

SIMULASI PERANCANGAN FASA TERTINGGAL SISTEM KENDALI DIGITAL

Cekmas Cekdin

Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Palembang
Jalan Jenderal Ahmad Yani 13 Ulu Palembang

Email : _cekmas_cekdin@yahoo.com

Abstrak : Perancangan dengan kompensator fasa tertinggal adalah $\omega_{w0} > \omega_{wp}$ dalam fungsi alih kompensator. Penguat arus searah merupakan satuan, dan frekuensi tinggi diberikan oleh (penguat frekuensi tinggi)_{dB} = $20 \log \frac{\omega_{wp}}{\omega_{w0}}$ atau *magnitude* penguat frekuensi tinggi adalah $\omega_{wp} / \omega_{w0}$

yang harganya kurang dari satu. Dengan demikian kompensator fasa tertinggal dipakai untuk mengurangi penguat frekuensi tinggi relatif terhadap penguat frekuensi rendah, dan meningkatkan margin stabilitas tanpa menurunkan tanggapan frekuensi rendah. Pengurangan penguat frekuensi tinggi mengurangi lebar pita frekuensi sistem lup tertutup, sehingga menghasilkan tanggapan sistem yang lebih lambat. Perancangan menggunakan kompensasi fasa tertinggal. Persamaan karakteristik sistemnya diberikan dengan persamaan berikut

$1 + D(z)G(z)$ dengan $G(z) = \mathcal{Z} \left[\frac{1 - e^{-sT}}{s} G_p(s) \right]$. Kompensator fasa tertinggal mengenakan penguat

yang telah dikurangi dan fasa negatif ke tanggapan frekuensi dari fungsi lup terbuka, yang sebagai plot polar adalah diagram Nyquist. Secara umum fasa negatif mengarah ke penurunan stabilitas sistem dengan memutar diagram Nyquist menuju titik -1, frekuensi pecah ω_{w0} dan ω_{wp} harus dipilih secara hati-hati sehingga fasa negatif terjadi di sekitar persilangan -180° dengan tanggapan frekuensi kendalian $G(j\omega_w)$, dengan $G(w) = G(z) \Big|_{z=(1+Tw/2)/(1-Tw/2)}$ dan untuk sistem pada $G(j\omega_w) = G(w) \Big|_{w=j\omega_w}$. Untuk meningkatkan margin stabilitas sistem, perlu bagi kompensator untuk mengenakan penguat yang telah dikurangi di sekitar persilangan -180° . Maka kedua ω_{w0} dan ω_{wp} harus lebih kecil dibandingkan dengan frekuensi dimana fasa -180° terjadi.

Kata kunci : Kompensator fasa tertinggal, margin penguat, margin fasa

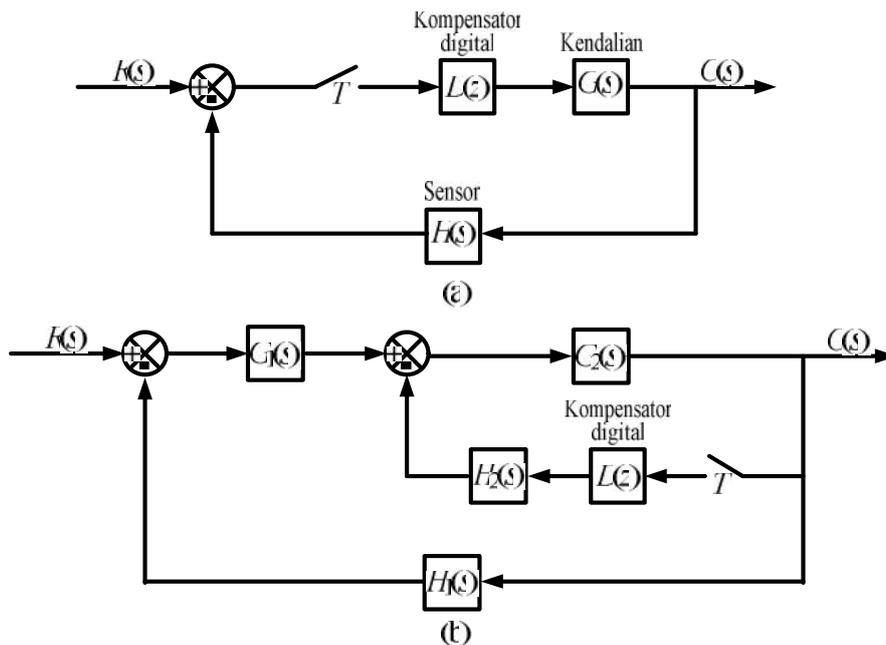
1. PENDAHULUAN

Masalah perancangan bagaimana fungsi alih pengendali digital yang akan memenuhi spesifikasi perancangan untuk sistem kendali. Perancangan sistem kendali digital ini melibatkan penggantian parameter sistem atau penambahan subsistem digital yang disebut kompensator, pengendali atau filter untuk mencapai karakteristik sistem tertentu yang dikendaki. Karakteristik yang dibutuhkan, atau spesifikasi kinerja, umumnya berkaitan dengan tanggapan peralihan, stabilitas relatif, sensitivitas terhadap perubahan pada parameter sistem, dan penolakan gangguan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kompensasi

Dengan mengasumsikan bahwa sistem yang akan dirancang mempunyai konfigurasi seperti Gambar 1(a).



Gambar 1. Sistem Kendali Digital

Untuk sistem pada Gambar 1(a) fungsi alih lup tertutup dinyatakan

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{D(z)G(z)}{1 + D(z)G(z)H(z)} \tag{1}$$

Persamaan karakteristik dari Persamaan (1) di atas adalah

$$1 + D(z)G(z)H(z) \tag{2}$$

Tipe kompensasi dari Gambar 1(a) disebut sebagai kompensasi kaskade atau kompensasi seri. Pangaruh kompensasi pada karakteristik sistem dinyatakan oleh persamaan karakteristik seperti Persamaan (2).

Dalam menempatkan kompensator yang lebih layak seperti pada Gambar 1(b). Untuk sistem ini didapat persamaan

$$C(z) = \frac{\mathcal{Z} \left[\frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H_1(s)} \right]}{1 + D(z) \mathcal{Z} \left[\frac{G_2(s)H_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H_1(s)} \right]} = 0 \tag{3}$$

Persamaan karakteristik untuk sistem ini adalah

$$1 + D(z) \mathcal{Z} \left[\frac{G_2(s)H_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H_1(s)} \right] = 0 \tag{4}$$

dengan

$$D(z) = \frac{K_d(z - z_0)}{z - z_p} \tag{5}$$

Transformasi $D(z)$ ke bidang w menghasilkan $D(w)$, dimana

$$D(w) = D(z) \Big|_{z = [1+(T/2)w]/[1-(T/2)w]} \tag{6}$$

Bila asumsi $D(w)$ berbentuk

$$D(w) = \frac{1 + w / \omega_{w0}}{1 + w / \omega_{wp}} \tag{7}$$

dengan $-\omega_{w0}$ merupakan lokasi nol dan $-\omega_{wp}$ merupakan lokasi pole dibidang w .

Penguat arus searah dari kompensator pada Persamaan (5) dengan menetapkan $z = 1$ atau dari Persamaan (7) dengan menetapkan $w = 0$. Maka dalam Persamaan (7) dengan mengasumsikan sebuah penguat arus searah satuan untuk kompensator. Penguat arus searah bukan satuan ditentukan dengan mengalikan sisi kanan dari Persamaan (7) dengan konstanta yang harganya setara dengan penguat arus searah yang dikehendaki.

Untuk merealisasikan suatu kompensator, fungsi alih harus dinyatakan dalam z , seperti pada Persamaan (5). Berdasarkan Persamaan (7) didapat

$$D(w) = \frac{1 + \frac{w}{\omega_{w0}}}{1 + \frac{w}{\omega_{wp}}} \Bigg|_{w = (2/T)[(z-1)/(z+1)]} \tag{8}$$

$$= \frac{\omega_{wp} (2/T + \omega_{w0})}{\omega_{w0} (2/T + \omega_{wp})} \left[\frac{z - \frac{2/T - \omega_{w0}}{2/T + \omega_{w0}}}{z + \frac{2/T - \omega_{wp}}{2/T + \omega_{wp}}} \right]$$

Maka, pada Persamaan (7) parameter pengendali pada bidang z sebagai fungsi dari parameter pada bidang w adalah

$$K_d = \frac{\omega_{wp} (2/T + \omega_{w0})}{\omega_{w0} (2/T + \omega_{wp})}, \quad z_0 = \frac{2/T - \omega_{w0}}{2/T + \omega_{w0}}, \quad z_p = \frac{2/T - \omega_{wp}}{2/T + \omega_{wp}} \tag{9}$$

Kompensator dari Persamaan (7) diklasifikasikan berdasar lokasi nol, ω_{w0} relatif terhadap lokasi kutub ω_{wp} . Bila $\omega_{w0} < \omega_{wp}$ kompensasi disebut fasa mendahului, bila $\omega_{w0} > \omega_{wp}$ kompensasi disebut sebagai fasa tertinggal. Bila diperhatikan dari Persamaan (9), dimana nol z_0 dekat ke $z = 1$ dari pada ke kutub z_p , kompensatornya fasa mendahului, jika sebaliknya kompensator fasa tertinggal.

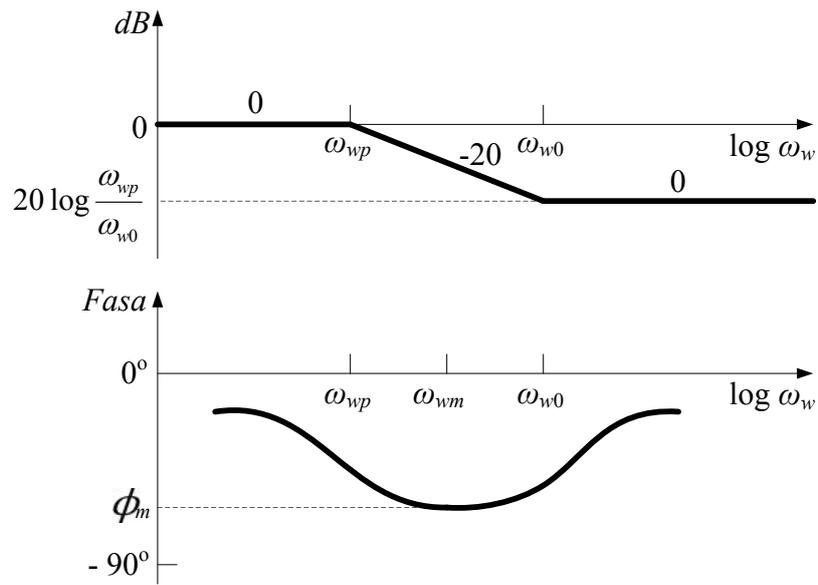
2.2. Perancangan Fasa Tertinggal

Perancangan dengan kompensator fasa tertinggal adalah $\omega_{w0} > \omega_{wp}$ dalam fungsi alih kompensator seperti pada Persamaan (7). Diagram Bode dari fungsi alih ini diberikan pada Gambar 2, fasa kompensator pada gambar tersebut adalah negatif, sehingga dinamai kompensator fasa tertinggal. Penguat arus searah merupakan satuan, dan frekuensi tinggi diberikan oleh

$$(\text{penguat frekuensi tinggi})_{dB} = 20 \log \frac{\omega_{wp}}{\omega_{w0}} \tag{10}$$

atau *magnitude* penguat frekuensi tinggi adalah $\omega_{wp} / \omega_{w0}$ yang harganya kurang dari satu. Dengan demikian kompensator fasa tertinggal dipakai untuk mengurangi penguat frekuensi tinggi relatif terhadap penguat frekuensi rendah, dan meningkatkan marjin stabilitas tanpa menurunkan tanggapan frekuensi rendah.

Pengurangan penguat frekuensi tinggi mengurangi lebar pita frekuensi sistem lup tertutup, sehingga menghasilkan tanggapan sistem yang lebih lambat.



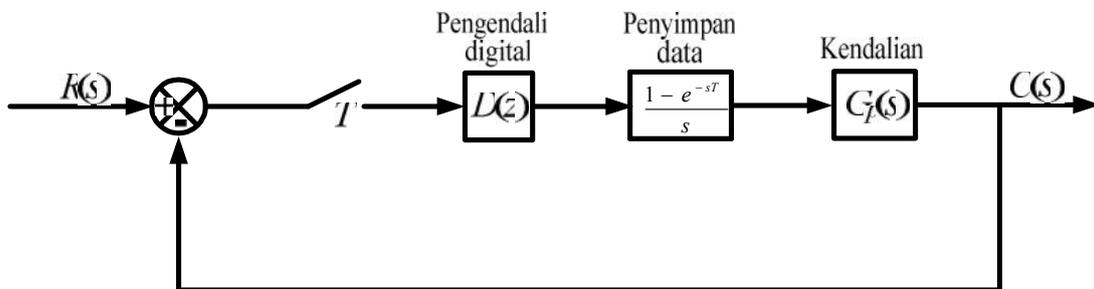
Gambar 2. Kompensator fasa tertinggal

Perancangan menggunakan kompensasi fasa tertinggal terhadap sistem seperti Gambar 3. Persamaan karakteristik sistemnya diberikan dengan persamaan berikut

$$1 + D(z)G(z) \tag{11}$$

dengan

$$G(z) = \mathcal{Z} \left[\frac{1 - e^{-sT}}{s} G_p(s) \right] \tag{12}$$



Gambar 3. Sistem Kendali Digital

Untuk konfigurasi sistem yang berbeda dari Gambar 3, persamaan karakteristik dibentuk seperti pada Persamaan (11). Kemudian fungsi alih yang mengalikan $D(z)$ dihitung. Dari hasil tersebut, teruskan dengan prosedur perancangan yang diberikan nanti.

Pada Gambar 2, terlihat kompensator fasa tertinggal mengenakan penguat yang telah dikurangi dan fasa negatif ke tanggapan frekuensi dari fungsi lup terbuka, yang sebagai plot polar adalah diagram Nyquist. Secara umum fasa negatif mengarah ke penurunan stabilitas sistem dengan memutar diagram Nyquist menuju titik -1, frekuensi pecah ω_{w0} dan ω_{wp} harus dipilih secara hati-hati sehingga fasa negatif terjadi di sekitar persilangan -180° dengan tanggapan frekuensi kendalian $G(j\omega_w)$, dengan

$$G(w) = G(z) \Big|_{z=(1+Tw/2)/(1-Tw/2)} \tag{13}$$

dan untuk sistem pada Gambar 3 adalah

$$G(j\omega_w) = G(w) \Big|_{w=j\omega_w} \tag{14}$$

Untuk meningkatkan margin stabilitas sistem, perlu bagi kompensator untuk mengenalkan penguat yang telah dikurangi di sekitar persilangan -180° . Maka kedua ω_{w0} dan ω_{wp} harus lebih kecil dibandingkan dengan frekuensi dimana fasa -180° terjadi.

Gambar 4 menggambarkan perancangan dengan kompensasi fasa tertinggal. Dalam gambar tersebut kedua margin penguat sistem dan margin fasa sistem meningkat, sehingga meningkatkan stabilitas relatif. Perlu diketahui, penguat frekuensi rendah tidak bias dikurangi, dan karenanya tanggapan keadaan tunak tidak bisa diturunkan untuk mencapai peningkatan stabilitas relatif. Lebar pita frekuensi lup tertutup telah dikurangi, yang secara umum menghasilkan tanggapan waktu sistem yang lebih lambat.

Sebuah teknik untuk menentukan ω_{w0} dan ω_{wp} untuk menghasilkan margin fasa yang dikendaki akan disajikan. Teknik ini dengan prosedur perancangan sebagai berikut:

1. Sesuaikan penguat arus searah dari $G(z)$ dengan faktor K_c untuk memenuhi spesifikasi frekuensi rendah.
2. Cari frekuensi ω_{w1} dimana sudut $G(j\omega_w)$ sama dengan $(-180^\circ + \phi_m + 5^\circ)$, dengan ϕ_m merupakan margin fasa yang dikehendaki.
3. Hitung nol dengan persamaan berikut

$$\omega_{w0} = 0,1 \omega_{w1} \tag{15}$$

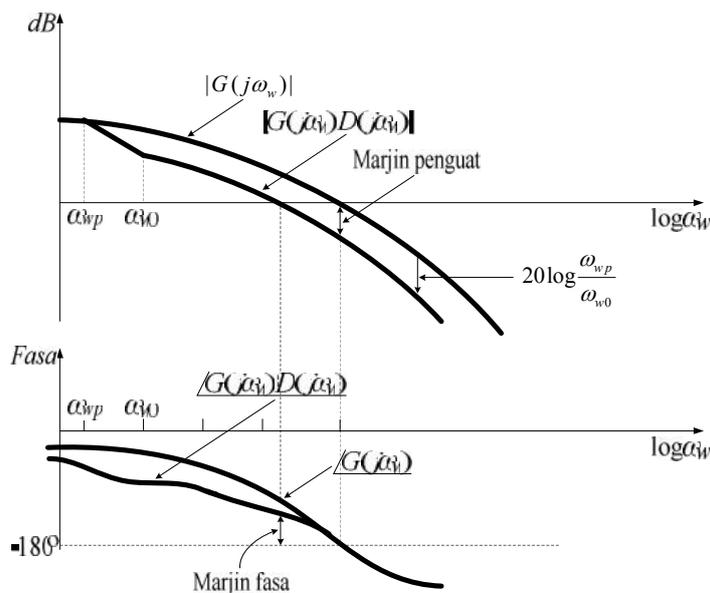
4. Hitung kutub dengan persamaan berikut

$$\frac{\omega_{wp}}{\omega_{w0}} = \frac{1}{|G(j\omega_{w1})|} \tag{16}$$

5. Hitung fungsi kompensator dengan persamaan berikut

$$D(w) = \frac{K_c (1 + w / \omega_{w0})}{(1 + w / \omega_{wp})} \tag{17}$$

dengan K_c merupakan faktor pengali penguat arus searah dari $G(w)$ pada langkah 1.



Gambar 4. Perancangan menggunakan kompensasi fasa tertinggal

Faktor 5° pada prosedur 2 ditambahkan untuk mempertimbangkan fasa tertinggal mendekati 5° yang ditambahkan oleh kompensator pada frekuensi ω_{w1} . $D(w)$ dihitung dari Persamaan (9), dengan penguat K_d harus dikalikan dengan K_c .

3. SIMULASI

Suatu fungsi kendalian diberikan

$$G_p(s) = \frac{4}{s(s+1)(s+2)}$$

Konfigurasi sistem diberikan pada Gambar 3, dan T dipilih 0,5 dt. Fungsi alih kompensator sebagai fungsi alih dari z , dan gambarkan tanggapan undak satuannya.

Fungsi alih pulsa kendalian dengan $T=0,5$ dt adalah

$$\begin{aligned} G(z) &= \frac{z-1}{z} \mathcal{Z} \left[\frac{4}{s^2(s+1)(s+2)} \right] \\ &= \frac{z-1}{z} \mathcal{Z} \left[\frac{1}{s^2} - \frac{3}{s} + \frac{4}{s+1} - \frac{1}{s+2} \right] \\ &= \frac{z-1}{z} \left[\frac{z}{(z-1)^2} - \frac{3z}{z-1} + \frac{4z}{z-0,065} - \frac{z}{z-0,3679} \right] \\ &= \left[\frac{0,05824z^2 + 0,1629z + 0,02753}{z^3 - 1,9744z^2 + 1,1975z - 0,2231} \right] \end{aligned}$$

Selanjutnya teknik dengan prosedur perancangan sebagai berikut

1. Prosedur ini tidak membutuhkan penyesuaian dari tanggapan frekuensi.
2. Marjin fasa (θ_m) yang dikehendaki adalah 50°, kemudian mencari frekuensi ω_{w1} dimana sudut dari $G(j\omega_w)$, sehingga

$$-180^\circ + 50^\circ + 5^\circ = -125^\circ$$

Dengan perhitungan komputer bahasa pemrograman MATLAB seperti berikut

```
disp('-----')
disp(' | w | |G(jw)| | Fasa |')
disp('-----')
T = 0.5;
Fasa = 0;
delta_w = 0.01;
w = 0.1;
while -125 < Fasa
    w = (w + delta_w);
    z = (1+T*j*w/2)/(1-T*j*w/2);
    Gjw = (((0.05824*z^2)+(0.1629*z)+(0.02753))/((z^3)
        -(1.9744*z^2)+(1.1975*z)-(0.2231)));
    Magnitude = abs(Gjw);
    Fasa = 180/pi*atan2(imag(Gjw), real(Gjw));
    fprintf('%7.3f |%7.3f |%10.3f |\n',w,Magnitude,Fasa)
end
disp('-----')
```

Hasil dari program diatas adalah seperti berikut

| w | G(jw) | Fasa |
|-------|--------|----------|
| 0.110 | 18.046 | -100.999 |
| 0.120 | 16.519 | -101.993 |
| 0.130 | 15.225 | -102.985 |
| 0.140 | 14.114 | -103.975 |

| |
|---------------------------|
| 0.150 13.150 -104.963 |
| 0.160 12.306 -105.949 |
| 0.170 11.559 -106.933 |
| 0.180 10.894 -107.915 |
| 0.190 10.298 -108.894 |
| 0.200 9.760 -109.871 |
| 0.210 9.273 -110.845 |
| 0.220 8.829 -111.817 |
| 0.230 8.423 -112.785 |
| 0.240 8.050 -113.751 |
| 0.250 7.706 -114.713 |
| 0.260 7.388 -115.673 |
| 0.270 7.092 -116.629 |
| 0.280 6.817 -117.582 |
| 0.290 6.561 -118.531 |
| 0.300 6.321 -119.477 |
| 0.310 6.096 -120.419 |
| 0.320 5.885 -121.358 |
| 0.330 5.686 -122.292 |
| 0.340 5.498 -123.223 |
| 0.350 5.320 -124.150 |
| 0.360 5.153 -125.073 |

Dari perhitungan diatas didapat $G(j0,36)=5,153 \angle -125,073^\circ$.

3. Maka $\omega_{w1} = 0,36$, dan dari Persamaan (15) didapat

$$\omega_{w0} = 0,1 \omega_{w1} = 0,1 \times 0,36 = 0,036$$

4. Dari Persamaan (16) didapat

$$\omega_{wp} = \frac{\omega_{w0}}{|G(j\omega_{w1})|} = \frac{0,036}{5,153} = 0,00699 \approx 0,007$$

5. Fungsi alih kompensator sebagai

$$D(w) = \frac{(1 + w/0,036)}{(1 + w/0,007)}$$

Berdasarkan Persamaan (9) adalah

$$K_p = \frac{\omega_{wp} (2/T + \omega_{w0})}{\omega_{w0} (2/T + \omega_{wp})} = \frac{0,007(2/0,5 + 0,036)}{0,036(2/0,5 + 0,007)} = 0,1975$$

$$z_0 = \frac{2/T - \omega_{w0}}{2/T + \omega_{w0}} = \frac{2/0,5 - 0,36}{2/0,5 + 0,36} = 0,9822$$

Fungsi alih kompensator sebagai fungsi dari z adalah

$$D(z) = \frac{0,1975(z - 0,9822)}{z - 0,99648} = \frac{0,1975z - 0,1940}{z - 0,99648}$$

didapat

$$D(z)G(z) = \left[\frac{0,1975z - 0,1940}{z - 0,99648} \right] \times \left[\frac{0,05824z^2 + 0,1629z + 0,02753}{z^3 - 1,9744z^2 + 1,1975z - 0,2231} \right]$$

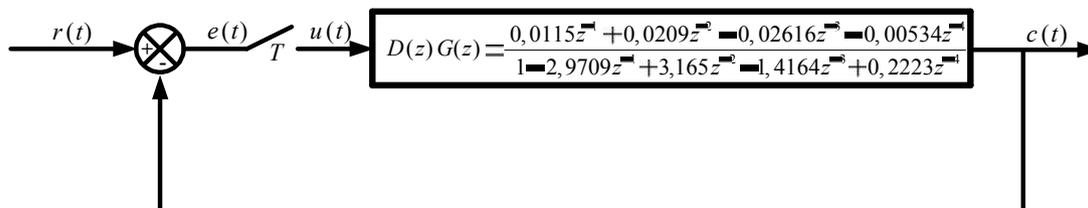
$$= \frac{0,0115z^3 + 0,0209z^2 - 0,02616z - 0,00534}{z^4 - 2,9709z^3 + 3,165z^2 - 1,4164z + 0,2223}$$

Kalikan persamaan diatas dengan z^{-4} / z^{-4} maka didapat

$$D(z)G(z) = \left[\frac{0,0115z^3 + 0,0209z^2 - 0,02616z - 0,00534}{z^4 - 2,9709z^3 + 3,165z^2 - 1,4164z + 0,2223} \right] \times \frac{z^{-4}}{z^{-4}}$$

$$= \frac{0,0115z^{-1} + 0,0209z^{-2} - 0,02616z^{-3} - 0,00534z^{-4}}{1 - 2,9709z^{-1} + 3,165z^{-2} - 1,4164z^{-3} + 0,2223z^{-4}}$$

Gambar dalam diagram blok sistem kendali seperti Gambar 5 dibawah ini



Gambar 5. Diagram blok perancangan fasa tertinggal sistem kendali digital sebagai fungsi z untuk Simulasi

Dari Gambar 5 diatas didapat fungsi alih dari

$$\frac{c(t)}{u(t)} = \frac{0,0115z^{-1} + 0,0209z^{-2} - 0,02616z^{-3} - 0,00534z^{-4}}{1 - 2,9709z^{-1} + 3,165z^{-2} - 1,4164z^{-3} + 0,2223z^{-4}}$$

atau

$$(1 - 2,9709 z^{-1} + 3,165 z^{-2} - 1,4164 z^{-3} + 0,2223 z^{-4}) c(t) = (0,0115 z^{-1} + 0,0209 z^{-2} - 0,02616 z^{-3} - 0,00534 z^{-4}) u(t)$$

atau

$$c(t) - 2,9709 z^{-1} c(t) + 3,165 z^{-2} c(t) - 1,4164 z^{-3} c(t) + 0,2223 z^{-4} c(t) = 0,0115 z^{-1} u(t) + 0,0209 z^{-2} u(t) - 0,02616 z^{-3} u(t) - 0,00534 z^{-4} u(t)$$

atau

$$c(t) - 2,9709 c(t-1) + 3,165 c(t-2) - 1,4164 c(t-3) + 0,2223 c(t-4) = 0,0115 u(t-1) + 0,0209 u(t-2) - 0,02616 u(t-3) - 0,00534 u(t-4)$$

dalam simbol program persamaan diatas adalah

$$CT - 2,9709 CTM1 + 3,165 CTM2 - 1,4164 CTM3 + 0,2223 CTM4 = \underbrace{0,0115UTM1 + 0,0209UTM2 - 0,02616UTM3 - 0,00534UTM4}_{C_1}$$

dengan

$$C_1 = 0,0115UTM1 + 0,0209UTM2 - 0,02616UTM3 - 0,00534UTM4$$

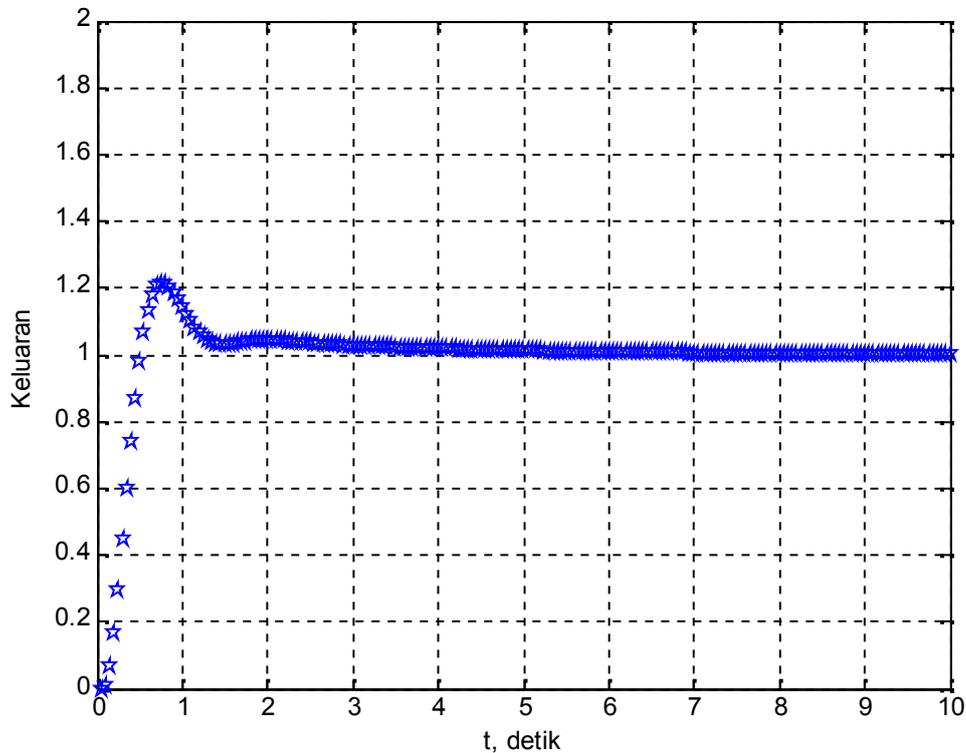
Jadi

$$CT = C_1 + 2,9709 CTM1 - 3,165 CTM2 + 1,4164 CTM3 - 0,2223 CTM4$$

dan

$$ET = RT - CT$$

Dari uraian diatas untuk menggambarkan tanggapan undak satuan dapat disusun dengan bahasa pemrograman MATLAB seperti pada LAMPIRAN. Gambar hasil programnya seperti Gambar 6.



Gambar 6. Tanggapan Undak Satuan untuk **Simulasi**

4. KESIMPULAN

Dari teknik dengan prosedur perancangan didapat disimpulkan hasilnya

1. Marjin fasa (θ_m) yang dikehendaki adalah 50° , kemudian mencari frekuensi ω_{w1} dimana sudut dari $G(j\omega_w)$, sehingga

$$G(j0,36)=5,153 \angle -125,073^\circ.$$

2. $\omega_{w1} = 0,36$, dan dari Persamaan (15) didapat

$$\omega_{w0} = 0,1 \omega_{w1} = 0,1 \times 0,36 = 0,036$$

3. Dari Persamaan (16) didapat

$$\omega_{wp} = \frac{\omega_{w0}}{|G(j\omega_{w1})|} = \frac{0,036}{5,153} = 0,00699 \approx 0,007$$

4. Fungsi alih kompensator sebagai fungsi dari z adalah

$$D(z)G(z) = \frac{0,0115z^{-1} + 0,0209z^{-2} - 0,02616z^{-3} - 0,00534z^{-4}}{1 - 2,9709z^{-1} + 3,165z^{-2} - 1,4164z^{-3} + 0,2223z^{-4}}$$

5. Tanggapan Undak Satuan (CT), untuk waktu menuju waktu tak hingga adalah stabil karena sama dengan *set point* (RT).

DAFTAR PUSTAKA

- Burn, Roland S., *Advanced Control Engineering*, Butterworth-Heinemann, 2001.
- Fadali, M. Sam., *Digital Control Engineering, Analysis and Design*, Elsevier, 2009.
- Houpis, Constantine H., Lamont, Garry B., *Digital Control Systems*, McGraw-Hill, 1985.
- Leigh, J.R., *Applied Digital Control, Theory, Design and Implementation*, Second Edition, Prentice-Hall International, Inc., 1992.
- Nise, Norman S., *Control Systems Engineering*, Second Edition, Addison-Wesley, 1995
- Ogata, Katsuhiko., *Discrete-Time Control System*, Prentice-Hall International, Inc., 1987.
- Ogata, Katsuhiko., *Solving Control Engineering Problems with MATLAB*, Prentice-Hall International, Inc., 1994.
- Ogata, Katsuhiko., *Modern Control Engineering*, Third Edition, Prentice-Hall International, Inc., 1997
- Phillips, Charles L., Nagle, H. Troy., *Digital System Analysis and Design*, Second Edition, Prentice-Hall International, Inc., 1990.
- Phillips, Charles L., Harbor, Royce D., *Sistem Kontrol Lanjut*, Alih bahasa oleh Prof. Dr. Ir. R.J. Widodo, PT. Prenhallindo, Jakarta, 1998.

LAMPIRAN LISTING PROGRAM

```

% PERANCANGAN SISTEM KENDALI DIGITAL
% TANGGAPAN UNDAK SATUAN FASA TERTINGGAL
epsilon = 10.01;
t = 0;
delta_t = 0.05;
RT = 1;
% Harga awal parameter :
CTM1 = 0;
CTM2 = 0;
CTM3 = 0;
CTM4 = 0;
UTM1 = 0;
UTM2 = 0;
UTM3 = 0;
UTM4 = 0;
while t < epsilon
    C1 = 0.0115*UTM1+0.0209*UTM2-0.02616*UTM3-0.00534*UTM4;
    CT = C1+2.9709*CTM1-3.165*CTM2+1.4164*CTM3-0.2223*CTM4;
    ET = RT - CT;
    UTM4 = UTM3;
    UTM3 = UTM2;
    UTM2 = UTM1;
    UTM1 = ET;
    CTM4 = CTM3;
    CTM3 = CTM2;
    CTM2 = CTM1;
    CTM1 = CT;
    t = t + delta_t;
v = [0 10 0 2];
axis(v);
plot(t,CT,'p')
grid on
hold on
xlabel('t, detik')
ylabel('Keluaran')
end

```