

**RANCANG BANGUN KOMPUTER ANALOG UNTUK
SIMULASI KARAKTERISTIK PENGENDALI PID**

(Skripsi)

Oleh

ERWIN DEBY



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

ABSTRAK

RANCANG BANGUN KOMPUTER ANALOG UNTUK SIMULASI KARAKTERISTIK PENGENDALI PID

OLEH

ERWIN DEBY

Dalam dunia pendidikan, sistem kendali merupakan salah satu mata kuliah yang sulit untuk dipelajari. Sehingga sangat perlu sebuah alat yang dapat membantu mahasiswa dalam memahami sistem kontrol, dan diharapkan juga dapat membantu mahasiswa dalam melakukan kegiatan praktikum sehingga mahasiswa dapat lebih mudah dalam melakukan analisa saat praktikum. Komputer analog untuk simulasi sistem kendali PID merupakan salah satu cara yang dapat membantu memahami sistem kontrol.

Analisa komputer analog sistem kendali PID ini dilakukan dengan menggunakan *software Matlab R2015a*, yang nantinya hasilnya akan dibandingkan dengan hasil perhitungan alat komputer analog kendali PID menggunakan rangkaian *Operational Amplifier (Op-amp)*. Komputer analog kendali PID ini terdiri dari beberapa kendali antara lain kendali proporsional, integral, derivative. Ketiga kendali ini juga memiliki kelebihan masing-masing, kendali proporsional memiliki risetime yang cepat, kendali integral dapat memperkecil *error*, kendali derivative yaitu meredam *overshoot*. Komputer analog kendali PID ini menggunakan IC LM741. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan nilai penguatannya, nilai *peak to peak*, dan menganalisa sinyal yang dihasilkan antara simulasi menggunakan *Matlab* dan menggunakan alat komputer analog kendali PID.

Kata Kunci : Komputer Analog, Kendali PID, *Op-amp*, IC LM741. *Matlab R2015a*.

ABSTRACT

ANALOG COMPUTER DESIGN FOR SIMULATION OF PID CONTROL CHARACTERISTICS

BY

ERWIN DEBY

In the world of education, the control system is one of the subjects that is difficult to learn. So that it is very necessary for a tool that can help students in understanding the control system, and is expected to also be able to assist students in conducting practical activities so that students can more easily carry out analysis during the lab. Analog computers for PID control system simulation is one way that can help understand the control system.

Analysis of the analog computer PID control system is done using the software Matlab R2015a, which later results will be compared with the results of the calculation of the PID control analog computer using a series of Operational Amplifier (Op-amp). This PID control analog computer consists of several controls including proportional, integral, derivative controls. These three controls also have their respective advantages, proportional controls have fast response, integral controls can minimize errors, derivative controls that reduce overshoot. This PID control analog computer uses IC LM741. The purpose of this study is to get the reinforcement value, peak to peak value, and analyze the signal generated between simulations using Matlab and using PID control analog computer tools.

Keywords: Analog Computer, PID Control, Op-amp, IC LM741. Matlab R2015a.

RANCANG BANGUN KOMPUTER ANALOG UNTUK SIMULASI KARAKTERISTIK PENGENDALI PID

Oleh

ERWIN DEBY

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

Judul Skripsi : **RANCANG BANGUN KOMPUTER
ANALOG UNTUK SIMULASI
KARAKTERISTIK PENGENDALI PID**

Nama Mahasiswa : **Erwin Deby**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1215031026

Program Studi : Teknik Elektro

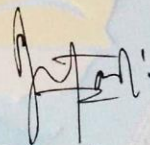
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

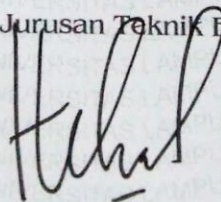


Agus Trisanto, Ph.D.
NIP 19680809 199903 1 001



Sumadi, S.T., M.T.
NIP 19731104 200003 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Elektro



Dr. Herman H Sinaga, M.T.
NIP 19711130 199903 1 003

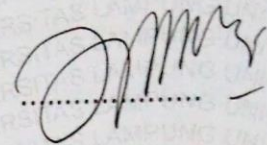


MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

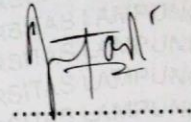
Ketua

: **Agus Trisanto, Ph.D.**



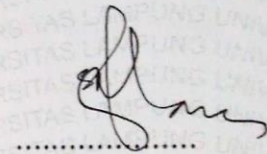
Sekretaris

: **Sumadi, S.T., M.T.**



Penguji

Bukan Pembimbing : **Syaiful Alam, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Suharno, M.Sc., Ph.D.

NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **24 Juli 2019**



Scanned with
CamScanner

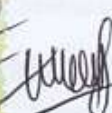
SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 6 Agustus 2019




Erwin Deby
NPM 1215031026

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Natar, pada tanggal 21 Desember 1993, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, dari Bapak Togi Samosir dan Ibu Tince Hutapea.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari Sekolah Dasar Negeri (SDN) 4 Natar, Lampung Selatan pada tahun 2000 dan diselesaikan pada tahun 2006, Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 1 Natar, Lampung Selatan dari tahun 2006 dan diselesaikan pada tahun 2009, dan Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 1 Natar, Lampung Selatan dari tahun 2009 dan diselesaikan pada tahun 2012.

Tahun 2012, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Selama menjadi mahasiswa penulis terdaftar sebagai anggota organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) Universitas Lampung periode 2014-2015. Pada tahun 2015 penulis melaksanakan kerja praktik di PT. Dirgantara Indonesia, Bandung dan membuat laporan tentang “*WEATHER RADAR SYSTEM GWX 70 PADA PESAWAT N-219*”. Pada Agustus 2016 Melaksanakan Penelitian di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro Universitas Lampung dengan judul yang ada pada penelitian ini.

PERSEMBAHAN

Hanya oleh Kasih Tuhan Yesus saya boleh menyelesaikan Tugas Akhir ini. Semua hanya karna AnugerahNya. Karya tulis ini kupersembahkan untuk:

Ayah dan Ibuku Tercinta

Togi Samosir dan Tince Hutapea

Serta Kakakku Tersayang

Ernova Sondang Theresia Samosir

Adikku Tersayang

Erina Samosir

Teman-teman kebanggaanku

Rekan-rekan Jurusan Teknik Elektro

Almamaterku

Universitas Lampung

Agamaku

Kristen

Bangsa dan Negaraku

Republik Indonesia

Terima-kasih untuk semua yang telah diberikan kepadaku. Tuhan Memberkati



MOTTO

"Kuatkan dan teguhkanlah hatimu, janganlah takut dan jangan gemetar karena mereka, sebab TUHAN, Allahmu, Dialah yang berjalan menyertai engkau; Ia tidak akan membiarkan engkau dan tidak akan meninggalkan engkau"


[Ulangan 31:6]

"Segala perkara dapat kutanggung di dalam Dia yang memberi kekuatan kepadaku"

[Filipi 4:13]

"Sebab Aku ini mengetahui rancangan-rancangan apa yang ada pada-Ku mengenai kamu, demikianlah firman TUHAN, yaitu rancangan damai sejahtera dan bukan rancangan kecelakaan, untuk memberikan kepadamu hari depan yang penuh harapan."

[Yeremia 29:11]



"Sebab TUHAN, Dia sendiri akan berjalan didepanmu, Dia sendiri akan menyertai engkau, Dia tidak akan membiarkan engkau dan tidak akan meninggalkan engkau; janganlah takut dan janganlah patah hati."

[Ulangan 31:8]

"Lebih Cepat Lebih Baik"

SANWACANA

Puji Tuhan, penulis memanjatkan puji syukur kehadiran Tuhan Yesus yang telah memberikan Kasih dan Anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir ini.

Tugas akhir dengan judul “**RANCANG BANGUN KOMPUTER ANALOG UNTUK SIMULASI KARAKTERISTIK PENGENDALI PID**” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Dalam masa perkuliahan dan penelitian, penulis mendapat banyak hal baik berupa dukungan, semangat, motivasi dan banyak hal yang lainnya. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M.P. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Suharno, M.Sc, Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Herman H Sinaga, M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Agus Trisanto, Ph.D. selaku pembimbing utama skripsi yang telah dengan sabar membimbing, memberikan ilmunya, motivasi dalam hidup dan arahnya di sela-sela kesibukan beliau yang sangat padat.

5. Bapak Sumadi, S.T.,M.T. selaku pembimbing pendamping yang telah membimbing, memberi ilmunya, cerita inspiratif, arahan spiritual serta sarannya dalam individu menyusun penelitian ini.
6. Bapak Syaiful Alam, S.T.,M.T., selaku dosen penguji skripsi yang telah memberikan saran, kritikan yang sangat membangun dalam penyusunan skripsi.
7. Ibu Yetti Yuniati, S.T.,M.T., selaku pembimbing akademik, yang sabar dalam membimbing dan sangat baik dalam membantu dari awal perkuliahan sampai saat ini.
8. Segenap dosen dan pegawai di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu dan wawasan yang tak terlupakan oleh penulis.
9. Ayahanda Togi Samosir (Bapak), Ibunda Tince Hutapea (Ibu). Tiada terkira jasa yang kalian berikan, hanya doa dan sedikit usaha meraih presatasi sekarang dan kedepannya serta menyelesaikan kewajiban agar terpancar senyum bangga di wajah kalian yang sangat saya impikan.
10. Keluarga tercinta Opung Kurus, Keluarga Lae Sitanggang & Kak Theresia, Keluarga Lae Gultom & Kak Manda, adik tercinta Erina samosir dan semua keluarga yang selama ini telah memberikan kasih sayang, semangat, doa, nasihat serta dukungan dalam segala aspek.
11. Mama susi, Dek aan S.Psi, dan dr. Putri Ayu D.S Yuwono yang selama ini tidak pernah lelah memberikan kasih sayang, semangat, doa, nasihat serta dukungan kepada penulis.
12. Teman diskusi saya sekaligus pembimbing diluar dosen saudara Suwanto, Yayan Alfianto, Anju Yosua, Gifinri Pratama Sinaga, Fahreza, Eko Pebriarto, Adam, Abiyu, Brian Sitorus, yang menyempatkan waktunya disela-sela kerjanya untuk berdiskusi dengan penulis.

13. Kakak dan adik rohani dalam pelayanan, Paramitha Uli S.E dan Magdalena Richa S.Pd yang selalu memberikan semangat dan dukungan doa.
14. Teman-teman p3mi natar dan pengurus p3mi distrik terimakasih atas dukungan doanya selama ini.
15. Teman dan rekan seperjuangan laboratorium Konversi (Yayan, Surya, Dharma, Lifani, Hekson, Payan, Bangkit, Abi) terimakasih atas cerita, tawa, berbagi ilmu, pengalaman dan silaturahmi
16. Teman-teman keluarga besar ELANG (Elektro Angkatan) 2012 terimakasih atas segala yang telah diberikan.
17. Abang dan kakak rohani Kelompok Kecil, keluarga Bang Muara Siagian dan kak Duma, Bang Harry Pasaribu, Bang Richard, terimakasih buat dukungan doa dan motivasi yang diberikan kepada penulis.

Penulis meminta maaf atas segala kesalahan dan ketidaksempurnaan dalam penyusunan tugas akhir ini. Saran dan kritik membangun sangat diharapkan penulis demi kebaikan di masa yang akan datang. Terimakasih

Bandar Lampung, 6 Agustus 2019

Penulis,

Erwin Deby

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|---|---------|
| DAFTAR ISI | i |
| DAFTAR GAMBAR | iii |
| DAFTAR TABEL | v |
| I. PENDAHULUAN | |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.3 Manfaat Penelitian | 3 |
| 1.4 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.5 Batasan Masalah | 4 |
| 1.6 Hipotesis | 4 |
| 1.7 Sistematika Penulisan | 4 |
| II. TINJAUAN PUSTAKA | |
| 2.1 Komputer Analog | 6 |
| 2.2 Model Matematika | 8 |
| 2.3 <i>Operational Amplifier (Op-amp)</i> | 8 |
| 2.4 Kontroler <i>Proportional, Integral, Derivative (PID)</i> | 11 |
| 2.5 <i>Proportional</i> | 13 |
| 2.6 <i>Integral</i> | 14 |
| 2.7 <i>Derivative</i> | 15 |
| 2.8 <i>Step Function</i> | 16 |
| 2.9 Pembagi tegangan (<i>Voltage Divider</i>) | 17 |
| 2.10 Rangkaian <i>Inverting dan Non-Inverting</i> | 18 |
| 2.11 <i>Attenuator</i> | 20 |
| III. METODE PENELITIAN | |
| 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian | 21 |
| 3.2 Alat dan Bahan Penelitian | 21 |
| 3.3 Tahap-tahap Penelitian | 22 |
| 3.4 Diagram Blok Sistem | 26 |
| 3.5 Pengujian simulasi matlab dan simulasi komputer | 27 |
| 3.6 Spesifikasi Sistem | 28 |

| | |
|--|----|
| IV. HASIL DAN PEMBAHASAN | |
| 4.1 Hasil Perancangan Simulasi | 29 |
| 4.2 Pengujian Rancang Bangun Komputer Analog | 30 |
| 4.2.1 Pengujian Menggunakan Simulasi Matlab | 30 |
| Pengujian <i>Proportional</i> | 30 |
| Pengujian <i>Integral</i> | 36 |
| Pengujian <i>Derivative</i> | 42 |
| 4.2.2 Pengujian Menggunakan Alat Komputer Analog | 48 |
| Pengujian <i>Proportional</i> | 50 |
| Pengujian <i>Integral</i> | 59 |
| Pengujian <i>Derivative</i> | 60 |
| V. KESIMPULAN | |
| 5.1 Kesimpulan | 61 |
| 5.2 Saran | 62 |

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

| Gambar | Halaman |
|--|---------|
| 2.1 Simbol Skematik <i>Op-amp</i> | 9 |
| 2.2 <i>Operational Amplifier Circuit</i> | 10 |
| 2.3 Diagram Blok <i>Laplace</i> | 13 |
| 2.4 Rangkaian <i>Proportional</i> | 14 |
| 2.5 Rangkaian <i>Integral</i> | 14 |
| 2.6 Rangkaian <i>Derivative</i> | 15 |
| 2.7 Rangkaian <i>Step Function</i> | 17 |
| 2.8 Pembagi Tegangan | 17 |
| 2.9 Rangkaian <i>Inverting</i> | 18 |
| 2.10 Rangkaian <i>Non-inverting</i> | 19 |
| 3.1 Diagram Alir Simulasi..... | 24 |
| 3.2 Diagram Alir Desain Elektrik..... | 25 |
| 3.3 Diagram Blok Sistem | 26 |
| 3.4 Rangkaian PID simulasi Matlab | 26 |
| 3.5 Alur Sistem..... | 27 |
| 4.1 Skematik Pengendali PID | 29 |
| 4.2 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Proportional</i> | 30 |
| 4.3 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 20K Ω | 31 |
| 4.4 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 40K Ω | 32 |
| 4.5 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 60K Ω | 33 |
| 4.6 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 80K Ω | 34 |
| 4.7 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 100K Ω | 35 |
| 4.8 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Integral</i> Variabel 100 Ω | 36 |
| 4.9 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Integral</i> Variabel 200 Ω | 37 |
| 4.10 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Integral</i> Variabel 400 Ω | 38 |
| 4.11 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Integral</i> Variabel 600 Ω | 39 |
| 4.12 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Integral</i> Variabel 800 Ω | 40 |
| 4.13 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Integral</i> Variabel 1K Ω | 41 |
| 4.14 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Derivative</i> Variabel 100 Ω | 42 |
| 4.15 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Derivative</i> Variabel 200 Ω | 43 |
| 4.16 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Derivative</i> Variabel 400 Ω | 44 |
| 4.17 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Derivative</i> Variabel 600 Ω | 45 |
| 4.18 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Derivative</i> Variabel 800 Ω | 46 |
| 4.19 Pengujian Simulasi Rangkaian <i>Derivative</i> Variabel 1K Ω | 47 |
| 4.20 Komputer Analog Rangkaian <i>Proportional</i> | 48 |
| 4.21 Komputer Analog Rangkaian <i>Integral</i> | 48 |
| 4.22 Komputer Analog Rangkaian <i>Derivative</i> | 48 |
| 4.23 Komputer Analog PID..... | 49 |
| 4.24 Osiloskop dan <i>Function Generator</i> | 49 |
| 4.25 Pengujian Alat Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 20K Ω Sinus.. | 50 |

| | |
|---|----|
| 4.26 Pengujian Alat Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 60K Ω Sinus... | 51 |
| 4.27 Pengujian Alat Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 100K Ω Sinus.. | 52 |
| 4.28 Pengujian Alat Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 20K Ω Kotak... | 53 |
| 4.29 Pengujian Alat Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 60K Ω Kotak... | 54 |
| 4.30 Pengujian Alat Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 100K Ω Kotak... | 55 |
| 4.31 Pengujian Alat Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 20K Ω Segitiga. | 56 |
| 4.32 Pengujian Alat Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 60K Ω Segitiga. | 57 |
| 4.33 Pengujian Alat Rangkaian <i>Proportional</i> Variabel 100K Ω Segitiga | 58 |
| 4.34 Pengujian Alat Rangkaian <i>Integral</i> Variabel 100 Ω | 59 |
| 4.35 Pengujian Alat Rangkaian <i>Integral</i> Variabel 100 Ω | 60 |

DAFTAR TABEL

| Tabel | Halaman |
|--|---------|
| 2.1 Karakteristik <i>Op-amp</i> | 9 |
| 2.2 Karakteristik PID..... | 12 |
| 3.1 Pengujian Gelombang Sinusoidal 1 Vpp | 27 |
| 3.2 Pengujian Gelombang Kotak 1 Vpp | 27 |
| 3.3 Pengujian Gelombang Segitiga 1 Vpp | 28 |

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam dunia pendidikan sistem kendali merupakan salah satu mata kuliah yang sulit untuk dipelajari, oleh karena itu sangat perlu sebuah alat yang dapat membantu mahasiswa dalam melakukan kegiatan praktikum serta dapat memberikan pemahaman yang baik sehingga mahasiswa dapat lebih mudah dalam melakukan analisa saat praktikum.

Sistem kontrol banyak diaplikasikan pada sistem-sistem analog yang mengalami perubahan terhadap waktu, sehingga hal inilah yang membuat mahasiswa mengalami kesulitan dalam hal mendapatkan penyelesaian dari sistem-sistem analog tersebut seperti tegangan, frekuensi dan lain sebagainya. Diperlukan modul praktikum dengan perangkat keras yang terintegrasi dengan perangkat lunak yang dapat ditampilkan melalui monitor. Hasil yang akan ditampillkan berupa grafik respon dari rangkaian modul komputer analog, sehingga alat ini dapat menambah wawasan mahasiswa terhadap bidang sistem kontrol.

Seiring dengan perkembangan zaman telah dibuat komputer analog yang digunakan untuk mensimulasikan pengendalian penyearah jembatan gelombang penuh tiga fasa. Studi pendahuluan hasil-hasil penelitian

tersebut diatas dapat dijadikan dasar dalam membangun sebuah komputer analog.

Komputer analog dapat digunakan untuk menyelesaikan beberapa permasalahan dibidang sistem komputer. Cara yang digunakan adalah dengan mengubah terlebih dahulu dalam bentuk model matematika, yaitu dalam bentuk persamaan *diferensial linier* dan realisasinya menggunakan komponen elektronika jenis *Op-Amp*. [1]

1.2 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian yang akan dilakukan antara lain :

- Merancang komputer analog untuk simulasi pengendali PID
- Membandingkan hasil Simulasi komputer analog dengan Simulasi digital menggunakan Matlab.

1.3 MANFAAT PENELITIAN

Manfaat penelitian yang akan dilakukan antara lain :

- Menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya mengenai komputer analog untuk simulasi sistem kendali PID yang lebih efektif baik secara ukuran perangkat maupun jenis-jenis komponen penyusun didalamnya.
- Menjadi awalan baru untuk mengembangkan komputer analog untuk simulasi sistem kendali PID dalam membantu mahasiswa saat praktikum.

1.4 RUMUSAN MASALAH

- Bagaimana merancang komputer analog untuk simulasi sistem kendali menggunakan PID?
- Bagaimana membuat komponen - komponen yang diperlukan dalam bentuk *layout* untuk membangun sistem yang telah dirancang?
- Apa saja analisis yang perlu dilakukan agar komputer analog memungkinkan untuk diproduksi?

1.5 BATASAN MASALAH

Batasan masalah dalam penelitian ini antara lain :

- Simulasi menggunakan Matlab
- Kendali PID

1.6 HIPOTESIS PENELITIAN

Dari penelitian ini diharapkan menghasilkan alat yang dapat membantu mengetahui perubahan tegangan, frekuensi dan lain sebagainya

1.7 SISTEMATIKA PENULISAN

Penelitian yang akan dilakukan ini ditulis dengan sistematika seperti di bawah ini :

a. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini akan berisi uraian latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, dan penjelasan sistematika penulisan.

b. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi penjelasan hal - hal yang terkait dengan judul penelitian ini seperti komputer analog, kendali PID, dan rangkaian *operasional amplifier* (*Op-amp*).

c. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisi penjelasan tempat dan waktu penelitian, alat dan bahan yang diperlukan, tahap - tahap penelitian dalam bentuk diagram alir, spesifikasi sistem yang akan dibuat dan diagram blok sistem yang akan dibuat.

d. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi hasil yang akan tampil pada monitor, sehingga dapat dianalisis penguatannya, sinyal yang dihasilkan dan tegangan *peak to peak*.

e. BAB V KESIMPULAN

Berisi kesimpulan dari hasil dan pembahasan sekaligus jawaban dari tujuan penelitian yang telah dikemukakan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komputer Analog

Hari ini seperti penemuan lainnya, komputer juga menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan kita. Menurut fungsinya komputer terbagi dua jenis yang berbeda, yaitu komputer analog dan komputer digital. Keduanya digunakan untuk melakukan dan memproses informasi atau data dan menghasilkan hasil dalam bentuk output. Perbedaan utama antara komputer analog dan komputer digital adalah bagaimana mereka memproses dan menangani data.

Komputer analog merupakan suatu alat penghitung yang bekerja pada level analog. Seperti yang kita ketahui level digital merupakan kondisi dimana ada level tegangan *high* (tinggi) dan level tegangan *low* (rendah), yang biasanya diimplementasikan dalam bentuk bilangan biner 0 dan 1. Pada dasarnya komponen utama atau inti dari komputer analog ini sendiri adalah *Operational Amplifier* atau yang sering kita kenal dengan sebutan *Op-amp*.

Komputer analog memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan. kelebihan tersebut antara lain:

- Memiliki fungsi yang lebih spesifik pada satu bidang
- Mudah untuk dioperasikan
- Mampu menampilkan besaran yang akan diproses dalam rentang nilai tertentu

Dan memiliki kekurangan antara lain:

- Tidak berlaku universal, hanya bisa menghitung satu bidang spesialisasinya saja
- Komponen yang rumit
- Tidak multifungsi, karena spesifik pada satu bidang
- Membutuhkan daya yang cukup besar

Kendali yang akan digunakan pada komputer analog ini adalah kendali PID, dan nantinya model matematika PID akan diubah menjadi model komputer analog yang akan dibuat. Dari model komputer analog inilah kita dapat membuat komputer analog untuk simulasi karakteristik pengendali PID.

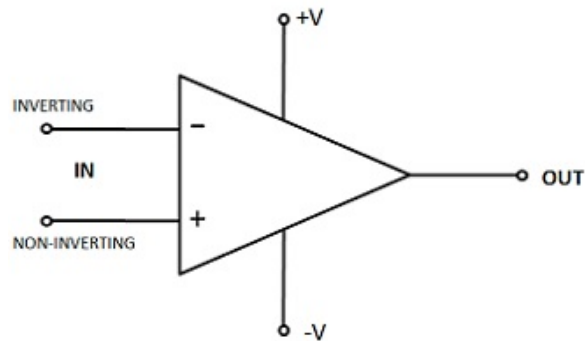
2.2 Model Matematika

Model matematika adalah deskripsi dari sistem yang menggunakan konsep-konsep matematika dan bahasa. Proses pengembangan model matematis disebut pemodelan matematika. Sebuah model matematika dapat membantu untuk menjelaskan sistem dan untuk mempelajari efek dari komponen yang berbeda, dan untuk membuat prediksi tentang perilaku.

Model matematika memiliki beberapa macam bentuk model, yaitu model matematika sistem dinamik, model statistik, model matematika persamaan diferensial, atau model matematika teori. Secara umum, model matematika termasuk model logis. Dalam banyak kasus, kualitas model matematika tergantung pada seberapa baik model matematika yang dikembangkan di sisi teoritis dan pengukuran eksperimental. Kurangnya kesepakatan antara model matematika teoritis dan pengukuran eksperimental sering menyebabkan perlunya teori untuk lebih dikembangkan lagi [2]

2.3 *Operational Amplifier (Op-amp)*

Merupakan sebuah rangkaian penguat dengan sumber terkendali (*controlled source*) yang memiliki *gain* tegangan sangat tinggi. Berikut gambar skematik *op-amp*. Berikut dibawah ini gambar 2.1 adalah gambar simbol skematik *op-amp*.



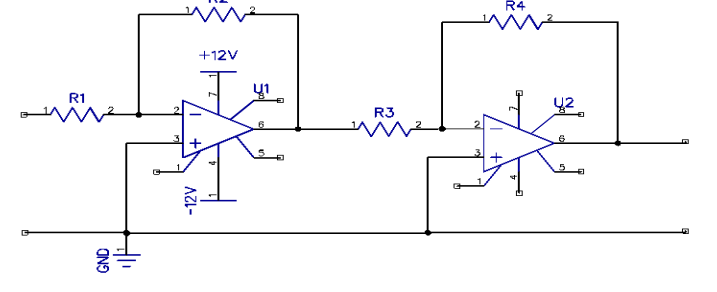
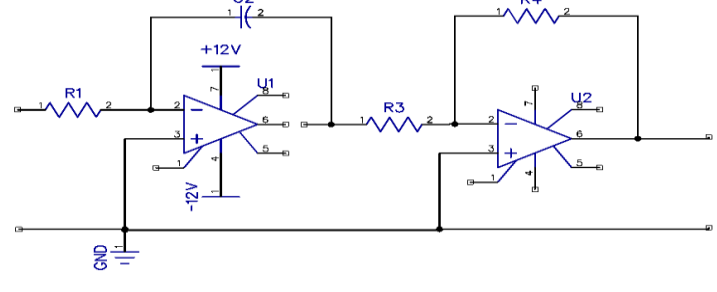
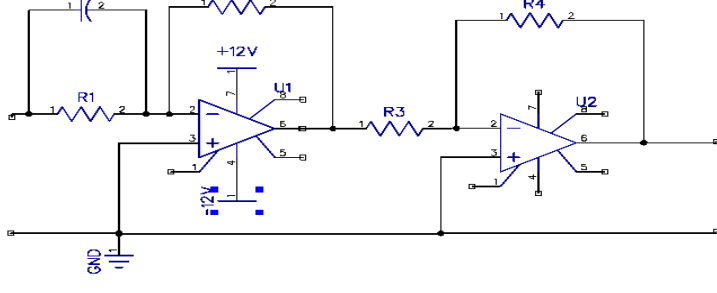
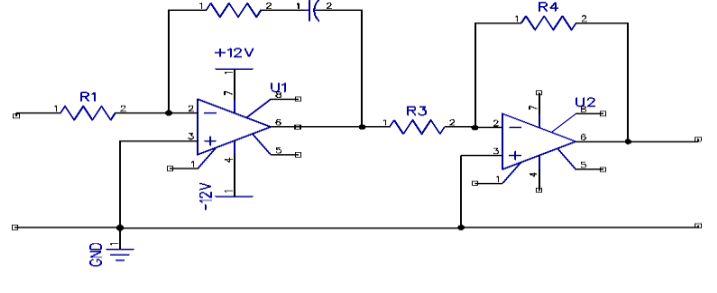
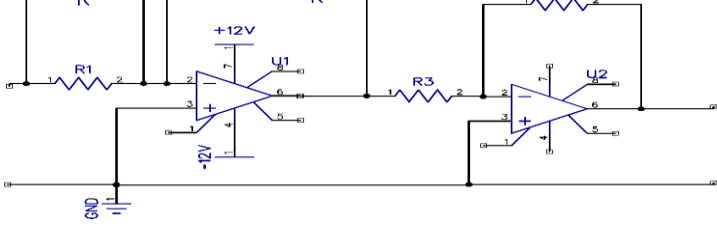
Gambar 2.1 Simbol Skematik *op-amp*

Dari gambar 2.1 diatas idealnya *op-amp* memiliki karakteristik seperti dalam tabel di bawah 2.1. pada tabel ini akan dijelaskan karakteristik dari *IC-LM741*. Namun untuk penjelasan lengkap mengenai rangkaian dan spesifikasi dari IC LM-741 dapat dilihat dalam datasheet IC-LM741 di lampiran.

Tabel 2.1 Karakteristik *Op-amp*

| Karakteristik | Simbol | Nilai Ideal |
|---|-----------|-------------|
| <i>Gain</i> tegangan keadaan kalang terbuka | A_{VOL} | ∞ |
| Impedansi masukan | Z_{IN} | ∞ |
| Nilai <i>offset</i> tegangan masukan | V_{off} | 0 |
| Nilai <i>offset</i> arus masukan | I_{off} | 0 |
| Impedansi keluaran | Z_{OUT} | 0 |

Dan berikut juga akan dijelaskan beberapa contoh gambar rangkaian *op-amp* pada gambar 2.2

| No | Control Action | $G(s) = \frac{E0(s)}{E1(s)}$ | Operational Amplifier Circuits |
|----|----------------|--|--|
| 1 | P | $\frac{R4}{R3} \frac{R2}{R1}$ |  |
| 2 | I | $\frac{R4}{R3} \frac{1}{R1 C2s}$ |  |
| 3 | PD | $\frac{R4}{R3} \frac{R2}{R1} (R1 C1s + 1)$ |  |
| 4 | PI | $\frac{R4}{R3} \frac{R2}{R1} \frac{R2C2s+1}{R2C2s}$ |  |
| 5 | PID | $\frac{\frac{R4}{R3} \frac{R2}{R1}}{R2C2s} (R1C1s+1)(R2C2s+1)$ |  |

Gambar 2.2 Operational Amplifier Circuit [7]

2.4 Kontroler Proportional, Integral, Derivative (PID)

PID merupakan sebuah mekanisme kontroler umpan balik yang biasanya dipakai pada sistem kontrol industri. Sebuah kontroler PID berfungsi sebagai penghitung nilai kesalahan sebagai beda antara *setpoint* yang diinginkan dan *variable* proses terukur yang dilakukan secara kontinyu. Proporsional – Integral - Derivative (PID) saat ini merupakan sistem kontrol yang paling banyak digunakan. Diperkirakan bahwa lebih dari 90% dari sistem kontrol di industri menggunakan kontrol PID. Dalam control PID yang cukup sering digunakan adalah *gain derivative* diatur ke nol (kontrol PI). Selama setengah abad terakhir, banyak usaha akademik dan industri telah difokuskan pada peningkatan kontrol PID. Berikut ini prinsip kerja dari kontroler PID :

- Prinsip kerja kontrol P adalah bertanggung jawab terhadap kesalahan yang sekarang, apabila nilai kesalahan besar dan positif maka keluaran kontrol juga besar dan positif.
 - Prinsip Kerja kontrol I adalah bertanggung jawab untuk nilai kesalahan yang sebelumnya dimana saat nilai keluaran kurang besar, maka kesalahan tersebut akan terakumulasi terus menerus, sehingga kontroler akan merespon juga dengan keluaran yang lebih tinggi.
 - Prinsip kerja control D adalah bertanggung jawab sebagai kontroler untuk kemungkinan yang akan datang berdasarkan *rate* perubahan waktu.
- Kontroler PID memiliki beberapa karakteristik, dan akan dijelaskan dalam tabel 2.2 mengenai karakteristiknya, diantaranya :

Tabel 2.2 Karakteristik PID [2]

| Respon Lup Tertutup | <i>Rise Time</i> | <i>Overshoot</i> | <i>Settling Time</i> | <i>S-S Error</i> |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| K_p | Menurunkan | Meningkatkan | Perubahan kecil | Mengurangi |
| K_i | Menurunkan | Meningkatkan | Meningkatkan | Mengeliminsi |
| K_d | Perubahan kecil | Menurunkan | Menurunkan | Perubahan kecil |

- Sebuah kontrol Proportional (K_p) akan memiliki efek mengurangi waktu naik dan akan mengurangi, tetapi tidak pernah menghilangkan, *error steady state*.
- Kontrol Integral (K_i) akan memiliki efek menghilangkan kesalahan *steady-state*, tapi mungkin membuat respon buruk.
- Sebuah kontrol Derivative (K_d) akan memiliki efek meningkatkan stabilitas sistem, mengurangi *overshoot*, dan meningkatkan respon.

PID bekerja dengan mengandalkan *variable* proses terukurnya oleh karena itu kontroler PID dapat memenuhi kebutuhan proses dan dapat dijelaskan dengan bagaimana responnya terhadap kesalahan, besarnya *overshoot* dari *setpoint*, dan derajat osilasi sistem. Beberapa aplikasi mungkin hanya membutuhkan dua *term* untuk memberikan kontrol yang sesuai, dapat menjadi PI, PD, P atau I. Biasanya yang paling umum menggunakan kontroler PI. [2]

2.5 Proportional

Pada sistem kendali PID salah satu yang paling sering dan paling banyak dipakai adalah kontrol Proportional (P). Kontrol P memiliki tugas antara *output* dan *error*. Kontrol P bertanggung jawab terhadap kesalahan yang sekarang, apabila nilai kesalahan besar dan positif maka keluaran kontrol juga besar dan positif.

Persamaan matematis :

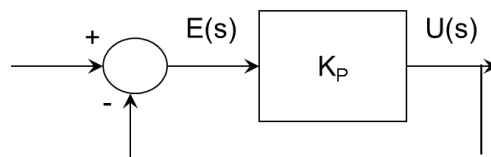
$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.1)$$

Dimana K_p : Konstanta Proporsional

Sehingga dalam *Laplace*

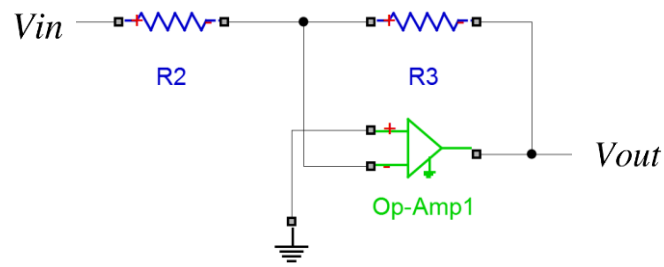
$$U(s)/E(s) = K_p \quad (2.2)$$

Diagram Blok



Gambar 2.3 Diagram Blok Pers. 2.2

Penggunaan kontrol P sendiri memiliki keterbatasan karena sifat kontrolnya yang tidak dinamik. Tetapi dalam aplikasi-aplikasi dasar sederhana kontrol P mampu untuk memperbaiki respon transien khususnya *settling time* dan *rise time*. Gambar 2.4 akan menjelaskan rumus mencari *gain*.



Gambar 2.4 Rangkaian Proportional [11]

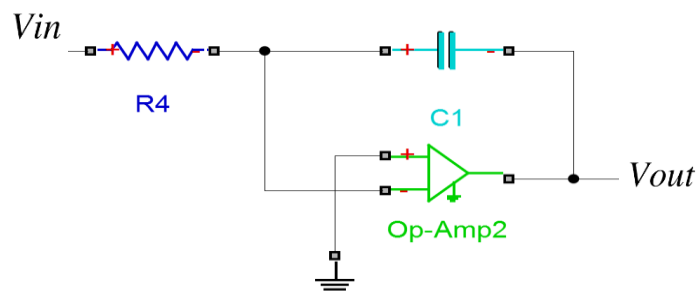
Adapun rumus untuk mencari *gain* kontrol P dari gambar diatas adalah:

$$G = - \frac{V_{out}}{V_{in}} \text{ atau } G = - \frac{R3}{R2} \quad (2.3)$$

$$V_{out} = - G. V_{in}$$

2.6 Integral

Rangkaian Integral dengan *op-amp* pada dasarnya digunakan dalam komputasi sinyal analog yang membantu dalam menyelesaikan sebuah persamaan Integral. Namun untuk melakukan komputasi sinyal analog diperlukan penguat DC yang sangat baik, dimana perubahan sedikit pada masukan akan diperkuat melalui penguatan lingkaran-terbuka. Rangkaian Integral ini juga merupakan rangkaian penguat *inverting* dengan tahanan umpan balik yang diganti dengan kapasitor. Berikut contoh rangkaian standart [2]. Gambar 2.5 akan menjelaskan rumus mencari *gain*



Gambar 2.5 Rangkaian *Integral* [11]

Adapun rumus yang didapat dari gambar diatas adalah

$$V_{in} - V_{out} = I \cdot R_4 + \frac{1}{C_1} \int I dt$$

$$V_{in}(s) - V_{out}(s) = I(s) \cdot R_4 + \frac{1}{C_1} \int I(s) dt$$

$$V_{in} = I \cdot R$$

$$\text{Laplace } V_{in}(s) = I(s) \cdot R \quad (2.4)$$

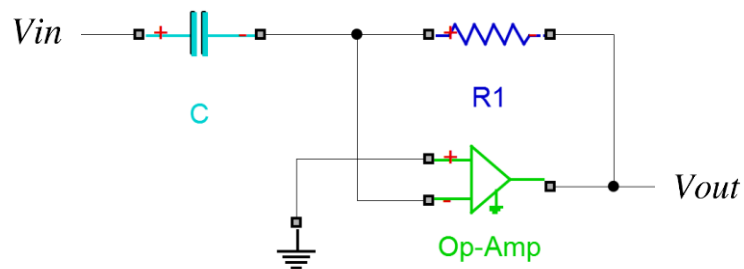
$$V_{out} = \frac{1}{C_1} \int I dt$$

$$\text{Laplace } V_{out} = \frac{1}{C_1} \int I(s) dt \quad (2.5)$$

2.7 Derivative

Rangkaian dari Derivative *op-amp* sangat mirip dengan rangkaian Integral, kecuali kapasitor dan induktor berubah di posisi *hunt*.

Tidak seperti sirkuit Integral, *op-amp* Derivative memiliki elemen resistif di umpan balik dari *output* ke *input* pembalik. Ini Memberikan stabilitas DC - merupakan faktor penting dalam beberapa aplikasi. Gambar 2.6 akan menjelaskan rumus mencari *gain*.



Gambar 2.6 Rangkaian Derivative [11]

Dari gambar diatas dapat kita ambil rumus untuk mencari nilai *gain*.

Adapun rumus sebagai berikut :

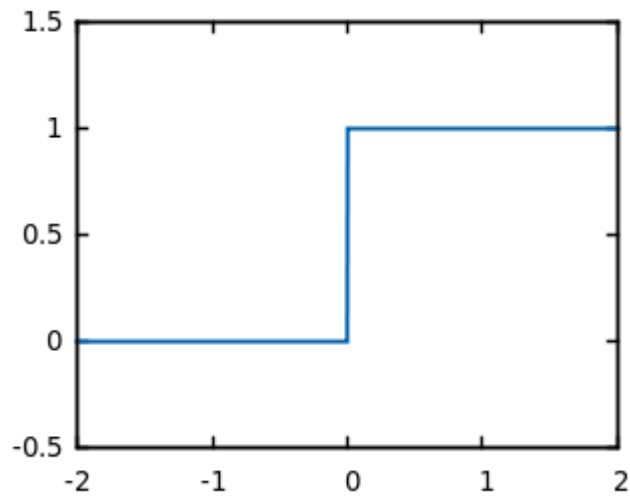
$$V_{out} = 1/2.\pi.R.C \quad (2.6)$$

2.8 Step Function

Step Function adalah fungsi yang merupakan rangkaian dari fungsi konstan terputus. Jenis fungsi ini juga disebut sebagai fungsi tangga karena ketika digambarkan, fungsi menyerupai tangga. Fungsi langkah mirip dengan fungsi *piecewise* dalam fungsi-fungsi ini terdiri dari beberapa ekspresi selama interval digabungkan menjadi satu fungsi. Sebuah *step function* ini berguna ketika ada banyak kasus untuk interval terus menerus kecil dari domain.

Step function adalah kombinasi dari satu atau lebih fungsi yang didefinisikan selama interval dibatasi, dan yang dapat terdefinisi pada titik-titik domain lain atau selama interval domain lainnya dibatasi.

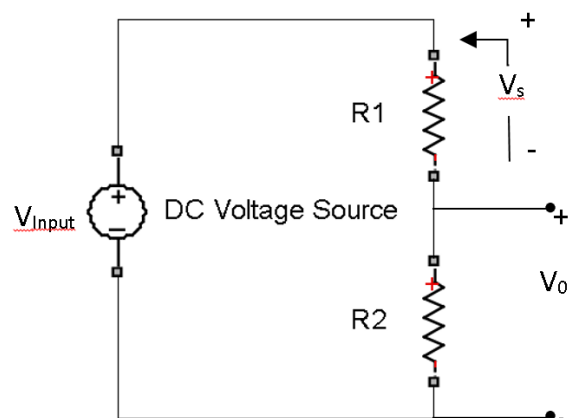
Jenis umum dari *step function* adalah di mana nilai-nilai fungsi dibatasi ke *integer* nilai-nilai *domain*. Berikut Gambar 2.7 akan menjelaskan bentuk dari *step function*



Gambar 2.7 Step Function [2]

2.9 Pembagi tegangan (*Voltage Divider*)

Rangkaian pembagi tegangan dapat dibuat menggunakan 2 buah resistor, sehingga dapat dicontohkan rangkaian pembagi tegangan dengan *output* V_o dari tegangan sumber V_1 yang menggunakan resistor pembagi tegangan R_1 dan R_2 . Gambar 2.8 akan menjelaskan rangkaian pembagi tegangan yaitu sebagai berikut



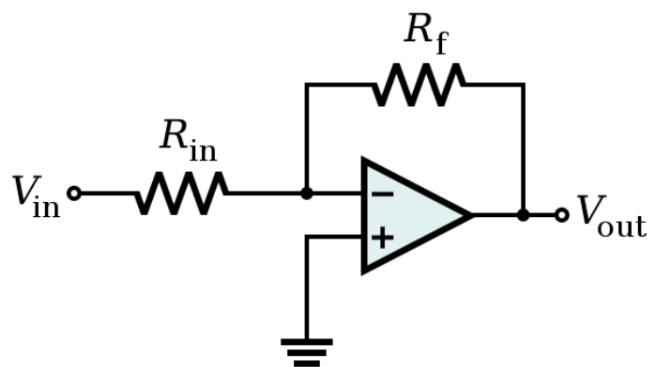
Gambar 2.8 Rangkaian Pembagi Tegangan

Biasanya rangkaian ini digunakan untuk membuat suatu tegangan referensi dari sumber tegangan yang lebih besar, titik tegangan referensi pada sensor, sehingga memberikan bias pada rangkaian penguat atau memberi bias pada komponen aktif. [1]

2.10 Rangkaian *Inverting*

Rangkaian *inverting op-amp* merupakan sebuah konfigurasi *op-amp* yang berfungsi sebagai penguat dengan diberikan *input* lebih dari satu untuk menghasilkan nilai yang linier dengan nilai penjumlahan sinyal *input* dan faktor penguatan yang ada. Rangkaian *inverting op-amp* merupakan dasar dari penjumlahan yang disusun menggunakan penguat *inverting* ataupun *non-inverting* dengan *input* lebih dari satu.

Berikut akan dijelaskan gambar rangkaian *inverting* melalui gambar 2.9 dibawah ini



Gambar 2.9 Rangkaian *Inverting* [2]

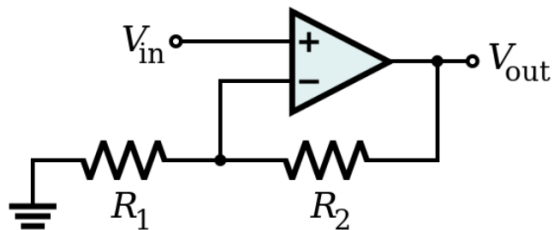
Pada operasi *adder*/penjumlahan sinyal secara *inverting*, sinyal *input* V_1 diberikan ke *line input* penguat *inverting* melalui R_{in} dan R_f . Besarnya penjumlahan sinyal *input* bernilai negatif karena operasinya membalik (*inverting*).

Besarnya penguatan tegangan (AV) setiap nilai sinyal *input* mengikuti nilai perbandingan R_f dan resistor *input* R_{in} . Dan dapat ditulis secara matematis :

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_f}{R_{in}} \quad (2.7)$$

Rangkaian *Non-Inverting*

Berikut akan dijelaskan gambar rangkaian *Non-inverting* melalui gambar 2.10 dibawah ini



Gambar 2.10 Rangkaian *Non-inverting* [2]

Rangkain *Non-Inverting* adalah rangkaian penguatan yang tidak menggunakan nilai resistansi *input*. Oleh karena itu nilai resistor *input* (R_1 , R_2) sebaiknya sama karena bertujuan untuk mendapat kestabilan dan akurasi penjumlahan sinyal yang diberikan ke rangkaian. Rangkaian penjumlah *non-inverting* sinyal *input* V_{in} diberikan jalur *input* berdasarkan

resistor masing-masing. Rumus Penguatan pada *non-inverting* dari gambar 2.9 dapat dirumuskan :

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.8)$$

2.11 Attenuator

Attenuator merupakan suatu rangkaian elektronika yang memiliki fungsi sebagai pelemah atau penurun level sinyal listrik dari suatu *output* rangkaian. Selain sebagai pelemah sinyal, *attenuator* juga digunakan sebagai penyesuai (*matching*) impedansi. Sehingga diharapkan sebagai rangkaian penyesuai impedansi, kedua tipe ini dapat selalu mengikuti perubahan-perubahan besarnya impedansi keluaran (*output*).

Karena fungsinya sebagai melemahkan/menurunkan sinyal, maka harga A selalu kurang dari satu. Biasanya dalam attenuasi digunakan kebalikan dari A, yang dinotasikan dengan a.

$$a = 1/A \text{ dengan } A = V_{out}/V_{in} \quad (2.9)$$

Dimana :

a : pelemah sinyal

A : Penguatan Sinyal

V_{out} : Tegangan output rangkaian

V_{in} : Tegangan input rangkaian

Impedansi memiliki karakteristik dasar penyesuaian terhadap *attenuator* yaitu keadaan dimana hambatan masukan (R_{in}) sama dengan hambatan beban (R_L). [2]

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro Universitas Lampung yang dimulai pada bulan Desember 2018 hingga Maret 2019.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain :

1. *Multimeter Digital*
2. *Function Generator*
3. Kapasitor
4. Resistor
5. *IC LM741*
6. *Personal Computer (PC)* atau laptop
7. Osiloskop
8. *Power Supply*
9. Papan PCB
10. Bor PCB
11. Kabel penghubung
12. Solder, timah, dan beberapa peralatan pembersih solder dan timah

3.3 Tahap – Tahap Penelitian

Secara umum penelitian yang telah dan akan dilaksanakan terbagi dalam beberapa tahap antara lain Studi literatur, Penentuan spesifikasi rancangan, perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, pembuatan alat, pengujian alat.

1. Studi Literatur

Tahap ini bertujuan untuk memahami definisi komputer analog, komponen-komponen dalam komputer analog dan kendali Proportional, Integral, Derivative (PID).

2. Penentuan Spesifikasi Rancangan

Memahami kebutuhan sumber listrik yang dibutuhkan komputer analog dan berbagai bentuk sinyal keluaran dari komputer analog.

3. Perancangan Perangkat lunak

Dalam tahap ini bertujuan untuk memahami bagaimana model matematika komputer analog akan dilakukan pengecekan menggunakan simulasi, dan apabila model matematika analog sudah benar maka akan masuk kedalam proses perancangan perangkat keras, dimana akan merangkai sistem secara keseluruhan.

4. Perancangan Perangkat Keras

Tahap ini bertujuan untuk mencari komponen – komponen yang tepat untuk menghasilkan keluaran yang sama dengan komputer analog jenis standar yang sudah digunakan diperguruan tinggi di amerika yaitu *Comdyna GP-6*.

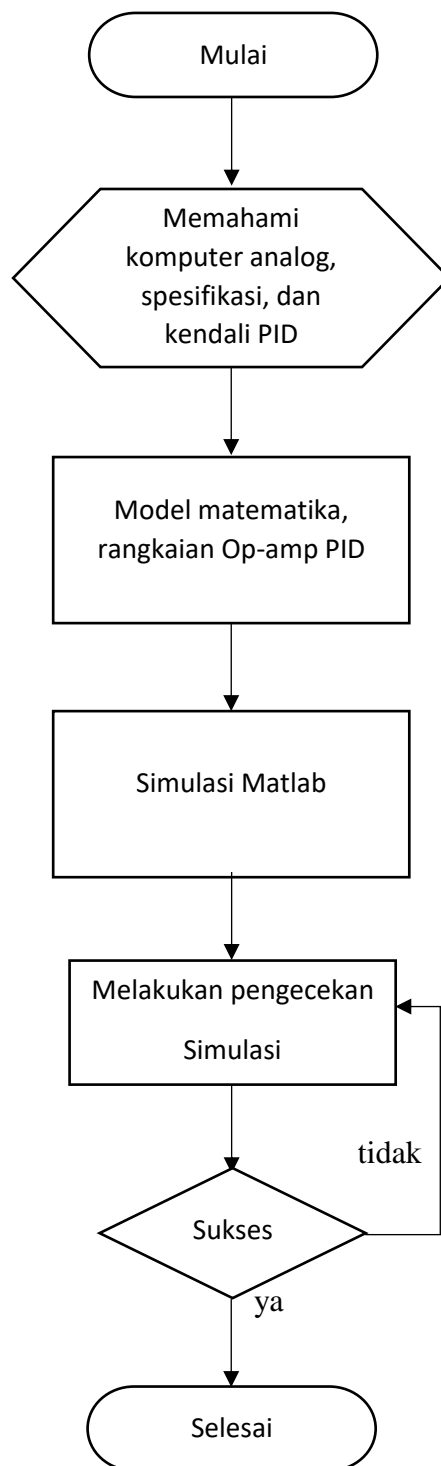
5. Pembuatan Alat

Tahap selanjutnya setelah perancangan adalah pembuatan alat berdasarkan rancangan yang telah dibuat. Adapun proses yang dilakukan pada tahap ini adalah

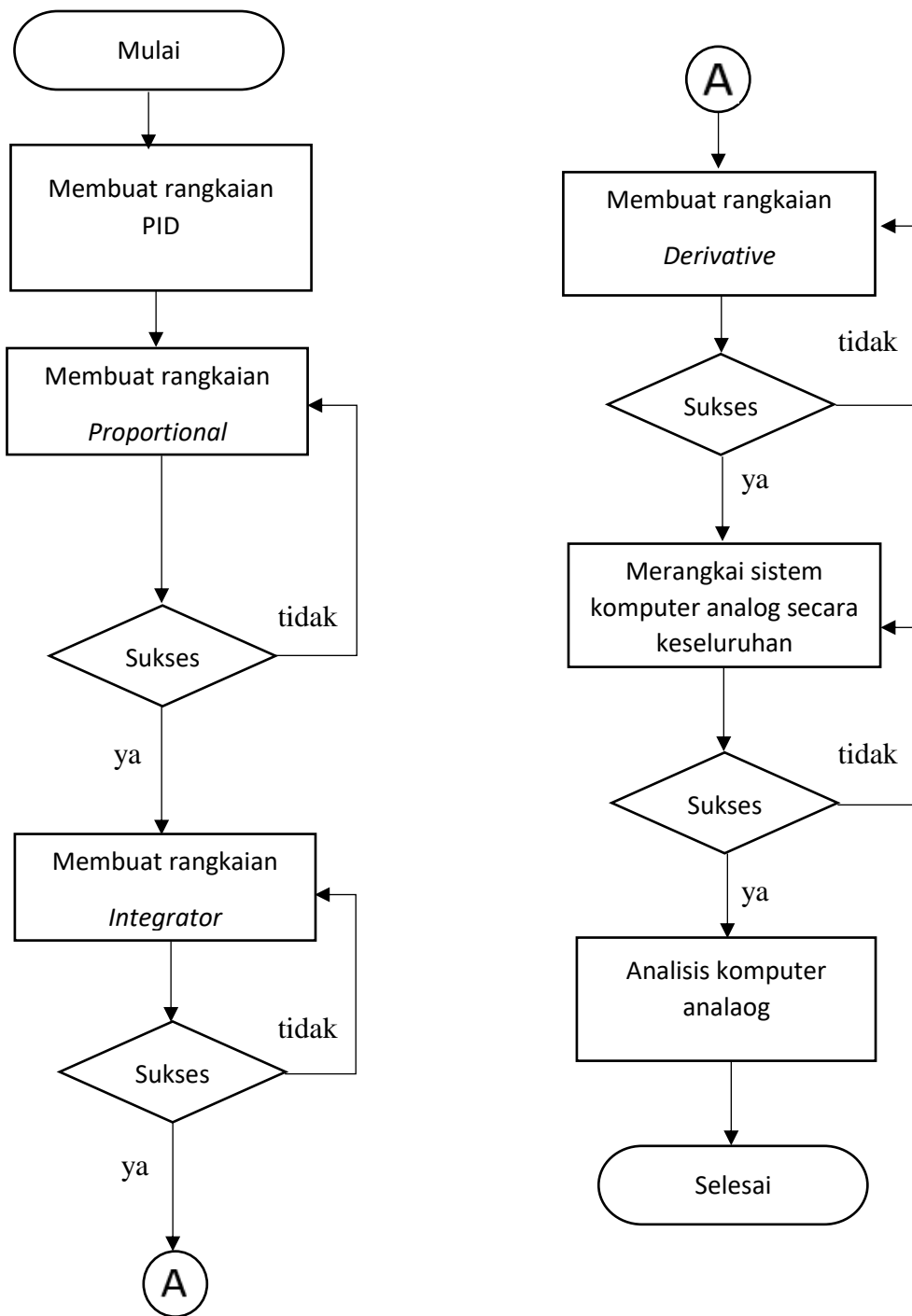
- a) Menggambar rangkaian elektronik untuk power supply pada PCB
- b) Melakukan pemasangan komponen pada PCB
- c) Melakukan penyolderan terhadap komponen dan PCB
- d) Membentuk konstruksi alat sesuai dengan bentuk yang telah dirancangkan ini bertujuan untuk mencari komponen – komponen yang tepat untuk menghasilkan keluaran yang sama dengan komputer analog jenis standar.

6. Pengujian Alat

Pengujian terhadap perancangan dan realisasi rancang bangun komputer analog ini dilakukan untuk rangkaiannya. Pengujian alat dilakukan mulai dari perancangan rangkaian Proportional. Setelah dalam pengecekan tidak ada masalah maka akan dilanjutkan pengecekan pada rangkaian Integrator secara keseluruhan, dan apabila dalam pengecekan rangkaian ini tidak ada kendala, selanjutnya dilakukan pengecekan pada rangkaian Derivative. Tahap akhir dalam pengujian alat adalah pengecekan rangkaian komputer analog secara keseluruhan. Tujuan dari pengujian alat ini sendiri yaitu untuk mengetahui apakah alat yang dibuat berhasil atau tidak dan apakah sesuai dengan spesifikasi rancangan.



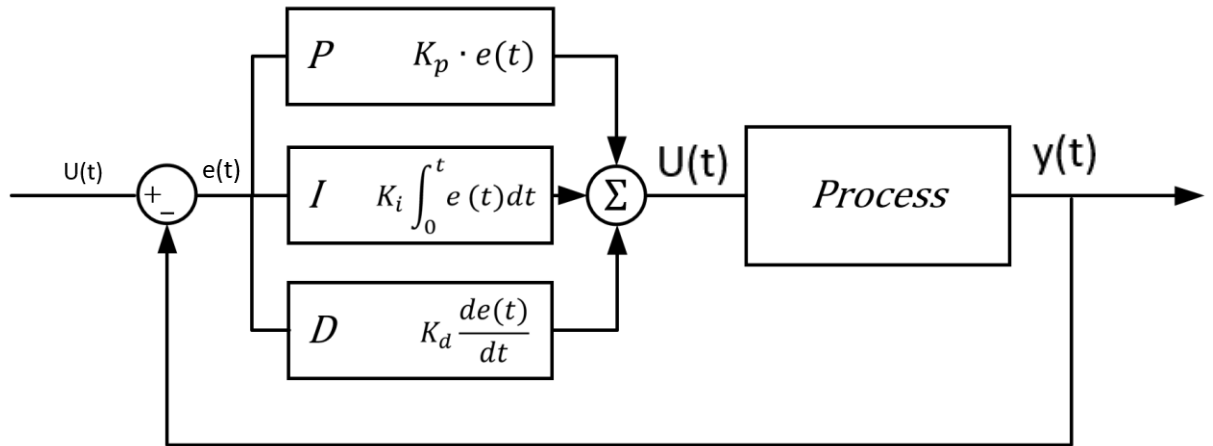
Gambar 3.1 Simulasi



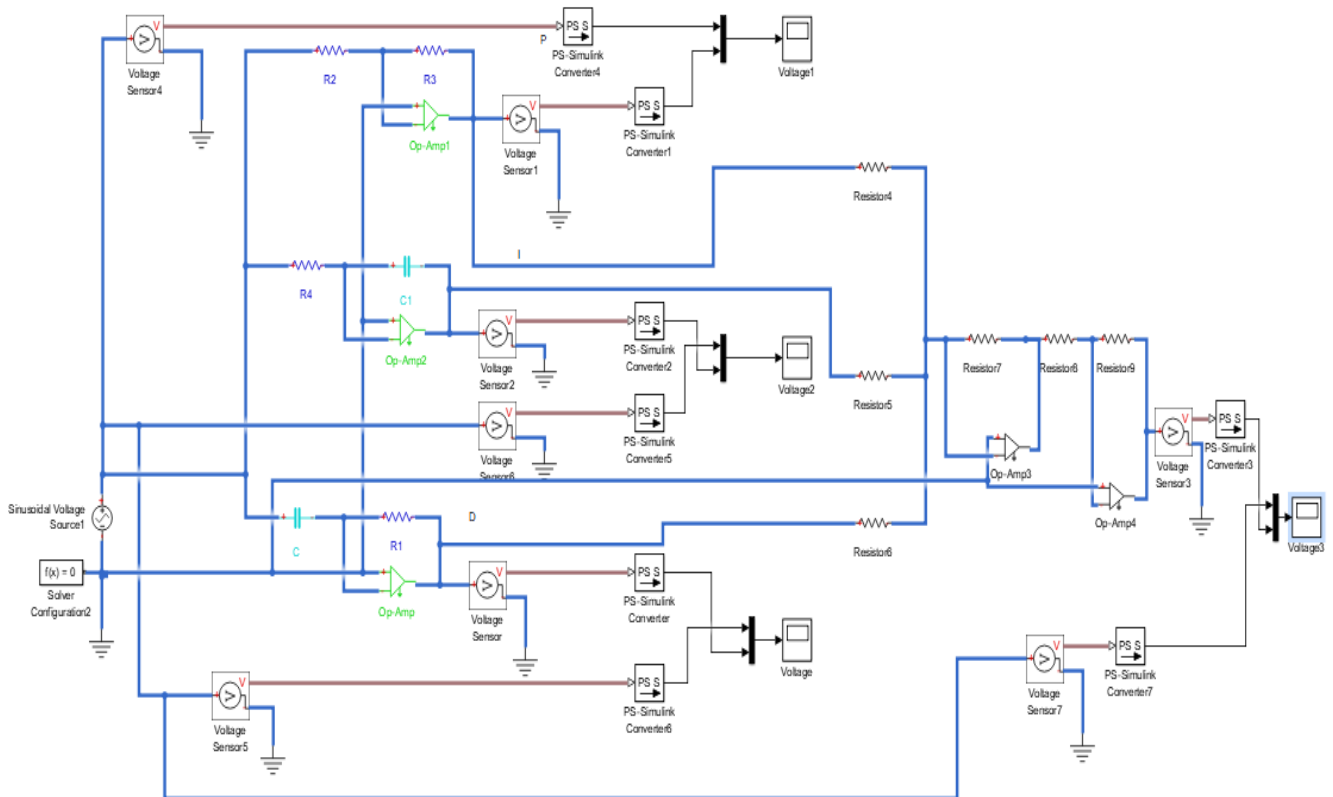
Gambar 3.2 Desain Elektrik

3.4 Diagram Blok Sistem

Secara keseluruhan, diagram blok sistem yang akan dirancang



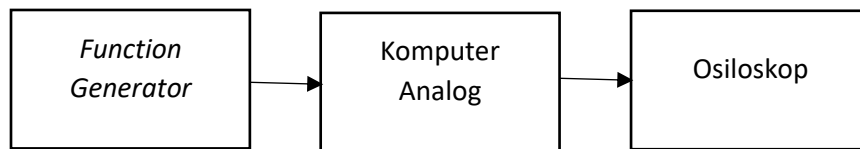
Gambar 3.3 Diagram Blok Sistem [2]



Gambar 3.4 Rangkaian PID simulasi Matlab [11]

3.5 Pengujian simulasi matlab dan simulasi komputer analog

Saat pengujian alat akan digunakan perbandingan antara hasil simulasi matlab dan juga hasil simulasi komputer analog. Pengujian akan menggunakan sumber *transfer function* dan akan dilakukan pengujian dengan 3 variabel yaitu, frekuensi, amplitudo dan juga bentuk gelombang (sinusoidal, kotak, gergaji).



Gambar 3.5 Alur Sistem

Tabel 3.1 Pengujian Gelombang Sinusoidal 1 Vpp

| No. | Penguatan | <i>Input</i> | <i>Output</i> |
|-----|-----------|--------------|---------------|
| 1 | 2x | | |
| 2 | 6x | | |
| 3 | 10x | | |

Tabel 3.2 Pengujian Gelombang Kotak 1 Vpp

| No. | Penguatan | <i>Input</i> | <i>Output</i> |
|-----|-----------|--------------|---------------|
| 1 | 2x | | |
| 2 | 6x | | |
| 3 | 10x | | |

Tabel 3.3 Pengujian Gelombang Segitiga 1 Vpp

| No. | Penguatan | <i>Input</i> | <i>Ouput</i> |
|-----|-----------|--------------|--------------|
| 1 | 2x | | |
| 2 | 6x | | |
| 3 | 10x | | |

3.6 Spesifikasi Sistem

Komputer analog ini akan diberikan tegangan melalui *step function* dengan masukan sebesar 1V. Dari komputer analog ini diharapkan dapat menganalisis sinyal keluaran pada osiloskop dengan hasil simulasi skematik sistem yang dirancang menggunakan PID.

V. KESIMPULAN

1. Panel komputer analog ini memiliki beberapa sistem kendali didalamnya antara lain 3 komponen proportional, 3 komponen integral, 3 komponen derivative, 2 komponen penjumlahan.
2. Dari hasil simulasi pada matlab dan alat komputer analog, nilai penguatan kontrol proporsional dipengaruhi nilai konstanta resistor variabelnya. semakin besar nilai konstanta proporsionalnya, maka semakin besar nilai *peak amplitude*.
3. Pada simulasi komputer analog, nilai penguatan kendali proportional yang dihasilkan komputer analog ini mencapai 10 kali penguatan.
4. Pada hasil simulasi dan pengujian alat, pada kendali integral semakin besar nilai resistor variabelnya maka gelombang yang dihasilkan akan semakin kecil mendekati tegangan 0 V pada lembahnya, dan untuk puncak gelombang tetap konstan 0 V.
5. Pada hasil simulasi dan pengujian alat, pada kendali derivative semakin besar nilai resistor variabelnya maka gelombang yang dihasilkan akan semakin besar pada lembah dan puncaknya.
6. Dari hasil simulasi digital menggunakan Matlab dan simulasi alat komputer analog, bentuk sinyal yang dihasilkan komputer analog tidak sebaik simulasi Matlab, ini dikarenakan pada simulasi komputer analog terdapat *noise* yang disebabkan berbagai macam faktor antara lain kabel penghubung, kabel probe.

Saran

1. Pada tugas akhir kali ini sangat diperlukan kondisi alat pendukung seperti osiloskop dan *function generator* dalam kondisi yang baik, karena sangat diperlukan kondisi yang baik saat pengambilan data, supaya nilai yang dihasilkan baik

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arief Budijanto. Desain Perangkat Keras Komputer Analog Berbasis Komputer Digital dan *Microcontroller*. Teknik Elektro; 2012.
- [2] <https://id.wikipedia.org/wiki/PID>
- [3] Allen PE, Holberg DR. *CMOS Analog Circuit Design*. 2nd rev. ed. New York: Oxford University Press; 2002.
- [4] Allen PE, Holberg DR. *CMOS Analog Circuit Design*. 2nd rev. ed. New York: Oxford University Press; 2002.
- [5] Imam Mashudi. Pengantar Sistem Kendali Otomatik. Bandung; 1995.
- [6] Albert Malvino, David J. Bates. *Electronic Principles*. 7th Ed. New York: McGraw-Hill; 2007.
- [7] Katsuhiko Ogata. *Modern Control Engineering*. 4th Ed. University of Minnesota; 2010.
- [8] Cristian Paul Chioncel, Petru Chioncel, Nicoleta Gillich. *PID Controller with Operational Amplifier*. Universitas Analele; 2009.
- [9] Chong G., Ang. K.H. *PID control system, analysis, design and technology*. IEEE Trans. Contr. Sys. Tech., vol.13, no.4, 2005
- [10] Ray Spiess. The Comdyna GP-6 *Analog Computer*. IEEE Control Systems Magazine; June 2005.

- [11] M.Subchan Mauludin, Andi Kurniawan. PERANCANGAN TRAINER PID ANALOG UNTUK MENGATUR KECEPATAN PUTARAN MOTOR DC. Universitas Wahid Hasyim. Semarang. 2011
- [12] Arief Budijanto, Slamet Winardi. DESAIN PERANGKAT KERAS KOMPUTER ANALOG BERBASIS KOMPUTER DIGITAL DAN MICROCONTROLLER. Universitas Widya Kartika Surabaya. 2012
- [13] Robert Paz. *Analog Computing Technique*. 2010
- [14] Andik Kurniawan. Simulasi motor DC dengan pengontrol PID Menggunakan Simulink pada MATLAB, Universitas Jember. 2014