

## ANALISIS DAN DISAIN KENDALI OPTIMAL MENGGUNAKAN METODA D-POLE ASSIGNMENT DAN DELTA OPERATOR ( $\delta$ - OPERATOR)

<sup>1</sup>Iksal Ramadhan

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro ST-INTEN Bandung, Jl. Ir. H. Djuanda No. 126B Bandung 40132

E-mail : [Iksal\\_r@yahoo.com](mailto:Iksal_r@yahoo.com)

**Abstrak.** Dalam perancangan sistem kendali optimal, salah satu masalah paling penting yang dihadapi para perancang adalah masalah pemilihan matriks-matrika bobot  $Q$  dan  $r$ . Yaitu bagaimana memilih matriks-matriks bobot tersebut agar disamping persyaratan optimal terpenuhi, persyaratan karakteristik dinamis yang sesuai dengan spesifikasi juga bisa terpenuhi. Namun yang menjadi masalah, bahwa jika dilihat dari segi karakteristik dinamis atau tanggapan transien suatu sistem, ternyata pada umumnya sistem yang dirancang jarang yang bisa langsung memenuhi spesifikasi yang diinginkan, sebab karakteristik dinamis sistem sangat tergantung pada nilai matriks-matriks bobot yang dipilih.

Untuk memecahkan masalah tersebut di atas, pada tahun 1987 K. Furuta dan S.B. Kim dari Tokyo Institut of Technology berhasil mengembangkan suatu metode pemilihan matriks-matriks bobot  $Q$  dan  $r$  yang dinamakan metode "D-Pole Assignment". Metode tersebut pada prinsipnya bertujuan meletakkan pole-pole sistem lingkaran tertutup kedalam suatu daerah berbentuk lingkaran yang bertitik pusat dan berjari-jari tertentu. Daerah tersebut kemudian dinamakan "Daerah\_D".

Disisi lain dalam proses diskritisasi sistem kontinyu ke diskrit terdapat kendala utama, yaitu masalah performansi sistem yang dapat terganggu. Hal tersebut terjadi karena dalam implementasi praktis perangkat keras digital, kesalahan pencuplikan dan pemilihan waktu pencuplikan (time sampling) yang besar akan dapat mengakibatkan kurang baiknya kinerja sistem. Untuk memecahkan masalah tersebut, Middleton dan Goodwin pada tahun 1990 memberikan alternatif untuk merepresentasikan sistem waktu diskrit dengan menggunakan Delta Operator ( $\delta$  - Operator).

Dengan memperhatikan hal-hal di atas yakni untuk menjamin terpenuhinya persyaratan optimal dan spesifikasi sistem yang diinginkan serta menjamin baiknya kinerja sistem, maka penelitian ini difokuskan untuk analisis dan disain kendali optimal menggunakan metoda D-Pole Assignment dan Delta Operator ( $\delta$  - Operator).

Sebagai verifikasi dari metode-metode yang telah dikembangkan dan untuk menguji kinerja pengendali maka dilakukan simulasi. Simulasi disini dimaksudkan untuk melihat unsur stabilitas dari hasil perancangan. Sebagai studi kasus dalam penelitian ini diambil model dinamika PLTN tipe PWR (Pressurised Water Reactor). Simulasi tersebut dilakukan terhadap sistem Pengaturan Suhu Air Mendidih di Lingkaran Sekunder Reaktor.

Dari simulasi yang dilakukan, secara umum diperoleh kesimpulan bahwa kestabilan sistem semakin baik bila letak titik pusat "Daerah-D" semakin dekat ke titik pusat lingkaran satuan pada bidang-z.

**Kata kunci :** Delta Operator, D-Pole Assignment, Pressurised Water Reactor, kendali optimal, indeks performansi

### 1. Latar Belakang dan Permasalahan

Secara umum teori kendali optimal didefinisikan sebagai suatu teori kendali yang pencarian solusinya didasarkan pada usaha untuk mengoptimalkan fungsi tolok ukur kuadratik (indeks performansi) dan sistem kendali yang dihasilkan agar dapat memenuhi persyaratan optimal bila diberikan input optimal. Namun yang menjadi

masalah bahwa jika dilihat dari segi karakteristik dinamis atau tanggapan transien suatu sistem, ternyata pada umumnya sistem yang dirancang jarang yang bisa langsung memenuhi spesifikasi yang diinginkan, sebab karakteristik dinamis sistem sangat tergantung pada nilai matriks-matriks bobot yang dipilih.

Untuk memenuhi masalah tersebut di atas, pada tahun 1987 Furuta dan Kim dari Tokyo Institut Of Technology berhasil mengembangkan suatu metode pemilihan matriks-matriks bobot  $Q$  dan  $r$  yang dinamakan metode “D-Pole Assignment untuk Sistem Regulator Optimal”. Metoda ini pada prinsipnya bertujuan meletakkan pole-pole sistem lingkaran tertutup kedalam suatu daerah berbentuk lingkaran yang bertitik pusat dan berjari-jari tertentu. Daerah tersebut kemudian dinamakan “Daerah\_D”.

Disisi lain dalam proses diskritisasi sistem kontinu ke diskrit terdapat kendala utama, yaitu masalah performansi sistem yang dapat terganggu. Hal tersebut terjadi karena dalam implementasi praktis perangkat keras digital, kesalahan pencuplikan dan pemilihan waktu pencuplikan (time sampling) yang besar akan dapat mengakibatkan kurang baiknya kinerja sistem. Masalah lain yang ditemui adalah saat mendiskripsikan sistem waktu diskrit dengan menggunakan Operator Geser (the shift operator)  $q$ , dimana bila waktu pencuplikan dibuat menuju nol ( $0$ ) maka sistem waktu kontinu tidak dapat ditemukan kembali.

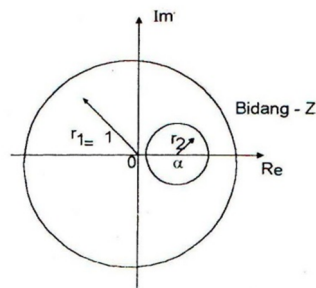
Untuk memecahkan masalah tersebut, Middleton dan Goodwin pada tahun 1990 memberikan alternatif untuk merepresentasikan sistem waktu diskrit dengan menggunakan Delta Operator ( $\delta$  - Operator).

Dengan memperhatikan hal-hal di atas yakni untuk menjamin terpenuhinya persyaratan optimal dan spesifikasi sistem yang diinginkan serta menjamin baiknya kinerja sistem, maka penelitian ini difokuskan untuk analisis dan disain kendali optimal menggunakan metoda D-Pole Assignment dan Delta Operator ( $\delta$  - Operator).

## 2. Kerangka Teori

### a. Metode D-Pole Assigment

Metode “D-pole Assigment” untuk sistem diskrit pada dasarnya bertujuan untuk meletakkan seluruh pole sistem lingkaran tertutup ke suatu daerah tertentu (specified region) yang berbentuk lingkaran berjari-jari  $r_2$  dan berpuat di  $\alpha$ , yang teletak di daerah lingkaran berjari-jari satu pada bidang-z. Daerah ini kita sebut daerah-D, seperti yang tampak pada Gambar 1 berikut.



**Gambar. 1** Lingkaran Satuan Pada Bidang - Z

Dengan peletakan pole pada daerah-D, maka kita dapat langsung memperoleh matriks-matriks bobot  $Q$  dan  $r$  yang memenuhi spesifikasi yang diinginkan.

**b. Transformasi Konformal Bilinier**

Suatu transformasi disebut transformasi bilinier bila transformasi tersebut berbentuk:

$$\omega = f(z) = \frac{az+b}{cz+d}, \quad ad - bc \neq 0, \quad \text{untuk bidang } -z \quad \dots (1)$$

dan

$$z = f(\omega) = \frac{1+(T/2)\omega}{1-(T/2)\omega}, \quad \text{untuk bidang } -\omega \quad \dots (2)$$

Dimana T merupakan prioda pencuplikan.

Transformasi bilinier tersebut adalah transformasi yang konformal, karena harga fungsi tersebut atau f(z) tidak sama dengan nol.

Bentuk lain persamaan transformasi bilinier sebagai berikut :

$$Z = f(\lambda) = \frac{a\lambda+b}{c\lambda+d}, \quad ad - bc \neq 0 \quad \dots (3)$$

**c. Transformasi D-Pole Assignment**

Adapun prinsip perhitungan untuk teknik “D-Pole Assignment” sebagai berikut:

Definisikan persamaan keadaan sistem diskrit  $\Sigma(A, \underline{b})$ ,

$$\underline{x}(k + 1) = A\underline{x}(k) + \underline{b}u(k) ; \quad \underline{x} \in R^n \quad \dots (4)$$

dimana pasangan A dan  $\underline{b}$  merupakan matriks konstan dan diasumsikan dapat dikendalikan.

Untuk sistem  $\Sigma(A, \underline{b})$  di atas, dikendalikan dengan hukum optimal:

$$* \quad u(k) = -\underline{F}\underline{x}(k) \quad \dots (5)$$

sehingga diperoleh persamaan keadaan lingkaran tertutup pada sistem diskrit:

$$\underline{x}(k + 1) = (A - \underline{b}\underline{F})\underline{x}(k) \quad \dots (6)$$

Persamaan ( 6 ) mempunyai pole-pole yang terletak dalam “Daerah-D”, dimana pole-pole tersebut direpresentasikan oleh:

$$|\lambda_i(A - \underline{b}\underline{F})| = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad \dots (7)$$

Selanjutnya kita dapat menggunakan transformasi bilinier bentuk umum persamaan (3), untuk memetakan  $\lambda_i$  (pole-pole lingkaran tertutup  $\Sigma(A, \underline{b})$ ) ke bidang  $-\rho[b]$  (daerah di dalam lingkaran berjari-jari satu, yang berlaku untuk 335yste kendali diskrit) dengan pole-pole  $\rho_i$ .

Untuk bidang  $-\rho[b]$  dengan mengambil a = 1, b =  $\alpha$ , c = 0 dan d =  $r_2$ , pada persamaan (3) diperoleh :

$$\rho[b] = f(\lambda) = \frac{\lambda-\alpha}{r_2} \quad \dots (8)$$

Dimana  $\alpha$  dan  $r_2$  masing-masing merupakan titik pusat dan jari-jari lingkaran -D.

**d. Delta Operator dan Operator Geser**

Delta operator didefinisikan sebagai berikut :

$$\delta \triangleq \frac{q-1}{\Delta}, \quad \Delta = \text{waktu pencuplikan} \quad \dots (9)$$

Operator Geser (the shift operator) didefinisikan sebagai berikut :

$$qx_k \triangleq x_{k+1} \quad \dots (10)$$

Dengan menggunakan delta operator, representasi operator geser menjadi:

$$\delta x_k = \frac{x_{k+1}-x_k}{\Delta} = \frac{x(k\Delta+\Delta)-x(k\Delta)}{\Delta} \quad \dots (11)$$

### 3. Kerangka Konseptual

Sebagai gambaran dari kerangka teori yang telah dibahas sebelumnya, pada bagian ini akan lebih ditekankan pada aspek pengembangan untuk memperlihatkan kaitan antara teori kendali optimal dengan penggunaan metode D-Pole Assignment dan Delta Operator ( $\delta$  – Operator). Atau dengan kata lain pada bagian ini akan diperlihatkan secara khusus kontribusi metode D-Pole Assignment dan Delta Operator ( $\delta$  – Operator) dalam perancangan kendali optimal.

#### a. Representasi Kendali Optimal Untuk Kasus Bergantung Waktu Dengan Menggunakan $\delta$ -Operator

Input optimal dalam bentuk delta direpresentasikan sebagai berikut :

$$u(t) = -L(t + \Delta)x(t) \quad \dots(12)$$

dimana,

$$L(t) = (R + \Delta B^T \Sigma(t)B)^{-1} B^T \Sigma(t)(I + \Delta A) \quad \dots(13)$$

dan  $\Sigma(t)$  memenuhi:

$$\bar{\rho} \Sigma(T) = Q + A^T \Sigma(t) + \Sigma(t)A + \Delta A^T \Sigma(t)A - L(t)^T [R + \Delta B^T \Sigma(t)B] L(t) \quad \dots(14)$$

$$\Sigma(t_f) = \Sigma_f \quad \dots(15)$$

dan  $\bar{\rho}$  merupakan suatu turunan (derivative), selanjutnya didefinisikan:

$$\bar{\rho} \Sigma(t) \triangleq \begin{cases} -\left(\frac{\Sigma(t) - \Sigma(t-\Delta)}{\Delta}\right), & \text{untuk waktu diskrit} \\ -\frac{d}{dt} \Sigma(t), & \text{untuk waktu kontinyu} \end{cases} \quad \dots(16)$$

dimana:

$$A = \frac{A_q - I}{\Delta}, \quad B = \frac{B_q}{\Delta}, \quad Q = \frac{Q_q}{\Delta}, \quad \text{dan } R = \frac{R_q}{\Delta}$$

#### b. Representasi Pemilihan Matriks Bobot Yang Memenuhi Persyaratan Optimal dan “D-Pole Assignment”

Dengan menggunakan transformasi bidang  $-\rho[b]$  diperoleh:

$$P_1 = A^T P_1 A + \{P_1 + r_2^2 Q_1 - \alpha A^T P_1 - \alpha P_1 A + (\alpha^2 - r_2^2) P_1\} - \underline{F}^{1T} (r_2^2 r_1 + \underline{b}^T P_1 \underline{b}) \underline{F}^1 \quad \dots (17)$$

dimana :

$$\underline{F}^1 = (r_2^2 r_1 + \underline{b}^T P_1 \underline{b})^{-1} (b^T P_1 A - \alpha \underline{b}^T P_1) \quad \dots (18)$$

Selanjutnya bila  $P = P_1$  dan  $\underline{F} = \underline{F}^1$  maka diperoleh:

$$Q = P_1 + r_2^2 Q_1 - \alpha P_1 A - \alpha A^T P_1 + (\alpha^2 - r_2^2) P_1 \quad \dots (19)$$

dan

$$r = r_2^2 r_1 \quad \text{atau} \quad r = r_2^2 \quad \dots (20)$$

Dari persamaan (19) dan (20) tampak Q adalah matriks definit positif sebab  $P_1$  dan  $Q_1$  definit positif. Demikian juga untuk matriks r akan definit positif sebab  $r_1$  juga definit positif.

Dengan demikian matriks-matriks bobot untuk system diskrit akan dapat meminimumkan tolok ukur penampilan kuadratik dengan konfigurasi pole-pole lingkaran tertutup yang diatur oleh kendali umpan balik keadaan. Hal ini juga sekaligus menjamin bahwa letak pole-pole di dalam “daerah-D” yang berbentuk lingkaran dengan titik pusat  $\alpha$  dan jari-jari  $r_2$ , serta terletak di dalam lingkaran satuan pada bidang-z.

**c. Representasi Persamaan Riccati, Matriks Bobot, dan Vektor Umpan Balik Optimal Dengan Menggunakan  $\delta$ -Operator**

Dengan menggunakan transformasi bidang  $-\rho[b]$  diperoleh:

$$P_1 = \Delta A^T P_1 A + \{P_1 + r_2^2 Q_1 - \alpha \Delta A^T P_1 - \alpha \Delta P_1 A + (\alpha^2 - r_2^2) P_1\} - \underline{F}^{1T} (r_2^2 r_1 + \Delta \underline{b}^T P_1 \underline{b}) \underline{F}^1 \quad \dots(21)$$

dimana :

$$\underline{F}^1 = (r_2^2 r_1 + \Delta \underline{b}^T P_1 \underline{b})^{-1} (\Delta \underline{b}^T P_1 A - \alpha \Delta \underline{b}^T P_1) \quad \dots(22)$$

Selanjutnya bila  $P = P_1$  dan  $\underline{F} = \underline{F}^1$  maka diperoleh:

$$Q = P_1 + r_2^2 Q_1 - \alpha \Delta P_1 A - \alpha \Delta A^T P_1 + (\alpha^2 - r_2^2) P_1 \quad \dots(23)$$

dan

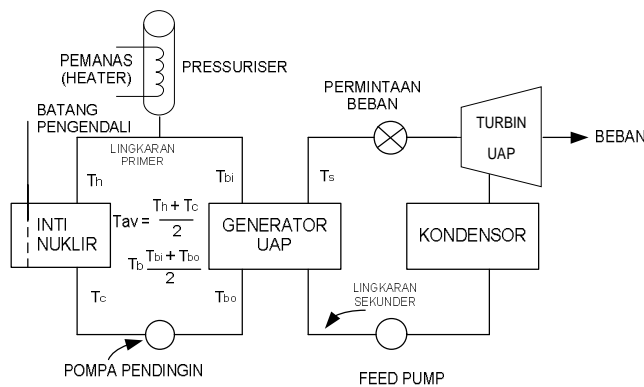
$$r = r_2^2 r_1 \quad \text{atau} \quad r = r_2^2 \quad \dots(24)$$

**4. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Tipe PWR (Pressurised Water Reactor)**

Reaktor nuklir melakukan pengaturan dayanya dengan mengendalikan jumlah neutron yang bereaksi.

Adapun prinsip kerja PLTN adalah dengan mengalirkan gas atau cairan pendingin yang akan memindahkan panas dari proses fisi ke “heat exchanger” untuk menghasilkan uap. Uap tersebut akan menggerakkan turbin generator yang selanjutnya menghasilkan energi listrik.

Pada Gambar 2 dibawah ini, ditunjukkan reaktor jenis PWR. Disini reaktor merupakan sumber energi panas. Panas diekstraksi dengan melakukan pendinginan (coolant) ke reaktor tersebut. Energi panas kemudian dipindahkan ke turbin melalui “generator uap”. Pendingin di bagian primer dapat berupa gas, air, atau bahan cairan.



**Gambar 2.** Lingkaran Primer dan Sekunder PLTN Tipe PWR

Setiap perubahan didalam parameter-parameter sistem pendingin, misalnya temperatur, tekanan atau aliran akan mempengaruhi reaktivitas reaktor. Pengaruh utama biasanya disebabkan oleh perubahan temperatur. Temperatur moderator dan bahan bakar dapat dipengaruhi oleh panas didalam reaktor maupun variabel-variabel dari beban atau gabungan dari keduanya. Pengaruh lain dapat disebabkan oleh tekanan sistem di lingkaran primer.

Persamaan-persamaan yang terkait dengan PLTN tipe PWR adalah persamaan kinetika, perpindahan panas dari bahan bakar ke air, keseimbangan panas untuk air pendingin di dalam inti, perlambatan transportasi, dan persamaan suhu yang keluar dari generatot uap.

Setelah proses linierisasi dan memilih variabel keadaan  $X_1 = C$ ,  $X_2 = t_s$ ,  $X_3 = t_c$ ,  $X_4 = t_{bi}$ ,  $X_5 = \emptyset$  diperoleh persamaan untuk PLTN tipe PWR dalam bentuk state variabel sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= \frac{1}{\ell} X_5 \\ \dot{X}_2 &= -\left(\frac{1}{t_5} \left(1 - \frac{D/2}{1+D/2}\right) + \frac{\psi}{t_5}\right) X_2 + \left(\frac{1}{t_5(1+D/2)}\right) X_4 \\ \dot{X}_3 &= \frac{D}{t_4(1+D/2)} X_2 + \left(\frac{2}{t_4(1+D/2)} - \frac{1}{t_4}\right) X_4 - \frac{1}{t_4} X_3 \\ \dot{X}_4 &= -\frac{1}{t_3} X_4 + \left(\frac{1}{t_3} \frac{4t_2}{t_2'-1} - 1\right) X_3 + \frac{2t_1A}{t_3\left(\frac{t_2}{t_2'}-1\right)} X_5 + \frac{2t_1A\ell}{t_3\left(\frac{t_2}{t_2'}-1\right)} X_1 \\ \dot{X}_5 &= -X_5 + KU \end{aligned} \tag{25}$$

dan diperoleh matriks A sistem adalah :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{t_5} \left(1 - \frac{D/2}{1+D/2}\right) + \frac{\psi}{t_5} & 0 & \frac{1}{t_5(1+D/2)} & 0 \\ 0 & \frac{D}{t_4(1+D/2)} & -\frac{1}{t_4} & \frac{1}{t_5(1+D/2)} & 0 \\ \frac{2t_1A\ell}{t_3\left(\frac{t_2}{t_2'}-1\right)} & 0 & \frac{1}{t_3} \frac{4t_2}{t_2'-1} - 1 & -\frac{1}{t_4} & \frac{2t_1A}{t_3\left(\frac{t_2}{t_2'}-1\right)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -10^{-2} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{26}$$

dengan memasukkan data parameter-parameter reaktor seperti dalam Tabel 1 diperoleh:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.286 \times 10^5 \\ 0 & -0.18 & 0 & 0.08 & 0 \\ 0 & 0.1 & -0.250 & -0.15 & 0 \\ 0.881 \times 10^{-3} & 0 & 0.255 & -0.250 & 0.252 \times 10^3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -10^{-2} \end{bmatrix} \tag{27}$$

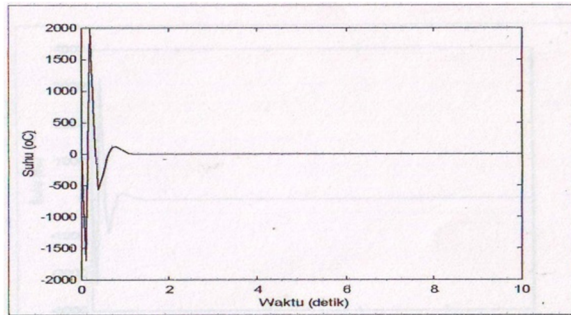
**Tabel 1.** Parameter-Parameter Reaktor

Konstanta waktu panas bahan bakar $t_1$	0,1	sec
Waktu untuk satu satuan volume pendingin		
Untuk melalui suatu inti reaktor $t_0$	0,25	sec
Suhu pendingin rata-rata $t_{av} = t_b$	500	°F
Perlambatan transportasi tertentu $t_3$	4	sec
Perlambatan transportasi antara titik keluar Boiler dan titik masuk reaktor $t_4$	4	sec
Fraksi neutron lambat $\beta$	0,007	
Waktu hidup rata-rata didalam reaktor $\ell$	$3.5 \times 10^{-5}$	sec
Konstanta peluruhan emmitter kasif $\lambda\psi$	0,1	sec <sup>-1</sup>
Konstanta panas $A_u$	$95^5$	°F/sec
Konstanta waktu pasang air $t_2$	0.34	sec
Konstanta waktu $t_2$	0.092	sec
Konstanta D	0.5	
Konstanta waktu sekunder $t_5$	10	sec
Arus daya waktu hilangnya panas dari inti reaktor $\delta$	$10^{-2}$	sec <sup>-1</sup>

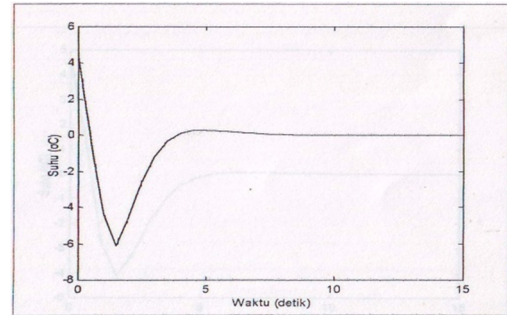
## 5. Hasil Simulasi

Pada bagian ini ditunjukkan hasil simulasi dinamika PLTN tipe PWR, khususnya simulasi pengaturan suhu air mendidih di lingkaran sekunder  $T_s$ .

- Hasil simulasi untuk :  $t = 0$  10 detik ,  $r_2 = 0,40$ , dan  $\alpha = 0,10$
- Hasil simulasi untuk :  $t = 0$  50 detik ,  $r_2 = 0,40$ , dan  $\alpha = 0,30$

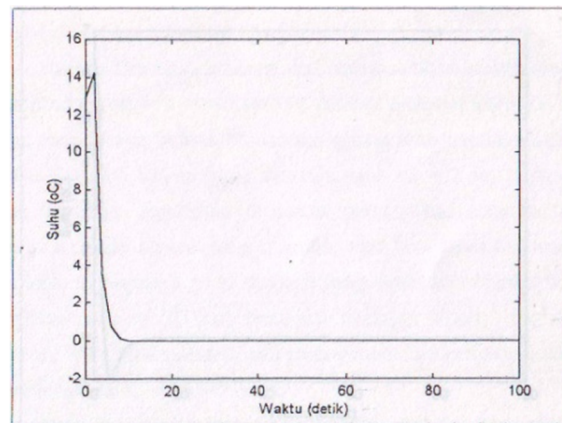


**Gambar 3.** Penyimpangan Suhu Air Mendidih di Lingkaran Sekunder



**Gambar 4.** Penyimpangan Suhu Air Mendidih di Lingkaran Sekunder

- Hasil simulasi untuk :  $t = 2$  detik ,  $r_2 = 0,40$  , dan  $\alpha = 0,30$



**Gambar 5.** Penyimpangan Suhu Air Mendidih di Lingkaran Sekunder

## 6. Pembahasan

Dari hasil simulasi yang dilakukan, diperoleh beberapa hasil analisa berikut.

- Keadaan tunak sistem semakin cepat tercapai bila titik pusat “Daerah-D” semakin dekat dengan titik pusat lingkaran satuan. Hal ini disebabkan karena nilai  $\sigma$  akan semakin besar bila letak pole pada bidang-z semakin dekat ke titik pusat lingkaran satuan.
- Lewatan maksimum akan semakin besar bila letak “Daerah-D” semakin dekat ke titik pusat lingkaran satuan. Hal ini disebabkan karena nilai frekuensi alamiah tak teredam ( $\omega_n$ ) akan semakin besar bila letak pole pada bidang-z semakin dekat ke titik pusat lingkaran satuan.
- Nilai sinyal kendali akan semakin besar bila letak “Daerah-D” semakin dekat ke titik pusat lingkaran satuan. Hal ini karena nilai sinyal kendali berhubungan dengan

kecepatan tanggapan, artinya bila semakin cepat tanggapan sistem maka akan semakin besar sinyal kendali yang dibutuhkan.

4. Bila waktu pencuplikan ( $\Delta$ ) diperbesar untuk harga  $\alpha$  dan  $r_2$  yang tetap maka tanggapan sistem semakin lambat. Hal ini disebabkan karena nilai  $\omega_n$  pada sistem lingkaran tertutup tergantung pada pemilihan "Daerah-D" dan pemilihan waktu pencuplikan.

## 7. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan sebagai verifikasi dari teori yang telah dikembangkan, diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pemilihan "Daerah-D" untuk sistem lingkaran tertutup :
  - a. Keadaan tunak sistem semakin cepat tercapai bila letak "Daerah-D" semakin dekat ke titik pusat lingkaran satuan
  - b. Lewatan maksimum semakin besar bila letak titik pusat "Daerah-D" semakin dekat ke titik pusat lingkaran satuan.
2. Semakin besar waktu pencuplikan maka semakin lambat keadaan tunak tercapai.
3. Waktu pencuplikan maksimum yang dapat dipakai agar sistem tetap stabil adalah 2 detik.
4. Penggunaan Metoda D-Pole Assignment dalam perancangan sistem akan lebih mempermudah dalam menentukan nilai matriks bobot yang memenuhi spesifikasi sistem sehingga performansi sistem dapat ditingkatkan.
5. Penggunaan Delta-Operator dalam perancangan sistem berhasil mengatasi kesalahan pemilihan waktu pencuplikan yang dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem.

## 8. Daftar Pustaka

- Anderson, B. D.O and Moore, J. B, 1989, Optimal Control, Prentice Hall, Inc.
- CL. Phillips, H.T. Nagle, 1990, Digital Control System Analysis and Design, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- E.G. Collins, JR and S. Tinglun, 1999, Delta Operator Approach to Discrete Time  $H_\infty$  Control, Journal Control.
- Furuta, K, dan S. B. Kim, Pole Assignment In a Specified Disk, IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. AC – 32, No. 5, May 1987, 423 -426.
- Lee, H. 1992, Control For Continuous and Discrete-Time Systems: A Unified Approach, Meng Thesis, University of Newcastle, Australia.
- Lee, S. dan T. Lee, Optimal Pole – Assignment For a discrete Linear Regulator With Constant Disturbances, Int. J. Contr., Vol. 45, no. 1, Jan. 1987, 161 – 168.
- Middleton, R.H and Goodwin, G.C. 1990, Digital Control and Estimation: A Unified Approach. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Ogata, K. 1994, Discrete Time Control Systems, Prentice Hall.
- Sultz, M.A.1961, Control Of Nuclear Reactor and Power Plants, McGraw Hill, Inc, New York.
- Tharps, H.S., Optimal Pole – Placement in Discrete System, IEEE Trans. On Automat. Cont., Vol. Ac – 37, no. 5, May 1992, 645 -648.
- Weaver L. E. 1968, Reactor Dinamisand Control, American Eiseiver Publising Company, Inc.