

**PERANCANGAN MODEL KOMPENSATOR DAN  
PLANT PADA SISTEM KENDALI KONVENSIONAL  
MENGUNAKAN KOMPUTER ANALOG**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan

Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

**AGUNG ADIYATMA**

**NIM 0710630073**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**MALANG**

**2012**

**PERANCANGAN MODEL KOMPENSATOR DAN  
PLANT PADA SISTEM KENDALI KONVENSIONAL  
MENGUNAKAN KOMPUTER ANALOG**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan

Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

**AGUNG ADIYATMA**

**NIM 0710630073**

Mengetahui dan menyetujui

Dosen pembimbing:

**Dr. Ir. Erni Yudaningtyas, MT**  
**NIP. 19650913 199002 2 001**

**M. Aziz Muslim, ST.,MT.,Ph.D**  
**NIP. 19741203 200012 1 001**

LEMBAR PENGESAHAN

**PERANCANGAN MODEL KOMPENSATOR DAN  
PLANT PADA SISTEM KENDALI KONVENSIONAL  
MENGUNAKAN KOMPUTER ANALOG**

SKRIPSI

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

**AGUNG ADIYATMA**

**NIM 0710630073**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada  
tanggal 20 Juli 2012

**DOSEN PENGUJI**

**Ir. Retnowati, MT**  
**NIP. 19511224 198203 2 001**

**Fitriana Suhartati, ST., MT.**  
**NIP. 19741017 199802 2 001**

**Ir. Purwanto, MT.**  
**NIP. 19540424 198601 1 001**

Mengetahui :  
Ketua Jurusan Teknik Elektro

**DR. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS.**  
**NIP. 19710615 199802 1 003**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## KATA PENGANTAR

Segala puji hanyalah milik Allah *Rabb* alam semesta. Aku bersaksi bahwa tiada *illah* yang *haq* untuk disembah kecuali Allah semata yang tiada sekutu baginya. Dialah sesembahan yang pertama dan yang belakangan yang menegakkan langit dan bumi. Aku bersaksi bahwa Muhammad itu adalah hamba dan utusan-Nya serta kekasih dan kepercayaan-Nya, yang Allah mengutus beliau kepada seluruh umat manusia sebagai pembawa berita gembira dan peringatan. Sholawat dan Salam semoga senantiasa terlimpahkan kepada beliau dan kepada keluarga beliau serta para sahabat beliau yang meniti di atas jalan beliau di dalam berdakwah ke jalan Allah

Hanya melalui pertolongan Allah *Subhanahu wa Ta'ala* semata sehingga kami dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Perancangan Model Kompensator dan *Plant* Pada Sistem Kendali Konvensional Menggunakan Komputer Analog”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang. terselesaikannya Skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak oleh karena itu dengan rasa hormat saya ingin menghaturkan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar besarnya kepada:

1. Keluarga tercinta, Ayahanda Andy Soelistyo dan Ibu Hayinatul Chasanah yang telah membesarkan anak-anaknya dengan penuh kasih sayang dan doanya yang tiada akhir (semoga Allah membalas jasa beliau). Serta kakakku Pribadi Arif Pratama dan adikku Aninda Rahma Astrina yang selalu memberikan dukungannya semoga Allah senantiasa menjaga kalian berdua.
2. Bapak Dr.Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya dan Bapak Muhammad Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Ibu Dr.Ir. Erni Yudaningsy, MT. dan Bapak M. Aziz Muslim, ST.,MT.,Ph.D. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah memberikan waktu, keikhlasan, dan kesabaran dalam membimbing.
4. Bapak Dwi Fadilla K., ST., MT. selaku dosen pembimbing akademik.
5. Segenap Dosen dan Staf Teknik Elektro Universitas Brawijaya.

6. Keluarga besar Laboratorium Sistem Kontrol TEUB, Shidqi, Seif, Rizki, Mahendra, Rio, Arif, Kharis, dan Risa, serta adik-adik asisten 2009 terima kasih telah memberikan banyak pengetahuan dalam belajar dan berkreasi.
7. Keluarga besar angkatan 2007 yang telah banyak memberikan masukan dan pengetahuan.
8. Teman-teman tim robot KRI, KRCI dan KRSI yang telah banyak membantu untuk peminjaman sarana dan prasarana.
9. Ustadz Abdullah Saleh Hadrami, Ustadz Ibnu Mundir, S.S.,M.Pd., Ustadz Jon Hariyadi, S.Pd.,M.H.I., yang telah banyak memberikan ilmu dan tauladan, semoga Allah *'Azza wa Jalla* senantiasa menjaga dan memberkahi umur mereka.
10. *Asaatidz* Ma'had Abdurrahman bin Auf Universitas Muhammadiyah Malang, Ustadz Sofyan Shofi, Lc., Ustadz Muhammad Taufiq, Lc., Ustadz Ali Wafa, Lc., Ustadz Hamzah Asrori, Lc., Ustadz Imam Rofi'i, Lc., yang sampai saat ini memberikan pengajaran Bahasa Arab dan Studi Islam kepada penulis, semoga Allah *Ta'ala* senantiasa menjaga mereka semua.
11. Keluarga besar PESMA (Pesantren Mahasiswa) Khusnul Khatimah yang banyak memberikan inspirasi dan motivasi.
12. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

kami menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Malang, 10 Juni 2012

Penulis

**DAFTAR ISI**

KATA PENGANTAR .....	i
DAFTAR GAMBAR.....	v
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Ruang Lingkup .....	2
1.4 Tujuan .....	2
1.5 Sistematika Pembahasan.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Sistem.....	4
2.1.1 Fungsi Alih Sistem.....	4
2.1.2 Tanggapan Sistem.....	5
2.1.3 Tanggapan Sistem Orde Satu.....	6
2.1.4 Tanggapan Sistem Orde Dua.....	7
2.2 Tempat Kedudukan Akar .....	9
2.3 Kompensator.....	11
2.3.1 Kompensasi Lead.....	11
2.3.2 Kompensasi Lag .....	13
2.4 Galat Keadaan Tunak.....	15
2.5 Komputer Analog .....	15
2.6 Penguat Operasional (Op Amp) .....	16
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>19</b>
3.1 Perancangan Sistem .....	19
3.2 Realisasi Pembuatan Sistem.....	19
3.3 Pengujian Sistem .....	19
3.4 Pengambilan Kesimpulan.....	20
<b>BAB IV PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT.....</b>	<b>21</b>
4.1 Perancangan Plant.....	21
4.1.1 Perancangan Rangkaian Orde Satu.....	21
4.1.2 Perancangan Rangkaian Orde Dua .....	24



4.1.3 Perancangan Mekanik Plant .....	29
4.2 Perancangan Kompensator .....	29
4.2.1 Perancangan Kompensator Phase Lead .....	31
4.2.2 Perancangan Kompensator Phase lag .....	33
4.2.3 Perancangan Mekanik Kompensator .....	34
<b>BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM.....</b>	<b>36</b>
5.1 Pengujian Sistem Orde 1 .....	36
5.1.1 Pengujian dengan Variasi Gain Sistem Orde 1 .....	37
5.1.2 Pengujian Konstanta Waktu Sistem Orde 1 .....	39
5.1.3 Pengujian Sistem Orde 1 Tidak Stabil .....	41
5.2 Pengujian Sistem Orde 2.....	43
5.2.1 Pengujian Gain Sistem Orde 2 .....	43
5.2.2 Pengujian Redaman Sistem Orde 2 .....	46
5.2.3 Pengujian Frekuensi Alamiyah Tidak Teredam Sistem Orde 2 .....	48
5.2.4 Pengujian Sistem Orde 2 Tidak Stabil.....	50
5.3 Pengujian Sistem Kendali Menggunakan Kompensator.....	54
5.3.1 Pengujian Sistem Kendali dengan Kompensator Lead.....	55
5.3.2 Pengujian Sistem Kendali dengan Kompensator Lag.....	57
<b>BAB VI PENUTUP.....</b>	<b>59</b>
6.1 Kesimpulan.....	59
6.2 Saran .....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>61</b>
<b>LAMPIRAN</b>	
Lampiran 1 Foto Alat Hasil Perancangan	
Lampiran 2 Datasheet LM741 Operational Amplifier	



**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2.1 Diagram Suatu Sistem ..... 4

Gambar 2.2 Kurva Tanggapan Sistem Orde Satu dengan Masukan Sinyal Tangga 7

Gambar 2.3 Kurva Tanggapan Sistem Orde Dua Underdamped dengan Masukan 8

Gambar 2.4 Kurva Tanggapan Sistem Orde Dua Overdamped dengan Masukan Sinyal Tangga ..... 9

Gambar 2.5 Diagram Blok Untuk Tempat Kedudukan Akar ..... 9

Gambar 2.6 Diagram Blok Kompensasi Seri ..... 11

Gambar 2.7 Sistem Balikan Satuan ..... 15

Gambar 2.8 Diagram Skematik Simbol Op-Amp ..... 16

Gambar 2.9 Penguat Inverting ..... 17

Gambar 2.10 Differensiator ..... 17

Gambar 2.11 Integrator ..... 18

Gambar 4.1 Diagram Blok sistem ..... 21

Gambar 4.2 (a) Rangkaian Sistem Orde 1 (b) Rangkaian Pengganti Sistem Orde 1. .... 22

Gambar 4.3 (a) Rangkaian Sistem Orde 2 (b) Rangkaian Pengganti Sistem Orde 2 ..... 25

Gambar 4.4 Perancangan Mekanik Plant (a) Mekanik Plant orde 1 (b) Mekanik Plant orde 2 ..... 29

Gambar 4.5 (a) Rangkaian Kompensator (b) Rangkaian Pengganti Kompensator ..... 30

Gambar 4.6 Perancangan Mekanik Kompensator ..... 35

Gambar 5.1 Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 (warna biru) Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 V (warna hitam) Untuk Berbagai Variasi R1 dengan Nilai C1 konstan 2  $\mu$ F, Nilai R2 Konstan 100 K $\Omega$  (a) R1 = 68 K $\Omega$  (b) R1 = 82 K $\Omega$  (c) R1 = 100 K $\Omega$  (d) R1 = 150 K $\Omega$  (e) R1 = 200 K $\Omega$  (f) R1 = 217 K $\Omega$  ..... 38

Gambar 5.2 Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 V Untuk Berbagai Variasi R1 dengan Nilai C1 konstan 2  $\mu$ F, dan Nilai R2 Konstan 100 K $\Omega$  Menggunakan Software MATLAB. .... 39



Gambar 5.3 Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 (warna biru) Terhadap Masukan Tangga 4 Volt (warna hitam) Untuk Berbagai Variasi Nilai  $C_1$  dengan Nilai  $R_1$  Konstan  $100\text{ K}\Omega$  dan Nilai  $R_2$  Konstan  $100\text{ K}\Omega$  (a)  $C_1 = 2\ \mu\text{F}$  (b)  $C_1 = 3\ \mu\text{F}$  (c)  $C_1 = 4\ \mu\text{F}$  (d)  $C_1 = 5\ \mu\text{F}$  (e)  $C_1 = 10\ \mu\text{F}$  (f)  $C_1 = 20\ \mu\text{F}$ ..... 40

Gambar 5.4 Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 Terhadap Masukan Tangga 4 Volt Untuk Berbagai Variasi Nilai  $C_1$  dengan Nilai  $R_1$  Konstan  $100\text{ K}\Omega$  dan Nilai  $R_2$  Konstan  $100\text{ K}\Omega$  Menggunakan Software MATLAB..... 41

Gambar 5.5 Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 (warna biru) Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 Volt (warna hitam) Untuk Berbagai Variasi Nilai  $C_1$  dengan Nilai  $R_1$  Konstan  $100\text{ K}\Omega$  dan Nilai  $R_2$  Takhingga (a)  $C_1 = 2\ \mu\text{F}$  (b)  $C_1 = 3\ \mu\text{F}$  (c)  $C_1 = 4\ \mu\text{F}$  (d)  $C_1 = 5\ \mu\text{F}$  (e)  $C_1 = 10\ \mu\text{F}$  (f)  $C_1 = 20\ \mu\text{F}$ ..... 42

Gambar 5.6 Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 Volt, Untuk Berbagai Variasi Nilai  $C_1$  dengan Nilai  $R_1$  Konstan  $100\text{ K}\Omega$  dan Nilai  $R_2$  Takhingga Menggunakan Software MATLAB..... 43

Gambar 5.7 Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 (warna biru) Terhadap Masukan Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Nilai  $R_1$  dengan Nilai  $C$  Konstan  $3\ \mu\text{F}$ , Nilai  $R_3$  Konstan  $140\text{ K}\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$  (a)  $R_1 = 200\text{ K}\Omega$  (b)  $R_1 = 300\text{ K}\Omega$  (c)  $R_1 = 400\text{ K}\Omega$  (d)  $R_1 = 500\text{ K}\Omega$  (e)  $R_1 = 600\text{ K}\Omega$  (f)  $R_1 = 700\text{ K}\Omega$ ..... 45

Gambar 5.8 Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 Terhadap Masukan Tangga 4 Volt Untuk Berbagai Nilai  $R_1$  dengan Nilai  $C$  Konstan  $3\ \mu\text{F}$ , Nilai  $R_3$  Konstan  $140\text{ K}\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$  Menggunakan Software MATLAB..... 46

Gambar 5.9 Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 (warna biru) Terhadap Masukan Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Nilai  $R_3$  dengan Nilai  $C$  Konstan  $3\ \mu\text{F}$ , Nilai  $R_1$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$  (a)  $R_3 = 50\text{ K}\Omega$  (b)  $R_3 = 70\text{ K}\Omega$  (c)  $R_3 = 80\text{ K}\Omega$  (d)  $R_3 = 140\text{ K}\Omega$  (e)  $R_3 = 200\text{ K}\Omega$  (f)  $R_3 = \sim$  (Takhingga). ..... 47

Gambar 5.10 Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 Terhadap Masukan Tangga 4 volt Untuk Berbagai Nilai  $R_3$  dengan Nilai  $C$  Konstan  $3\ \mu\text{F}$ , Nilai  $R_1$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$  Menggunakan Software MATLAB..... 48

Gambar 5.11 Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 (warna biru) Terhadap Masukan Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Nilai  $C$  dengan Nilai  $R_1$

Konstan 400 K $\Omega$ , Nilai R3 Konstan 200 K $\Omega$ , dan Nilai R6 Konstan 400 K $\Omega$   
 (a) C = 0.5  $\mu$ F (b) C = 1  $\mu$ F (c) C = 2  $\mu$ F (d) C = 3  $\mu$ F (e) C = 4  $\mu$ F ..... 49

Gambar 5.12 Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 Terhadap Masukan Tangga 4 volt  
 Untuk Berbagai Nilai C dengan Nilai R1 Konstan 400 K $\Omega$ , Nilai R3 Konstan  
 200 K $\Omega$ , dan Nilai R6 Konstan 400 K $\Omega$  Menggunakan Software MATLAB.50

Gambar 5.13 Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 (warna biru) Terhadap Masukan  
 Tangga..... 51

Gambar 5.14 Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 Terhadap Masukan Tangga 4 volt  
 Untuk Berbagai Variasi Nilai C dengan Nilai R1 Konstan 400 K $\Omega$ , Nilai R3  
 Konstan 70 K $\Omega$ , dan Nilai R6 Bernilai Takhingga Menggunakan Software  
 MATLAB. .... 52

Gambar 5.15 Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 (warna biru) Terhadap Masukan  
 Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Nilai C dengan Nilai R1  
 Konstan 700 K $\Omega$ , dan R3 = R6 Bernilai Takhingga (a) C = 0,5  $\mu$ F (b) C = 1  
 $\mu$ F (c) C = 2  $\mu$ F (d) C = 3  $\mu$ F (e) C = 4  $\mu$ F. .... 53

Gambar 5.16 Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 Terhadap Masukan Tangga 4 volt  
 Untuk Berbagai Nilai C dengan Nilai R1 Konstan 700 K $\Omega$ , dan R3 = R6  
 Bernilai Takhingga Menggunakan Software MATLAB..... 54

Gambar 5.17 Grafik Tanggapan Plant (warna biru) Terhadap Masukan Sinyal  
 Tangga 4 volt (warna hitam). .... 55

Gambar 5.18 Grafik Tanggapan Sistem Kendali (warna biru) Terhadap Masukan  
 Sinyal Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Variasi Parameter  
 Kompensator Lead (a) Kc=3,502, Zo= -0,002, dan Po= -7,002 (b) Kc=3,520,  
 Zo= -0,020, dan Po= -7,020 (c) Kc=3,702, Zo= -0,195, dan Po= -7,206 (d)  
 Kc= 4,643, Zo= -0,879, dan Po=-8,167..... 56

Gambar 5.19 Grafik Tanggapan Plant (warna biru) Terhadap Masukan Sinyal  
 Tangga 4 volt (warna hitam). .... 57

Gambar 5.20 Grafik Tanggapan Sistem Kendali (warna biru) Terhadap Masukan  
 Sinyal Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Variasi Parameter  
 Kompensator Lag (a) Kc=10, Zo= -0,1, dan Po= -0,002 (b) Kc=10, Zo= -0,3,  
 dan Po= -0,006 (c) Kc=10, Zo= -0,5, dan Po= -0,01 (d) Kc= 10, Zo= -1, dan  
 Po= -0,02 ..... 58



**DAFTAR TABEL**

Tabel 4.1 Variasi Gain sistem yang bergantung pada nilai R1. .... 23

Tabel 4.2 Variasi konstanta waktu sistem T dan waktu penetapan  $T_s=4T$  yang bergantung pada pemilihan nilai C1. .... 24

Tabel 4.3 Variasi Gain sistem yang bergantung pada nilai R1 ..... 27

Tabel 4.4 Variasi peredaman sistem  $\xi$  yang bergantung pada nilai R3 ..... 28

Tabel 4.5 Variasi frekuensi alamiah tidak teredam sistem  $\omega_n$  yang bergantung pada pemilihan nilai C. .... 28

Tabel 4.6 Variasi parameter kompensator  $K_c$ ,  $Z_o$ , dan  $P_o$  untuk variasi penguatan DC. .... 32

Tabel 4.7 Pemilihan nilai-nilai C1,C2, R1, R2 dan R4 untuk berbagai variasi parameter kompensator dengan membuat R3=100 K ohm. .... 33

Tabel 4.8 Berbagai variasi parameter kompensator phase lag untuk mengkompensasi plan dengan fungsi alih dengan membuat R3=100 K ohm. .... 34

Tabel 5.1 Performansi Sistem Orde Satu Untuk Berbagai Variasi R1 dengan nilai C1 Konstan 2  $\mu$ F, dan Nilai R2 Konstan 100 K $\Omega$ . .... 37

Tabel 5.2 Performansi Sistem Orde Satu Untuk Berbagai Variasi Nilai C1 dengan Nilai R1 Konstan 100 K $\Omega$  dan Nilai R2 Konstan 100 K $\Omega$ . .... 39

Tabel 5.3 Performansi Sistem Orde Satu Tidak Stabil Untuk Berbagai Variasi Nilai C1 dengan Nilai R1 Konstan 100 K $\Omega$  dan Nilai R2 Takhingga. .... 41

Tabel 5.4 Performansi Sistem Orde Dua Untuk Berbagai Variasi R1 dengan Nilai C konstan 3 $\mu$ f, Nilai R3 Konstan 140 K $\Omega$ , dan Nilai R6 Konstan 400 K $\Omega$ .... 44

Tabel 5.5 Performansi Sistem Orde Dua Untuk Berbagai Nilai R3 dengan Nilai C Konstan 3 $\mu$ F, Nilai R1 Konstan 400 K $\Omega$ , dan Nilai R6 Konstan 400 K $\Omega$ . .... 46

Tabel 5.6 Performansi Sistem Orde Dua Untuk Berbagai Variasi Nilai C dengan Nilai R1 Konstan 400 K $\Omega$ , Nilai R3 Konstan 200 K $\Omega$ , Nilai R6 Konstan 400 K $\Omega$ . .... 48

Tabel 5.7 Performansi Sistem Orde Dua Tidak Stabil Untuk Berbagai Berbagai Variasi Nilai C dengan Nilai R1 Konstan 400 K $\Omega$ , Nilai R3 Konstan 70 K $\Omega$ , dan Nilai R6 Bernilai Takhingga. .... 50



Tabel 5.8 Performansi Sistem Orde Dua Tidak Stabil Untuk Berbagai Berbagai Variasi Nilai C dengan Nilai R1 Konstan 700 K $\Omega$ , dan R3 = R6 Bernilai Takhingga..... 52

Tabel 5.9 Performansi Sistem Kendali Untuk Berbagai Variasi Parameter Kompensator Lead..... 55

Tabel 5.10 Performansi Sistem Kendali Untuk Berbagai Variasi Parameter Kompensator Lag..... 57



## ABSTRAK

**AGUNG ADIYATMA**, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2012, Perancangan Model Kompensator Dan *Plant* Pada Sistem Kendali Konvensional Menggunakan Komputer Analog, Dosen Pembimbing: Dr. Ir. Erni Yudaningtyas, MT dan M. Aziz Muslim, ST.,MT.,Ph.D.

Komputer analog merupakan salah satu alat yang berguna dalam perancangan dan analisis sistem linier maupun tak linier. Perancangan model fungsi alih bisa dilakukan dengan menggunakan komputer analog. Dengan membuat rangkaian komputer analog dari suatu sistem, berupa rangkaian elektronik, dapat digunakan untuk mewakili model suatu sistem fisis sehingga dapat dilakukan analisis atau desain dari sistem sebenarnya secara kontinyu.

Komponen utama perancangan adalah penguat operasional (op-amp) dan komponen elektronika menghasilkan fungsi alih yang merupakan representasi model sistem orde satu, orde dua dan kompensator orde 1. Model sistem orde satu dan orde dua diberikan masukan fungsi tangga dan diamati performansi yang dihasilkan. Selanjutnya teknik kompensasi sistem menggunakan kompensator orde 1 untuk mengkompensasi sistem agar berperilaku sesuai dengan yang diinginkan. Kompensator orde 1 difungsikan sebagai kompensator *lead* maupun kompensator *lag* sedangkan *plant* yang dikompensasi berupa sistem orde 1 dan orde 2.

*Plant* yang dikompensasi menggunakan kompensator *lead* yaitu modul sistem orde dua yang memiliki fungsi alih  $G_p = 7,143/s^2$ , Sedangkan *Plant* yang dikompensasi menggunakan kompensator fasa *lag* yaitu modul sistem orde satu yang memiliki fungsi alih  $G_p = 0,667/(2s+1)$ .

**Kata Kunci** : Komputer Analog, Sistem Orde 1, Sistem Orde 2, Kompensator *lead*, Kompensator *lag*.



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pemakaian sistem kendali konvensional (satu masukan satu keluaran dengan parameter konstan) banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, seperti pengendalian suhu ruang, pengendalian ketinggian air, sistem servo, dan masih banyak lagi. Dalam mendesain sistem kendali biasanya tidak mungkin memodifikasi dinamika plant, Penyetelan penguatan merupakan langkah awal dalam mengendalikan sistem tersebut agar memenuhi performansi yang diinginkan. Akan tetapi dalam beberapa kasus praktis pengaturan penguat saja mungkin belum cukup mengubah perilaku sistem dalam penyesuaian spesifikasi yang diinginkan. Untuk mengubah perilaku keseluruhan maka perlu ditambahkan perangkat tambahan yang disisipkan kedalam sistem untuk mengkompensasi ketidaksempurnaan tersebut yang disebut kompensator.

Perilaku sistem kendali yang menjadi perhatian meliputi kestabilan, karakteristik tanggapan transien, dan kesalahan keadaan mantap. Dengan adanya kompensator pada sistem kendali maka kestabilan, unjuk kerja transien, dan kesalahan keadaan mantap pada sistem dapat diperbaiki atau dikompensasi. Jenis dan parameter kompensator dipilih agar sistem kendali memiliki perilaku yang diinginkan.

Untuk mempelajari dan memahami performansi *plant* (biasanya didekati dengan menggunakan sistem orde satu atau dua) dan pengaruh kompensator pada performa sistem kendali, perlu dibuat suatu model fisis berupa komputer analog. Model fisis tersebut dapat digunakan untuk mensimulasikan performa sistem dengan berbagai variasi gain  $K$ , konstanta waktu  $T$ , rasio redaman sistem  $\xi$ , frekuensi alamiah tidak teredam sistem  $\omega_n$ , sistem yang tidak stabil dan sistem yang terkompensasi. Performa sistem terkompensasi merupakan akibat dari penambahan kompensator pada sistem sehingga dalam pembuatan model fisis, berupa komputer analog, perlu dibedakan menjadi dua buah yaitu plant dan kompensator.

Simulasi melalui komputer analog dapat digunakan sebagai media simulasi untuk mendesain sistem kendali konvensional tanpa perlu berhadapan dengan

sistem yang sesungguhnya. Dengan membuat rangkaian komputer analog dari suatu sistem, berupa rangkaian elektronik, dapat digunakan untuk mewakili model suatu sistem fisis sehingga dapat dilakukan analisis atau desain dari sistem sebenarnya secara kontinyu.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka pembahasan skripsi ini ditekankan pada :

1. Merancang dan membuat model plant berorde 1 dan 2 dengan bermacam kriteria performansi menggunakan komputer analog.
2. Merancang dan membuat model Kompensator *phase lead* dan *phase lag* menggunakan komputer analog.
3. Mengaplikasikan kompensator tersebut untuk mengkompensasi performa plant orde 1 dan 2 sesuai dengan performansi yang diinginkan..

## 1.3 Ruang Lingkup

Dalam perancangan untuk skripsi ini permasalahan dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut :

1. Model *plant* yang dibuat berorde 1 dan 2.
2. Kompensator yang dibuat kompensator orde 1.
3. Komputer analog dibentuk menggunakan rangkaian elektronik
4. Program bantu untuk analisis dan simulasi yaitu MATLAB.
5. Piranti akuisisi data mrnggunakan DATAQ DI-158U beserta software pendukungnya.

## 1.4 Tujuan

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah merancang model sistem kendali konvensional berupa kompensator (*phase lead* dan *lag*) dan plant (*orde 1* dan *2*) menggunakan komputer analog dengan berbagai macam kriteria performansi sebagai media pembelajaran dan simulasi untuk analisis atau desain dari sistem sebenarnya.



## 1.5 Sistematika Pembahasan

Skripsi ini terdiri dari enam bab dengan sistematika pembahasan sebagai berikut:

### **BAB I Pendahuluan**

Membahas latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan dan sistematika pembahasan.

### **BAB II Tinjauan Pustaka**

Membahas teori-teori yang mendukung dalam perancangan dan pembuatan alat.

### **BAB III Metodologi Penulisan**

Membahas metode penelitian dan perencanaan alat.

### **BAB IV Perancangan dan Pembuatan Alat**

Membahas perancangan dan perealisasi sistem yang meliputi spesifikasi, perencanaan blok diagram, prinsip kerja, dan realisasi sistem sehingga sistem dapat bekerja sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

### **BAB V Pengujian dan Analisis**

Membahas hasil pengujian sistem yang sudah dibuat, serta analisis hasil yang diperoleh.

### **Bab VI Kesimpulan dan Saran**

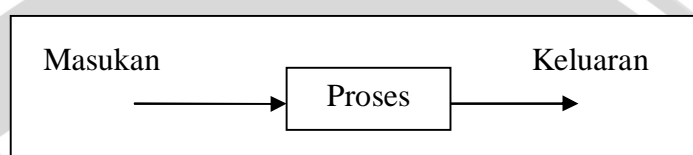
Membahas kesimpulan perancangan ini dan saran-saran yang diperlukan untuk pengembangan selanjutnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem

Sistem adalah kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama-sama dan melakukan suatu sasaran tertentu (Ogata,1996:30). Secara umum pada suatu sistem terdapat tiga komponen utama yaitu masukan, proses, dan keluaran. Masukan yang secara sederhana dimodelkan pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Diagram Suatu Sistem.

Sumber: Perancangan.

Sebagai dasar dalam menganalisis dan mendesain suatu sistem adalah dengan menggunakan pendekatan model matematik dari sistem fisik tersebut. Model matematik dari suatu sistem didefinisikan sebagai kumpulan persamaan yang digunakan untuk mewakili perilaku sistem fisik. Harulah dimengerti bahwa tidak ada model matematik yang pasti dari suatu sistem fisik. Ketepatan suatu model dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan kerumitan persamaan-persamaan, akan tetapi tetap tidak pernah mendapatkan kepastian (Phillips, C.L. & Royce D, 1997:10). Sangat tidak mungkin mengembangkan suatu model yang mewakili secara keseluruhan perilaku sistem fisik sehingga model yang digunakan dalam analisis maupun perancangan sistem hanya sebatas pendekatan dalam batas-batas yang bisa ditoleransi.

##### 2.1.1 Fungsi Alih Sistem

Fungsi alih didefinisikan sebagai perbandingan antara transformasi laplace keluaran (fungsi tanggapan) terhadap transformasi laplace masukan (fungsi penentu) dengan anggapan bahwa semua syarat awal nol (Ogata, 1996:45).

Secara umum dalam analisis sistem kendali konvensional menggunakan model matematik dalam bentuk fungsi alih dimana analisis dan desain dilakukan dalam daerah  $s$  atau frekuensi, Pendekatan fungsi alih ini secara umum

memberikan hasil yang memuaskan untuk sistem SISO dikarenakan hubungan antara masukan dan keluaran dari sistem secara langsung bisa diketahui

$$\text{Fungsi alih} = \frac{\mathcal{L}[\text{fungsi keluaran}]}{\mathcal{L}[\text{fungsi masukan}]} = \frac{a_0 s^m + a_1 s^{m-1} + \dots + a_m}{b_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_n} \quad (2-1)$$

Bentuk umum fungsi alih dapat dilihat pada persamaan (2-1). Dengan menggunakan konsep fungsi alih dapat dinyatakan sistem dinamik dengan persamaan aljabar dalam  $s$ . Orde sistem dapat diketahui dengan melihat pangkat tertinggi  $s$  pada penyebut suatu fungsi alih sehingga fungsi alih pada persamaan (2-1) adalah sistem dengan orde- $n$  (Ogata, 1996:45).

### 2.1.2 Tanggapan Sistem

Tanggapan sistem kendali terhadap sinyal masukan terdiri dari dua bagian yaitu tanggapan transien dan tanggapan tunak. Yang dimaksud dengan tanggapan transien adalah tanggapan sistem yang berlangsung dari keadaan awal sampai keadaan akhir sedangkan untuk tanggapan keadaan tunak ialah perilaku keluaran sistem jika  $t$ (waktu) mendekati tak terhingga (Ogata, 1996:45).

Untuk menganalisis dan mendesain suatu sistem kendali harus didapatkan beberapa perbandingan kinerja dengan menetapkan sinyal-sinyal uji tertentu dan membandingkan tanggapan sistem terhadap sinyal-sinyal masukan ini. Suatu sinyal uji yang digunakan pada sistem kendali ialah fungsi tangga, fungsi laju, fungsi sinusoidal dan sebagainya. Sinyal uji yang paling sering digunakan adalah fungsi tangga, karena masukan ini menyediakan informasi tentang karakteristik tanggapan transien dan tanggapan keadaan tunak dari suatu sistem.

Karakteristik tanggapan transien suatu sistem terhadap masukan tangga bergantung pada syarat awal. Untuk dapat membandingkan tanggapan transien dari berbagai macam sistem, hal yang biasa dilakukan adalah menggunakan syarat awal standar bahwa sistem mula-mula dalam keadaan diam sehingga keluaran dan semua turunan terhadap waktunya pada awal tanggapan akan sama dengan nol. Selanjutnya karakteristik tanggapan secara mudah dapat dibandingkan.

Dalam menentukan karakteristik tanggapan transien suatu sistem kendali terhadap masukan tangga satuan, dicari parameter-parameter (performansi sistem) sebagai berikut:

1. Waktu penetapan (*Settling Time*),  $t_s$  : merupakan waktu yang diperlukan kurva tanggapan untuk mencapai dan menetap dalam daerah di sekitar nilai akhir yang ukurannya ditentukan dengan prosentase mutlak dari nilai akhir (biasanya 5 % atau 2 %).
2. Waktu tunda (*Delay Time*),  $t_d$  : merupakan waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai setengah nilai akhir pada saat lonjakan yang pertama kali.
3. Waktu naik (*Rise Time*),  $t_r$  : merupakan waktu yang diperlukan tanggapan untuk naik dari 10 sampai 90 %, 5 sampai 95 % atau 0 sampai 100 % dari nilai akhir. Untuk sistem orde dua redaman kurang (*Underdamped*) digunakan waktu naik 0-100 %, dan untuk sistem redaman lebih (*Overdamped*) digunakan waktu naik 10-90 %.
4. Waktu puncak (*Peak Time*),  $t_p$  : merupakan waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai puncak lewatan (lonjakan maksimal) yang pertama kali.
5. Lewatan maksimum (*Maximum Overshoot*),  $M_p$  : merupakan nilai puncak maksimum kurva tanggapan yang diukur dari satu. Jika nilai keadaan mantap tanggapan tidak sama dengan satu, maka dapat digunakan persen lewatan maksimum.

### 2.1.3 Tanggapan Sistem Orde Satu

Bentuk umum fungsi alih sistem orde pertama dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (2.2)$$

Di mana  $T$  adalah konstanta waktu dan  $K$  penguatan sistem, di mana kedua parameter ini menggambarkan perilaku sistem orde satu.

Tanggapan tangga satuan sistem orde satu dapat diperoleh dengan memasukkan nilai  $R(s) = 1/s$  (transformasi laplace masukan tangga satuan), maka akan diperoleh persamaan:

$$C(s) = \frac{K}{Ts + 1} \frac{1}{s} \quad (2-3)$$

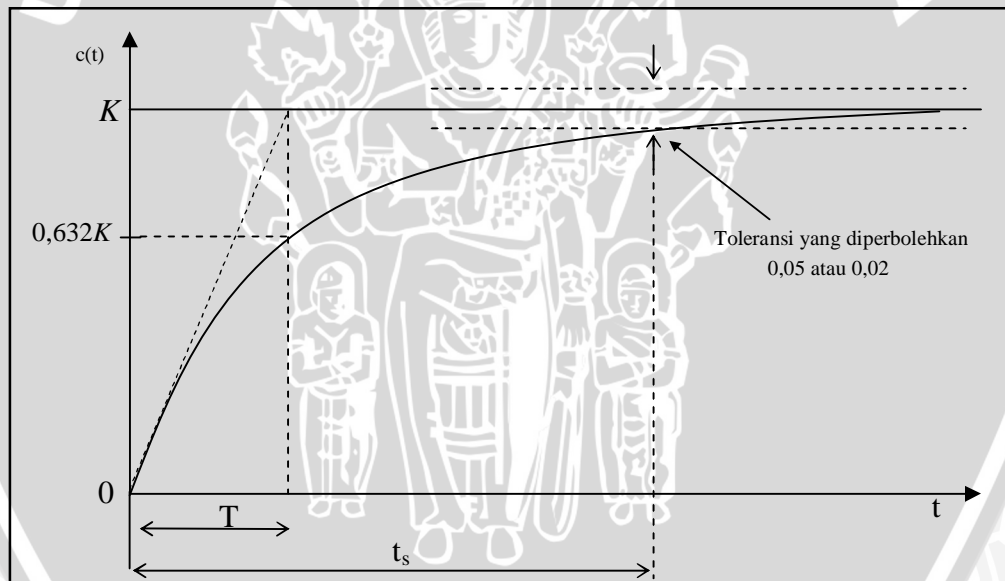
dengan menguraikan  $C(s)$  menjadi pecahan parsial diperoleh

$$C(s) = \frac{K}{s} - \frac{KT}{Ts+1} \quad (2-4)$$

Dengan melakukan transformasi Laplace balik pada ke dalam Persamaan (2-4), diperoleh

$$c(t) = K(1 - e^{-t/T}) \quad (t \geq 0) \quad (2-5)$$

Salah satu karakteristik penting kurva tanggapan eksponensial  $c(t)$  tersebut adalah pada  $t = T$ , nilai  $c(t) = 0,632K$  atau tanggapan  $c(t)$  telah mencapai 63,2 % perubahan totalnya. Parameter  $T$  disebut *konstanta waktu* yang memiliki satuan detik. Dalam pengertian praktis suku eksponensial pada persamaan (2-5) dianggap telah menuju nol dan respon sistem telah menetap pada nilai tertentu setelah menempuh waktu penetapan  $t_s$  (*Settling Time*) sebesar empat kali konstanta waktu (menggunakan toleransi 2 %).



**Gambar 2.2** Kurva Tanggapan Sistem Orde Satu dengan Masukan Sinyal Tangga.

Sumber: Modul Praktikum Sistem Kontrol Dasar TEUB, 2011.

### 2.1.4 Tanggapan Sistem Orde Dua

Bentuk umum fungsi alih sistem orde dua ditunjukkan dalam Persamaan

(2-6).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-6)$$

dengan,

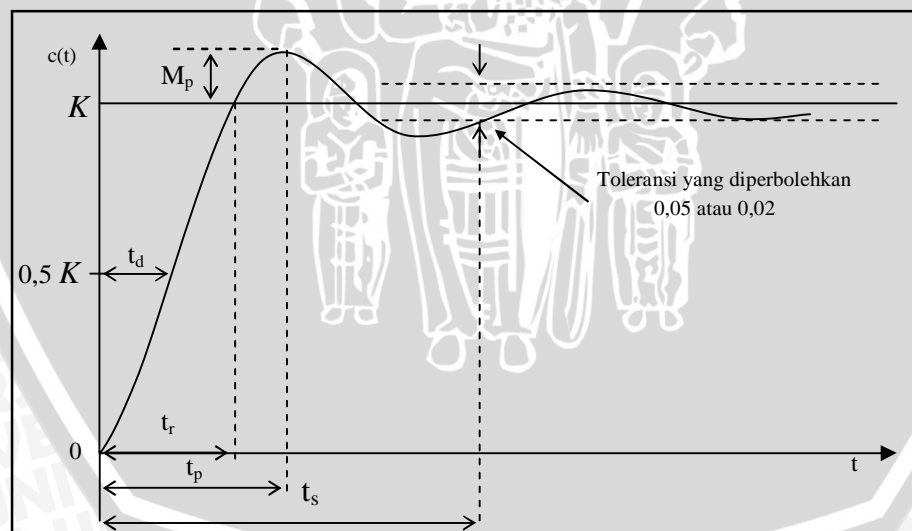
$\omega_n$  = frekuensi alamiah tidak teredam

$\xi$  = rasio peredaman sistem

$K$  = penguatan sistem

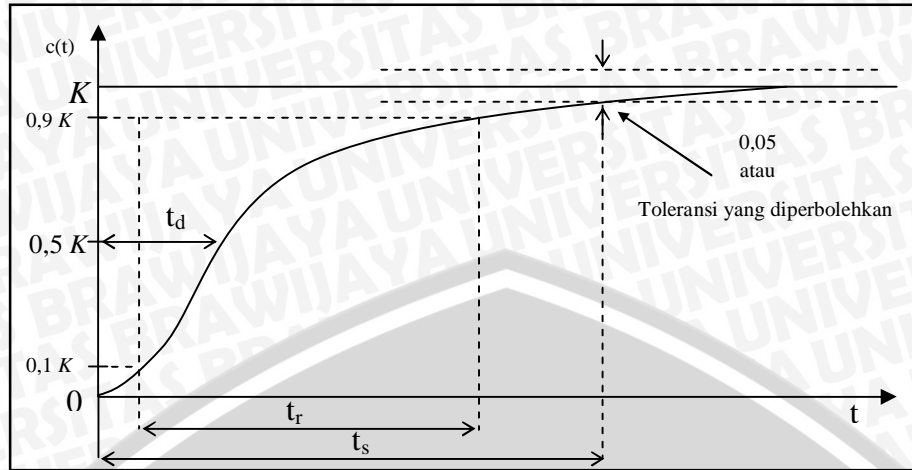
Perilaku dinamik tanggapan sistem orde dua terhadap sinyal uji tangga satuan dapat digambarkan dengan suku 2 paramater  $\omega_n$  dan  $\xi$ . Jika  $0 < \xi < 1$ , kutub *loop* tertutup merupakan sekawan kompleks dan berada pada sebelah kiri bidang *s* dan memiliki *overshoot*, dalam hal ini sistem dikatakan dalam keadaan teredam kurang. Jika  $\xi = 1$  maka sistem dikatakan teredam kritis. Jika  $\xi > 1$  sistem dikatakan teredam lebih. Tanggapan transien sistem teredam kritis dan teredam lebih tidak memiliki *overshoot*. Jika  $\xi = 0$ , tanggapan sistem akan berosilasi terus (tidak berhenti).

Respon sistem telah menetap pada nilai tertentu setelah menempuh waktu penetapan  $t_s$  (*Settling Time*) sebesar empat kali konstanta waktu (menggunakan toleransi 2 %). Di mana pada sistem orde dua besarnya konstanta waktu sebanding dengan  $T = 1 / \xi \omega_n$ .



**Gambar 2.3** Kurva Tanggapan Sistem Orde Dua *Underdamped* dengan Masukan Sinyal Tangga.

Sumber: Modul Praktikum Sistem Kontrol Dasar TEUB, 2011.

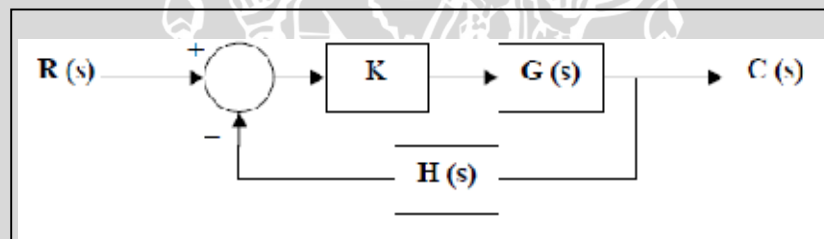


**Gambar 2.4** Kurva Tanggapan Sistem Orde Dua *Overdamped* dengan Masukan Sinyal Tangga.

Sumber: Modul Praktikum Sistem Kontrol Dasar TEUB, 2011.

## 2.2 Tempat Kedudukan Akar

Tempat Kedudukan Akar sebuah sistem merupakan kurva atau tempat kedudukan dari akar-akar persamaan karakteristik (*pole-pole* dari fungsi alih simpul tertutup) dengan satu buah parameter yang diubah-ubah.



**Gambar 2.5** Diagram Blok Untuk Tempat Kedudukan Akar.

Sumber: Phillips, C.L. & Royce D, 1997.

Persamaan karakteristik sistem pada gambar 2.5 diatas dinyatakan dengan

$$1 + KG(s)H(s) = 0 \quad (2-7)$$

Nilai  $s$  berada pada tempat kedudukan akar jika  $s$  memenuhi persamaan (2-7) di atas. Karena  $s$  dapat merupakan bilangan kompleks, maka dari persamaan tersebut,  $s$  adalah sebuah titik pada Tempat Kedudukan Akar jika memenuhi syarat *magnitude*

$$|K| = \frac{1}{|G(s)H(s)|} \quad (2-8)$$

Dengan syarat sudut

$$\angle G(s)H(s) = r(180^0) \text{ , dengan } r = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots \quad (2-8)$$

Dari kedua syarat tersebut, diturunkan aturan-aturan menggambarkan tempat kedudukan akar sebagai berikut :

1. Tempat kedudukan akar mempunyai sifat simetri terhadap sumbu nyata.
2. Menentukan *pole-pole* dan *zero-zero* dari fungsi alih simpal terbuka sistem  $KG(s)H(s)$ . Tempat kedudukan akar bermula dari *pole-pole* (untuk  $K=0$ ) dan berakhir *zero-zero* ( untuk  $K \rightarrow \infty$  ) termasuk *zero-zero* pada titik tak hingga.
3. Menentukan asimptot  $\theta$  dan titik potongnya dengan sumbu nyata  $\sigma$  dapat dihitung melalui persamaan :

$$\theta = \frac{r180^\circ}{\alpha} \quad (2-9)$$

dimana  $\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$  dan  $\alpha =$  banyaknya *zero* pada titik tak hingga dan

$$\sigma = \frac{\sum (\text{letak pole berhingga}) - \sum (\text{letak zero berhingga})}{\sum (\text{pole berhingga}) - \sum (\text{zero berhingga})} \quad (2-10)$$

4. Menentukan daerah cakupan tempat kedudukan akar pada sumbu nyata. Tempat kedudukan akar mencakup titik-titik pada sumbu nyata di sebelah kiri frekuensi kritis ( *pole-pole* dan *zero-zero* ) nyata yang berjumlah ganjil.
5. Menentukan titik penjar ( titik pisah atau titik temu), yang terdapat diantara akar-akar

$$N(s)D'(s) - N'(s)D(s) = 0 \quad (2.11)$$

dengan  $N(s)$  dan  $D(s)$  masing-masing merupakan numerator dan denominator  $G(s)H(s)$ .

Banyak tersedia program komputer untuk menggambarkan kedudukan akar yang memberikan hasil yang lebih baik dan lebih tepat. Namun, pengetahuan yang baik tentang aturan-aturan dan teknik-teknik penggambaran tempat kedudukan akar akan memberikan gambaran lebih jauh tentang pengaruh perubahan parameter dan pengaruh penambahan *pole* dan *zero* pada proses perancangan.

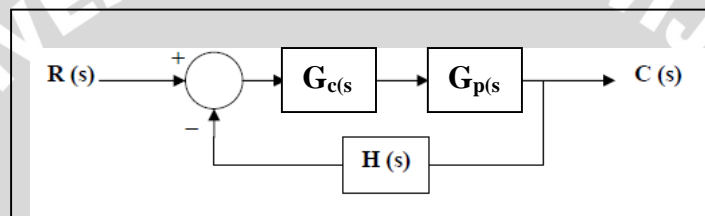
### 2.3 Kompensator

Kompensator seringkali juga disebut dengan istilah kontroler, pengendali ataupun penapis. Kompensator adalah suatu sistem dinamis yang sengaja



ditambahkan atau disisipkan didalam sistem untuk mengkompensasi *plant* sehingga mendapatkan karakteristik sistem keseluruhan yang diinginkan.

Jika suatu kompensator diperlukan untuk memenuhi spesifikasi performansi, maka perancang harus merealisasikan suatu perangkat fisik yang mempunyai fungsi alih tertentu sebagai kompensator. Kompensator biasanya merupakan perangkat listrik, pneumatik, hidraulik, atau kombinasinya dan terdiri dari rangkaian RC (listrik, mekanik, pneumatik, atau hidrolis) dan penguat. Pada Gambar 2.6 menunjukkan sistem kompensasi yang digunakan untuk sistem kendali umpan balik. Dikarenakan kompensator  $G_c(s)$  dipasang secara seri dengan *plant*  $G_p(s)$  maka kompensasi semacam ini disebut kompensasi seri.



**Gambar 2.6** Diagram Blok Kompensasi Seri.

Sumber: Teknik Kontrol Automatik, Katsuhiko Ogata, 1997.

Diantara macam macam kompensator yang digunakan secara luas ialah kompensator *lead* dan kompensator *lag*. Pada skripsi ini hanya dibatasi kedua jenis kompensator tersebut yakni kompensator *lead* biasa disebut dengan kompensator mendahului, sedangkan kompensator *lag* biasa disebut kompensator tertinggal.

### 2.3.1 Kompensasi Lead

Fungsi alih kompensator orde-1 adalah sebagai berikut:

$$G_c(s) = \frac{K_c(s - z_0)}{(s - p_0)} \quad (2.12)$$

Kompensator fasa mendahului memiliki harga  $|z_0| < |p_0|$  dimana nilai  $K_c$ ,  $z_0$ , dan  $p_0$  ditentukan agar memenuhi spesifikasi performansi tertentu.

Persamaan (2.13) dibawah ini menunjukkan persamaan karakteristik sistem terkompensasi yang blok diagramnya dapat dilihat pada Gambar 2.6

$$1 + KG_c(s) G_p(s) H(s) = 1 + \frac{K_c(s - z_0)}{(s - p_0)} G_p(s) H(s) \quad (2.13)$$

Penambahan kompensator *phase lead*  $G_c(s)$  pada sistem menambahkan sudut positif pada syarat sudut lokus akar yaitu

$$\sum(\text{sudut zero berhingga}) - \sum(\text{sudut pole berhingga}) = r(180^\circ)$$

dengan,  $r = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$  (2.14)

Sudut positif yang dihasilkan oleh kompensator tersebut akan menggeser lokus akar sistem keseluruhan ke sisi sebelah kiri bidang-s, yaitu menuju ke daerah yang lebih stabil dengan demikian kompensator ini akan memperbaiki tanggapan transien melalui perbaikan kestabilan sistem dan kecepatan tanggapan sistem.

Untuk merancang *phase lead* secara analitik pertama-tama fungsi alih kompensator dinyatakan sebagai

$$G_c(s) = \frac{a_1s + a_0}{b_1s + 1} \quad (2.14)$$

Tujuan dari perancangan adalah memilih  $a_0$ ,  $a_1$ , dan  $b_1$  sehingga titik  $s_1$  memenuhi persamaan (2.15)

$$G_c(s)G_p(s)H(s)|_{s=s_1} = -1 \quad (2.15)$$

Dimana titik  $s_1$  merupakan akar persamaan karakteristik dominan dari sistem yang terkompensasi. Biasanya  $s_1$  merupakan bilangan kompleks.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-14) ke dalam persamaan (2-15) diperoleh persamaan (2-17)

$$G_c(s)G_p(s)H(s)|_{s=s_1} = \left( \frac{a_1s + a_0}{b_1s + 1} \right) G_p(s_1)H(s_1) = -1 \quad (2.17)$$

Dari syarat *magnitude* dan sudut tempat kedudukan akar, diperoleh persamaan (2-18) dan (2-19)

$$\left| \left( \frac{a_1s + a_0}{b_1s + 1} \right) G_p(s_1)H(s_1) \right| = 1 \quad (2.18)$$

$$\arg \left[ \left( \frac{a_1s + a_0}{b_1s + 1} \right) G_p(s_1)H(s_1) \right] = 180^\circ \quad (2.19)$$

Terdapat 2 persamaan dan 3 variabel yang tidak diketahui  $a_0$ ,  $a_1$ , dan  $b_1$  maka dengan menentukan salah satu dari variabel dapat diperoleh dua variabel lainnya. Biasanya letak *pole*  $s_1$  diturunkan dari spesifikasi transien sistem kendali dan

penguatan dc kompensator  $a_0$  dihitung dari spesifikasi keadaan tunak. Dalam hal ini maka hanya  $a_1$  dan  $b_1$  yang tidak diketahui.

Untuk menyelesaikan persamaan (2-18) dan (2-19) pertama nyatakan,

$$s_1 = |s_1| e^{j\beta} \quad (2-20)$$

dan

$$G_p(s_1)H(s_1) = |G_p(s_1)H(s_1)| e^{j\psi} \quad (2-21)$$

sehingga dihasilkan

$$a_1 = \frac{\sin \beta + a_0 |G_p(s_1)H(s_1)| \sin(\beta - \psi)}{|s_1| |G_p(s_1)H(s_1)| \sin \psi} \quad (2-22)$$

$$b_1 = \frac{\sin(\beta + \psi) + a_0 |G_p(s_1)H(s_1)| \sin \beta}{-|s_1| \sin \psi} \quad (2-23)$$

dengan  $a_0$ ,  $G_p(s)H(s)$ , dan titik  $s_1$  diketahui maka akan didapat parameter-parameter kompensator (Phillips, C.L. & Royce D, 1997:213).

### 2.3.2 Kompensasi Lag

Sebagaimana pada bagian sebelumnya fungsi alih kompensator orde-1 adalah sebagai berikut:

$$G_c(s) = \frac{K_c(s - z_0)}{(s - p_0)} \quad (2.24)$$

Kompensator fasa lag memiliki harga  $|z_0| > |p_0|$  yang akan menambah sudut negatif pada syarat sudut. Dengan demikian kompensator *phase lag* akan menggeser lokus akar ke sebelah kanan bidang-s, yaitu ke arah yang tidak stabil. Maka sudut yang dihasilkan oleh kompensator *phase lag* harus kecil untuk meminimumkan kemungkinan ketidakstabilan.

Seperti yang telah diketahui sebelumnya, kompensator *phase lead* digunakan untuk menggeser lokus akar pada bidang-s yang stabil, namun kompensator *phase lag* digunakan untuk menggeser ke arah yang berlawanan. Dengan demikian kompensator *phase lag* tidak mengubah secara besar karakteristik tanggapan transien dari *pole-pole* dominan sistem, namun kompensator *phase lag* digunakan untuk memperbaiki tanggapan keadaan tunak sistem (Phillips, C.L. & Royce D, 1997:217).

Untuk merancang *phase lag* langkah awal pilih nilai penguatan yang menyebabkan *pole* sistem melalui  $s_1$  dan titik ini berada pada lokus akar yang memiliki tanggapan transien yang memuaskan. Sehingga persamaan karakteristik yang belum terkompensasi adalah

$$1 + KG_p(s)H(s)|_{s=s_1} = 0 \quad (2.25)$$

sehingga didapatkan penguatan sistem yang belum terkompensasi  $K_0$  yang menyebabkan *pole* sistem melalui  $s_1$

$$K_0 = \frac{-1}{G_p(s_1)H(s_1)} \quad (2.26)$$

anggaplah kompensator memiliki penguatan DC satu, yaitu

$$G_c(s)|_{s=0} = \frac{K_c z_0}{p_0} = 1 \quad (2.27)$$

sehingga nilai  $K_c$  kurang dari satu

$$K_c = \frac{p_0}{z_0} < 1 \quad (2.28)$$

dengan memilih  $z_0$  dan  $p_0$  yang kecil dibandingkan dengan  $|s_1|$  maka didapatkan persamaan (2.29)

$$G_c(s_1) = \frac{K_c(s_1 - z_0)}{(s_1 - p_0)} \cong K_c \quad (2.29)$$

sehingga penguatan yang diperlukan agar lokus akar dekat dengan  $s_1$  pada sistem terkompensasi didapatkan pada persamaan (2.30)

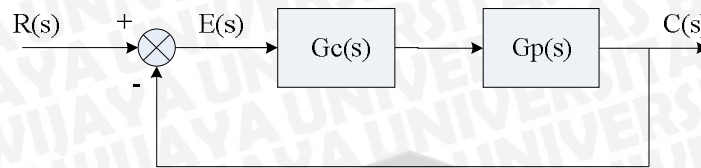
$$K = \frac{-1}{G_c(s_1)G_p(s_1)H(s_1)} \quad (2.30)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (2-26) dan (2-29) pada persamaan (2-30) maka didapatkan

$$K \cong \frac{K_0}{K_c} \quad (2.31)$$

karena nilai  $K_c$  kurang dari satu maka mengakibatkan  $K$  lebih besar dari  $K_0$ . Dengan demikian penambahan kompensator *phase lag* menaikkan penguatan DC sehingga akan memperbaiki tanggapan keadaan tunak namun tanggapan transien tidak terlalu terpengaruh (Phillips, C.L. & Royce D, 1997:217).

## 2.4 Galat Keadaan Tunak



**Gambar 2.7** Sistem Balikan Satuan.

Sumber: Phillips, C.L. & Royce D, 1997.

Galat suatu sistem  $e(t)$  adalah perbedaan antara masukan sistem dengan keluaran sistem, yaitu

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2-31)$$

galat sistem keadaan tunak adalah nilai keadaan tunak dari  $e(t)$ . Notasi dari galat keadaan tunak adalah  $e_{ss}$ , merupakan teorema akhir dari transformasi Laplace.

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \quad (2-32)$$

Untuk sistem dalam Gambar 2.7 nilai  $E(s)$  dapat dinyatakan dengan

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (2-33)$$

sehingga

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (2-34)$$

Untuk masukan sinyal tangga satuan  $R(s)=1/s$  maka persamaan (2-34) menjadi

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G_c(s)G_p(s)} = \frac{sR(s)}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G_c(s)G_p(s)} = \frac{1}{1 + K_p} \quad (2-35)$$

dimana  $K_p$  disebut kostanta galat posisi (Phillips, C.L. & Royce D, 1997:143).

## 2.5 Komputer Analog

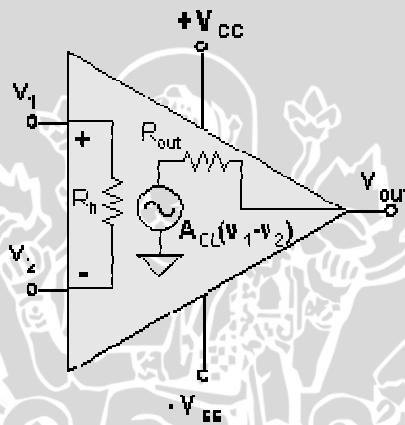
Komputer analog merupakan salah satu alat yang paling berguna untuk menganalisis dan mendesain sistem linier maupun nonlinier. Komputer analog memproses masukan berupa sinyal analog, dan menghasilkan keluaran analog. Dengan membuat rangkaian komputer analog dari suatu sistem berupa rangkaian

elektronik (contoh:op-amp) dapat dilakukan analisis atau desain dari sistem sebenarnya secara kontinyu.

Komponen utama komputer analog adalah penguat operasional (op-amp) dapat menghasilkan berbagai operasi matematik yang berfungsi sebagai pengubah tanda, penjumlah, pendiferensiasi, dan pengintegral.

## 2.6 Penguat Operasional (Op-Amp)

Penguat operasional (op-amp) merupakan salah satu komponen analog yang populer digunakan dalam berbagai aplikasi rangkaian elektronika. Aplikasi op-amp populer yang paling sering dibuat antara lain adalah rangkaian inverter, non-inverter, integrator dan differensiator.



**Gambar 2.8** Diagram Skematik Simbol Op-Amp.

Sumber: <http://robby.c.staff.gunadarma.ac.id>.

Ada dua aturan penting dalam melakukan analisa rangkaian op-amp berdasarkan karakteristik op-amp ideal yaitu:

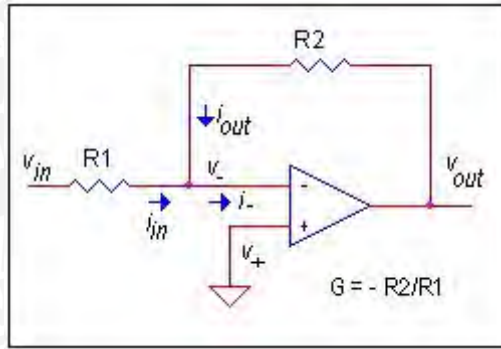
**Aturan 1** : Perbedaan tegangan antara *input*  $V_+$  dan  $V_-$  adalah nol lihat Gambar 2.8.

**Aturan 2** : Arus pada *input* op-amp adalah nol ( $I_+ = I_- = 0$ ).

### 2.6.1 Penguat *inverting*

Rangkaian untuk penguat *inverting* adalah seperti yang ditunjukkan Gambar 2.9. Penguat ini memiliki ciri khusus yaitu sinyal keluaran memiliki beda fasa sebesar  $180^\circ$  atau masukan dengan keluarannya berlawanan polaritas.

$$V_{out}(t) = -V_{in}(t) \frac{R_2}{R_1} \quad (2.15)$$

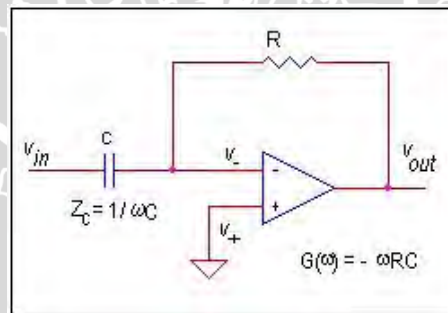


Gambar 2.9 Penguat *Inverting*.

Sumber: <http://robby.c.staff.gunadarma.ac.id>.

### 2.6.2 Differensiator

Apabila komponen R1 pada rangkaian penguat *inverting* Gambar 2.9 di ganti dengan kapasitor C, maka akan diperoleh rangkaian differnsiator seperti pada Gambar 2.10. Pada rangkaian op-amp differensiator nilai keluaran  $V_{out}$  akan nol apabila tidak ada perubahan nilai pada sinyal masukan atau  $V_{in}$  konstan.



Gambar 2.10 Differensiator.

Sumber: <http://robby.c.staff.gunadarma.ac.id>.

Hubungan sinyal  $V_{out}(t)$  dengan sinyal  $V_{in}(t)$  dari op-amp differensial dapat dinyatakan dengan :

$$C \frac{d}{dt} (V_{in}(t) - V_-) = \frac{V_- - V_{out}(t)}{R} \quad (2.16)$$

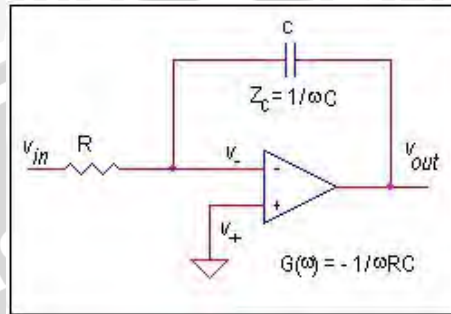
$$V_{out}(t) = -RC \frac{d}{dt} V_{in}(t) \quad (2.17)$$

atau dalam transformasi Laplace dinyatakan dengan :

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -RC.s \quad (2.18)$$

### 2.6.3 Integrator

Op-Amp yang berfungsi sebagai integrator dapat dilihat dalam Gambar 2.11. Rangkaian dasar sebuah integrator adalah rangkaian op-amp *inverting*, hanya saja rangkaian umpan baliknya (*feedback*) bukan resistor melainkan menggunakan kapasitor C.



Gambar 2.11 Integrator.

Sumber: <http://robby.c.staff.gunadarma.ac.id>.

Pada Op-amp integral, nilai keluaran  $V_{out}$  diubah dengan laju yang sebanding dengan sinyal masukan  $V_{in}(t)$ , sehingga

$$\frac{V_{in}(t) - V_-}{R} = C \frac{d}{dt}(V_- - V_{out}(t)) \quad (2-19)$$

$$\frac{V_{in}(t)}{R} = C \frac{d}{dt}(-V_{out}(t)) \quad (2-20)$$

$$V_{out}(t) = \frac{1}{RC} \int V_{in}(t) dt \quad (2-21)$$

dan dalam transformasi laplace dapat dinyatakan

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{sRC} \quad (2-22)$$



## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai langkah-langkah yang akan dilakukan dalam perancangan, implementasi, dan pengujian dari sistem kendali yang akan dirancang. Kesimpulan dan saran disertakan untuk menjawab rumusan masalah atas skripsi ini dan bagaimana skripsi dapat dikembangkan lebih lanjut.

#### 3.1 Perancangan Sistem

Perancangan sistem dilakukan sebagai langkah awal sebelum terbentuknya suatu model sistem kendali menggunakan komputer analog, hal ini dimaksudkan agar sistem tersebut dapat berjalan sesuai dengan deskripsi awal yang telah direncanakan. Perancangan sistem yang dilakukan meliputi:

- Perancangan blok diagram dan rangkaian sistem yang akan dirancang.
- Penentuan spesifikasi sistem yang akan dibuat, meliputi :
  - a. Penentuan performasi *plant*.
  - b. Penentuan performasi kompensator
  - c. Penentuan performasi sistem kendali secara keseluruhan.
- Penentuan dimensi *casing* atau kotak pembungkus pada tiap-tiap blok digram pada sistem.

#### 3.2 Realisasi Pembuatan Sistem

Untuk merealisasikan alat atau sistem yang telah dirancang sebelumnya maka perlu diperhatikan beberapa tahapan dalam pembuatan alat tersebut, diantaranya yaitu:

- Penentuan tipe IC op-amp yang digunakan dalam realisasi
- Penentuan rangkaian op-amp sebagai komputer analog
- Pemilihan nilai kapasitor dan resistor yang mudah didapatkan
- Penentuan batasan-batasan linieritas sistem yang dibuat.

#### 3.3 Pengujian Sistem

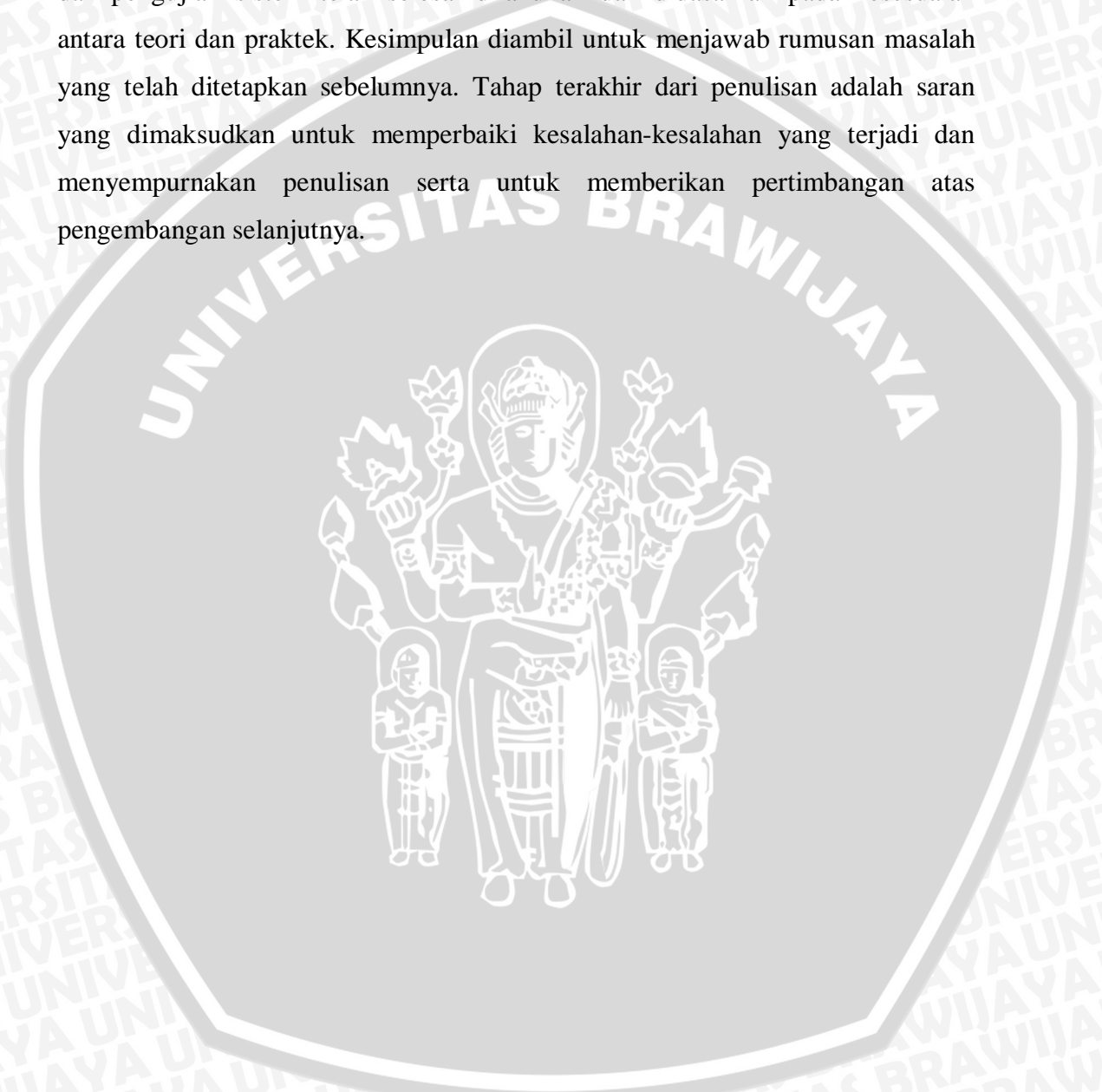
Pengujian diperlukan untuk mengetahui performansi dari sistem yang dirancang, berupa *plant*, kompensator dan sistem kendali secara keseluruhan, sesuai atau tidak sesuai dengan yang diharapkan. Pengujian dilakukan melalui 2

repository.ub.ac.id

tahap. Tahap pertama adalah pengujian tiap-tiap blok.dan tahap kedua adalah pengujian sistem kendali secara keseluruhan.

### 3.4 Pengambilan Kesimpulan

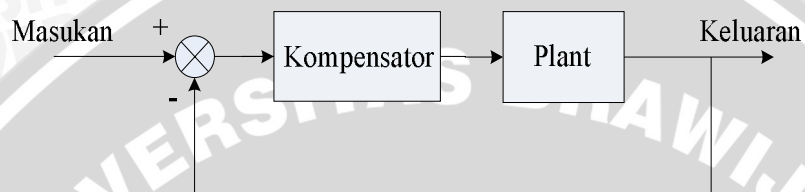
Pengambilan kesimpulan dilakukan setelah semua tahapan perancangan dan pengujian sistem telah selesai dilakukan dan didasarkan pada kesesuaian antara teori dan praktek. Kesimpulan diambil untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan sebelumnya. Tahap terakhir dari penulisan adalah saran yang dimaksudkan untuk memperbaiki kesalahan-kesalahan yang terjadi dan menyempurnakan penulisan serta untuk memberikan pertimbangan atas pengembangan selanjutnya.



## BAB IV

### PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT

Pada bab ini menjelaskan tentang proses perancangan dan pembuatan model kompensator dan *plant* pada sistem kendali menggunakan komputer analog. Langkah awal dalam perancangan sistem ialah dengan membuat blok diagram sistem keseluruhan dimana dapat dilihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.12** Diagram Blok sistem.

Sumber: Perancangan.

Pada skripsi ini yang akan dirancang dan dibuat ialah blok *plant* dan blok kompensator pada Gambar 4.1. Sedangkan untuk sinyal masukan dan blok *summing point* menggunakan modul yang tersedia di Laboratorium Sistem Pengaturan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.

#### 4.1 Perancangan *Plant*

*Plant* yang akan dirancang pada skripsi ini berupa *plant* orde satu dan *plant* orde dua menggunakan komputer analog yang berupa rangkaian elektronik. Hubungan antara masukan dan keluran atau fungsi alih rangkain tersebut harus sama dengan sistem yang diinginkan yaitu sistem orde satu dan orde dua dengan berbagai kriteria performansi.

##### 4.1.1 Perancangan Rangkaian Orde Satu

Bentuk umum fungsi alih sistem orde pertama dapat dinyatakan sebagai berikut:

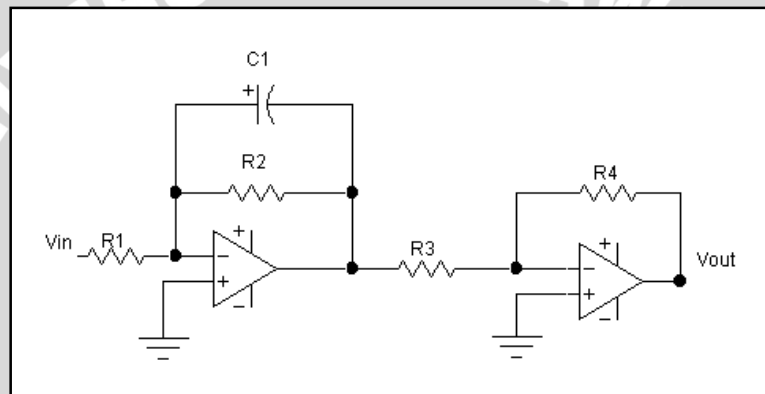
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (4-1)$$

$T$  adalah konstanta waktu dan  $K$  merupakan penguatan sistem. Kedua parameter ini menggambarkan perilaku sistem orde satu. Konstanta waktu  $T$  akan berhubungan langsung dengan waktu penetapan (*Settling Time*) yaitu  $T_s = 4T$

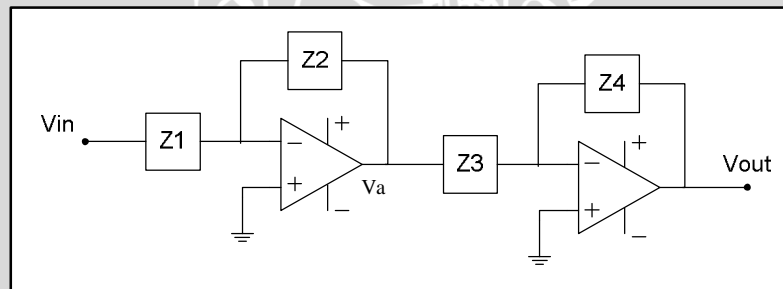
(menggunakan kriteria toleransi 2%). Sedangkan penguatan  $K$  menyatakan perbandingan antara tanggapan tunak sistem dengan sinyal masukan berupa sinyal tangga.

Untuk merealisasikan sistem orde satu tersebut maka perlu dipilih suatu konfigurasi dari komputer analog yang mengakibatkan kedua parameter,  $T$  dan  $K$ , dapat diubah-ubah tergantung pada performansi sistem yang dikehendaki dan perubahan komponen rangkaian yang mewakili besar dari parameter-parameter tersebut tidak saling berpengaruh.

Komputer analog yang dirancang untuk merealisasikan model sistem orde satu dapat dilihat pada Gambar 4.2.



(a)



(b)

**Gambar 4.13** (a) Rangkaian Sistem Orde 1 (b) Rangkaian Pengganti Sistem Orde1.

Sumber: Perancangan.

Untuk mendapatkan fungsi alihnya perhatikan rangkaian penggantinya pada Gambar 4.2(b), impedansi  $Z_2$  merupakan komponen  $R_1$  dan  $C_1$  yang disusun paralel dimana besarnya,

$$Z_2(s) = \frac{R_2(1/sC_1)}{R_2 + 1/sC_1} \quad (4-2)$$

kemudian hubungan antara  $V_{out}$  dan  $V_{in}$  dinyatakan dalam

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_a}{V_{in}} \cdot \frac{V_{out}}{V_a} = \left( -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} \right) \cdot \left( -\frac{Z_4(s)}{Z_3(s)} \right) \quad (4-3)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (4-2) ke persamaan (4-3) maka didapatkan fungsi alih rangkaian sistem orde satu pada persamaan (4-4).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2 / R_1}{sC_1R_2 + 1} \quad (4-4)$$

Dengan melihat pada persamaan (4-4) maka apabila  $R_2$  bernilai konstan maka pemilihan nilai penguatan sistem  $K$  ditentukan oleh pemilihan nilai  $R_1$  sedangkan pemilihan nilai konstanta waktu sistem  $T$  ditentukan oleh nilai  $C_1$ . Dengan pemilihan tersebut tampak bahwa perubahan untuk masing-masing parameter tersebut tidak akan berpengaruh satu sama lain.

Pada skripsi ini dipilih 6 buah variasi nilai untuk masing masing parameter, parameter  $T$  dan  $K$ , yang diwakili oleh pemilihan nilai-nilai  $R_1$  dan  $C_1$ . Adapun untuk membuat model sistem yang tidak stabil dibuat dengan dengan cara memutus  $R_2$ . Pemilihan nilai-nilai  $R_1$  dan  $C_1$  beserta perubahan parameter sistem dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2. Perubahan parameter sistem tersebut didapat dengan  $R_2$  dibuat konstan sebesar 100 K $\Omega$ .

**Tabel 4.1** Variasi *gain* sistem yang bergantung pada nilai  $R_1$ .

No	$R_1$ (K $\Omega$ )	$K$
1	68	0,68
2	82	0,82
3	100	1
4	150	1,5
5	200	2
6	217	2,17

**Tabel 4.2** Variasi konstanta waktu sistem  $T$  dan waktu penetapan  $T_s=4T$  yang bergantung pada pemilihan nilai  $C_1$ .

No	$C_1$ ( $\mu\text{F}$ )	$T$	$T_s$ (s)
1	2	0,2	0,8
2	3	0,3	1,2
3	4	0,4	1,6
4	5	0,5	2
5	10	1	4
6	20	2	8

Melalui rangkaian diatas dimungkinkan juga untuk membuat sistem orde satu yang tidak stabil, yaitu dengan cara melepas komponen  $R_2$  yang serupa dengan memberikan nilai hambatan tak hingga pada  $R_2$ . Penurunan fungsi alih sistem yang tidak stabil tersebut dimulai dengan mengalikan pembilang dan penyebut fungsi alih sistem pada persamaan (4-4) dengan  $R_1/R_2$  sehingga diperoleh,

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{R_1/R_2 + sC_1R_1} \quad (4-5)$$

Dengan mensubstitusikan nilai tak hingga pada  $R_2$  akan menyebabkan suku pertama pada penyebut persamaan (4-5) menjadi nol sehingga didapat fungsi alih sistem orde satu yang tidak stabil pada persamaan (4-6).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{sC_1R_1} \quad (4-6)$$

#### 4.1.2 Perancangan Rangkaian Orde Dua

Bentuk umum fungsi alih sistem orde dua ditunjukkan dalam persamaan (4-7).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4-7)$$

dengan,

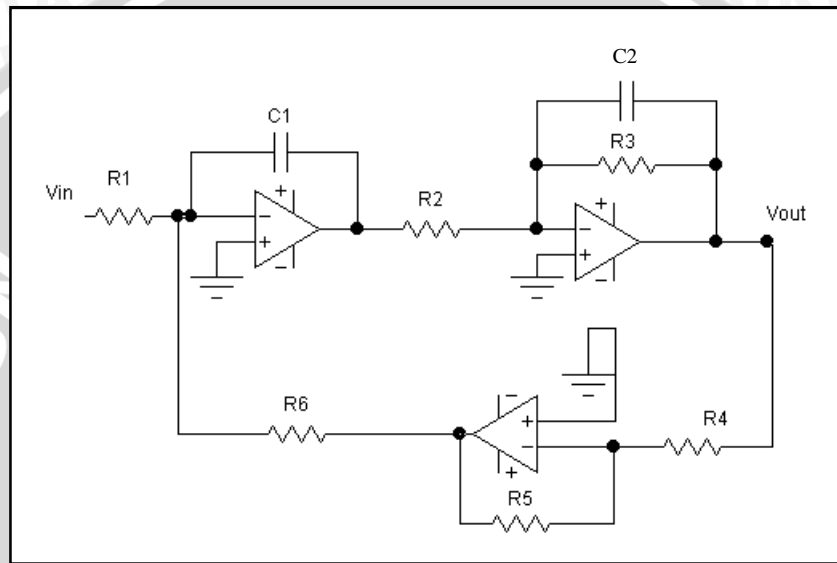
$\omega_n$  = frekuensi alamiah tidak teredam

$\xi$  = rasio peredaman sistem

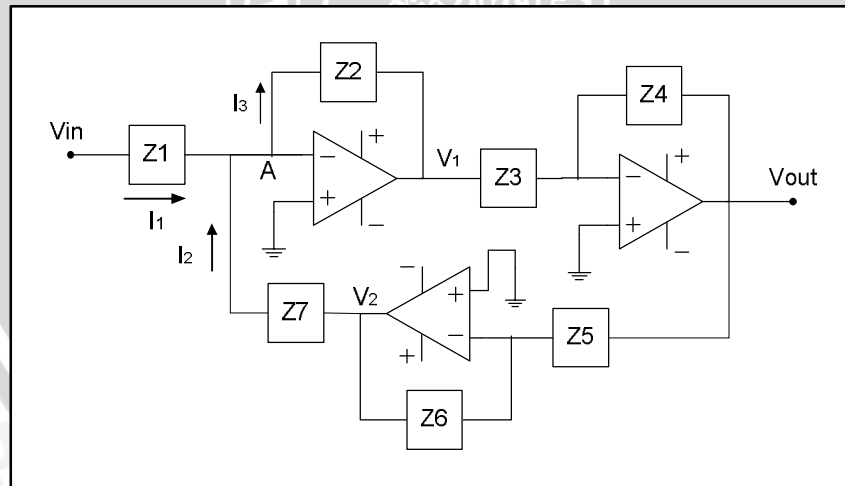
$K$  = penguatan sistem

Untuk merealisasikan sistem orde dua tersebut maka perlu dipilih suatu konfigurasi dari komputer analog yang mengakibatkan ketiga parameter,  $\omega_n$ ,  $\xi$ , dan  $K$ , dapat diubah-ubah tergantung pada performansi sistem yang dikehendaki dan perubahan dari parameter-parameter tersebut tidak saling berpengaruh satu sama lain.

Komputer analog yang dirancang untuk merealisasikan model sistem orde dua dapat dilihat pada Gambar 4.3.



(a)



(b)

**Gambar 4.14** (a) Rangkaian Sistem Orde 2 (b) Rangkaian Pengganti Sistem Orde 2

Sumber: Perancangan

Impedansi  $Z_2$  dan  $Z_4$  pada rangkaian pengganti sistem orde 2, Gambar 4.3

(b), dinyatakan dalam persamaan (4-8) dan (4-9).

$$Z_2(s) = \frac{1}{sC_1} \quad (4-8)$$

dan,

$$Z_4(s) = \frac{R_3(1/sC_2)}{R_3 + 1/sC_2} \quad (4-9)$$

Melalui Hukum Khirchoof pada titik A,  $I_1 + I_2 = I_3$ , didapatkan

$$\frac{V_{in}}{Z_1} + \frac{V_2}{Z_7} = \frac{-V_1}{Z_2} \quad (4-10)$$

Hubungan antara  $V_1$  dan  $V_{out}$  dapat dinyatakan

$$V_1 = -\frac{Z_3(s)}{Z_4(s)} V_{out} \quad (4-11)$$

Sedangkan hubungan antara  $V_2$  dan  $V_{out}$  dapat dinyatakan

$$V_2 = -\frac{Z_6(s)}{Z_5(s)} V_{out} \quad (4-12)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (4-11) dan (4-12) ke dalam persamaan (4-10), memasukan nilai-nilai impedansinya, membuat nilai  $R_4=R_5$  dan membuat nilai  $C_1=C_2=C$  maka didapatkan fungsi alih rangkaian sistem orde dua dalam persamaan (4-13).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{R_1 R_2 C^2} \frac{1}{S^2 + S \frac{1}{R_3 C} + \frac{1}{R_2 R_6 C^2}} \quad (4-13)$$

Dengan mengubah persamaan (4-13) dalam bentuk lain yang lebih menguntungkan maka fungsi alih rangkaian sistem orde dua dapat dinyatakan dalam persamaan (4-14).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{R_6}{R_1} \left( \frac{1}{C\sqrt{R_2 R_6}} \right)^2}{S^2 + 2 \left( \frac{\sqrt{R_2 R_6}}{2R_3} \right) \left( \frac{1}{C\sqrt{R_2 R_6}} \right) S + \left( \frac{1}{C\sqrt{R_2 R_6}} \right)^2} \quad (4-14)$$



Dengan membandingkan fungsi alih rangkain sistem orde 2 dalam persamaan (4-14) dengan persamaan (4-7) maka tampak parameter  $K$ ,  $\omega_n$ , dan  $\xi$ , dapat ditentukan melalui persamaan-persamaan berikut,

$$K = \frac{R_6}{R_1} \quad (4-15)$$

$$\xi = \frac{\sqrt{R_2 R_6}}{2R_3} \quad (4-16)$$

$$\omega_n = \frac{1}{C\sqrt{R_2 R_6}} \quad (4-17)$$

Agar perubahan komponen rangkaian yang mewakili besar dari parameter-parameter tersebut tidak mempengaruhi parameter lainnya maka nilai dari  $R_2$  dan  $R_6$  dibuat tetap. Sedangkan  $R_1$ ,  $R_3$  dan  $C_1$  dibuat variabel dimana pemilihan nilai pada ketiga komponen tersebut dipilih untuk memenuhi performansi tertentu. Pemilihan nilai  $R_1$  akan berdampak langsung pada penguatan sistem, pemilihan  $R_3$  akan berdampak langsung pada rasio peredaman sistem  $\xi$ , dan pemilihan nilai  $C$  akan berdampak pada frekuensi alamiah tidak teredam sistem  $\omega_n$ .

Pemilihan nilai-nilai  $R_1$ ,  $R_3$  dan  $C$  pada skripsi ini dan performansi yang akan ditimbulkan oleh pemilihan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.3, Tabel 4.4, dan Tabel 4.5. Performansi tersebut didapat dengan memilih  $R_2$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ , dan  $R_6$  bernilai konstan yang besarnya, 50 K $\Omega$ , 100 K $\Omega$ , 100 K $\Omega$ , dan 400 K $\Omega$ .

**Tabel 4.3** Variasi *gain* sistem yang bergantung pada nilai  $R_1$

No	R1 (K $\Omega$ )	$K$
1	200	2
2	300	1,3333
3	400	1
4	500	0,8
5	600	0,6667
6	700	0,5714

**Tabel 4.4** Variasi peredaman sistem  $\xi$  yang bergantung pada nilai  $R_3$

No	$R_3$ (K $\Omega$ )	$\xi$
1	50	1,4142
2	70	1.0102
3	80	0.8839
4	140	0,5051
5	200	0.3536
6	~ (Tak hingga)	0

**Tabel 4.5** Variasi frekuensi alamiah tidak teredam sistem  $\omega_n$  yang bergantung pada pemilihan nilai C.

No	C ( $\mu$ F)	$\omega_n$
1	0.5	14.1421
2	1	7.0711
3	2	3.5355
4	3	2.3570
5	4	1.7678

Dengan melihat persamaan (4-13) tampak bahwa melalui rangkaian orde dua diatas dimungkinkan juga untuk membuat sistem yang tidak stabil yaitu dengan cara melepas komponen  $R_6$  saja atau melepas komponen  $R_6$  dan  $R_3$ . Dengan melepas komponen  $R_6$  sama halnya dengan memberikan nilai tak hingga pada  $R_6$  yang terdapat dalam persamaan (4-13) sehingga akan didapatkan fungsi alih pada persamaan (4-18).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{R_1 R_2 C^2} \frac{1}{S^2 + S \frac{1}{R_3 C}} \quad (4-18)$$

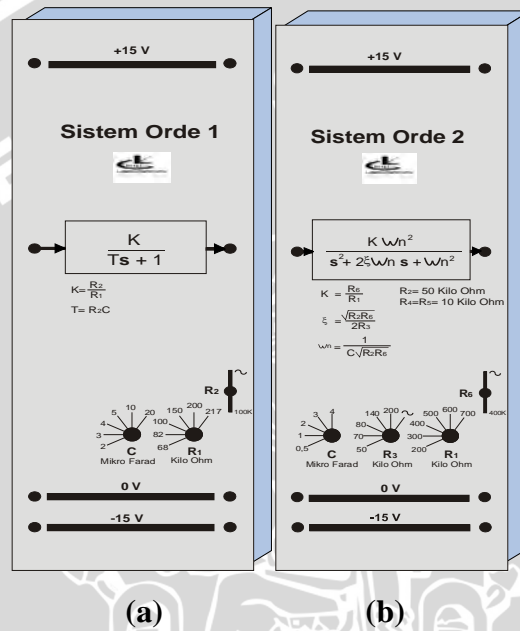
Dengan melepas komponen  $R_6$  dan  $R_3$  hal tersebut serupa dengan memberikan nilai tak hingga pada kedua komponen tersebut sehingga akan didapatkan fungsi alih pada persamaan (4-19).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{R_1 R_2 C^2} \frac{1}{S^2} \quad (4-19)$$

Dengan melihat pada kedua persamaan diatas, persamaan (4-18) dan (4-19), maka untuk mengamati variasi performansi sistem tersebut cukup hanya dengan merubah nilai C.

#### 4.1.3 Perancangan Mekanik *Plant*

Perancangan mekanik dilakukan untuk merancang *casing plant* yang berupa komputer analog. Secara umum rancangan mekanik *plant* ditunjukkan pada Gambar 4.4.



**Gambar 4.15** Perancangan Mekanik *Plant* (a) Mekanik *Plant* orde 1 (b) Mekanik *Plant* orde 2.

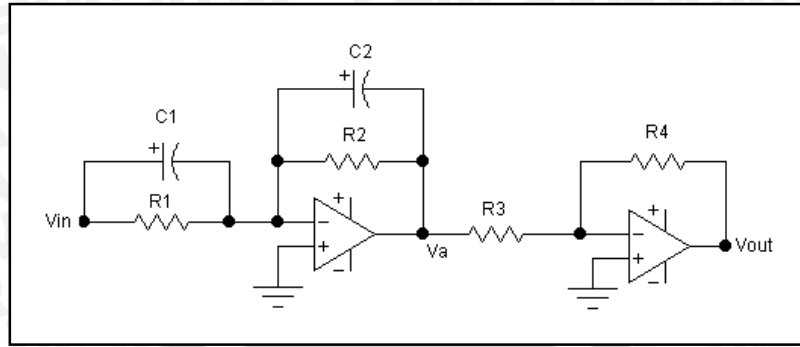
Sumber: Perancangan.

#### 4.2 Perancangan Kompensator

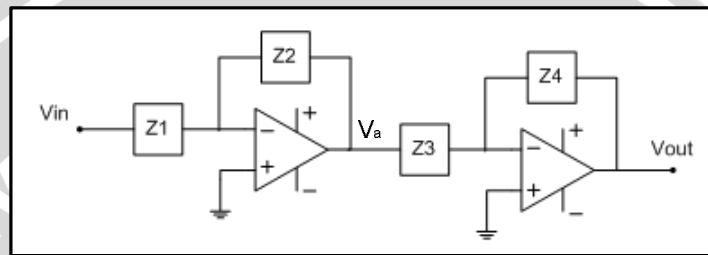
Kompensator yang akan dirancang mempunyai fungsi alih orde satu yang bentuk umumnya dapat dilihat dalam persamaan (4-18).

$$G_c(s) = \frac{K_c (s - z_0)}{(s - p_0)} \quad (4-18)$$

Untuk merealisasikan model kompensator dalam persamaan (4-18) maka dibuat konfigurasi komputer analog seperti pada Gambar 4.5.



(a)



(b)

**Gambar 4.16 (a)** Rangkaian Kompensator **(b)** Rangkaian Pengganti Kompensator.

Sumber: Perancangan.

Untuk mendapatkan fungsi alihnya perhatikan rangkaian penggantinya pada Gambar 4.5(b), impedansi  $Z_1$  dan  $Z_2$  terdiri dari komponen R dan C yang disusun paralel sehingga besarnya,

$$Z_1(s) = \frac{R_1(1/sC_1)}{R_1 + 1/sC_1} \quad (4-19)$$

dan

$$Z_2(s) = \frac{R_2(1/sC_2)}{R_2 + 1/sC_2} \quad (4-20)$$

Kemudian hubungan antara  $V_{out}$  dan  $V_{in}$  dinyatakan dalam

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_a}{V_{in}} \cdot \frac{V_{out}}{V_a} = \left( -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} \right) \left( -\frac{Z_4(s)}{Z_3(s)} \right) \quad (4-21)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (4-19) dan persamaan (4-20) ke persamaan (4-21) maka didapatkan fungsi alih rangkaian kompensator pada persamaan (4-22).

$$G_c(s) = \frac{R_4 R_2 (R_1 C_1 s + 1)}{R_3 R_1 (R_2 C_2 s + 1)} \quad (4-22)$$

Dengan mengubah persamaan (4-22) dalam bentuk lain yang lebih menguntungkan maka fungsi alih rangkaian kompensator dapat dinyatakan dalam persamaan (4-23).

$$G_c(s) = \frac{R_4 C_1 (s + 1/R_1 C_1)}{R_3 C_2 (s + 1/R_2 C_2)} = \frac{K_c (s - z_0)}{(s - p_0)} \quad (4-23)$$

Sehingga *gain* ( $K_c$ ), *zero* ( $Z_o$ ), dan *pole* ( $P_o$ ) fungsi alih kompensator sebanding dengan

$$K_c = \frac{R_4 C_1}{R_3 C_2} \quad (4-24)$$

$$z_0 = -1/R_1 C_1 \quad (4-25)$$

$$p_0 = -1/R_2 C_2 \quad (4-26)$$

Pemilihan nilai  $Z_o$  dan  $P_o$  akan menentukan jenis kompensator yang dipakai kompensator *lead* (fasa mendahului) atau kompensator *lag* (fasa tertinggal). Kompensator fasa mendahului memiliki harga  $|z_0| < |p_0|$ . Kompensator fasa *lag* memiliki harga  $|z_0| > |p_0|$ .

#### 4.2.1 Perancangan Kompensator *Phase Lead*

Pada skripsi ini plan yang dikompensasi menggunakan kompensator fasa mendahului yaitu modul sistem orde 2 dengan parameter plan orde 2 yang digunakan yaitu  $R_1 = 700 \text{ K}\Omega$ ,  $C = 2 \text{ mikro F}$ , dan  $R_3 = R_5 = \sim$  (tak hingga/*open*) sehingga memiliki fungsi alih pada persamaan (4-27).

$$G_p = \frac{7,143}{s^2} \quad (4-27)$$

Plan tersebut, pada persamaan (4-27), tidak bisa dikompensasi hanya menggunakan penguat  $K$  saja, karena sistem akan berosilasi untuk semua nilai  $K > 0$ .

Dalam merancang parameter kompensator  $K_c$ ,  $Z_o$ , dan  $P_o$  untuk mengkompensasi plan yang memiliki fungsi alih pada persamaan (4-27) langkah pertama ialah memilih *pole* dominan dari sistem yang telah terkompensasi  $s_1$  pada skripsi ini dipilih nilai  $s_1$  pada persamaan (4-28).

$$s_1 = -3,5 \pm j3,57 \quad (4-28)$$

pemilihan tersebut akan menghasilkan  $\xi = 0.7$ ,  $\omega_n = 5$ , dan  $t_s = 4/\xi\omega_n = 1.14 \text{ s}$ .

Persamaan dibawah ini digunakan untuk mencari  $a_1$  dan  $b_1$

$$a_1 = \frac{\sin \beta + a_0 |G_p(s_1)H(s_1)| \sin(\beta - \psi)}{|s_1| |G_p(s_1)H(s_1)| \sin \psi} \quad (4-29)$$

$$b_1 = \frac{\sin(\beta + \psi) + a_0 |G_p(s_1)H(s_1)| \sin \beta}{-|s_1| \sin \psi} \quad (4-30)$$

dimana nilai  $\beta$  dan  $\psi$  didapat dari persamaan (4-31) dan persamaan (4-32)

$$s_1 = |s_1| e^{j\beta} \quad (4-31)$$

$$G_p(s_1)H(s_1) = |G_p(s_1)H(s_1)| e^{j\psi} \quad (4-32)$$

Sedangkan penguatan DC  $a_0$  pada skripsi ini dibuat variasi karena pada kenyataannya kompensator dapat dirancang untuk nilai  $a_0$  yang berbeda-beda. Pemilihan koefisien  $a_0$  akan memenuhi beberapa spesifikasi desain seperti galat keadaan tunak, rejeksi gangguan keadaan tunak spesifikasi sensitivitas dan sebagainya.

Dengan menyelesaikan persamaan perancangan diatas dengan nilai  $s_1 = -3,5 \pm j3,57$  maka didapatkan nilai-nilai parameter kompensator  $K_c$ ,  $Z_0$ , dan  $P_0$  dengan variasi nilai  $a_0$  yang dapat dilihat pada Tabel 4.6. Sedangkan nilai-nilai resistor maupun kapasitor yang diperlukan untuk meralisasikan kompensator dalam komputer analog dapat dilihat pada tabel 4.7.

**Tabel 4.6** Variasi parameter kompensator  $K_c$ ,  $Z_0$ , dan  $P_0$  untuk variasi penguatan DC.

$a_0$	$a_1$	$b_1$	$K_c$	$Z_0$	$P_0$
0,001	0,500	0,143	3,502	0,002	7,002
0,010	0,501	0,142	3,520	0,020	7,020
0,100	0,514	0,139	3,702	0,195	7,206
0,500	0,569	0,122	4,643	0,879	8,167

**Tabel 4.7** Pemilihan nilai-nilai  $C_1, C_2, R_1, R_2$  dan  $R_4$  untuk berbagai variasi parameter kompensator dengan membuat  $R_3=100$  K ohm.

$K_c$	$Z_0$	$P_0$	$C_1=C_2$ ( $\mu$ F)	$R_1$ (K $\Omega$ )	$R_2$ (K $\Omega$ )	$R_4$ (K $\Omega$ )
3,502	0,002	7,002	50	10002,543	2,856	350,189
3,520	0,020	7,020	20	2506,807	7,123	351,959
3,702	0,195	7,206	20	256,852	6,939	370,169
4,643	0,879	8,167	20	56,856	6,122	464,327

#### 4.2.2 Perancangan Kompensator *Phase lag*

Plan yang dikompensasi menggunakan kompensator fasa tertinggal yaitu modul sistem orde 1 dengan parameter plan orde 1 yang digunakan yaitu  $R_1= 150$  K ohm,  $C_1=20$  mikro F, dan  $R_2=100$  K ohm sehingga memiliki fungsi alih pada persamaan (4-33).

$$G_p = \frac{0,667}{2s + 1} \tag{4-33}$$

Dalam merancang parameter kompensator  $K_c, Z_0,$  dan  $P_0$  untuk mengkompensasi plan tersebut langkah pertama ialah memilih  $K_0$  pada persamaan (4-34 ) yang menghasilkan nilai *pole*  $s_1$  simpul tertutup sistem yang tidak terkompensasi agar memiliki tanggapan transien yang diinginkan.

$$K_0 = \frac{-1}{G_p(s_1)H(s_1)} \tag{4-34}$$

Pada skripsi ini dipilih  $s_1= -3.8 - 0j$  yang akan menghasilkan  $\xi =1,$   $\omega_n=3.8,$  dan  $t_s= 4/ \xi \omega_n =1.05$  sekon. Dengan mensubtitusikan nilai  $s_1$  pada persamaan (4-34) maka didapatkan nilai  $K_0 = 9.895$

$$K_0 = 9,895 \tag{4-35}$$

Kemudian hitung galat keadaan tunak  $e_{ss}$  dan konstanta galat posisi  $K_p$  untuk sistem tertutupnya ketika diberi penguat  $K_0$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + K_0 G_p(s)} \tag{4-36}$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} K_0 G_p(s) \tag{4-37}$$



Dengan menyelesaikan persamaan (4-36) diatas dan masukan yang digunakan ialah sinyal tangga  $R(s) = 4/s$  maka akan didapatkan  $e_{ss} = 0.53$  dan  $K_p = 6,67$ . Kriteria desain pada skripsi ini ialah galat keadaan tunak mendekati nol sehingga konstanta galat posisi  $K_p$  harus dinaikan dengan memberikan kompensator pahase lag dalam sistem tertutupnya. Akibat penambahan kompensator *phase lag* maka konstanta galat posisi  $K_p$  sistem terkompensasi dapat dihitung melalui persamaan (4-38).

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_c(s - z_0)}{(s - p_0)} G_p(s) \quad (4-38)$$

Nilai penguatan kompensator  $K_c$  sama dengan nilai  $K_o$  yang telah dihitung untuk memenuhi kriteria transien sistem kendali. Dikarenakan kompensator fasa lag memiliki harga  $|z_0| > |p_0|$  maka konstanta galat posisi  $K_p$  sistem pada persamaan (4-38) akan semakin besar dimana besarnya berbanding lurus dengan perbandingan  $|z_0|/|p_0|$ . Pada skripsi ini perbandingan  $|z_0|/|p_0|$  dibuat bernilai 50 yang akan memberikan galat keadaan tunak  $e_{ss} = 0,012$ . Pemilihan nilai  $Z_0$  dan  $P_0$  pada skripsi ini dibuat variasi dimana dapat dilihat pada Tabel 4.8 . Pada tabel tersebut disertakan pula nilai-nilai resistor maupun kapasitor yang diperlukan untuk merealisasikan kompensator dalam komputer analog.

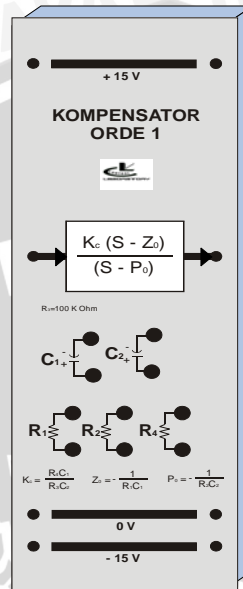
**Tabel 4.8** Berbagai variasi parameter kompensator *phase lag* untuk mengkompensasi plan dengan fungsi alih  $G_p = \frac{0,667}{2s + 1}$  dengan membuat  $R_3 = 100$  K ohm.

$K_c$	$Z_0$	$P_0$	$C_1=C_2$ ( $\mu$ F)	$R_1$ (K $\Omega$ )	$R_2$ (K $\Omega$ )	$R_4$ (K $\Omega$ )
10	0,500	0,010	100	20,000	1000	1000
10	0,100	0,002	100	100,000	5000	1000
10	0,300	0,006	100	33,333	1666,667	1000
10	1,000	0,020	100	10,000	500	100



### 4.2.3 Perancangan Mekanik Kompensator

Perancangan mekanik dilakukan untuk merancang *casing* kompensator yang berupa komputer analog.. Secara umum rancangan mekanik kompensator ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.17 Perancangan Mekanik Kompensator.

Sumber: Perancangan.

## BAB V

### PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM

Tujuan pengujian sistem ini adalah untuk menentukan apakah alat yang telah dibuat berfungsi dengan baik dan sesuai dengan perancangan. Pengujian pada sistem ini meliputi pengujian sistem orde 1 dengan berbagai kriteria performansi, pengujian sistem orde 2 dengan berbagai kriteria performansi, pengujian sistem kendali menggunakan kompensator *phase lag*, dan pengujian sistem kendali menggunakan kompensator *phase lead*. Adapun pengujiannya dilakukan secara pengukuran menggunakan piranti DATAQ DI-158U yang terhubung dengan komputer dimana berfungsi sebagai osiloskop. Untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem yang dibuat maka hasil pengujian dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan software MATLAB.

#### 5.1 Pengujian sistem orde 1

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui keberhasilan rangkaian komputer analog sistem orde 1 yang dibuat. Adapun pengujiannya berupa pengujian tanggapan sistem orde 1, dengan berbagai variasi fungsi alih, terhadap masukan sinyal tangga. Adapun peralatan yang diperlukan meliputi;

1. DATAQ DI-158U
2. Setpoint Potensiometer
3. Power Supply +/- 15 V
4. Multimeter
5. Modul Sistem Orde 1.

Prosedur pengujian dilakukan dengan menghubungkan *Analog1 channel1* pada piranti DATAQ DI-158U ke sinyal masukan yang berasal dari modul Setpoint Potensiometer dan *Analog 2 channel 1* dihubungkan pada keluaran rangkaian sistem orde 1. Sedangkan pada *Analog1 Channel 2* dan *Analog 2 channel 2* dihubungkan dengan *ground* rangkaian.

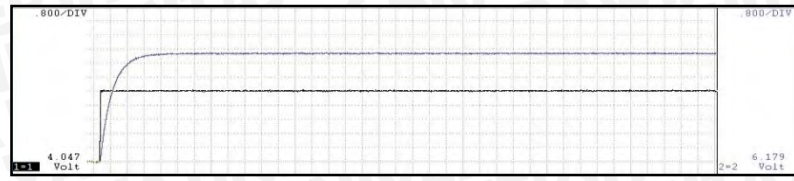
Pengujian sistem orde 1 ini meliputi pengujian dengan berbagai variasi gain, pengujian dengan berbagai variasi konstanta waktu, dan pengujian berbagai variasi sistem orde 1 yang tidak stabil.

### 5.1.1 Pengujian Dengan Variasi Gain Sistem Orde 1

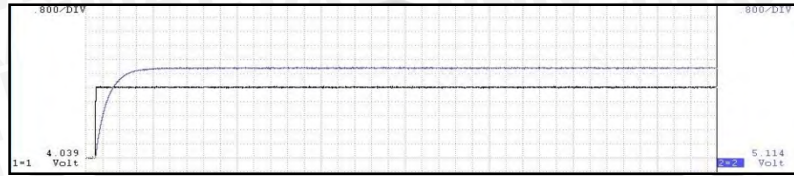
Pengujian variasi gain pada rangkaian sistem orde satu yaitu dengan membuat nilai  $R_2$  konstan 100 K $\Omega$ , nilai  $C_1$  konstan 2 $\mu$ F dan mengubah nilai  $R_1$  secara bergantian. Grafik tanggapan sistem terhadap sinyal tangga 4 volt dengan berbagai nilai  $R_1$  dapat dilihat pada Gambar 5.1 dengan skala 0,8 V/div dan 0,333 sekon/div. Adapun performansinya dapat dilihat pada Tabel 5.1.

**Tabel 5.1** Performansi Sistem Orde Satu Untuk Berbagai Variasi  $R_1$  dengan nilai  $C_1$  Konstan 2  $\mu$ F, dan Nilai  $R_2$  Konstan 100 K $\Omega$ .

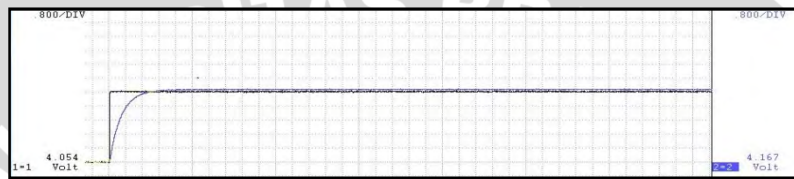
No	$R_1$ (K $\Omega$ )	Fungsi Alih	Pengukuran			Matlab		
			<i>Steady State</i> (V)	<i>Gain</i>	<i>Time Settling</i> (s)	<i>Steady State</i> (V)	<i>Gain</i>	<i>Time Settling</i> (s)
1	68	$\frac{1,47}{0,2s+1}$	6,16	1,54	0,90	5,88	1,47	0,78
2	82	$\frac{1,22}{0,2s+1}$	5,13	1,28	0,89	4,88	1,22	0,78
3	100	$\frac{1}{0,2s+1}$	4,16	1,04	0,88	4	1	0,78
4	150	$\frac{0,67}{0,2s+1}$	2,83	0,71	0,91	2,67	0,67	0,78
5	200	$\frac{0,5}{0,2s+1}$	2,12	0,53	0,88	2	0,5	0,78
6	217	$\frac{0,46}{0,2s+1}$	1,94	0,49	0,86	1,84	0,46	0,78



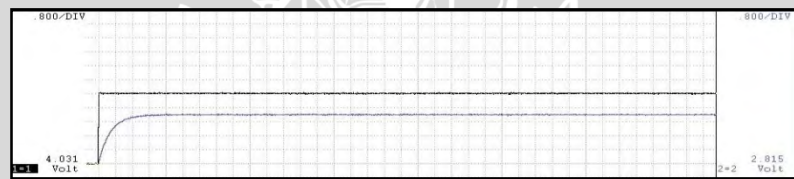
(a)



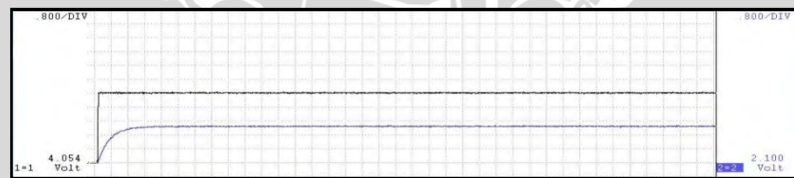
(b)



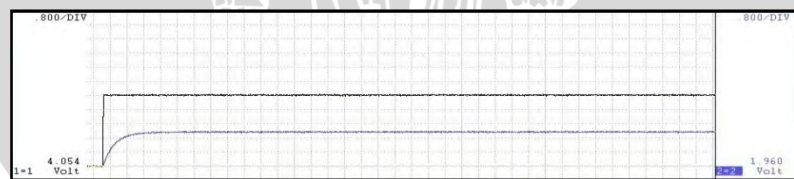
(c)



(d)

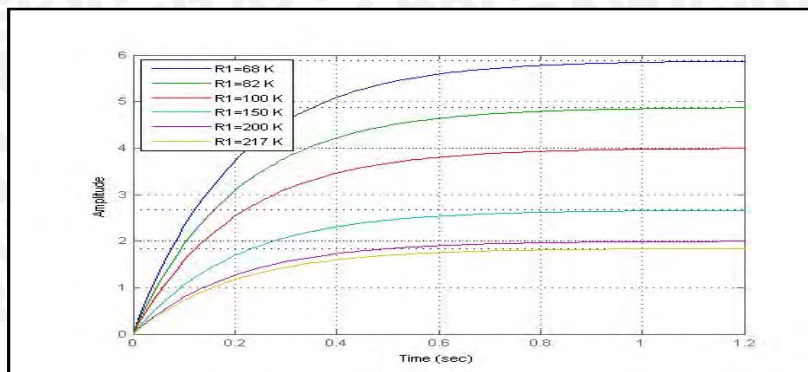


(e)



(f)

**Gambar 5.1** Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 (warna biru) Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 V (warna hitam) Untuk Berbagai Variasi  $R_1$  dengan Nilai  $C_1$  konstan  $2 \mu\text{F}$ , Nilai  $R_2$  Konstan  $100 \text{ K}\Omega$  (a)  $R_1 = 68 \text{ K}\Omega$  (b)  $R_1 = 82 \text{ K}\Omega$  (c)  $R_1 = 100 \text{ K}\Omega$  (d)  $R_1 = 150 \text{ K}\Omega$  (e)  $R_1 = 200 \text{ K}\Omega$  (f)  $R_1 = 217 \text{ K}\Omega$ .



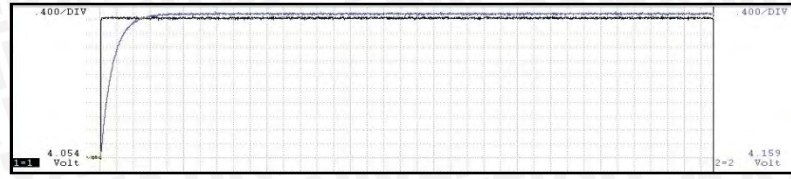
**Gambar 5.2** Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 V Untuk Berbagai Variasi  $R_1$  dengan Nilai  $C_1$  konstan  $2 \mu\text{F}$ , dan Nilai  $R_2$  Konstan  $100 \text{ K}\Omega$  Menggunakan Software MATLAB.

### 5.1.2 Pengujian Konstanta Waktu Sistem Orde 1

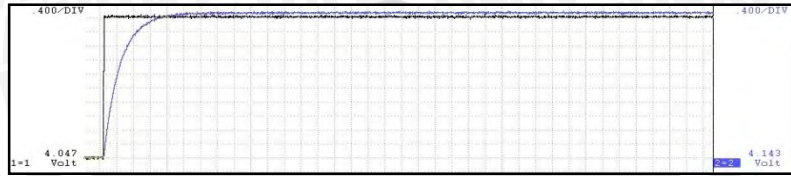
Pengujian variasi konstanta waktu pada rangkaian sistem orde satu yaitu dengan membuat nilai  $R_1$  konstan  $100 \text{ K}\Omega$ , nilai  $R_2$  konstan  $100 \text{ K}\Omega$  dan mengubah nilai  $C_1$  secara bergantian. Grafik tanggapan sistem terhadap sinyal tangga 4 volt dengan berbagai nilai  $C_1$  dapat dilihat pada Gambar 5.3 dengan skala  $0,8 \text{ V/div}$  dan  $0,333 \text{ sekon/div}$ . Adapun performansinya dapat dilihat pada Tabel 5.2.

**Tabel 5.2** Performansi Sistem Orde Satu Untuk Berbagai Variasi Nilai  $C_1$  dengan Nilai  $R_1$  Konstan  $100 \text{ K}\Omega$  dan Nilai  $R_2$  Konstan  $100 \text{ K}\Omega$ .

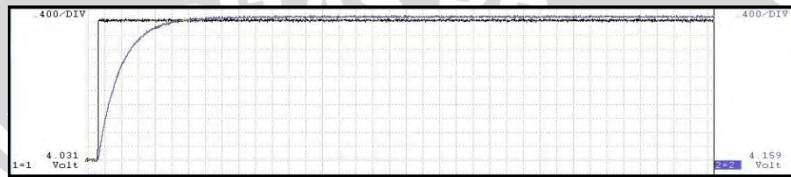
No	$C_1$ (mikro F)	Fungsi Alih	Pengukuran			Matlab		
			Steady State (V)	Gain	Time Settling (s)	Steady State (V)	Gain	Time Settling (s)
1	2	$\frac{1}{0,2s+1}$	4,16	1,04	0,88	4	1	0,78
2	3	$\frac{1}{0,3s+1}$	4,16	1,04	1,25	4	1	1,18
3	4	$\frac{1}{0,4s+1}$	4,16	1,04	1,72	4	1	1,57
4	5	$\frac{1}{0,5s+1}$	4,16	1,04	2,23	4	1	1,96
5	10	$\frac{1}{s+1}$	4,16	1,04	4,11	4	1	3,91
6	20	$\frac{1}{2s+1}$	4,16	1,04	7,85	4	1	7,82



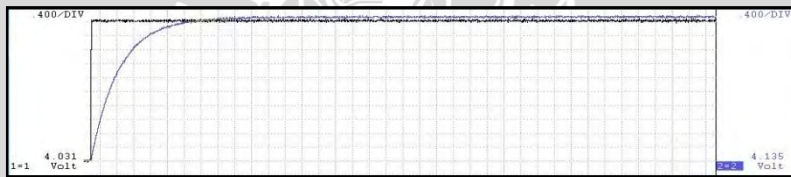
(a)



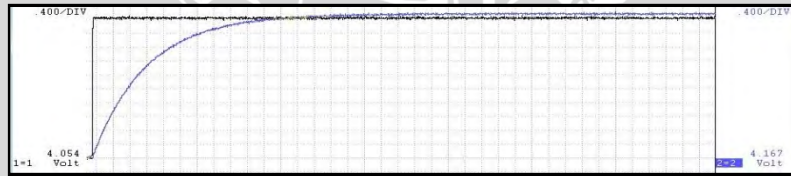
(b)



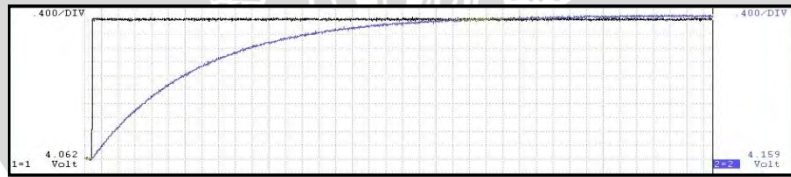
(c)



(d)

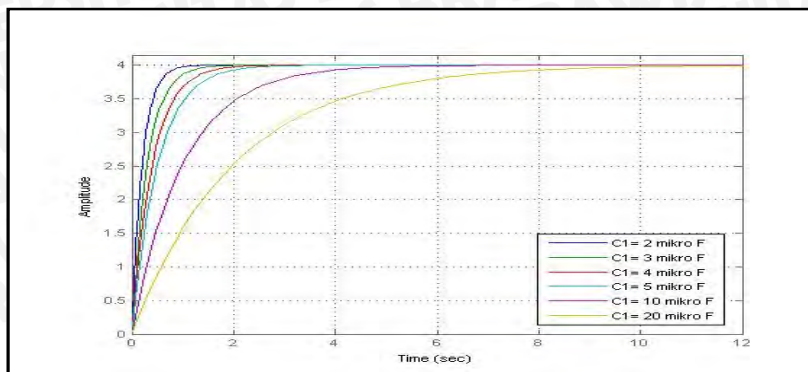


(e)



(f)

**Gambar 5.3** Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 (warna biru) Terhadap Masukan Tangga 4 Volt (warna hitam) Untuk Berbagai Variasi Nilai  $C_1$  dengan Nilai  $R_1$  Konstan  $100\text{ K}\Omega$  dan Nilai  $R_2$  Konstan  $100\text{ K}\Omega$  (a)  $C_1 = 2\ \mu\text{F}$  (b)  $C_1 = 3\ \mu\text{F}$  (c)  $C_1 = 4\ \mu\text{F}$  (d)  $C_1 = 5\ \mu\text{F}$  (e)  $C_1 = 10\ \mu\text{F}$  (f)  $C_1 = 20\ \mu\text{F}$ .



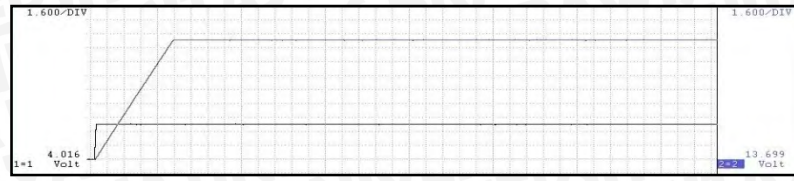
**Gambar 5.4** Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 Terhadap Masukan Tangga 4 Volt Untuk Berbagai Variasi Nilai  $C_1$  dengan Nilai  $R_1$  Konstan 100 K $\Omega$  dan Nilai  $R_2$  Konstan 100 K $\Omega$  Menggunakan Software MATLAB.

### 5.1.3 Pengujian Sistem Orde 1 Tidak Stabil

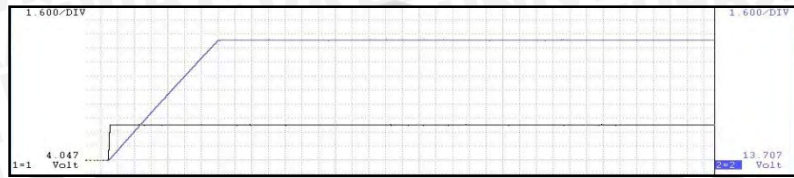
Pengujian variasi sistem orde satu tidak stabil yaitu dengan membuat nilai  $R_1$  konstan 100 K $\Omega$ , nilai  $R_2$  takhingga dan mengubah nilai  $C_1$  secara bergantian. Grafik tanggapan sistem terhadap sinyal tangga dengan berbagai nilai  $C_1$  dapat dilihat pada Gambar 5.5 dengan skala 1,6 V/div dan 0.333 sekon/div. Adapun performansinya dapat dilihat pada Tabel 5.3.

**Tabel 5.3** Performansi Sistem Orde Satu Tidak Stabil Untuk Berbagai Variasi Nilai  $C_1$  dengan Nilai  $R_1$  Konstan 100 K $\Omega$  dan Nilai  $R_2$  Takhingga.

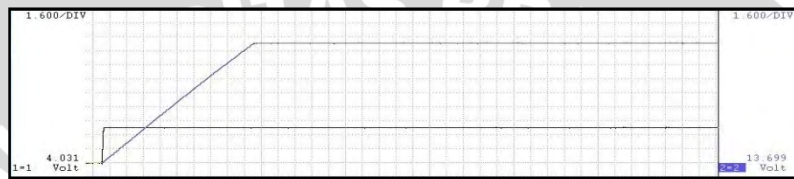
No	$C_1$ (mikro F)	Fungsi Alih	Pengukuran	Matlab
			<i>Steady State</i> (V)	<i>Steady State</i> (V)
1	2	$\frac{1}{0,2s}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
2	3	$\frac{1}{0,3s}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
3	4	$\frac{1}{0,4s}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
4	5	$\frac{1}{0,5s}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
5	10	$\frac{1}{s}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
6	20	$\frac{1}{2s}$	Menuju V Saturasi	Takhingga



(a)



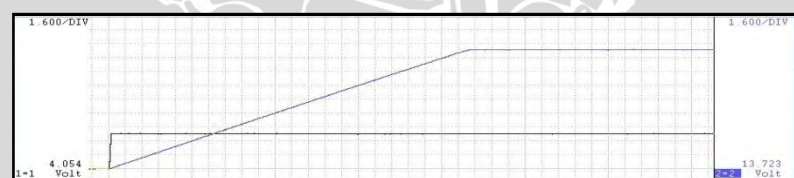
(b)



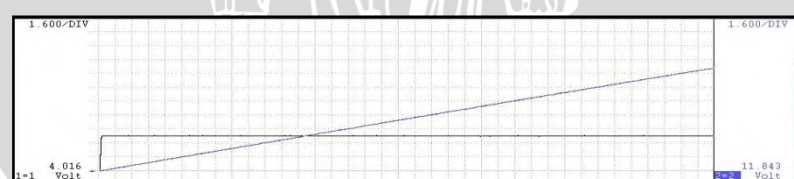
(c)



(d)



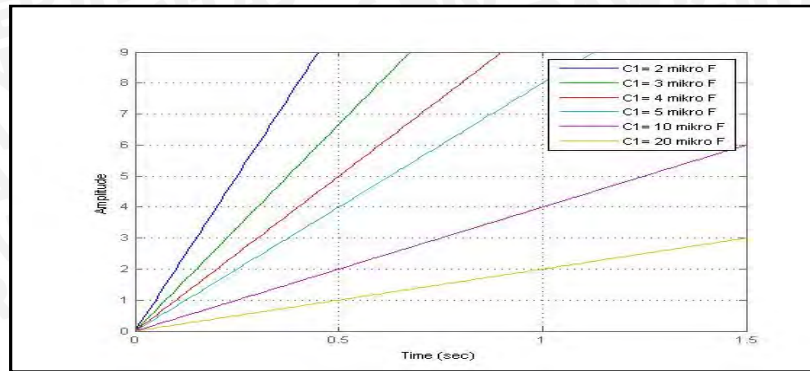
(e)



(f)

**Gambar 5.5** Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 (warna biru) Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 Volt (warna hitam) Untuk Berbagai Variasi Nilai  $C_1$  dengan Nilai  $R_1$  Konstan 100 K $\Omega$  dan Nilai  $R_2$  Tak hingga (a)  $C_1 = 2 \mu\text{F}$  (b)  $C_1 = 3 \mu\text{F}$  (c)  $C_1 = 4 \mu\text{F}$  (d)  $C_1 = 5 \mu\text{F}$  (e)  $C_1 = 10 \mu\text{F}$  (f)  $C_1 = 20 \mu\text{F}$ .





**Gambar 5.6** Grafik Tanggapan Sistem Orde 1 Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 Volt, Untuk Berbagai Variasi Nilai  $C_1$  dengan Nilai  $R_1$  Konstan 100 K $\Omega$  dan Nilai  $R_2$  Tak hingga Menggunakan Software MATLAB.

## 5.2 Pengujian sistem orde 2

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui keberhasilan rangkaian komputer analog sistem orde 2 yang dibuat. Adapun pengujiannya berupa pengujian tanggapan sistem orde 2, dengan berbagai variasi fungsi alih, terhadap masukan sinyal tangga. Adapun peralatan yang diperlukan meliputi;

1. DATAQ beserta Softwarena
3. Setpoint Potensiometer
4. Power Supply +/- 15 V
5. Multimeter
6. Modul Sistem Orde 2

Prosedur pengujian dilakukan dengan menghubungkan *Analog1 channel1* pada piranti DATAQ DI-158U ke sinyal masukan yang berasal dari modul Setpoint Potensiometer dan *Analog 2 channel 1* dihubungkan pada keluaran rangkaian sistem orde 2. Sedangkan pada *Analog1 Channel 2* dan *Analog 2 channel 2* dihubungkan dengan *ground* rangkaian.

Pengujian sistem orde 2 ini meliputi pengujian dengan berbagai variasi gain, pengujian dengan berbagai variasi rasio redaman sistem  $\xi$ , pengujian dengan berbagai variasi frekuensi alamiah tidak teredam sistem  $\omega_n$  dan pengujian berbagai variasi sistem orde 2 yang tidak stabil.

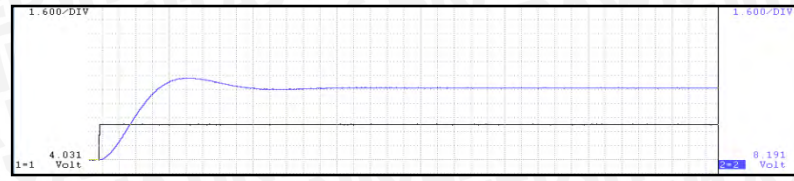
### 5.2.1 Pengujian Gain Sistem Orde 2

Pengujian variasi gain pada rangkaian sistem orde dua yaitu dengan membuat nilai C konstan 3 $\mu$ F, nilai  $R_3$  konstan 140 K $\Omega$ , nilai  $R_6$  konstan 400 K $\Omega$  dan mengubah nilai  $R_1$  secara bergantian. Grafik tanggapan sistem terhadap sinyal

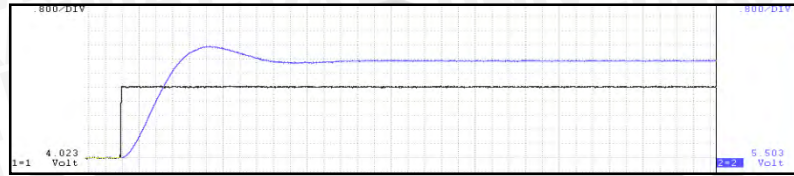
tangga 4 volt dengan berbagai nilai  $R_1$  dapat dilihat pada Gambar 5.4 dengan skala 0,8 V/div dan 0.333 sekon/div (khusus untuk Gambar 5.7 (a) menggunakan skala 1,6 V/div). Adapun performansinya dapat dilihat pada Tabel 5.4.

**Tabel 5.4** Performansi Sistem Orde Dua Untuk Berbagai Variasi  $R_1$  dengan Nilai C konstan  $3\mu\text{f}$ , Nilai  $R_3$  Konstan  $140\text{ K}\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$ .

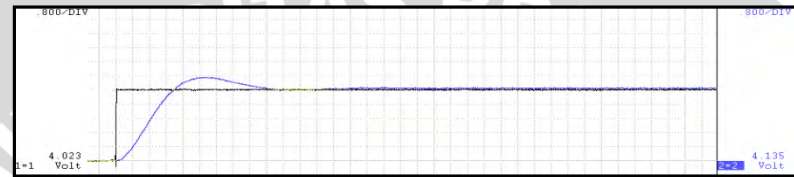
No	$R_1$ (K $\Omega$ )	Fungsi Alih	Pengukuran			Matlab		
			Steady State (V)	Gain	Time Settling (s)	Steady State (V)	Gain	Time Settling (s)
1	200	$\frac{11,1}{s^2 + 2,4s + 5,6}$	8,19	2,05	3,47	8	2	3,4
2	300	$\frac{7,7}{s^2 + 2,4s + 5,6}$	5,50	1,38	3,53	5,33	1,33	3,4
3	400	$\frac{5,6}{s^2 + 2,4s + 5,6}$	4,10	1,03	3,48	4	1	3,4
4	500	$\frac{4,4}{s^2 + 2,4s + 5,6}$	3,31	0,83	3,50	3,2	0,8	3,4
5	600	$\frac{3,7}{s^2 + 2,4s + 5,6}$	2,77	0,69	3,46	2,67	0,67	3,4
6	700	$\frac{3,2}{s^2 + 2,4s + 5,6}$	2,39	0,60	3,45	2,29	0,57	3,4



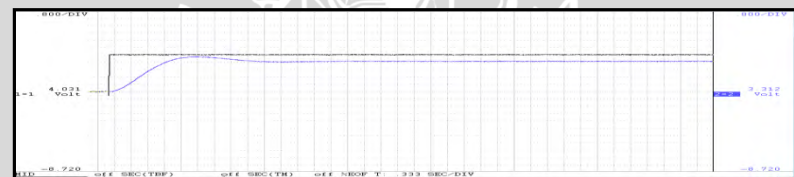
(a)



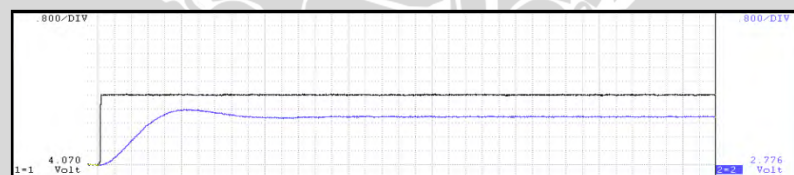
(b)



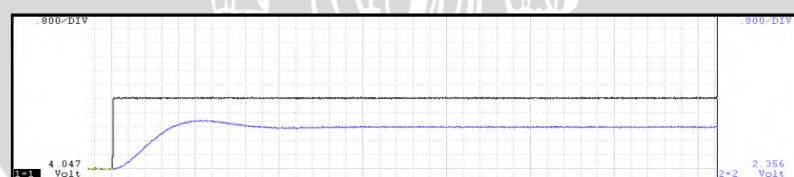
(c)



(d)

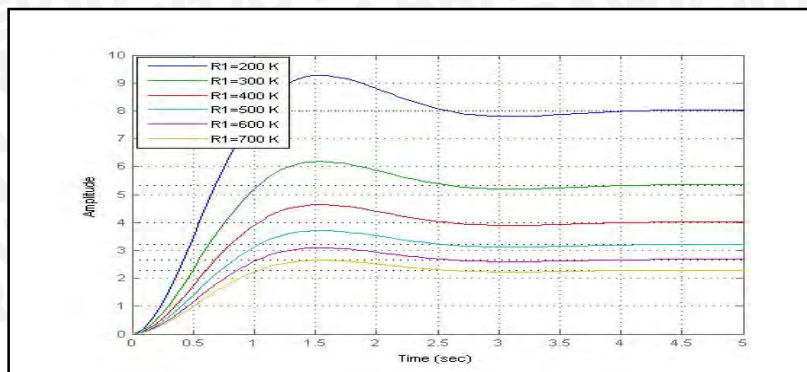


(e)



(f)

**Gambar 5.7** Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 (warna biru) Terhadap Masukan Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Nilai  $R_1$  dengan Nilai  $C$  Konstan  $3\mu\text{F}$ , Nilai  $R_3$  Konstan  $140\text{ K}\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$  (a)  $R_1 = 200\text{ K}\Omega$  (b)  $R_1 = 300\text{ K}\Omega$  (c)  $R_1 = 400\text{ K}\Omega$  (d)  $R_1 = 500\text{ K}\Omega$  (e)  $R_1 = 600\text{ K}\Omega$  (f)  $R_1 = 700\text{ K}\Omega$



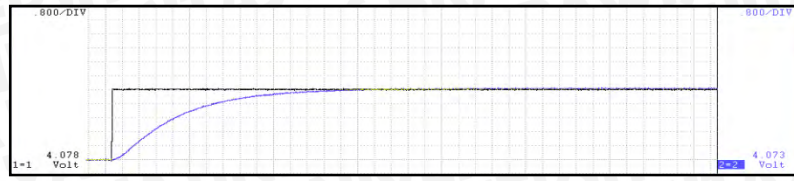
**Gambar 5.8** Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 Terhadap Masukan Tangga 4 Volt Untuk Berbagai Nilai  $R_1$  dengan Nilai  $C$  Konstan  $3\mu\text{F}$ , Nilai  $R_3$  Konstan  $140\text{ K}\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$  Menggunakan Software MATLAB.

### 5.2.2 Pengujian Redaman Sistem Orde 2

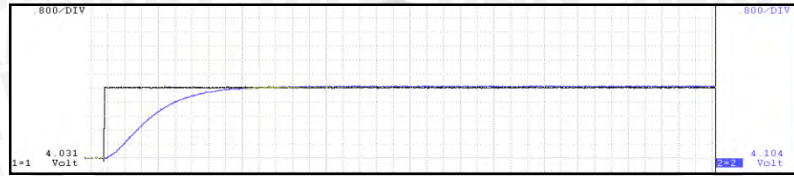
Pengujian variasi redaman pada rangkaian sistem orde dua yaitu dengan membuat nilai  $C$  konstan  $3\mu\text{F}$ , nilai  $R_1$  konstan  $400\text{ K}\Omega$ , nilai  $R_6$  konstan  $400\text{ K}\Omega$  dan mengubah nilai  $R_3$  secara bergantian. Grafik tanggapan sistem terhadap sinyal tangga 4 volt dengan berbagai nilai  $R_3$  dapat dilihat pada Gambar 5.9 dengan skala  $0,8\text{ V/div}$  dan  $0.333\text{ sekon/div}$ . Adapun performansinya dapat dilihat pada Tabel 5.5.

**Tabel 5.5** Performansi Sistem Orde Dua Untuk Berbagai Nilai  $R_3$  dengan Nilai  $C$  Konstan  $3\mu\text{F}$ , Nilai  $R_1$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$ .

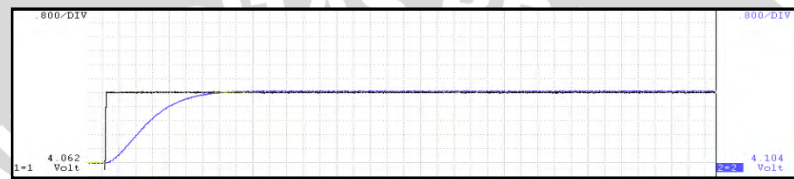
No	$R_1\text{ (K}\Omega\text{)}$	TF	Pengukuran			Matlab		
			Steady State (V)	$T_s\text{ (s)}$	$M_p\%$	Steady State (V)	$T_s\text{ (s)}$	$M_p\%$
1	50	$\frac{5,6}{s^2 + 6,7s + 5,6}$	4,10	4,95	0	4	4,2	0
2	70	$\frac{5,6}{s^2 + 4,8s + 5,6}$	4,10	2,98	0	4	2,53	0
3	80	$\frac{5,6}{s^2 + 4,2s + 5,6}$	4,10	2,27	0,25	4	1,92	0,26
4	140	$\frac{5,6}{s^2 + 2,4s + 5,6}$	4,10	3,35	16	4	3,4	15,9
5	200	$\frac{5,6}{s^2 + 1,47s + 5,6}$	4,10	5,1	25	4	4,64	30,5
6	Tak hingga	$\frac{5,6}{s^2 + 5,6}$	Osilasi	-	-	Osilasi	-	-



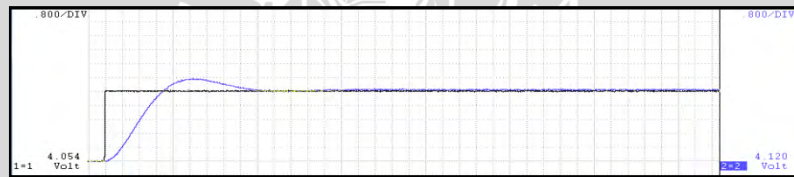
(a)



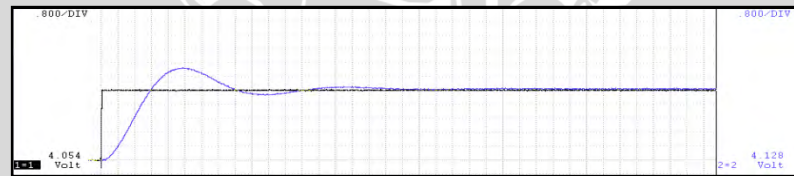
(b)



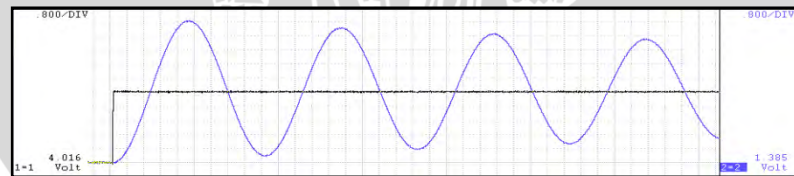
(c)



(d)

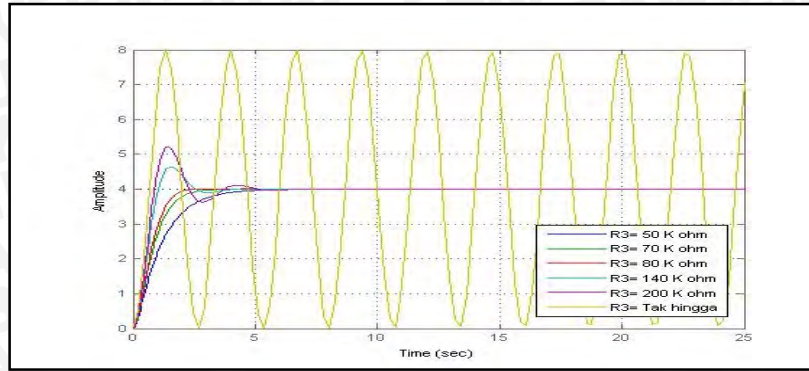


(e)



(f)

**Gambar 5.9** Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 (warna biru) Terhadap Masukan Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Nilai  $R_3$  dengan Nilai C Konstan  $3\mu\text{F}$ , Nilai  $R_1$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$  (a)  $R_3 = 50\text{ K}\Omega$  (b)  $R_3 = 70\text{ K}\Omega$  (c)  $R_3 = 80\text{ K}\Omega$  (d)  $R_3 = 140\text{ K}\Omega$  (e)  $R_3 = 200\text{ K}\Omega$  (f)  $R_3 = \sim$  (Taktingga).



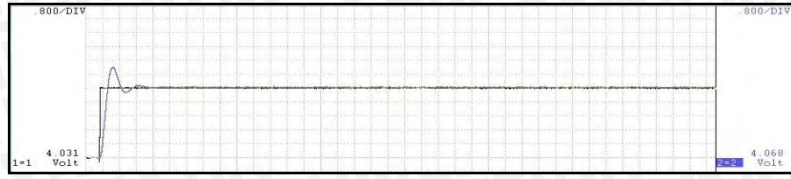
**Gambar 5.10** Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 Terhadap Masukan Tangga 4 volt Untuk Berbagai Nilai  $R_3$  dengan Nilai  $C$  Konstan  $3\mu F$ , Nilai  $R_1$  Konstan  $400 K\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan  $400 K\Omega$  Menggunakan Software MATLAB.

### 5.2.3 Pengujian Frekuensi Alamiah Tidak Tereadam Sistem Orde 2

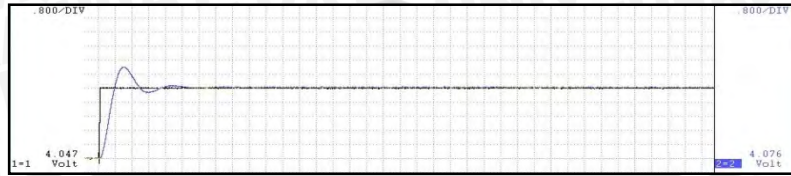
Pengujian variasi frekuensi alamiah tidak teredam pada rangkaian sistem orde dua yaitu dengan membuat nilai  $R_1$  konstan  $400 K\Omega$ , nilai  $R_3$  konstan  $200 K\Omega$ , nilai  $R_6$  konstan  $400 K\Omega$  dan mengubah nilai  $C$  secara bergantian. Grafik tanggapan sistem terhadap sinyal tangga 4 volt dengan berbagai nilai  $C$  dapat dilihat pada Gambar 5.11 dengan skala  $0,8 V/div$  dan  $0,333 \text{ sekon}/div$ . Adapun performansinya dapat dilihat pada Tabel 5.6.

**Tabel 5.6** Performansi Sistem Orde Dua Untuk Berbagai Variasi Nilai  $C$  dengan Nilai  $R_1$  Konstan  $400 K\Omega$ , Nilai  $R_3$  Konstan  $200 K\Omega$ , Nilai  $R_6$  Konstan  $400 K\Omega$ .

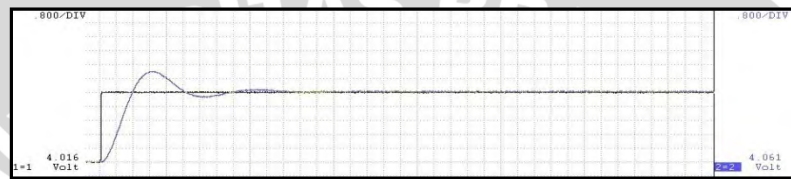
No	C (mikro F)	TF	Pengukuran			Matlab		
			Steady State (V)	$T_s(s)$	$M_p\%$	Steady State (V)	$T_s(s)$	$M_p\%$
1	0,5	$\frac{200}{s^2 + 10s + 200}$	4,06	0,82	28,8	4	0,77	30,5
2	1	$\frac{50}{s^2 + 5s + 50}$	4,06	1,57	28,8	4	1,55	30,5
3	2	$\frac{12,5}{s^2 + 2,5s + 12,5}$	4,06	3,42	29,3	4	3,1	30,5
4	3	$\frac{5,56}{s^2 + 1,67s + 55,6}$	4,06	4,9	29,3	4	4,65	30,5
5	4	$\frac{3,13}{s^2 + 1,25s + 3,13}$	4,10	6,63	28,1	4	6,19	30,5



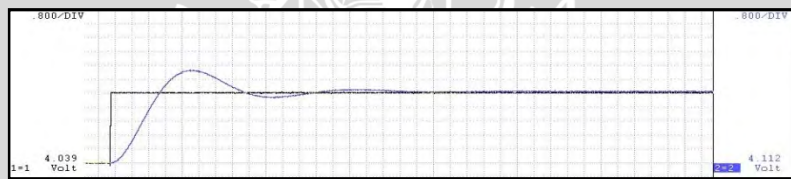
(a)



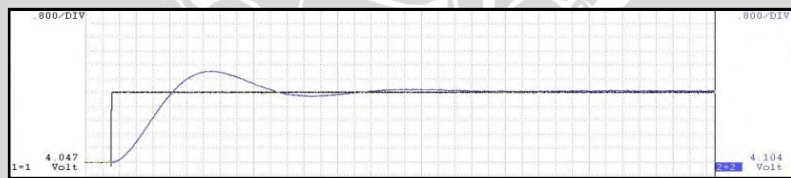
(b)



(c)

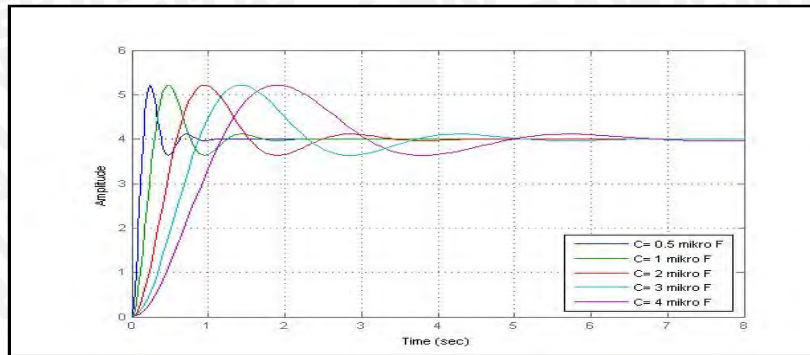


(d)



(e)

**Gambar 5.11** Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 (warna biru) Terhadap Masukan Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Nilai C dengan Nilai  $R_1$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$ , Nilai  $R_3$  Konstan  $200\text{ K}\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$  (a)  $C = 0.5\ \mu\text{F}$  (b)  $C = 1\ \mu\text{F}$  (c)  $C = 2\ \mu\text{F}$  (d)  $C = 3\ \mu\text{F}$  (e)  $C = 4\ \mu\text{F}$



**Gambar 5.12** Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 Terhadap Masukan Tangga 4 volt Untuk Berbagai Nilai C dengan Nilai  $R_1$  Konstan 400 K $\Omega$ , Nilai  $R_3$  Konstan 200 K $\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Konstan 400 K $\Omega$  Menggunakan Software MATLAB.

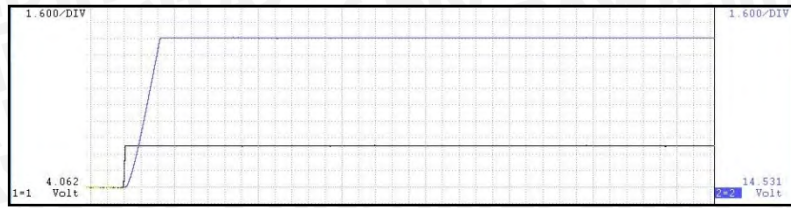
### 5.2.4 Pengujian Sistem Orde 2 Tidak Stabil

Variasi sistem orde dua tidak stabil terdapat dua macam yaitu dengan cara melepas komponen  $R_6$  saja atau melepas komponen  $R_6$  dan  $R_3$ . Pengujian yang pertama yaitu dengan membuat  $R_6$  *open*, nilai  $R_1$  konstan 400 K $\Omega$ , nilai  $R_3$  konstan 70 K $\Omega$  dan mengubah nilai C secara bergantian. Pengujian yang kedua yaitu dengan membuat  $R_6$  dan  $R_3$  *open*, nilai  $R_1$  konstan 700 K $\Omega$ , dan mengubah nilai C secara bergantian. Grafik tanggapan sistem orde dua tidak stabil terhadap sinyal tangga 4 volt dengan berbagai nilai C dapat dilihat pada Gambar 5.7 dan Gambar 5.8 dengan skala 1,6 V/div dan 0.333 sekon/div. Adapun performansinya dapat dilihat pada Tabel 5.7 dan Tabel 5.8.

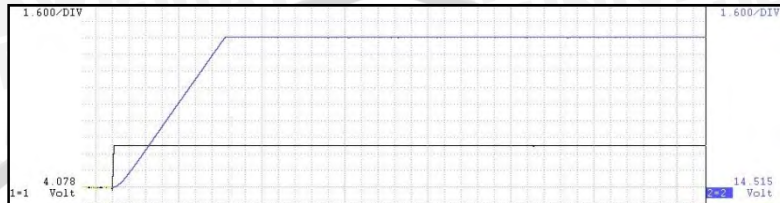
**Tabel 5.7** Performansi Sistem Orde Dua Tidak Stabil Untuk Berbagai Berbagai Variasi Nilai C dengan Nilai  $R_1$  Konstan 400 K $\Omega$ , Nilai  $R_3$  Konstan 70 K $\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Bernilai Takhingga.

No	C (mikro F)	Fungsi Alih	Pengukuran	Matlab
			<i>Steady State</i> (V)	<i>Steady State</i> (V)
1	0,5	$\frac{200}{s^2 + 28,57s}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
2	1	$\frac{50}{s^2 + 14,29s}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
3	2	$\frac{12,5}{s^2 + 7,14s}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
4	3	$\frac{5,56}{s^2 + 4,76s}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
5	4	$\frac{3,13}{s^2 + 3,57s}$	Menuju V Saturasi	Takhingga

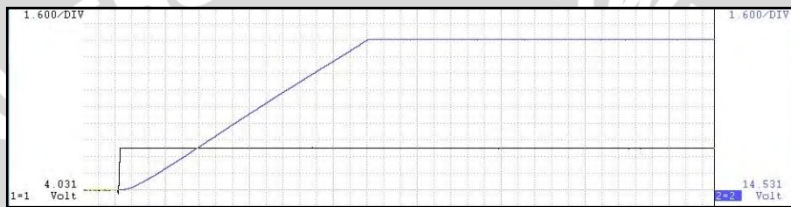




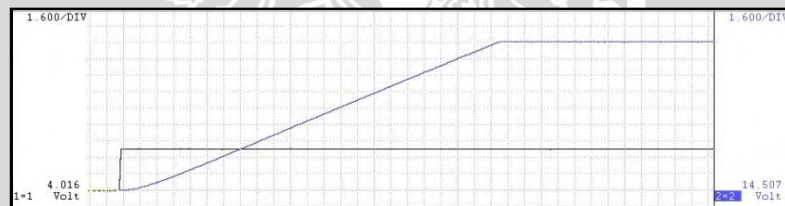
(a)



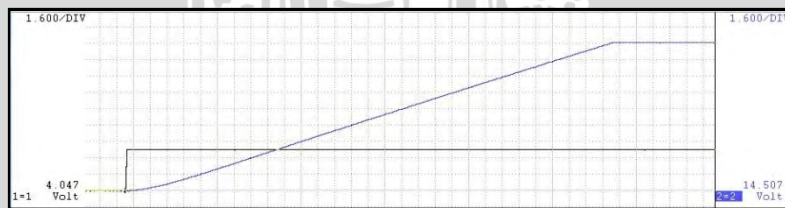
(b)



(c)

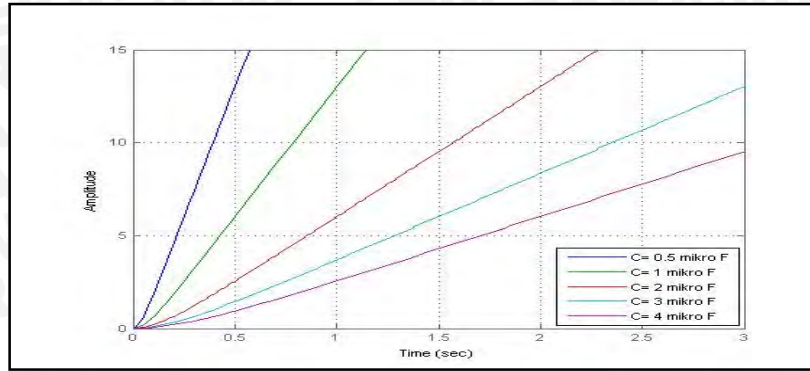


(d)



(e)

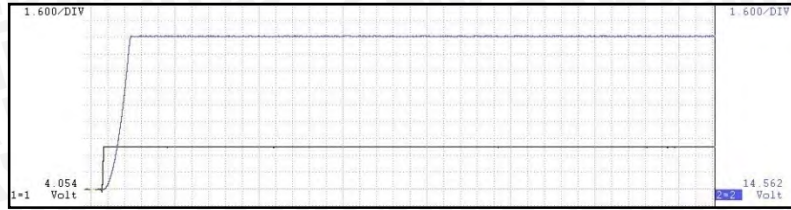
**Gambar 5.13** Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 (warna biru) Terhadap Masukan Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Variasi Nilai C dengan Nilai  $R_1$  Konstan  $400\text{ K}\Omega$ , Nilai  $R_3$  Konstan  $70\text{ K}\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Bernilai Takhingga (a)  $C = 0,5\ \mu\text{F}$  (b)  $C = 1\ \mu\text{F}$  (c)  $C = 2\ \mu\text{F}$  (d)  $C = 3\ \mu\text{F}$  (e)  $C = 4\ \mu\text{F}$ .



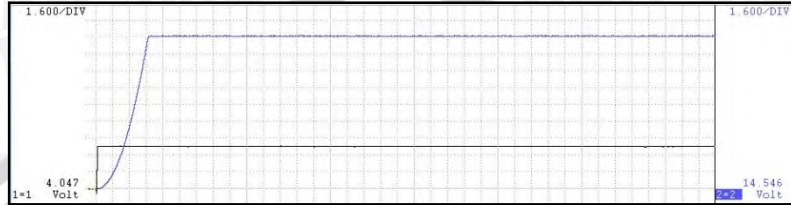
**Gambar 5.14** Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 Terhadap Masukan Tangga 4 volt Untuk Berbagai Variasi Nilai C dengan Nilai  $R_1$  Konstan 400 K $\Omega$ , Nilai  $R_3$  Konstan 70 K $\Omega$ , dan Nilai  $R_6$  Bernilai Takhingga Menggunakan Software MATLAB.

**Tabel 5.8** Performansi Sistem Orde Dua Tidak Stabil Untuk Berbagai Berbagai Variasi Nilai C dengan Nilai  $R_1$  Konstan 700 K $\Omega$ , dan  $R_3 = R_6$  Bernilai Takhingga.

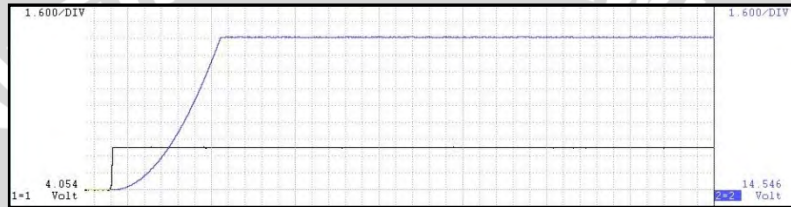
No	C (mikro F)	Fungsi Alih	Pengukuran	Matlab
			<i>Steady State (V)</i>	<i>Steady State (V)</i>
1	0,5	$\frac{114,3}{s^2}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
2	1	$\frac{28,57}{s^2}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
3	2	$\frac{7,143}{s^2}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
4	3	$\frac{3,175}{s^2}$	Menuju V Saturasi	Takhingga
5	4	$\frac{1,786}{s^2}$	Menuju V Saturasi	Takhingga



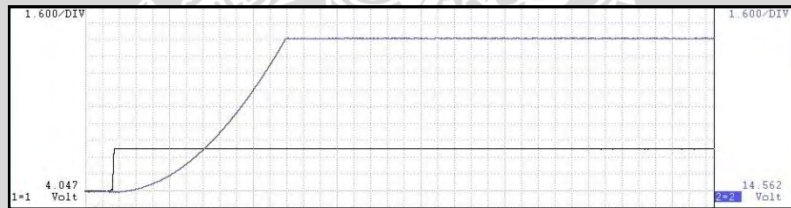
(a)



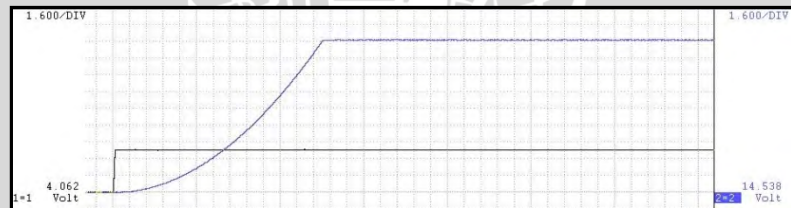
(b)



(c)

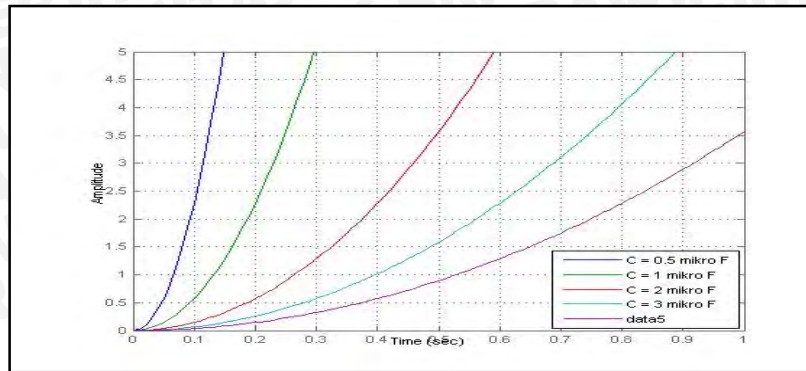


(d)



(e)

**Gambar 5.15** Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 (warna biru) Terhadap Masukan Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Nilai C dengan Nilai  $R_1$  Konstan  $700\text{ k}\Omega$ , dan  $R_3 = R_6$  Bernilai Takhingga (a)  $C = 0,5\ \mu\text{F}$  (b)  $C = 1\ \mu\text{F}$  (c)  $C = 2\ \mu\text{F}$  (d)  $C = 3\ \mu\text{F}$  (e)  $C = 4\ \mu\text{F}$ .



**Gambar 5.16** Grafik Tanggapan Sistem Orde 2 Terhadap Masukan Tangga 4 volt Untuk Berbagai Nilai C dengan Nilai  $R_1$  Konstan 700 K $\Omega$ , dan  $R_3 = R_0$  Bernilai Taktingga Menggunakan Software MATLAB.

### 5.3 Pengujian sistem Kendali Menggunakan Kompensator

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui keberhasilan dari rangkaian kompensator yang telah dirancang untuk mengkompensasi performa sistem sehingga sistem kendali berperilaku sesuai dengan performansi yang diberikan. Adapun pengujiannya berupa pengujian tanggapan sistem sebelum terkompensasi dan tanggapan sistem yang telah terkompensasi terhadap masukan sinyal tangga. Adapun peralatan yang diperlukan meliputi;

1. DATAQ DI-158U
2. Power Supply +/- 15 V
3. Multimeter
4. Modul *Setpoint* Potensiometer
5. Modul *Summing Point*
6. Modul Sistem Orde 1
7. Modul Sistem Orde 2
8. Modul Kompensator.

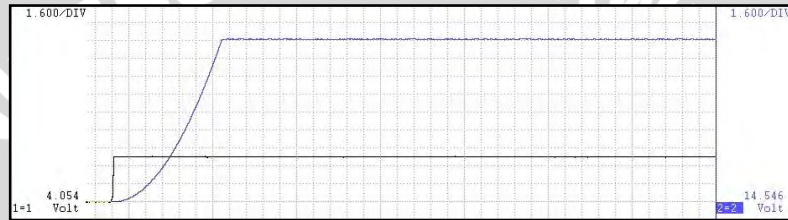
Prosedur pengujian dilakukan dengan menghubungkan *Analog1 channel1* pada piranti DATAQ DI-158U ke sinyal masukan yang berasal dari modul *Setpoint* Potensiometer dan *Analog 2 channel 1* dihubungkan pada keluaran *plant*. Sedangkan pada *Analog1 Channel 2* dan *Analog 2 channel 2* masing-masing dihubungkan dengan *ground* rangkaian.

### 5.3.1 Pengujian sistem Kendali Dengan Kompensator *Lead*

*Plant* yang dikompensasi menggunakan kompensator *lead* yaitu modul sistem orde 2 dengan parameter yang digunakan yaitu  $R_1 = 700 \text{ k ohm}$ ,  $C = 2 \text{ }\mu\text{F}$ , dan  $R_3=R_6 = \infty$  (Tak hingga/*open*) sehingga memiliki fungsi alih pada alih pada persamaan (5-1).

$$G_p = \frac{7,143}{s^2} \quad (5-1)$$

Pengujian tanggapan *plant* terhadap masukan sinyal tangga dapat dilihat pada Gambar 5.17 dengan skala 1,6 V/div dan 0.333 sekon/div.

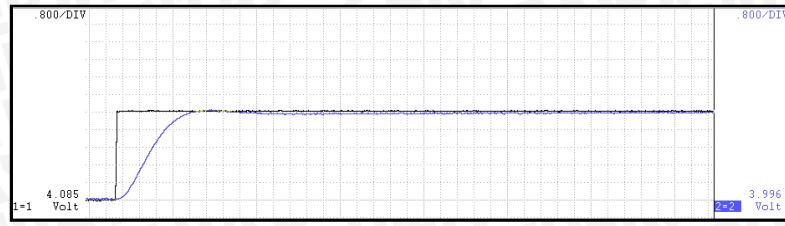


**Gambar 5.17** Grafik Tanggapan *Plant* (warna biru) Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 volt (warna hitam).

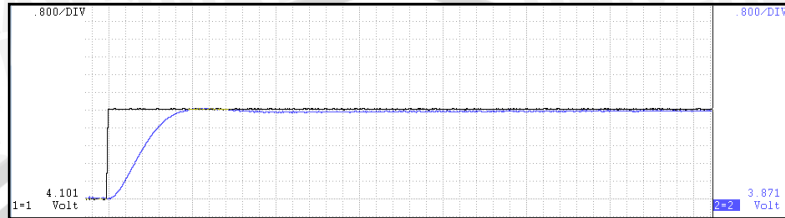
Pengujian tanggapan *plant* yang telah terkompensasi menggunakan kompensator *lead*, dengan variasi parameter kompensator yang telah ditentukan, dapat dilihat pada Gambar 5.18 dengan skala 1,6 V/div dan 0.333 sekon/div. Adapun performansinya dapat dilihat pada Tabel 5.9.

**Tabel 5.9** Performansi Sistem Kendali Untuk Berbagai Variasi Parameter Kompensator *Lead*.

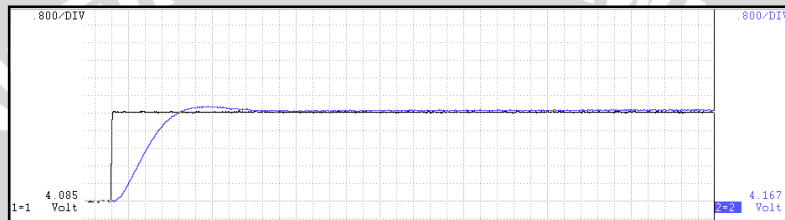
$K_c$	$Z_0$	$P_0$	Steady State (V)	$T_s$ (s)	$M_p$ %	Error Steady State (V)
3,502	-0,002	-7,002	3,97	1,158	0,04	0,03
3,520	-0,020	-7,020	3,87	1,167	0,034	0,13
3,702	-0,195	-7,206	4,19	1,083	0,032	-0,19
4,643	-0,879	-8,167	4,12	2,683	0,187	-0,12



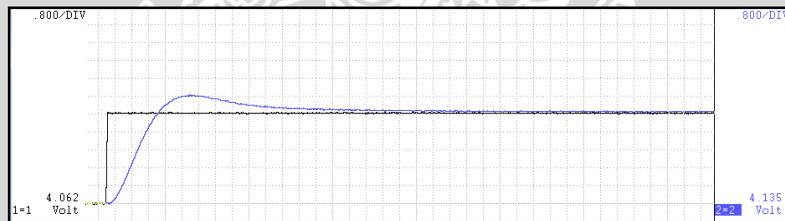
(a)



(b)



(c)



(d)

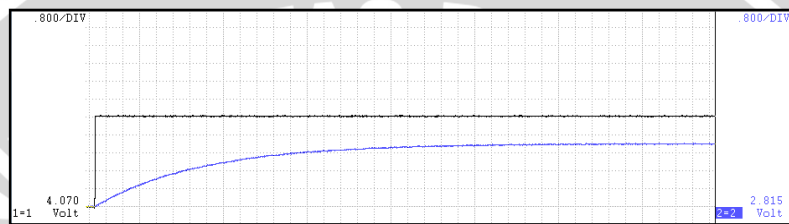
**Gambar 5.18** Grafik Tanggapan Sistem Kendali (warna biru) Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Variasi Parameter Kompensator *Lead* (a)  $K_c=3,502$ ,  $Z_o=-0,002$ , dan  $P_o=-7,002$  (b)  $K_c=3,520$ ,  $Z_o=-0,020$ , dan  $P_o=-7,020$  (c)  $K_c=3,702$ ,  $Z_o=-0,195$ , dan  $P_o=-7,206$  (d)  $K_c=4,643$ ,  $Z_o=-0,879$ , dan  $P_o=-8,167$ .

### 5.3.2 Pengujian sistem Kendali Dengan Kompensator *Lag*

*Plant* yang dikompensasi menggunakan kompensator fasa tertinggal yaitu modul sistem orde 1 dengan parameter digunakan yaitu  $R_1 = 150 \text{ K ohm}$ ,  $C_1 = 20 \mu\text{F}$ , dan  $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$  sehingga memiliki fungsi alih pada persamaan (5-2).

$$G_p = \frac{0,667}{2s + 1} \quad (5-2)$$

Pengujian tanggapan *plant* terhadap masukan sinyal tangga dapat dilihat pada Gambar 5.19 dengan skala 1,6 V/div dan 0.333 sekon/div.

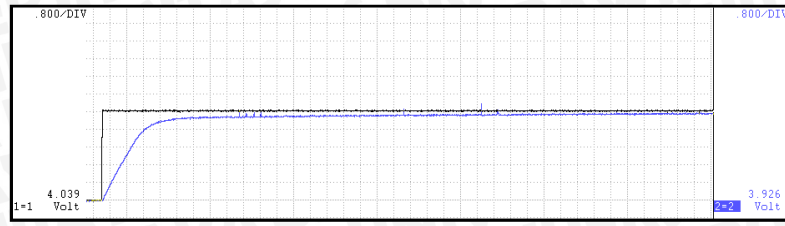


**Gambar 5.19** Grafik Tanggapan *Plant* (warna biru) Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 volt (warna hitam).

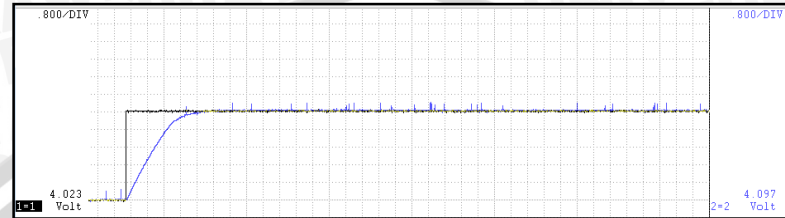
Pengujian tanggapan *plant* yang telah terkompensasi menggunakan kompensator *lag*, dengan variasi parameter kompensator yang telah ditentukan, dapat dilihat pada Gambar 5.20 dengan skala 1,6 V/div dan 0.333 sekon/div. Adapun performansinya dapat dilihat pada Tabel 5.10.

**Tabel 5.10** Performansi Sistem Kendali Untuk Berbagai Variasi Parameter Kompensator *Lag*.

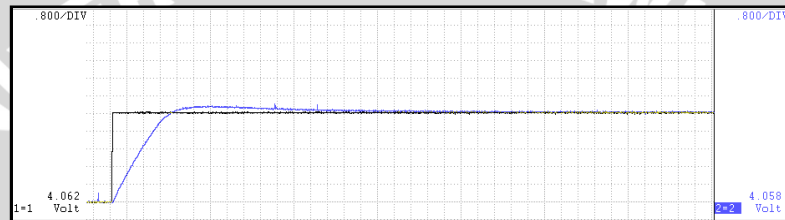
$K_c$	$Z_0$	$P_0$	Steady State (V)	$T_s$ (s)	$M_p$ %	Error Steady State (V)
10,000	-0,100	-0,002	4,00	10	0	0
10,000	-0,300	-0,006	4,10	1,31	0	0
10,000	-0,500	-0,010	4,09	4,62	7	0
10,000	-1,000	-0,020	4,09	4,55	20	0



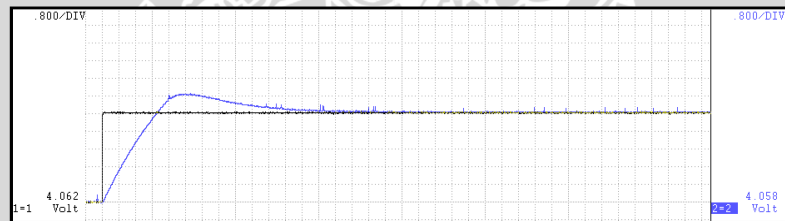
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 5.20** Grafik Tanggapan Sistem Kendali (warna biru) Terhadap Masukan Sinyal Tangga 4 volt (warna hitam) Untuk Berbagai Variasi Parameter Kompensator Lag (a)  $K_c=10$ ,  $Z_o=-0,1$ , dan  $P_o=-0,002$  (b)  $K_c=10$ ,  $Z_o=-0,3$ , dan  $P_o=-0,006$  (c)  $K_c=10$ ,  $Z_o=-0,5$ , dan  $P_o=-0,01$  (d)  $K_c=10$ ,  $Z_o=-1$ , dan  $P_o=-0,02$ .



## BAB VI PENUTUP

### 6.1 Kesimpulan

Dari hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Modul *plant* berupa sistem orde satu dengan bermacam kriteria performansi dapat direalisasikan dan berfungsi dengan baik sesuai dengan perancangan. Performansi yang dihasilkan meliputi sistem orde satu yang stabil dengan berbagai variasi gain ( $K$ ), variasi konstanta waktu ( $T$ ), dan berbagai variasi sistem orde 1 yang tidak stabil.
2. Modul *plant* berupa sistem orde dua dengan bermacam kriteria performansi dapat direalisasikan dan berfungsi dengan baik sesuai dengan perancangan. Performansi yang dihasilkan meliputi sistem orde dua yang stabil dengan berbagai variasi gain ( $K$ ), rasio redaman sistem ( $\xi$ ), frekuensi alamiah tidak teredam sistem ( $\omega_n$ ), dan berbagai variasi sistem orde 2 yang tidak stabil.
3. Modul kompensator orde satu dapat direalisasikan dan berfungsi dengan baik sesuai dengan perancangan. Modul kompensator difungsikan sebagai kompensator *lead* dan kompensator *lag*. Kedua kompensator ini digunakan untuk mengkompensasi *plant* yang diberikan berupa sistem orde satu maupun sistem orde dua sehingga performansi sistem kendali sesuai dengan yang diinginkan. *Plant* yang dikompensasi menggunakan kompensator *lead* yaitu modul sistem orde dua dengan parameter yang digunakan yaitu  $R_1 = 700 \text{ K}\Omega$ ,  $C = 2 \text{ }\mu\text{F}$ , dan  $R_3 = R_6 = \sim$  (tak hingga/*open*), Respon yang dihasilkan memiliki *Settling Time* ( $t_s$ ) = 1,158 sekon *maximum overshoot* ( $M_p$ ) sebesar 0,04 % dan *error steady state* ( $e_{ss}$ ) sebesar 0.03 volt, Sedangkan *plant* yang dikompensasi menggunakan kompensator fasa *lag* yaitu modul sistem orde satu dengan parameter yang digunakan yaitu  $R_1 = 150 \text{ K}\Omega$ ,  $C_1 = 20 \text{ }\mu\text{F}$ , dan  $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$ . Respon yang dihasilkan memiliki *Settling Time* ( $t_s$ ) = 1,31 sekon *maximum overshoot* ( $M_p$ ) sebesar 0 % dan *error steady state* ( $e_{ss}$ ) sebesar 0 volt.



## 6.2 Saran

Beberapa hal yang direkomendasikan untuk pengembangan lebih lanjut adalah:

1. Dirancang modul *plant* yang berorde tinggi (berorde lebih dari dua) agar dapat mensimulasikan pengendalian sistem fisis yang memiliki fusi alih beorde tinggi.
2. Dirancang modul kompensator yang berorde dua atau berorde tinggi untuk menambah peranan kompensator dalam mengkompensasi *plant*.
3. Dirancang mekanisme pengendalian *plant*, yang berupa modul sistem orde satu maupun modul sistem orde dua, dengan menggunakan metode kompensasi yang lain.



## DAFTAR PUSTAKA

- Ogata, Katsuhiko. 1997. *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*. Terjemahan oleh Edi Laksono. Jakarta. Penerbit Erlangga.
- Ogata, Katsuhiko. 1997. *Teknik Kontrol Automatik Jilid 2*. Terjemahan oleh Edi Laksono. Jakarta. Penerbit Erlangga.
- Phillips, C.L. dan Royce D. 1997. *Dasar-dasar Sistem Kontrol*. Terjemahan oleh RJ Widodo. Jakarta. Penerbit Prenhallindo.
- Phillips, C.L. dan Royce D. 1998. *Sistem Kontrol: Lanjutan*. Terjemahan oleh RJ Widodo. Jakarta. Penerbit Prenhallindo.
- Hartanto, Dwi. dan Agung Wahyu. 2003. *Aplikasi dan Desain Sistem Kontrol dengan MATLAB*. Yogyakarta. Penerbit Andi.



# LAMPIRAN



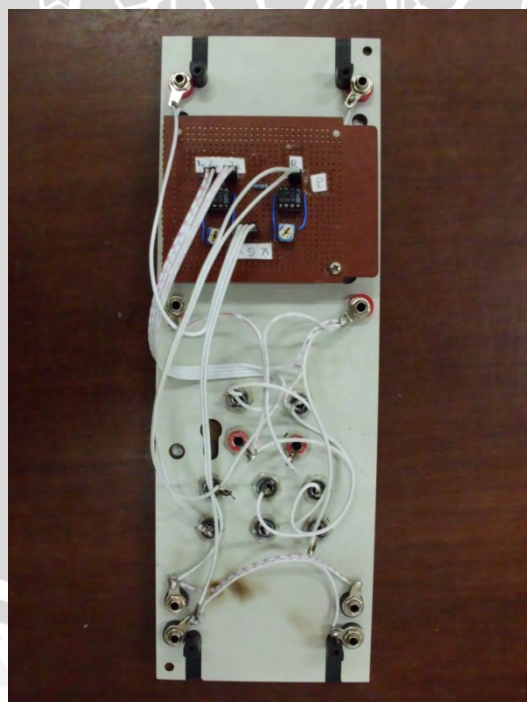
# Lampiran 1

Foto Alat

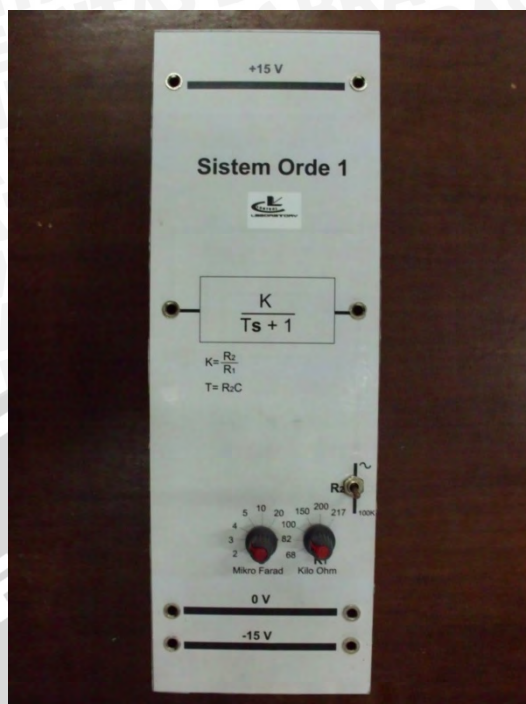




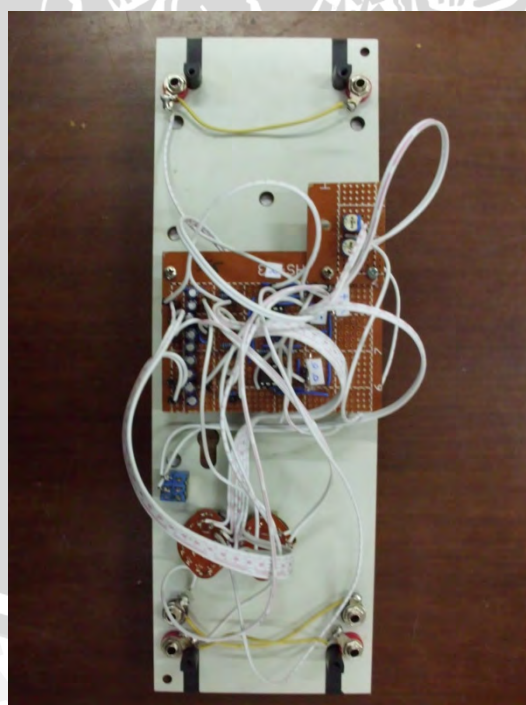
Gambar Hasil Perancangan Modul Kompensator Orde 1



Gambar Hasil Perancangan Komponen Rangkaian Kompensator Orde 1



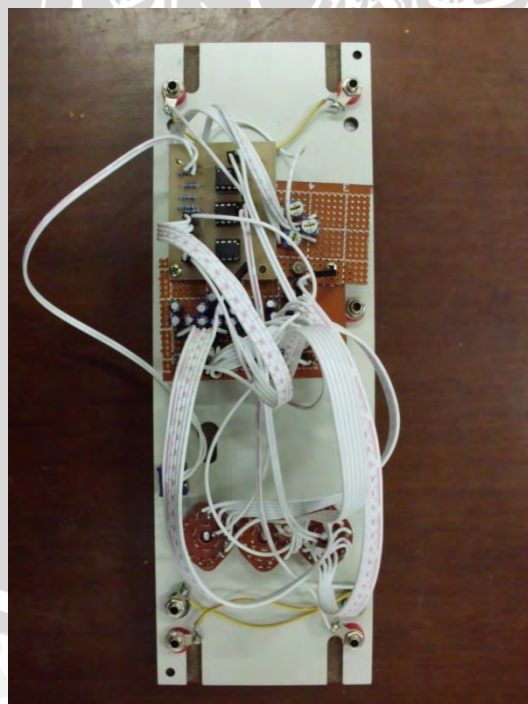
Gambar Hasil Perancangan Modul Sistem Orde 1



Gambar Hasil Perancangan Komponen Rangkaian Sistem Orde 1

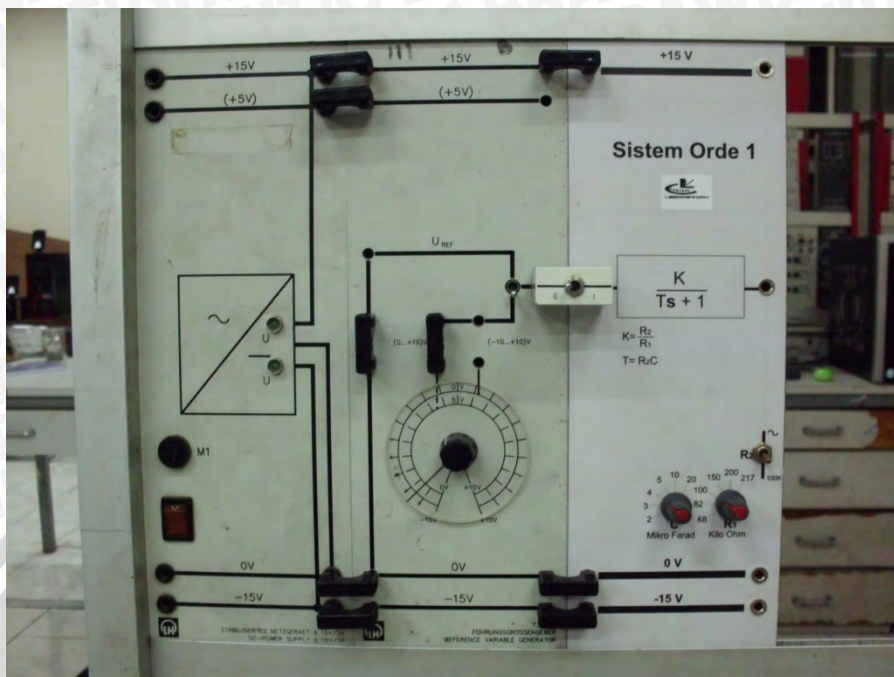


Gambar Hasil Perancangan Modul Sistem Orde 2

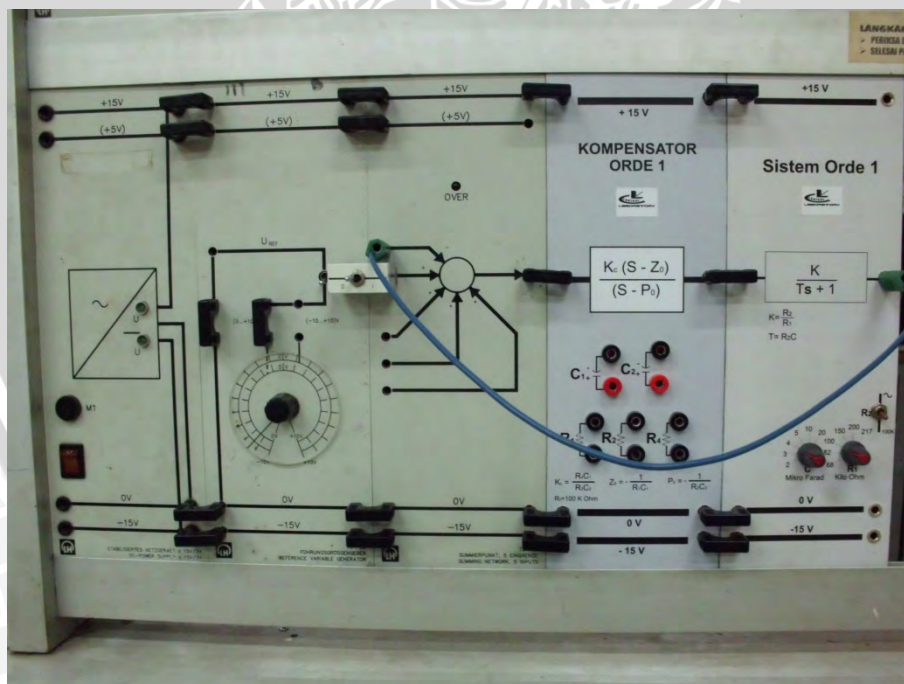


Gambar Hasil Perancangan Komponen Rangkaian Sistem Orde 2

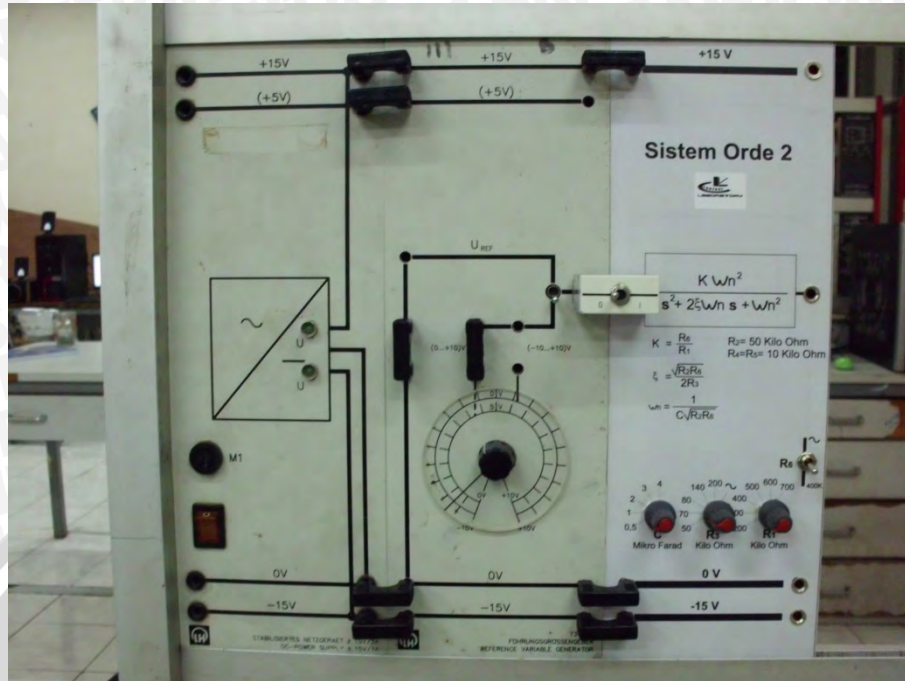




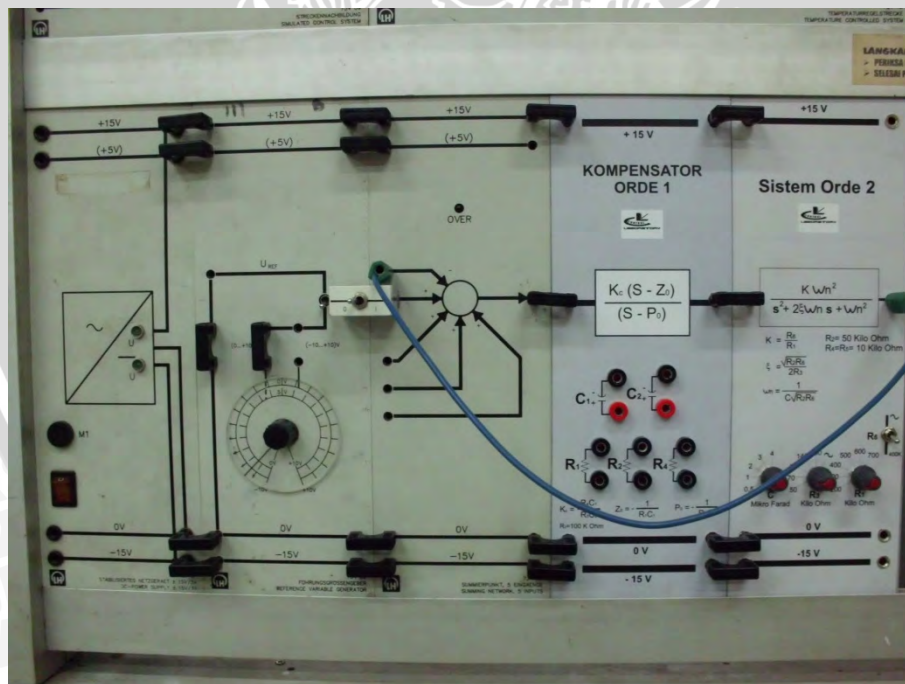
Gambar Rangkaian Pengujian Sistem Orde 1



Gambar Rangkaian Pengujian Pengendalian Sistem Orde 1 Menggunakan Kompensator Orde 1



Gambar Rangkaian Pengujian Sistem Orde 2



Gambar Rangkaian Pengujian Pengendalian Sistem Orde 2 Menggunakan Kompensator Orde 1

# Lampiran 2

## Datasheet





August 2000

# LM741

## Operational Amplifier

### General Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications. The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and

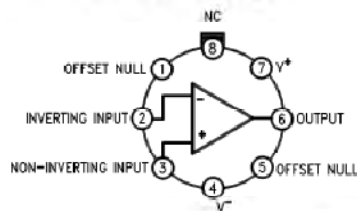
output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

The LM741C is identical to the LM741/LM741A except that the LM741C has their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

### Features

### Connection Diagrams

Metal Can Package

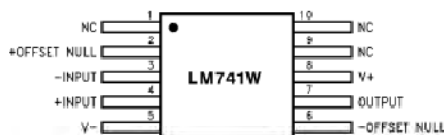


00934102

Note 1: LM741H is available per JM38510/10101

Order Number LM741H, LM741H/883 (Note 1),  
LM741AH/883 or LM741CH  
See NS Package Number H08C

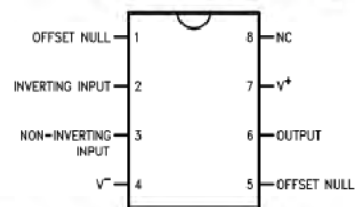
Ceramic Flatpak



00934106

Order Number LM741W/883  
See NS Package Number W10A

Dual-In-Line or S.O. Package

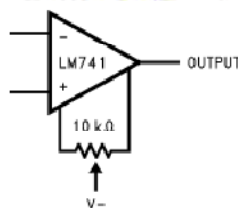


00934103

Order Number LM741J, LM741J/883, LM741CN  
See NS Package Number J08A, M08A or N08E

### Typical Application

Offset Nulling Circuit



00934107



### Absolute Maximum Ratings (Note 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

(Note 7)

	LM741A	LM741	LM741C
Supply Voltage	±22V	±22V	±18V
Power Dissipation (Note 3)	500 mW	500 mW	500 mW
Differential Input Voltage	±30V	±30V	±30V
Input Voltage (Note 4)	±15V	±15V	±15V
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous	Continuous
Operating Temperature Range	-55°C to +125°C	-55°C to +125°C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Junction Temperature	150°C	150°C	100°C
Soldering Information			
N-Package (10 seconds)	260°C	260°C	260°C
J- or H-Package (10 seconds)	300°C	300°C	300°C
M-Package			
Vapor Phase (60 seconds)	215°C	215°C	215°C
Infrared (15 seconds)	215°C	215°C	215°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.			
ESD Tolerance (Note 8)	400V	400V	400V

### Electrical Characteristics (Note 5)

Parameter	Conditions	LM741A			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$										mV
	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$				1.0	5.0		2.0	6.0		
	$R_S \leq 50\Omega$	0.8	3.0								mV
Average Input Offset Voltage Drift	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			4.0							mV
	$R_S \leq 50\Omega$						6.0				mV
	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$									7.5	mV
Average Input Offset Current Drift			15								$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Voltage Adjustment Range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{V}$	±10			±15			±15			mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.0	30	20	200		20	200		nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			70	85	500			300		nA
Average Input Offset Current Drift			0.5								nA/°C
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80	80	500		80	500		nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			0.210		1.5			0.8		$\mu\text{A}$
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0		M $\Omega$
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}, V_S = \pm 20\text{V}$	0.5									M $\Omega$
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$							±12	±13		V
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				±12	±13					V



**Electrical Characteristics** (Note 5) (Continued)

Parameter	Conditions	LM741A			LM741			LM741C			Units		
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max			
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	50						50	200		20	200	V/mV V/mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	32						25			15		V/mV V/mV
	$V_S = \pm 5\text{V}$ , $V_O = \pm 2\text{V}$	10											V/mV
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 20\text{V}$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	$\pm 16$											V V
	$V_S = \pm 15\text{V}$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$				$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$		$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$				V V
Output Short Circuit Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$	10	25	35		25			25				mA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	10		40									mA
Common-Mode Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ , $V_{CM} = \pm 12\text{V}$ $R_S \leq 50\Omega$ , $V_{CM} = \pm 12\text{V}$							70	90		70	90	dB dB
		80	95										
Supply Voltage Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $V_S = \pm 20\text{V}$ to $V_S = \pm 5\text{V}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	86	96										dB dB
					77	96		77	96				
Transient Response	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain	Rise Time		0.25	0.8		0.3				0.3		$\mu\text{s}$
		Overshoot		6.0	20		5				5		%
Bandwidth (Note 6)	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.437	1.5										MHz
Slew Rate	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain	0.3	0.7			0.5			0.5				V/ $\mu\text{s}$
Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$					1.7	2.8		1.7	2.8			mA
Power Consumption	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_S = \pm 20\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$		80	150									mW mW
	LM741A $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$						50	85		50	85		mW mW
LM741	$V_S = \pm 15\text{V}$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$												mW mW
							60	100		45	75		mW mW

**Note 2:** "Absolute Maximum Ratings" indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



### Electrical Characteristics (Note 5) (Continued)

**Note 3:** For operation at elevated temperatures, these devices must be derated based on thermal resistance, and  $T_j$  max. (listed under "Absolute Maximum Ratings").  $T_j = T_A + (\theta_{JA} P_D)$ .

Thermal Resistance	Cerdip (J)	DIP (N)	HO8 (H)	SO-8 (M)
$\theta_{JA}$ (Junction to Ambient)	100°C/W	100°C/W	170°C/W	195°C/W
$\theta_{JC}$ (Junction to Case)	N/A	N/A	25°C/W	N/A

**Note 4:** For supply voltages less than  $\pm 15V$ , the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

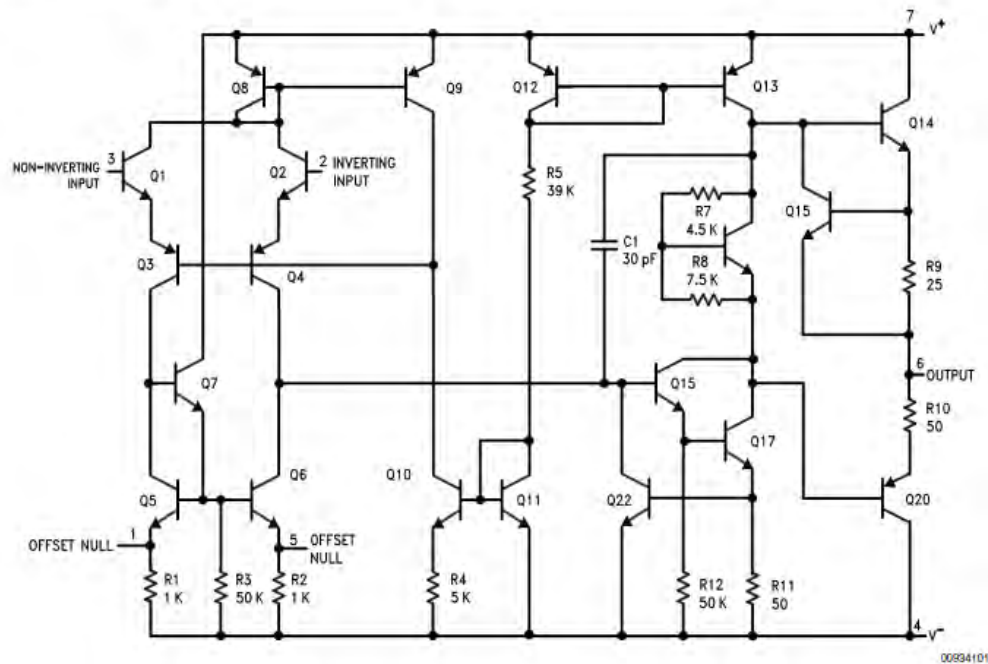
**Note 5:** Unless otherwise specified, these specifications apply for  $V_S = \pm 15V$ ,  $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$  (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to  $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$ .

**Note 6:** Calculated value from:  $BW$  (MHz) =  $0.35/\text{Rise Time}(\mu s)$ .

**Note 7:** For military specifications see RETS741X for LM741 and RETS741AX for LM741A.

**Note 8:** Human body model, 1.5 k $\Omega$  in series with 100 pF.

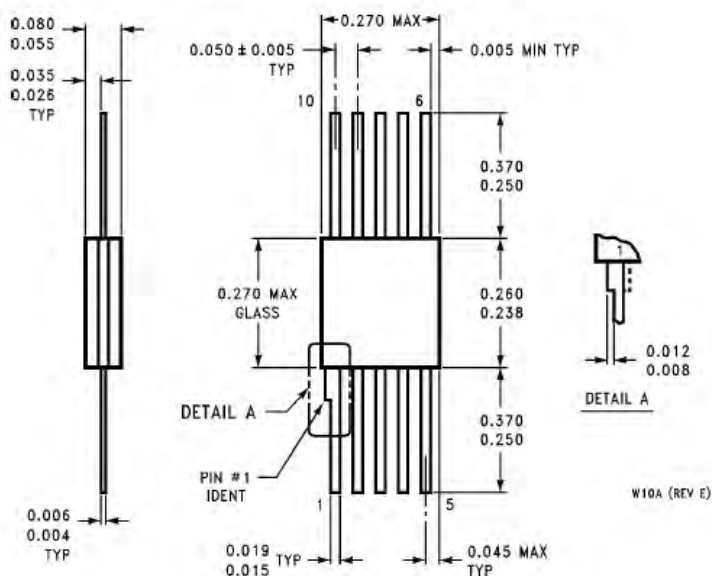
### Schematic Diagram







**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



10-Lead Ceramic Flatpak (W)  
 Order Number LM741W/883, LM741WG-MPR or LM741WG/883  
 NS Package Number W10A

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

For the most current product information visit us at [www.national.com](http://www.national.com).

**LIFE SUPPORT POLICY**

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

**BANNED SUBSTANCE COMPLIANCE**

National Semiconductor certifies that the products and packing materials meet the provisions of the Customer Products Stewardship Specification (CSP-9-111C2) and the Banned Substances and Materials of Interest Specification (CSP-9-111S2) and contain no "Banned Substances" as defined in CSP-9-111S2.



**National Semiconductor**  
 Americas Customer  
 Support Center  
 Email: [new.feedback@nsc.com](mailto:new.feedback@nsc.com)  
 Tel: 1-800-272-9959

**National Semiconductor**  
 Europe Customer Support Center  
 Fax: +49 (0) 180-530 85 86  
 Email: [europa.support@nsc.com](mailto:europa.support@nsc.com)  
 Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208  
 English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171  
 Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

**National Semiconductor**  
 Asia Pacific Customer  
 Support Center  
 Email: [ap.support@nsc.com](mailto:ap.support@nsc.com)

**National Semiconductor**  
 Japan Customer Support Center  
 Fax: 81-3-5639-7507  
 Email: [jp.feedback@nsc.com](mailto:jp.feedback@nsc.com)  
 Tel: 81-3-5639-7560

[www.national.com](http://www.national.com)

