclear Society.
- [7] Ogata, Katsuhiko. *Discrete Time Control System*. Prentice Hall International, Inc. 1987.
- [8] Setiawan, Iwan. 2008. *Kontrol PID untuk Proses Industri*. Jakarta: Elex Media Komputindo.
- [9] Sumardi. 2005. *Bahan Ajar Sistem Kontrol Multivariabel*. Semarang: Teknik Elektro Universitas Diponegoro.
- [10] _____. *Teknik Kontrol Otomatik (Sistem Pengaturan) Jilid 1*. Erlangga, Jakarta, 1989.
- [11] _____. *Designing Linear Control Systems With Matlab*. Prentice-Hall, New Jersey, 1994.
- [12] _____. *Teknik Kontrol Otomatik (Sistem Pengaturan) Jilid 2*. Erlangga, Jakarta, 1994.