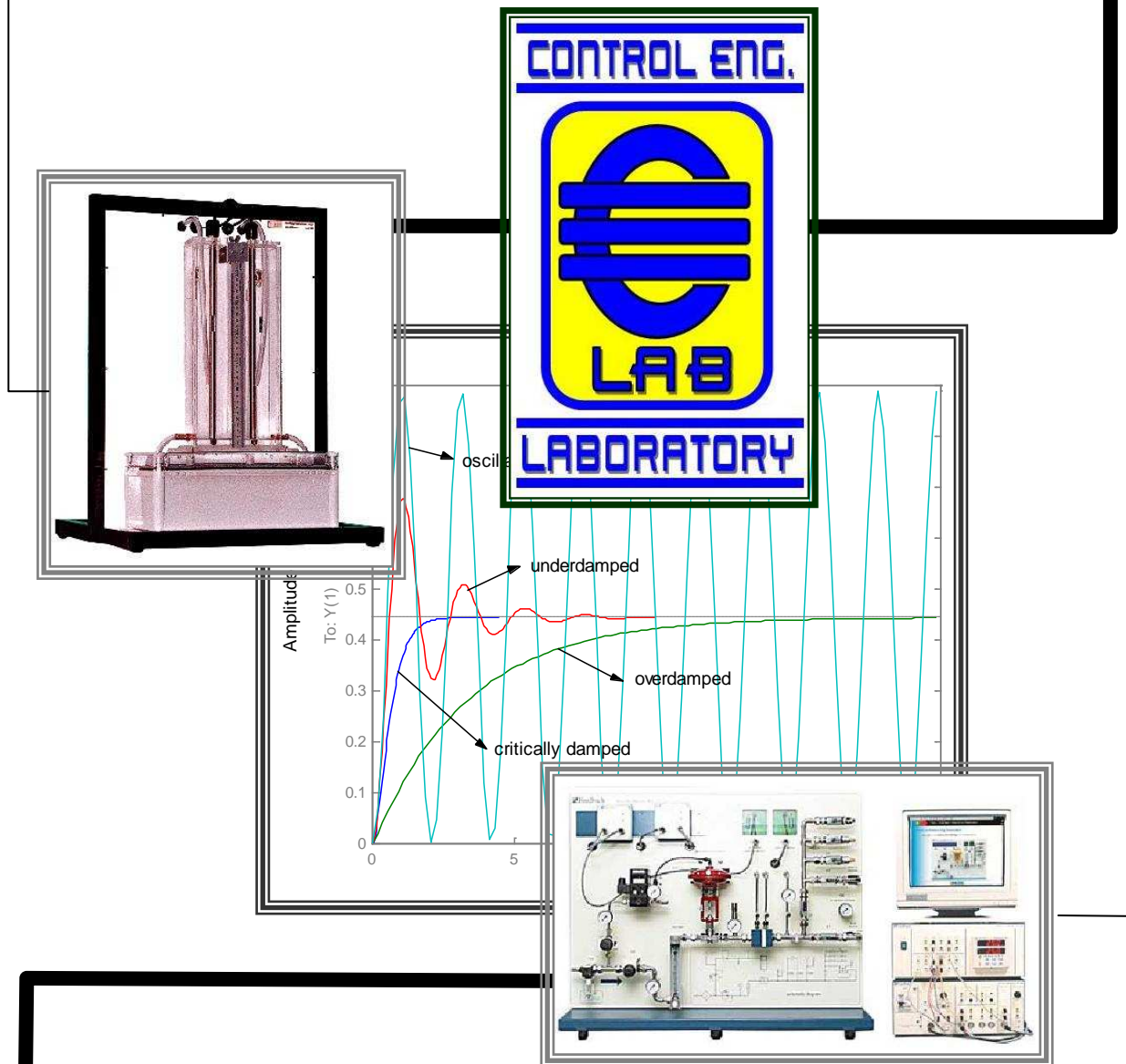


MODUL PRAKTIKUM DASAR SISTEM KENDALI



**LABORATORIUM TEKNIK KENDALI
DEPARTEMEN ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK - 2011**

PERCOBAAN 1

PENGENALAN MATLAB

I. Tujuan Percobaan

1. Mengetahui dasar-dasar pengoperasian MATLAB dan SIMULINK untuk analisa dan simulasi sistem kendali dasar.
2. Dapat merancang dan mensimulasikan sistem kendali sederhana.

II. Teori dan Percobaan

1. Matlab

MATLAB (Matrix Laboratory) merupakan salah satu jenis perangkat lunak yang dikembangkan oleh MathWorks™ yang dapat digunakan untuk mendesain proses dan sistem kendali.

1.1. Operasi Matematika dalam Matlab

Pada Matlab terdapat beberapa fungsi dasar matematika yaitu:

Operator	Keterangan
\wedge	Menyatakan pangkat
$*$	Menyatakan perkalian
$/$	Menyatakan pembagian
$+$	Menyatakan penjumlahan
$-$	Menyatakan pengurangan

Tabel 1.1 Fungsi matematika dasar pada Matlab

Adapun cara penulisan operasi matematika dengan menggunakan Matlab adalah seperti contoh di bawah ini. Misalkan diketahui nilai $a = 4$, $b = 9$, $c = 2$, dan $d = (a^2 \times b : c) - (b \times a)$ dapat ditulis dalam Matlab:

```
>> a = 4 ;
```

```
>> b = 9 ;
```

```
>> c = 2 ;
```

```
>> d = ( a ^ 2 * b / c ) - ( b * a )
```

dan diperoleh hasilnya :

```
d =
```

Catatan : Tanda titik koma (;) berfungsi untuk mencegah hasil perintah ditampilkan sehingga dapat menghemat waktu perhitungan. Selain itu Matlab pada operasi matematika tidak memperdulikan adanya spasi tetapi bersifat “case sensitive”

Matlab juga dapat digunakan untuk operasi matriks, di mana tiap baris pada matriks dipisah dengan tanda titik koma (;) dan tiap entri pada baris dipisah dengan satu spasi, dan cara penulisannya dapat dilihat melalui contoh berikut ini:

```
>> A = [1 2 ; 3 4]
```

A =

```
1      2
3      4
```

Matriks di atas adalah matriks 2x2 dengan 1 adalah entri pada baris pertama, kolom pertama, 2 adalah entri pada baris pertama kolom kedua, 3 adalah entri pada baris kedua, kolom pertama, dan 4 adalah entri pada baris kedua, kolom kedua.

Pada Matlab juga terdapat fungsi-fungsi operasi matriks seperti invers, transpose, perkalian, penjumlahan, dan pengurangan. Tabel berikut berisi perintah-perintah operasi matriks:

Operator	Keterangan
inv (A) atau A^{-1}	Invers matriks A
A'	Transpose matriks A
$A + B$	Penjumlahan matriks A dengan matriks B
$A - B$	Matriks A dikurang dengan matriks B
$A*B$	Perkalian matriks A dengan matriks B

Tabel 1.2. Operator matriks pada Matlab

Penulisan polinomial pada Matlab diwakili dengan suatu matriks baris. Contohnya adalah sebagai berikut:

Suatu polinomial $A = s^3 + 2s^2 + 3s + 4$ pada Matlab ditulis:

```
>> A = [1 2 3 4]
```

dan akar-akar dari polinomial A dapat dicari dengan menggunakan perintah:

>> akar = roots (A)

Fungsi – fungsi MATLAB lainnya:

Log	Menyatakan logaritma berbasis e
log10	Menyatakan logaritma berbasis 10
log2	Menyatakan logaritma berbasis 2
exp(x)	Menyatakan bilangan natural (e) pangkat x
Sin	Menyatakan nilai sinus dalam radian
Sind	Menyatakan nilai sinus dalam derajat
Sqrt	Menyatakan akar suatu nilai

1.2. Perintah dasar Matlab untuk sistem kendali

Matlab dapat digunakan untuk menuliskan fungsi alih suatu sistem/ proses dengan perintah sebagai berikut:

- Untuk fungsi alih dalam representasi poles dan zeros:

$G = \text{zpk} ([\text{zeros}], [\text{poles}], [\text{gain}])$

Contoh:

>> $G = \text{zpk} ([-1 -2], [0 -1 3], [5])$

Zero/pole/gain:

$5 (s+1) (s-2)$

$s (s+1) (s-3)$

- Untuk fungsi alih dalam bentuk umum:

>> $G = \text{tf} (\text{num}, \text{den})$

Contoh:

>> $\text{num} = [1 \ 1];$

>> $\text{den} = [1 \ 2 \ 1];$

>> $G = \text{tf} (\text{num}, \text{den})$

Transfer function:

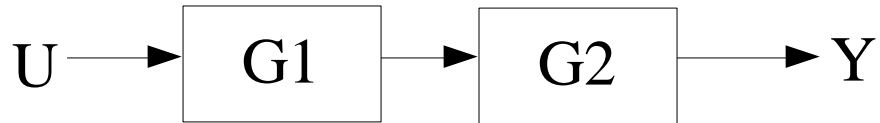
$s + 1$

$s^2 + 2s + 1$

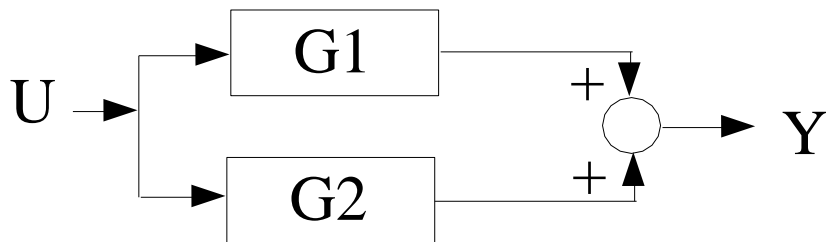
2. Simulink

2.1 Diagram Blok

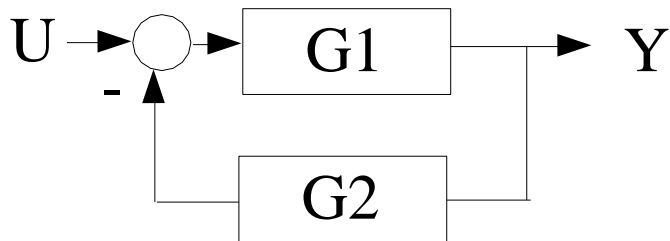
- Hubung seri



- Hubung paralel



- Dengan umpan balik



Blok diagram menyatakan model dari suatu sistem. Adapun untuk model sistem kontinu yang akan digunakan di sini dapat dinyatakan dalam bentuk polinomial, ataupun dalam bentuk poles dan zeros.

Dimana hubungan output dan input dapat dinyatakan sebagai berikut:

- Hubung seri

$$\frac{Y}{U} = G1.G2$$

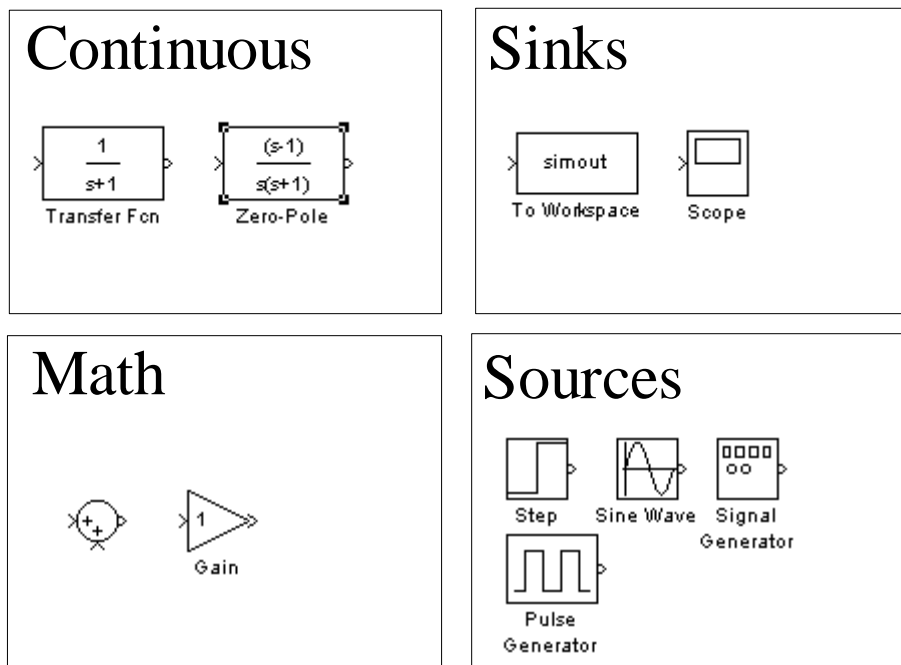
- Hubung paralel

$$\frac{Y}{U} = G1 + G2$$

- Dengan umpan balik

$$\frac{Y}{U} = \frac{G1}{1+G1.G2}$$

Blok diagram menyatakan model dari suatu sistem. Pada blok diagram di atas fungsi G1 dan G2 adalah fungsi dalam bentuk polinomial. Blok-blok diagram tersebut kemudian dapat dibuat di dalam simulink.



Blok-blok yang biasa digunakan dalam simulink adalah sebagai berikut:

1. Transfer function digunakan untuk sistem yang menggunakan persamaan dalam bentuk polinomial, nilai-nilai numerator disingkat num serta denominator disingkat den, dapat diubah dengan cara mengklik gambar dua kali.
2. Zero-pole digunakan untuk sistem yang persamaannya merupakan perkalian dari akar-akar polinomial.
3. Sum digunakan untuk menjumlahkan dua buah sinyal.
4. Scope digunakan untuk melihat sinyal keluaran sistem.
5. To workspace digunakan bila kita ingin mengolah sinyal proses diteruskan dengan file *.m.
6. Pulse Generator digunakan untuk membangkitkan pulsa.

7. Signal Generator digunakan untuk membangkitkan sinyal (sinus, square, sawtooth, random).
8. Sine Wave digunakan untuk membangkitkan sinyal sinusoidal.
9. Step digunakan untuk membangkitkan sinyal yang berupa fungsi step $u(t)$.

3. Peralatan

1. Pentium-based PC dengan sistem operasi Microsoft Windows XP
2. Perangkat Lunak MATLAB R2009a

4. Prosedur Percobaan

- a. Jalankan program MATLAB pada computer
- b. Kerjakan soal-soal yang ada pada borang praktikum
- c. Save file-file yang diperlukan untuk membuat laporan
- d. Praktikum Selesai

PERCOBAAN 2 TRANSIENT RESPONSE

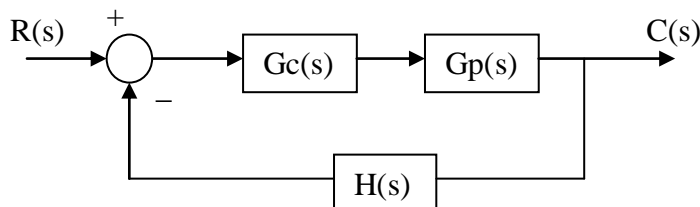
I. Tujuan Percobaan

1. Mampu menganalisa spesifikasi transient response dari sistem orde-1 dan orde-2.
2. Mampu menganalisa perbedaan transient response antara sistem orde -1 dan orde-2.
3. Mampu menganalisa kestabilan pada fungsi transfer sistem.
4. Mampu menganalisa steady state error yang terjadi pada respon keluaran sistem.

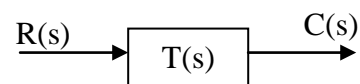
II. Dasar Teori

Transient response menunjukkan karakteristik output terhadap input dalam time domain. Karakteristik suatu sistem kendali biasanya dilihat dari transient response-nya. Hal ini karena sistem dengan penyimpanan energi tidak bisa merespon seketika itu juga dan akan selalu menunjukkan transient response ketika sistem itu diberi input atau gangguan. Untuk menganalisa sistem kendali biasanya digunakan standar input seperti fungsi impulse, step, ramp, atau sinusoidal. Input yang paling sering digunakan adalah unit step, karena input ini menyediakan informasi tentang karakteristik transient respons dan steady state respons dari suatu sistem. Secara umum setiap kita mengaktifkan suatu sistem, kita mengaktifkan fungsi step.

Gambar diagram blok :



Gambar 1.1.a



Gambar 1.1.b

Keterangan :

Gambar 1.a. Blok diagram suatu sistem kendali

Gambar 1.b. Blok diagram suatu sistem kendali yang disederhanakan di mana:

$$G(s) = G_c(s)G_p(s) \text{ dan } H(s) = 1 \quad (1.1)$$

Perhatikan gambar 1.b. Fungsi alih lingkaran tertutup dari sistem kendali tersebut adalah:

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)H(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (1.2)$$

$$C(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} R(s) \quad (1.3)$$

Transient respons dari sistem adalah invers Transformasi Laplace dari $C(s)$ atau $c(t) = L^{-1}[C(s)]$

1. Sistem orde –1

Sistem orde –1 mempunyai bentuk umum fungsi alih sebagai berikut :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K / \tau}{s + (1 / \tau)} \quad (1.4)$$

dimana τ adalah konstanta waktu

2. Sistem orde –2

Bentuk fungsi alih lingkaran tertutup dari sistem orde –2 adalah sebagai berikut:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (1.5)$$

Dengan ξ merupakan koefisien redaman yang menunjukkan apakah sistem orde-2 tersebut overdamped, underdamped, critically damped atau oscillatory (lihat pada lampiran). Sedangkan ω_n adalah frekuensi natural.

Dalam perancangan suatu sistem kendali harus diketahui spesifikasi-spesifikasi yang mendefinisikan karakteristik sistem.

Spesifikasi transient respons sebagai berikut :

1. Rise time (T_r)
2. Peak time (T_p)
3. Percent Overshoot (%OS)

4. Settling time (T_s)
5. Final Value (F_v) atau nilai steady state

Rumus Untuk Menghitung step respons sistem orde –1:

$$T_r = 2.2 \tau$$

$$T_s = 4\tau$$

$$F_v = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{C(s)}{R(s)}$$

Rumus Untuk Menghitung step respons sistem orde –2 (underdamped):

$$T_r = (1 - 0.4167 \xi + 2.917 \xi^2) / \omega_n$$

$$T_p = \pi / \{ \omega_n (1 - \xi^2)^{0.5} \}$$

$$\%OS = \exp(-\pi\xi / (1 - \xi^2)^{0.5})$$

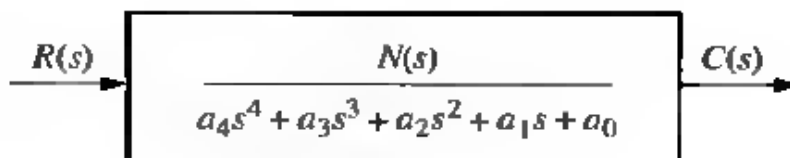
$$T_s = 4 / (\xi\omega_n)$$

$$F_v = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{C(s)}{R(s)}$$

Kestabilan Sistem

Kestabilan sistem dapat ditentukan salah satunya dengan menggunakan Routh-Hurwitz Criterion. Yang menyatakan bahwa jumlah dari akar-akar polynomial yang berada di sebelah kanan sumbu origin adalah sama dengan banyaknya perubahan tanda yang terjadi pada kolom pertama.

Diketahui:



s^4	a_4	a_2	a_0
s^3	a_3	a_1	0
s^2	$-\frac{\begin{vmatrix} a_4 & a_2 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix}}{a_3} = b_1$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_4 & a_0 \\ a_3 & 0 \end{vmatrix}}{a_3} = b_2$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_4 & 0 \\ a_3 & 0 \end{vmatrix}}{a_3} = 0$
s^1	$-\frac{\begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix}}{b_1} = c_1$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_3 & 0 \\ b_1 & 0 \end{vmatrix}}{b_1} = 0$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_3 & 0 \\ b_1 & 0 \end{vmatrix}}{b_1} = 0$
s^0	$-\frac{\begin{vmatrix} b_1 & b_2 \\ c_1 & 0 \end{vmatrix}}{c_1} = d_1$	$-\frac{\begin{vmatrix} b_1 & 0 \\ c_1 & 0 \end{vmatrix}}{c_1} = 0$	$-\frac{\begin{vmatrix} b_1 & 0 \\ c_1 & 0 \end{vmatrix}}{c_1} = 0$

Tabel Routh

Steady State Error

Ada 3 jenis steady state error, yaitu untuk input step, input ramp, dan input parabolic.

a. Step Input

dengan $R(s) = 1/s$

$$e(\infty) = e_{step}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(1/s)}{1 + G(s)} = \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G(s)}$$

b. Ramp Input

Dengan $R(s) = 1/s^2$

$$e(\infty) = e_{ramp}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(1/s^2)}{1 + G(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s + sG(s)} = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} sG(s)}$$

c. Parabolic Input

Dengan $R(s) = 1/s^3$

$$e(\infty) = e_{parabola}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(1/s^3)}{1 + G(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^2 + s^2G(s)} = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} s^2G(s)}$$

Static Error Constant

- Position constant (K_p), di mana $K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)$
- Velocity constant (K_v), di mana $K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)$
- Acceleration constant (K_a), di mana $K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)$

III. PERALATAN YANG DIGUNAKAN

1. PC dengan sistem operasi Windows XP.
2. Perangkat lunak MATLAB R2009a
3. Program penunjang praktikum yang dibuat oleh asisten.

IV. PERCOBAAN

A. Sistem Orde –1

1. Dari Simulink Matlab, masukkan fungsi alih lingkaran tertutup (sistem yang akan diberikan asisten pada waktu percobaan) dengan mengetikkan perintah-perintah sebagai berikut.
2. Masukkan fungsi transfer $\frac{1}{s+3}$ dengan cara mengklik dua kali pada kolom transfer function dan masukkan nilai [1] untuk numerator coefficient dan [1 3] pada denominator coefficient.
3. Amati dan gambar step response-nya serta catat karakteristiknya (T_r , T_p , T_s) dengan melihat dari kolom scope.

B. Sistem Orde – 2

1. Dengan cara yang sama masukkan nilai [10] untuk numerator coefficient dan [1 2 40] pada denominator coefficient.

$$\frac{10}{s^2+2s+40}$$

2. Amati dan gambar step response-nya serta catat karakteristiknya (T_r , T_p , T_s , %OS) dengan melihat dari kolom scope.

C. Kestabilan sistem

Diberikan fungsi transfer sistem
$$\frac{10}{s^5 + 7s^4 + 6s^3 + 42s^2 + 8s + 56}$$

Dengan cara yang sama, masukkan ke dalam tabel transfer function [10] untuk numerator coefficient dan [1 7 6 42 8 56] untuk denominator coefficient.

Amati garfik yang terjadi pada tabel scope. Tentukan apakah sistem tersebut stabil dan bandingkan dengan menganalisa fungsi transfer tersebut menggunakan prinsip kestabilan Routh.

D. Steady State Error

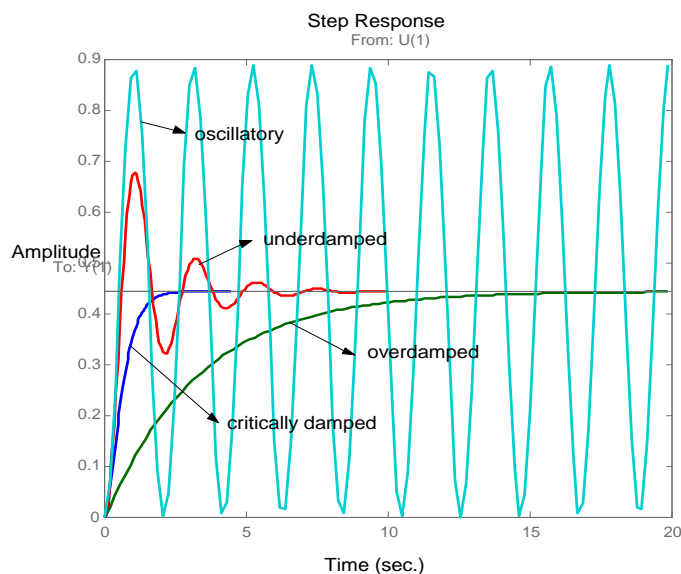
Masukkan [1] pada numerator coefficient dan [1 2] pada denominator coefficient ke dalam tabel scope. Hitung besarnya error pada grafik tersebut. Analisa hasil percobaan. Ganti fungsi transfer [1] pada numerator coefficient dan [1 2 2] pada denominator coefficient ke dalam tabel scope. Hitung error yang terjadi. Analisa hasilnya, bandingkan dengan percobaan sebelumnya.

V. DATA PERCOBAAN

No	Fungsi Alih G(s)	Time Response				Gambar
		Tr	Tp	Ts	%OS	

LAMPIRAN :

Beberapa karakteristik tanggapan waktu suatu sistem orde 2 dengan ζ berbeda :



PERCOBAAN 3 TEMPAT KEDUDUKAN AKAR

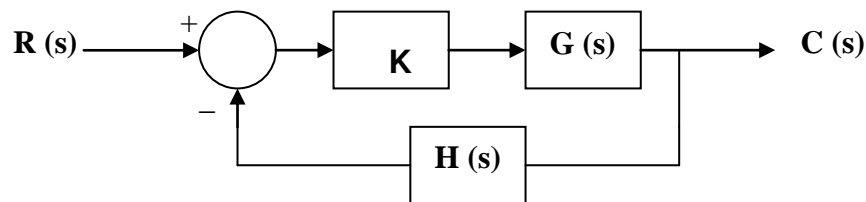
I. Tujuan Percobaan

1. Mampu memahami prinsip tempat kedudukan akar (TKA) dan menggambar kurva TKA dari suatu sistem.
2. Mampu menganalisa kestabilan suatu sistem berdasarkan analisis TKA.

II. Dasar Teori

A. Pengertian

Kurva pergerakan closed loop pole dari open loop pole ke open loop zero akibat peningkatan nilai Gain (K).



Gambar 2.1 : Diagram blok tempat kedudukan akar

Dari gambar 2.1, persamaan karakteristik sistem dinyatakan dengan

$$1 + KG(s)H(s) = 0$$

Nilai s berada pada TKA jika s memenuhi persamaan di atas. Karena s dapat merupakan bilangan kompleks, maka dari persamaan tersebut, s adalah sebuah titik pada TKA jika memenuhi syarat magnitude.

$$|K| = \frac{1}{|G(s)H(s)|}$$

Dengan syarat sudut

$$\angle G(s)H(s) = r \cdot 180^\circ, \text{ dengan } r = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$$

B. Menggambar TKA dengan manual

1. Letakkan pole dan zero open loop pada s -plane (bidang s).
2. Pole open loop akan bergerak ke zero open loop dengan arah pergerakan sebagai berikut:

Jika disebelah kanan terdapat jumlah pole dan zero ganjil maka terdapat arah pergerakan.

3. Pole closed loop akan bergerak secara simetri.

4. Pole atau zero infinity

Menentukan asimptot θ dan titik potongnya dengan sumbu nyata σ dapat dihitung dengan rumus :

$$\sigma = \frac{\sum (\text{letak pole berhingga}) - \sum (\text{letak zero berhingga})}{\sum (\text{pole berhingga}) - \sum (\text{zero berhingga})}$$

$$\theta = \frac{(2k+1)180}{\sum (\text{pole berhingga}) - \sum (\text{zero berhingga})}$$

5. Real axis breakaway dan break in point

$$N(s)D'(s) - N'(s)D(s) = 0$$

6. Angles of Departure and Arrival from complex pole or zero

$$\theta = \sum \text{zero angle} - \sum \text{pole angle} = (2k+1).180^\circ$$

III. Langkah Percobaan

1. Buat fungsi alih sistem dengan mengetikkan perintah-perintah berikut pada Matlab command window :

i. Ketik numerator dan denominator

Untuk transfer function

$$p = \frac{10 + 10s}{6 + 5s + s^2}$$

Ketik:

num = [10 10]

den = [1 5 6]

i. Buat system linear dalam bentuk transfer function:

q = tf(num,den)

respon:

$$q = \frac{10}{40 + 12s + s^2 + s^3}$$

ii. Untuk menggambar TKA, ketikkan perintah sebagai berikut :

→ `rlocus(q);`

2. Setelah muncul kurva TKA, lanjutkan sesuai perintah pada materi praktikum.

PERCOBAAN IV

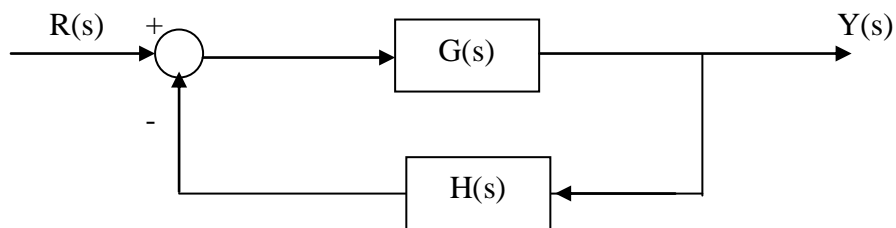
TANGGAPAN FREKUENSI DIAGRAM BODE

A. PERCOBAAN DIAGRAM BODE

I. Tujuan Percobaan

1. Memahami prinsip pembuatan diagram Bode suatu sistem.
2. Memahami dan menentukan kestabilan sistem dengan diagram Bode

II. Dasar Teori



Gambar 4.1. diagram blok sistem kendali dengan umpan balik

Jika suatu sistem memiliki fungsi alih $G(s)$ dan fungsi umpan balik $H(s)$ seperti gambar di atas, maka tanggapan frekuensi dapat diperoleh dengan mensubstitusi $s = j\omega$. Sehingga diperoleh responnya adalah $G(j\omega)H(j\omega)$. Karena $G(j\omega)H(j\omega)$ adalah suatu bilangan kompleks, maka untuk menggambarkan dibutuhkan dua buah grafik yang merupakan fungsi dari ω , yaitu:

1. Grafik magnitude terhadap frekuensi.
2. Grafik fasa terhadap frekuensi.

Diagram Bode merupakan salah satu metode analisis dalam perancangan sistem kendali yang memperhatikan tanggapan frekuensi sistem yang diplot secara logaritmik.

Dari kedua buah grafik yang diplot tersebut, yang perlu diperhatikan adalah nilai dari Gain Margin (GM) dan Phase Margin (PM). Nilai GM besarnya adalah $\frac{1}{G}$, dengan G adalah gain saat kurva grafik fasa memotong nilai -180° . Nilai GM umumnya dinyatakan dalam dB, yang dihitung dengan $20\log_{10}(GM)$. Sementara

PM adalah nilai fasa dalam derajat saat kurva grafik magnitude dengan frekuensi memotong nilai 0 dB.

Dari metode analisis Tempat Kedudukan Akar (TKA) diketahui bahwa suatu sistem lingkaran tertutup dinyatakan stabil apabila letak akarnya memotong sumbu $j\omega$, atau $1 + KG(j\omega) = 0$. Dalam nilai magnitude, ini dinyatakan sebagai nilai mutlak $|KG(j\omega)| = 1$, dan nilai fasanya adalah $\angle KG(j\omega) = -180$. Keuntungan dari metode ini dibandingkan dengan metode lainnya adalah pole dan zero nyata dapat terlihat dengan mudah.

Tanggapan frekuensi dari suatu sistem – yang dapat disusun baik dengan pendekatan perhitungan manual, maupun dengan software Matlab, dipengaruhi oleh beberapa komponen dalam sistem fungsi alih yang berpengaruh s.b.b.:

1. Bati (gain) konstan
2. Pole dan zero yang terletak pada titik awal (origin)
3. Pole dan zero yang tidak terletak pada titik awal.
4. Pole dan zero kompleks
5. Waktu tunda ideal.

B. PERALATAN

1. PC dengan sistem operasi Windows XP.
2. Perangkat lunak MATLAB R2009a
3. Program penunjang praktikum yang dibuat oleh asisten.

C. LANGKAH PERCOBAAN

1. Buat fungsi alih sistem
 - Ketik pada Command Window dan masukkan transfer function yang diberikan untuk percobaan ini, seperti contoh:

$$G(s) = \frac{num(s)}{den(s)} = \frac{25}{s^2 + 4s + 25}$$

dengan perintah :

num=[0 0 25];

den=[1 4 25];

2. Untuk menggambar Bode

- Ketik pada Command Window :

bode(num,den)

3. Gambar diagram Bode yang terlihat di Matlab pada lembar data percobaan.

D. Data Percobaan

a. Diagram Bode

Fungsi Alih	GM	ωGM	PM	ωPM	Diagram Bode