PERANCANGAN PENGENDALI LAG, LEAD, DAN LAG-LEAD POSISI MOTOR DC SECARA DISKRIT MENGGUNAKAN MATLAB

Oleh :
Yulastri
Zulharbi Suar
Julsam

Staf Pengajar Teknik Elektro Politeknik Unand

ABSTRACT
Controller for control dc motor position are designed with based system model of dc motor. Three types controllers lag, lead, and lag-lead are used for system. Transfer function controllers are designed with Bode Diagram and software Matlab. Transfer function systems are transformed from time domain to frekuensi domain and z-transformer. That is discretisation system. The parameter in dc motor systems are controlled with lag, lead, and lag-lead to be needed system. Lead contoller is used to be good system speed dc motor, lag controller to hit error steady state, and lag-lead controller is used to be good both system.
Discrete control System can be used to control system dc with the best condition. But the analog control system controlled system with some error. The characteristic control of discrete control system can to change. Discrete control system are strong to noise. Position control systems using dc motor are commonly found in industry, where precise positioning is important.

Key word : Bode Diagram, lag, lead, error steady state.

I. PENDAHULUAN

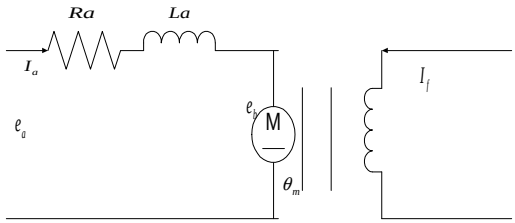
Perancangan dibuat untuk pengendali posisi motor arus searah dalam orde dua. Dan perancangan ini dibuat hanya sampai tahap simulasi. Jadi tingkah laku sistem dapat dilihat dari kurva tanggapan hasil simulasi. Motor dc banyak digunakan sebagai aktuator pada berbagai sistem di industri. Motor dc merupakan sistem elektromekanik yang bisa diaktifkan dengan sinyal input tegangan dan akan menghasilkan keluaran berupa putaran atau torsi. Pengaturan kecepatan dan posisi yang tepat sesuai dibutuhkan sistem yang akan digerakan oleh motor tersebut perlu ditambahkan konparator atau pengendali. Beberapa pengendali yang sering digunakan adalah lag, lead dan lag-lead, tetapi pengendali ini digunakan sebagai pengendali analog yang berupa rangkaian elektronika. Proses elektronika analog ini masih menghasilkan kesalahan yang cukup besar, maka dicoba lah merancang pengendali tersebut dengan sistem diskrit, dimana kesalahan tersebut dapat ditekan menjadi lebih kecil.

Selanjutnya akan diperlihatkan proses perancangan mulai dari kendaliannya berupa motor arus searah.

II. MATERI DAN METODA PENELITIAN

II.2 Perancangan Fungsi Alih Motor Servo Arus Searah dengan Medan Konstan

Rangkaian ekivalen untuk motor arus searah dengan medan konstan digambarkan sebagai berikut:



Keterangan:

Medan konstan yang dimaksud disini adalah arus konstan dengan tegangan jangkar variabel.

E_i = tegangan jangkar masukan

R_a = tahanan jangkar pada stator

L_a = induktansi jangkar pda stator

I_a = arus jangkar pada stator

I_f = arus medan (konstan)

θ_m = posisi sudut beban pada keluaran

Dari rangkaian jangkar diatas, didapat persamaan:

$$Ei = (Ra + sLa)Ia + eb$$
$$= (Ra+sLa)Ia + Kb\omega$$
$$= (Ra + sLa) + Ks\theta_m$$

Fungsi alih merupakan perbandingan putaran motor terhadap tegangan masukan, didapatkan sebagai berikut:

$$E_i = (R_a + sL_a)\frac{(Js^2 + Ds + K)}{K_m}\theta_m + K_b.s\theta_m$$

Pada motor servo:K_b <<, R_a >> L_a, sehingga

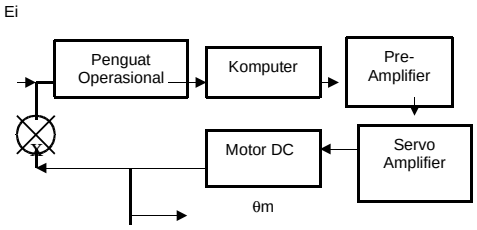
$$\frac{\theta_m}{E_i} = \frac{K_m / R_a}{s(Js + D)}$$

jika dimisalkan K' = K_m /(R_a.D) dan τ_m =J/D, maka:
bila K<<, maka:

$$G(s) = \frac{K_m}{s(\tau_m s + 1)}$$

II.2 Perancangan Sistem Kendali Motor Arus Searah tanpa Kompensator

Sebelum merancang pengendali untuk motor arus searah, harus diukur terlebih dahulu fungsi alih dari motor. Dengan menggunakan modul MS-150 kita bisa mengukur nilai parameter yang diperlukan untuk fungsi alih motor tersebut. Modul parktikum MS-150 untuk pengendalian posisi dapat disusun sebagai berikut:



Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Kendali Posisi secara Digital

Implementasi sistem kendali secara digital dapat menggunakan komputer ataupun mikrokontroller untuk pengendalinya. Motor arus searah ataupun plant lainya digerakan oleh sinyal analog, sedangkan sinyal kendali dari pengendali digital akan mengeluarkan sinyal digital, sehingga perlu pengubah sinyal dari digital ke analog (*D/A Converter*), demikian juga dengan sinyal yang masuk ke pengendali digital berupa sinyal analog sehingga untuk ini kita menggunakan pengubah sinyal dari analog ke digital (*A/D Converter*). Diagram blok untuk sistem kendali digital ini dapat kita lihat pada gambar 2.1.

Dengan melakukan pengukuran dari kurva tanggapan step dari sistem modul MS-150 kita dapatkan harga τ = 0.36 detik saat kondisi lingkar terbuka. Dan K_m didapat dari penghitungan perbandingan tegangan keluaran yang bisa dibaca pada kurva tanggapan dengan tegangan masukan ke motor, Km = Vo/Vi = 0.7

Sehingga fungsi alih dari motor arus searah tersebut menjadi:

Dari model sistem akan diperlihatkan fungsi alih sistem kendali digital tanpa kompensator, dengan memberikan perioda sampling T = 0.01detik.

$$G(s) = \frac{0.7}{s(0.36s + 1)}$$

Pemilihan perioda sampling adalah berdasarkan asumsi bahwa frekuensi sampling harus lebih besar dua kali dari frekuensi natural ($\omega_s > 2\omega_n$), dan dari pengukuran $\omega_n = V_{tacho}/ K_{teg.}$= 200 rad/det. Sehingga $\omega_s = 2\pi/ T > 200$ rad/det.

Pemodelan dari plant sistem kendali digital tersebut akan kita tunjukan sebagai berikut:

$$G_{ho}G(z) = \ell[G_{ho}(s)G(s)$$

$$= \ell\left[\frac{1 - e^{-sT}}{s} x \frac{0.7}{s(0.36s + 1)}\right]$$

$$= (1 - z^{-1})\ell\left[\frac{0.7}{s^2(0.36s + 1}\right]$$

Dengan mensubtitusikan :

$$z = \frac{1 + jw\, T/2}{1 - jw\, T/2}$$

Maka fungsi alih sistem tersebut menjadi :

$$= \frac{9.633.10^{-5} z + 9.544.10^{-5}}{z^2 - 1.973z + 0.9726}$$

II.3 Perancangan Kompensator *Phase Lead*

Metoda dengan pendekatan tanggapan frekuensi, spesifikasi kinerja diberikan dalam bentuk *phase margin, gain margin,* dan konstanta kesalahan

statik. Disini digunakan pendekatan dengan metoda diagram Bode.

Prosedur yang akan dilakukan untuk merancang kompensator *phase lead* adalah sebagai berikut:

1. Menggambarkan tanggapan frekuensi dari fungsi alih

Dengan menggunakan program matlab didapatkan nilai *phase margin,* pm = 76°, *gain margin*, gm = 287.12 dB, *crossover frequency*, wgc = 0.679 rad/det, *phase crossover frequency*, wpc = 23.021 rad/det. Dengan memperhatikan kurva tanggapan transient dari sistem ini terlihat kalau sistem tidak stabil karena getaranya masih terlalu besar. Phase margin 76° juga mengimplikasikan sistem tidak stabil, karena untuk sistem yang stabil tersebut diharapkan phase marginnya minimum 0°.

2. Menentukan fungsi alih dari kompensator *phase lead* seperti berikut:

Kemudian dari diagram Bode kita akan menentukan sudut fasa mendahului yang perlu ditambahkan ke sistem. Disini kita memilih sudut yang perlu

$$D(jw) = \frac{1 + jw\tau}{1 + jw\alpha w}$$

ditambahkan ϕs =80° dan sudut fasa dari sistem yang belum terkompensasi ϕ_1 = 76°, serta toleransi penambahan sudut yang diberikan adalah 12° sehingga kita akan dapatkan sudut fasa mendahului ϕ_L, $\phi_L = \phi s - \phi_1 + 12° = 80° - 76° + 12° = 16°$

3. Menentukan α dengan persamaan $\sin\phi_m$

$\alpha = 1 - \sin 16^0 / 1 + \sin 16^0 = 0.57$

Kemudian menentukan frekuensi yang menyebabkan penguatan sistem tanpa kompensasi dengan –20 log (1/ $\sqrt{\alpha}$) = -20 log (1/ $\sqrt{0.36}$) = -2.44 db. Frekuensi ini merupakan *gain crossover frequency* (wgc) yang baru yang menyebabkan terjadinya pergeseran fasa maksimum. Dari diagram Bode wgc yang baru tersebut adalah 1 rad/det.

4. Menentukan *break frekuensi* dari kompensator, $1/\tau$ = wgc $\sqrt{\alpha}$ = 1 $\sqrt{0.57}$ = 0.75, dan $1/\alpha\tau$ = 1.315.

Fungsi alih dari kompensator phase lead akan menjadi: D(jw) = (1+jw/0.75) / (1+jw/1.315)

5. Menentukan fungsi alih sistem terkompensasi lingkar tertutup.

Selanjutnya untuk mendapatkan algoritma pengendali kita harus mentransformasikan kembali pengendali kedomain z dengan persamaan:

jw = 2 (z-1)/T (z+1)

Dan

$D(z) = U(z)/E(z) = 1.75 - 1.73\, z^{-1} / 1 - 0.98\, z^{-1}$

Sehingga algoritma pengendali dengan metoda *direct* dapat dituliskan sebagai berikut:

u(k) = 0,9(k-1) + 1.7 e(k) –1.7 e(k-1)

Algoritma ini bisa digunakan untuk implementasi dengan perangkat lunak pada komputer, tetapi disini kita tidak meneruskan sampai implementasinya. Untuk melihat tanggapan sistem kita akan melihat melalui simulasi yang akan ditunjukan pada hasil.

II.4 Perancangan Kompensator *Phase Lag*

Kompensator phase lag ini bertujuan untuk memberikan pelemahan pada daerah frekuensi tinggi, supaya sistem memiliki batas fasa yang mencukupi. Prosedur perancangan kompensator ini dapat kita ikuti sebagai berikut:

1. Menentukan fungsi alih kompensator lag dalam domain frekuensi adalah sebagai berikut:

$$D(jw) = \frac{1 + \tau jw}{1 + \beta\tau jw}$$

2. Sistem lingkar terbuka yang belum terkompensasi belum memiliki margin fasa dan margin penguatan yang sesuai, sehingga kita perlu memilih sudut fasa yang dibutuhkan minimal sebanding dengan-180° yang ditambahkan dengan faktor penambahan 5° sampai 12°. Disini kita memilih sudut yang diperlukan 40° yang ditambah dengan 12°. Dari nilai sudut fasa sekitar 52° itu kita akan mencari nilai *gain crossover frekuensi* yang baru *wgc* = 2 rad/detik. Untuk mencegah pengaruh

yang akan merusak kompensator lag, pole dan zero kompensator lag diletakan lebih kecil dari wgc yang baru. Maka kita memilih break frequency $1/\tau$ satu dekade dibawah wgc yang baru. Dan kita dapatkan $1/\tau$ = 0.2 rad/detik.

2. Selanjutnya kita menentukan pelemahan yang diperlukan untuk membawa besaran kurva turun sampai 0 dB pada wgc yang baru. Dengan membacanya pada diagram bode, kita akan mendapatkan β dari atenuasi 20 log β = 12.5 dB. Sehingga break frequency yang lainya adalah $1/\beta\tau$ = 0.047 rad/detik.
3. Dari prosedur 3 dan 4 kita dapatkan fungsi alih kompensator dalam domain frekuensi

$$D(jw) = \frac{1 + 5jw}{1 + 21.3jw}$$

Persamaan ini dapat dirubah ke domain z

$$D(z) = \frac{0.235 - 0.234z^{-1}}{1 - 0.999z^{-1}} = \frac{U(z)}{E(z)}$$

Dari persamaan kompensator lag ini dapat buatkan algoritmanya secara langsung seperti dibawah ini:

u(k) = 0.9 u(k-1) + 0.23 e(k) + 0.23 e(k-1)

3.5 Perancangan Kompensator *Lag-Lead*

Kompensator *lag-lead* ini merupakan kombinasi dari kompensator lag dengan kompensator lead. Fungsi alih dari kompensator lag-lead dapat dituliskan sebagai berikut:

$$D(jw) = \left(\frac{\tau_1 jw + 1}{\tau_1 \beta jw}\right)\left(\frac{\tau_2 \beta + 1}{\frac{\tau_2}{\beta} jw + 1}\right)$$

Bagian *phase lead*(bagian τ_2) mengubah kurva respon ferkuensi dengan menambah sudut *phase lead* dan menaikan margin fasa pada *gain crossover frequency.* Bagian τ_1 merupakan *phase lag* yang memberikan pelemahan didekat dan diatas *gain crossover frequency* dan memperbaiki *steady state* sistem.

Prosedur perancangan kompensator lag-lead dapat kita lakukan sebagai berikut:

1. Untuk merancang bagian phase lag kita melakukan cara yang sama dengan perancangan kompensator lag yang sebelumnya. Fungsi alih yang kita dapatkan untuk bagian lag adalah:

$$D_1(jw) = \frac{1 + 5jw}{1 + 21.3jw}$$

2. Bagian phase lead dirancang berdasarkan sudut fasa maksimum (ϕ_m) yaitu : $\sin \varphi = 1-\alpha/1+\alpha$ dan $\alpha = 1/\beta$, sehingga $\sin \phi_m = (\beta - 1) / (\beta + 1)$. Dari perhitungan wgc yang baru didapatkan β = 4,25 dan sudut fasa maksimum menjadi 37.8°, serta α = 0.24. Dengan sudut fasa maksimum didapatkan gain margin maksimum w_m =3.5 rad/detik. Break frequency pada bagian zero phase lead $1/\tau_2 = w_m.\sqrt{\alpha} = 3.5\sqrt{0.24} = 1.71$, sedangkan untuk bagian pole, $1/\beta\tau_2 = w_m / \sqrt{\alpha} = 3.5 / \sqrt{0.24} = 7.1$, dan fungsi alih untuk bagian lead adalah:

D(jw) = (1+ jw/1.71)/(1+jw/7.1)

3. Dengan menggabungkan bagian lag dan lead maka kita akan mendapatkan kompensator lag-lead yang lengkap sbb.:

$$D(jw) = \left(\frac{1 + 5jw}{1 + 21.3jw}\right)\left(\frac{1 + 0.58jw}{1 + 0.14jw}\right)$$

Dalam domain z persamaan tersebut akan menjadi

$$D(z) = \frac{0.235z - 0.234}{z - 0.999}\,\frac{4.034z - 3.966}{z - 0.931} = \frac{U(z)}{E(z)}$$

sebagai berikut:

Algoritma pengendalinya dengan metoda direct dapat kita tuliskan sebagai berikut:

u(k) = 1.08u(k+2) +2.08u(k+1) +1.05e(k+2) + 2.08e(k+1) +1.03e(k)

III.HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Simulasi merupakan salah satu cara untuk menggambarkan kondisi yang sebenarnya dalam bentuk gambar bergerak, kurva tanggapan dan sebagainya. Sistem kendali memiliki beberapa metoda untuk menunjukan simulasi sistem, diantaranya dengan penggambaran diagram Bode, Nichols chart, Root Locus, Nyquist, Polar, tanggapan Step dan sebagainya. Penggambaran

dalam daerah frekuensi biasanya menggunakan diagram Bode, Nichols chart dan Nyquist. Hasil perancangannya akan kita lihat dalam bentuk tanggapan pada diagram Bode dan Nichols chart. Analisa kestabilan dan karakteristik pengendalian lainnya ditunjukan pada kurva tanggapan Step dan Root Locus.

]III.1 Simulasi Sistem Kendali Posisi Motor Arus Searah yang belum terkompensasi

Tanggapan sistem lingkar terbuka dari sistem yang belum terkompensasi ditunjukan berupa diagram Bode dan tanggapan step pada gambar 3.1 dan 3.2. Untuk melihat perbedaan kondisi

sistem yang terkompensasi dengan yang belum terkompensasi akan kita bandingkan selanjutnya.

Perlunya kompensator bagi suatu sistem adalah agar sistem tersebut dapat dikendalikan sesuai kondisi yang diinginkan.Dan kita harus memperhatikan apakah sistem tersebut memerlukannya atau tidak. Maka disini kestabilan sistem akan kita uji dengan menggunakan metoda pengujian Jury.

Sistem yang belum terkompensasi memiliki fungsi alih lingkar tertutup seperti persamaan berikut:

$$\frac{Gho.G(z)}{1+Gho.G(z)} = \frac{9.633e-005z+9.544e-005}{z^2-1.973z+0.9726}$$

Dengan menggunakan metoda pengujian Jury yang diperhatikan adalah bagian pole sistem lingkar tertutup (P(z)). Persamaan polenya adalah sebagai berikut:

$$P(z) = a_0z^2 + a_1z^1 + a_2z^0$$
$$= z^2 - 1.973z + 0.9726 = 0$$

Kondisi stabilitas yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut:

1. $|a_2| < a_0$, untuk kriteria ini kondisi kestabilan terpenuhi karena 0.9726 < 1.
2. $P(1) = a_0 + a_1 + a_2 > 0$
   $= 1 - 1.973 + 0.9726 = -0.0004 < 0$,

kondisi ini tidak memenuhi untuk kondisi kestabilan sistem. Sampai disini pengujian dihentikan, kondisi sistem terbukti tidak stabil.

III.2 Simulasi dan analisa penggunaan kompensator *Lead*

Hasil perancangan fungsi alih open loop sistem terkompensasi lead adalah sebagai berikut:

Tanggapan dari sistem yang terkompensasi lead ini disimulasikan dengan program matlab. Tanggapan sistem ini digambarkan dalam diagram Bode seperti terlihat pada gambar 3.3 . Dari diagram Bode kita mendapatkan margin sistem terkompensasi yang baru yaitu margin fasa, pm = 197º, margin penguatan, gm = 88dB, frekuensi crossover fasa, ω_{pc} = 25.79 rad/detik, dan frekuensi crossover penguatan, ω_{gc} = 0.95 rad/detik. Gain crossover frequency (ω_{gc}) yang baru ini mendekati nilai yang kita tetapkan dalam perancangan kompensator.

Sistem kendali yang kita rancang berupa sistem kendali digital lingkar tertutup. Fungsi alih untuk keluaran sistem lingkar tertutup yang terkompensasi lead dengan input step ditunjukan sebagai berikut:

$$C(z) = \frac{0.000168z^3 - 2.901e-007z^2 - 0.0001653z}{z^4 - 3.96z^2 - 3.878z + 0.9599}$$

III.3 Simulasi dan analisa sistem kendali digital dengan kompensator *lag*

Fungsi alih sistem yang terkendali atau terkompensasi Lag sebagai berikut:

Dari penunjukan diagram Bode kita juga mendapatkan margin yang baru yaitu margin fasa, pm = 55º, margin penguatan, gm = 1.15 dB,

$$= \frac{(9.13z^3 - 9.04z^2 - 8.96z - 8.87)10^{-5}}{z^4 - 3.90z^3 + 5.71z^2 - 3.71z + 0.905}$$

frekuensi crossover fasa, ω_{pc} = 22.85 rad/detik, dan frekuensi crossover penguatan, ω_{gc} = 0.2 rad/detik. Gambar diagram Bode dan ditunjukan pada gambar 3.4.

Keluaran sistem lingkar tertutup untuk sistem yang terkompensasi lag hasil perancangan dengan input step didapatkan sebagai berikut:

$$C(z) = \frac{2.26z^3 - 0.01634z^2 - 2.238z}{z^4 - 3.972z^3 + 5.916z^2 - 3.916z + 0.9721}$$

III.4 Simulasi dan analisa sistem kendali digital dengan kompensator *lag-lead*

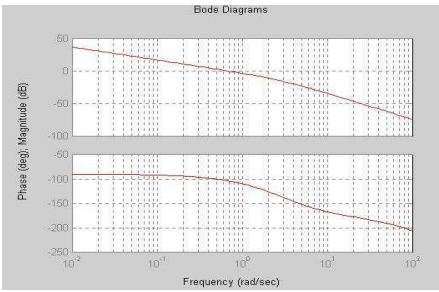
Fungsi alih lingkar terbuka sistem kendali digital dengan kompensator lag-lead hasil perancangan adalah sebagai berikut:

$$Gho.G(z).D(z) = \frac{(2.26z^2 - 0.01634z - 2.238)10^{-5}}{z^3 - 2.972z^2 + 2.944z - 0.9721}$$

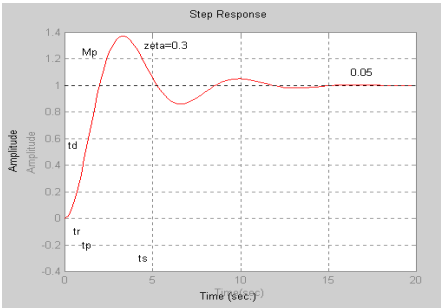
$$C(z) = \frac{(9.13z^4 - 9.04z^3 - 8.96z^2 + 8.873z)10^{-5}}{z^5 - 4.903z^4 + 9.6z^3 - 9.4z^2 + 4.6z - 0.91}$$

Tanggapan sistem kendali digital yang terkompensasi *lag-lead* ditunjukan pada diagram Bode dan tanggapan Step pada gambar 3.5 dan 3.6.

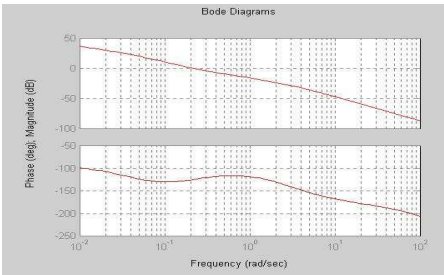
Kurva tanggapan untuk semua kondisi sistem



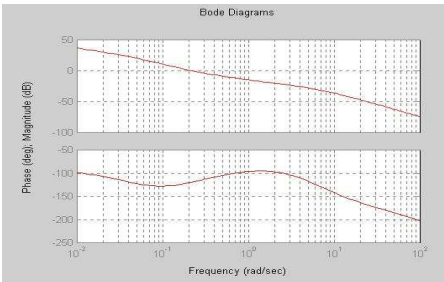
Gambar 3.1 Diagram Bode Motor dc yang belum terkompensasi



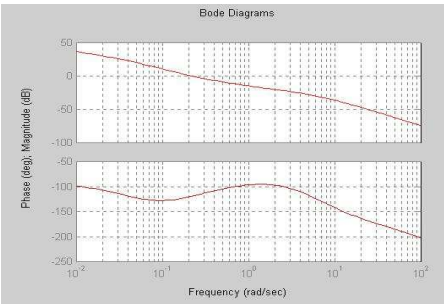
Gambar 3.2 Tanggapan step sistem yang belum terkompensasi



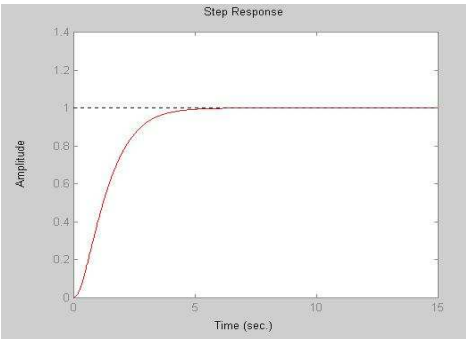
Gambar 3.3 Diagram Bode Sistem yang terkompensasi *Lead*



Gambar 3.4 Diagram Bode sistem terkompensasi *Lag*



Gambar 3.5 Diagram Bode sistem terkompensasi *Lag-Lead*



Gambar 3.6 Tanggapan Step sistem terkompensasi *Lag-Lead*

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan analisa simulasi maka disimpulkan bahwa:

1. Sistem kendali digital memiliki keuntungan yaitu:

- proses data pada pengendali digital lebih jelas dan perhitungan pengendali yang rumit bisa diselesaikan dengan mudah,
- karakteristik pengendalian bisa dirubah dengan mudah sesuai yang dibutuhkan,
- pengendali digital lebih kuat terhadap noise (gangguan) dibandingkan dengan pengendali analog.

2. Sistem kendali digital memiliki kelemahan dari segi proses penyamplingan dan kuantisasi menghasilkan galat yang lebih besar.
3. Kompensator *lead,* memperlebar bandwidth yang berarti mempercepat tanggapan sistem, memperkecil overshoot, dan memperbaiki keadaan tunak sistem. dalam domain frekuensi akan memperbesar margin fasa dan memperkecil waktu turun.
4. Kompensator *lag,* memiiliki gain yang besar pada daerah frekuensi rendah sehingga mampu memperbaiki galat keadaan tunaknya dan memiliki gain yang kecil pada daerah frekuensi tinggi sehingga mampu mengatasi ketidak stabilan sistem. Tetapi kompensator *lag* ini memiliki bandwidth yang kecil yang menyebakan lambatnya tanggapan sistem.
5. Kompensator *lag-lead,* mempunyai dua buah pole dan dua buah zero sehingga akan mempertinggi orde sistem. Kompensator ini sebaiknya digunakan bila menginginkan tanggapan yang cepat drai sistem dan ketelitian serta kestabilan yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. D'Azzo, J.J dan Houpis, C.H,"Feedback Control System Analysis & Synthesis", McGraw-Hill Kogakusha,Ltd., Edisi Kedua, 1966.
2. Gopal, M, "Digital Control Engineering", John Wiley and Sons(SEA) Pte. Ltd., Singapore, 1988.
3. Ogata Katsuhiko, "Modern Control Engineering", Prentice-Hall International, Inc., Edisi Ketiga, 1997.
4. Ogata Katsuhiko,"Discrete-Time Control System", Prentice-Hall International, Inc., 1987.
5. Shahian, Bahram dan Hassul Michael, "Control System Design Using Matlab", Prentice-Hall International, Inc., 1993.