

**ANALISIS DOMAIN WAKTU DAN KESTABILAN SISTEM
KENDALI *AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR* DENGAN
KOMBINASI PENGENDALI PADA KONFIGURASI DUA
DERAJAT KEBEBASAN**

TUGAS AKHIR

Karya Ilmiah sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan jenjang strata satu
(S-1) di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas

Oleh

Gema Azzanni Putra

NIM. 2010952007

Pembimbing

Ir. Heru Dibyo Laksono, S.T., M.T.

NIP. 197701072005011002



**Program Studi Sarjana
Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Andalas
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Analisis Domain Waktu dan Kestabilan Sistem Kendali *Automatic Voltage Regulator* Dengan Kombinasi Pengendali Pada Konfigurasi Dua Derajat Kebebasan

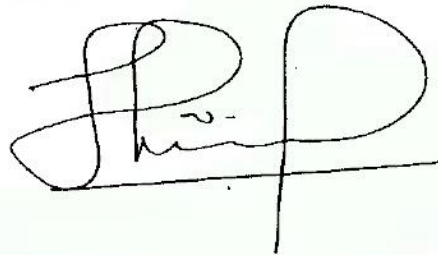
Oleh:

Gema Azzanni Putra
NIM. 2010952007

Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas

Disetujui pada Tanggal : 06 Maret 2024

Pembimbing,



Ir. Heru Dibyo Laksono, S.T, M.T.
NIP. 197701072005011002

Mengetahui:

Ketua Departemen Teknik Elektro,



Prof. Dr. Eng. Muhammad Ilhamdi Rusydi, M.T.
NIP. 198205222005011002

HALAMAN PENGHARGAAN

Puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan kemudahan kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat beserta salam tak lupa diucapkan dan dikirimkan buat junjungan umat manusia yakni Nabi Muhammad SAW. Dalam penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari dukungan segala pihak. Penulis banyak menerima saran, petunjuk, dan bimbingan serta dorongan yang bersifat moral maupun materil. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT dengan segala rahmat dan karunia-Nya yang memberikan kekuatan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Orang tua, kakak, abang, dan adik penulis yang selalu memberikan dukungan dan berupa semangat, perhatian serta doa demi kelancaran dan kesuksesan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Heru Dibyo Laksono, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan bimbingan, dorongan, dan saran kepada penulis sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan.
4. Bapak Mumuh Muharam, S.T., M.T. dan Bapak Rizki Wahyu Pratama, S.T., M.T. selaku penguji tugas akhir ini yang senantiasa memberikan saran dan masukan dalam tugas akhir ini.
5. Seluruh Bapak dan Ibu dosen beserta staf yang telah memberikan ilmunya dan membantu penulis selama berkuliah di Departemen Teknik Elektro Universitas Andalas.
6. Cantika Fajria Varoni yang selalu memberikan dukungan, dorongan, perhatian, dan semangat untuk penulis.
7. Sobat KP yang telah memberikan semangat dan motivasi verbal kepada penulis.
8. Teman satu bimbingan yang telah membantu memberikan pendapat, solusi, serta dukungan untuk penulis selama mengerjakan tugas akhir.
9. Anggota Kos Ganteng yang selalu memberikan wejangan malam hari untuk mengerjakan tugas akhir.

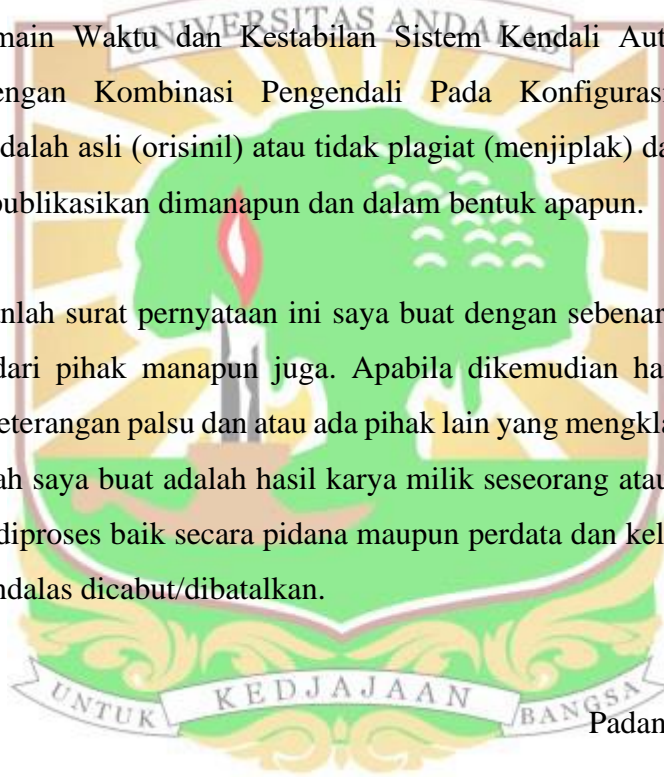
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Gema Azzanni Putra
NIM : 2010952007
Program Studi : S-1 Teknik Elektro
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir yang telah saya buat dengan judul: “Analisis Domain Waktu dan Kestabilan Sistem Kendali Automatic Voltage Regulator Dengan Kombinasi Pengendali Pada Konfigurasi Dua Derajat Kebebasan”, adalah asli (orisinil) atau tidak plagiat (menjiplak) dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan dimanapun dan dalam bentuk apapun.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya tanpa ada paksaan dari pihak manapun juga. Apabila dikemudian hari ternyata saya memberikan keterangan palsu dan atau ada pihak lain yang mengklaim bahwa tugas akhir yang telah saya buat adalah hasil karya milik seseorang atau badan tertentu, saya bersedia diproses baik secara pidana maupun perdata dan kelulusan saya dari Universitas Andalas dicabut/dibatalkan.



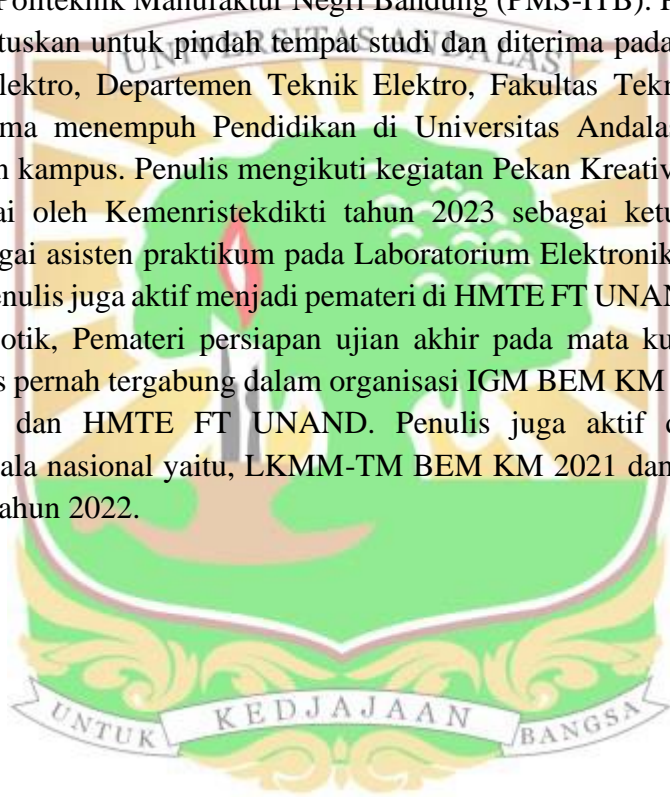
Padang, Maret 2024

Gema Azzanni Putra
NIM. 2010952007

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Gema Azzanni Putra, lahir di Kota Bukittinggi, Sumatera Barat pada tanggal 16 Juni 2001, anak ketiga dari empat bersaudara. Dilahirkan dari pasangan Bapak Friadi gustino (alm.) dan Ibu Erta. Penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di SDS Jamiyyatul Hujjaj Bukittinggi. Melanjutkan ke SMPN 2 Bukittinggi, Pada tahun 2019 penulis tamat dari SMAN 3 Bukittinggi dan ditahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di prodi Mekatronika, Politeknik Manufaktur Negri Bandung (PMS-ITB). Pada tahun 2020 penulis memutuskan untuk pindah tempat studi dan diterima pada Program Studi S-1 Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas. Selama menempuh Pendidikan di Universitas Andalas, penulis aktif dalam kegiatan kampus. Penulis mengikuti kegiatan Pekan Kreativitas Mahasiswa (PKM) didanai oleh Kemenristekdikti tahun 2023 sebagai ketua tim. Penulis menjabat sebagai asisten praktikum pada Laboratorium Elektronika Instrumentasi tahun 2022. Penulis juga aktif menjadi pemateri di HMTE FT UNAND, diantaranya Pelatihan Robotik, Pemateri persiapan ujian akhir pada mata kuliah sinyal dan sistem. Penulis pernah tergabung dalam organisasi IGM BEM KM UNAND, BEM FT UNAND, dan HMTE FT UNAND. Penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan skala nasional yaitu, LKMM-TM BEM KM 2021 dan Firetech UKM Neotelemetri tahun 2022.



Judul	Analisis Domain Waktu dan Kestabilan Sistem Kendali <i>Automatic Voltage Regulator</i> dengan Kombinasi Pengendali pada Konfigurasi Dua Derajat Kebebasan	Gema Azzanni Putra
Program Studi	Sarjana Teknik Elektro	2010952007
Fakultas Teknik Universitas Andalas		
<p>Abstrak</p> <p>Meningkatnya kebutuhan energi listrik masyarakat mendorong perhatian terhadap optimalisasi sistem kendali pada <i>Automatic Voltage Regulator</i> (AVR). Penggunaan AVR menjadi sangat penting untuk menjaga stabilitas tegangan terminal keluaran generator. Penelitian ini berfokus pada analisis domain waktu, khususnya respons <i>transien</i> dan <i>steady state</i>, serta respons kestabilan sistem AVR dengan kombinasi pengendali pada konfigurasi dua derajat kebebasan. Penelitian ini memaparkan analisis kombinasi pengendali P, I, PI, PD, PID, PIDF, dan PDF pada konfigurasi dua derajat kebebasan, dengan total 49 kombinasi pengendali. Kinerja pengendali dalam sistem AVR dinilai melalui respons keluaran dengan kriteria peralihan pada kondisi <i>transient</i>, kesalahan untuk kondisi <i>steady state</i>, dan kestabilan. Uji sistem AVR dengan pengendali ini dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Konstanta pengendali yang digunakan diperoleh melalui metode PIDTune pada MATLAB. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendali PDF-PDF paling optimal untuk sistem AVR. Penentuan ini didasarkan pada kriteria perancangan, di mana ketiga jenis pengendali ini memperlihatkan respons waktu naik <0,14 detik, waktu puncak <0,4 detik, waktu keadaan mantap <10 detik, nilai puncak <1,3 , % Lewatan maksimum <25% untuk kondisi <i>transient</i>, kesalahan keadaan mantap di bawah satuan <0,05 untuk kondisi <i>steady state</i>, dan memiliki akar-akar persamaan karakteristik bernilai negatif pada analisis kestabilan.</p> <p>Kata Kunci: <i>Automatic Voltage Regulator</i>, Sistem Kendali, Analisis Domain Waktu, Konfigurasi Pengendali, MATLAB.</p>		

<i>Title</i>	<i>Time Domain Analysis and Stability Analysis of Automatic Voltage Regulator Control System with Controller Combination in Two Degrees of Freedom Configuration</i>	Gema Azzanni Putra
<i>Mayor</i>	<i>Bachelor of Electrical Engineering</i>	2010952007
<i>Engineering Faculty Universitas Andalas</i>		
<i>Abstract</i>		
<p><i>The increasing demand for electrical energy in society has spurred attention towards optimizing the control system of the Automatic Voltage Regulator (AVR). The utilization of AVR is crucial in maintaining the stability of the output voltage terminal of the generator. This research focuses on the analysis of the time domain, specifically transient and steady-state responses, as well as the stability response of the AVR system with a combination of controllers in a two-degree-of-freedom configuration. The study presents an analysis of the combination of P, I, PI, PD, PID, PIDF, and PDF controllers in a two-degree-of-freedom configuration, totaling 49 controller combinations. The performance of the controllers in the AVR system is assessed through output responses with criteria for transient conditions, steady-state errors, and stability. The AVR system is tested with these controllers using MATLAB software. Controller constants are obtained through the PIDTune method in MATLAB. The research findings indicate that PDF-PDF controllers are the most optimal for the AVR system. This determination is based on design criteria, where these three types of controllers exhibit responses with rise time <0.14 seconds, peak time <0.4 seconds, settling time <10 seconds, peak value <1.3, maximum overshoot <25% for transient conditions, steady-state error below 0.05 for steady-state conditions, and have characteristic equation roots with negative values in stability analysis.</i></p> <p><i>Keywords: Automatic Voltage Regulator, Control System, Time Domain Analysis, Controller Configuration , MATLAB.</i></p>		

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGHARGAAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iv
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	v
Abstrak	vi
<i>Abstract</i>	vii
DAFTAR ISI.....	iv
PRAKATA.....	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR SIMBOL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
DAFTAR ISTILAH.....	xii
DAFTAR SINGKATAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Pendahuluan	4
2.2 Sistem Kendali	6
2.3 Pemodelan <i>Automatic Voltage Regulator</i> (AVR).....	7
2.3.1 Model <i>Amplifier</i>	7
2.3.2 Model <i>Exciter</i>	8
2.3.3 Model Generator	8
2.3.4 Model Sensor.....	9
2.3.5 Model AVR tanpa Sensor	9

2.3.6	Model AVR dengan Sensor.....	10
2.4	Analisis Sistem Kendali	10
2.4.1	Analisis Kesalahan	10
2.4.2	Analisis Peralihan.....	14
2.4.3	Analisis Kestabilan.....	17
2.5	Konfigurasi Pengendali	18
2.5.1	Konfigurasi Pengendali Tunggal.....	19
2.5.2	Konfigurasi Pengendali Dua Derajat Kebebasan	19
2.6	Pengendali PID.....	19
2.6.1	Pengendali Proporsional (P).....	20
2.6.2	Pengendali Integral (I).....	20
2.6.3	Pengendali Diferensial (D).....	21
2.7	PIDTune	22
BAB III METODE PENELITIAN.....		23
3.1	Studi literatur.....	23
3.2	Pemodelan Sistem AVR pada Konfigurasi Dua Derajat Kebebasan	24
3.3	Perancangan Kombinasi Pengendali Dua Derajat Kebebasan	26
3.4	Penentuan Kriteria Perancangan Sistem AVR	26
3.5	Simulasi Sistem AVR Pada Perangkat Lunak MATLAB.....	27
3.6	Analisis Sistem AVR dengan Pengendali	27
BAB IV HASIL DAN ANALISIS.....		28
4.1	Pendahuluan	28
4.2	Respons Sistem AVR Tanpa Pengendali	29
4.2.1	Respons Sistem AVR Tanpa Pengendali dan Tanpa Sensor	29
4.2.2	Respons Sistem AVR Tanpa Pengendali dan dengan Sensor.....	30
4.3	Analisis Kesalahan Respons Sistem AVR dengan Pengendali	32
4.3.1	Analisis Kesalahan Sistem AVR dengan Pengendali dan Tanpa Sensor	32
4.3.2	Analisis Kesalahan Sistem AVR dengan Pengendali dan Sensor.....	33
4.4	Analisis Peralihan Respons Sistem AVR dengan Pengendali	34
4.4.1	Analisis Peralihan Sistem AVR dengan Pengendali dan Tanpa Sensor	35
4.4.2	Analisis Peralihan Sistem AVR dengan Pengendali dan Sensor	35

4.5	Analisis Kestabilan Respons sistem AVR dengan Pengendali	36
4.5.1	Analisis Kestabilan Respons Sistem AVR dengan Pengendali dan Tanpa Sensor	37
4.5.2	Analisis Kestabilan Respons Sistem AVR dengan Pengendali dan Sensor	37
4.6	Hasil Analisis Keseluruhan Respons Sistem AVR Dengan Pengandali Tanpa Sensor	38
4.7	Hasil Analisis Keseluruhan Respons Sistem AVR Dengan Pengandali Dengan Sensor	41
BAB V SIMPULAN DAN SARAN		44
5.1	Kesimpulan	44
5.2	Saran	44
DAFTAR PUSTAKA		45
Lampiran		47



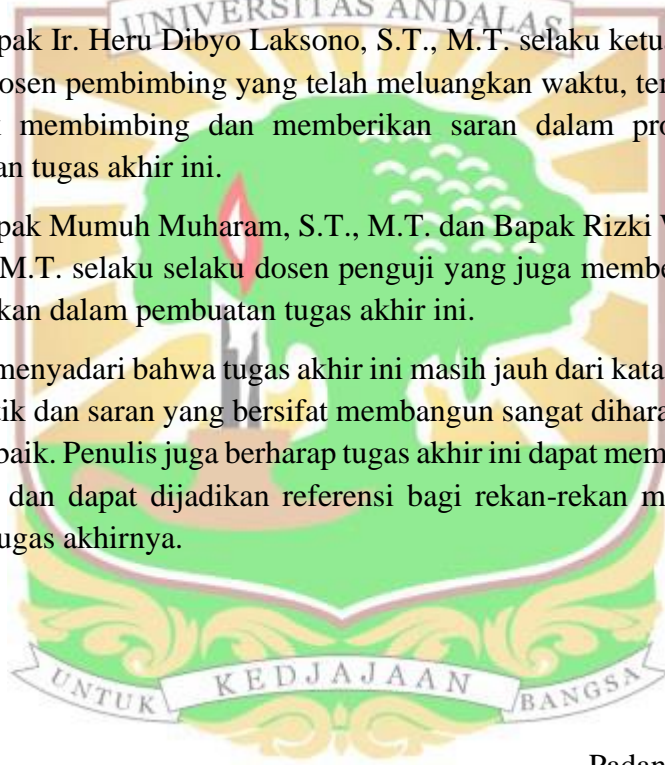
PRAKATA

Segala puji bagi Allah SWT, yang telah memberikan nikmat, kesempatan dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Analisi Domain Waktu dan Kestabilan Sistem Kendali *Automatic Voltage Regulator* Dengan Kombinasi Pengendali Pada Konfigurasi Dua Derajat Kebebasan”**.

Tugas akhir ini tersusun bukanlah karena kerja keras penulis saja, ada bantuan dari pihak lain yang turut andil dalam tersusunnya tugas akhir ini. Maka dari itu, penulis juga ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Heru Dibyو Laksono, S.T., M.T. selaku ketua Program Studi dan dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk membimbing dan memberikan saran dalam proses pembuatan laporan tugas akhir ini.
2. Bapak Mumuh Muharam, S.T., M.T. dan Bapak Rizki Wahyu Pratama, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang juga memberikan saran dan masukan dalam pembuatan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan agar dapat menjadi lebih baik. Penulis juga berharap tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan dapat dijadikan referensi bagi rekan-rekan mahasiswa dalam mengerjakan tugas akhirnya.

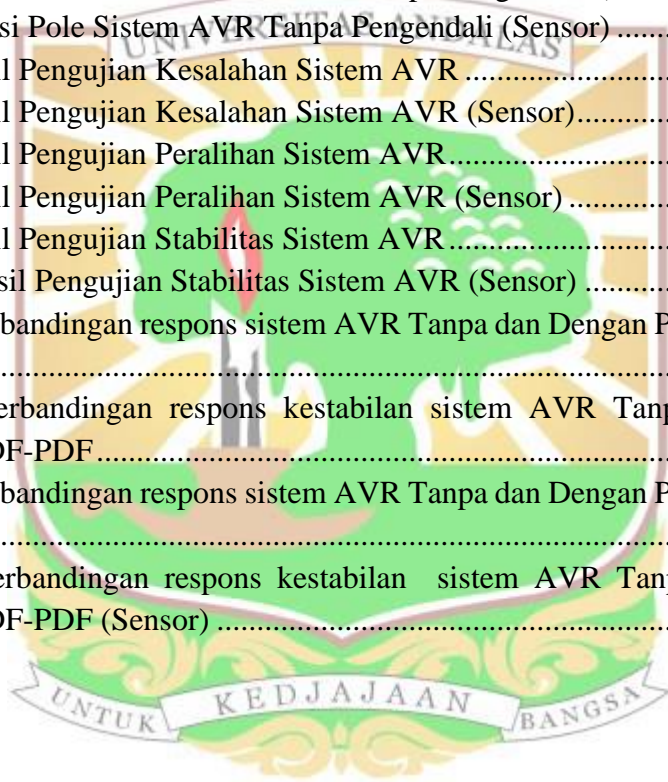


Padang, Maret 2024

Gema Azzanni Putra
NIM. 2010952007

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kesalahan Keadaan Mantap dengan berbagai jenis masukan.....	14
Tabel 2.2 Respon Perubahan Konstanta Pengendali.....	20
Tabel 2.3 Tipe-Tipe Pengendali pada PIDTune [22].....	22
Tabel 3.1 Kombinasi Pengendali	26
Tabel 3.2 Kriteria Perancangan.....	27
Tabel 4.1 Respons Peralihan Sistem AVR Tanpa Pengendali.....	29
Tabel 4.2 Posisi Pole Sistem AVR Tanpa Pengendali.....	30
Tabel 4.3 Respons Peralihan Sistem AVR Tanpa Pengendali (Sensor)	31
Tabel 4.4 Posisi Pole Sistem AVR Tanpa Pengendali (Sensor)	31
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kesalahan Sistem AVR	33
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kesalahan Sistem AVR (Sensor).....	34
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Peralihan Sistem AVR.....	35
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Peralihan Sistem AVR (Sensor)	36
Tabel 4.9 Hasil Pengujian Stabilitas Sistem AVR.....	37
Tabel 4.10 Hasil Pengujian Stabilitas Sistem AVR (Sensor)	38
Tabel 4.11 Perbandingan respons sistem AVR Tanpa dan Dengan Pengendali PDF-PDF	39
Tabel 4.12 Perbandingan respons kestabilan sistem AVR Tanpa dan Dengan Pengendali PDF-PDF	40
Tabel 4.13 Perbandingan respons sistem AVR Tanpa dan Dengan Pengendali PDF-PDF (sensor)	41
Tabel 4.14 Perbandingan respons kestabilan sistem AVR Tanpa dan Dengan Pengendali PDF-PDF (Sensor)	42



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Generator Sinkron dengan AVR	5
Gambar 2.2 Diagram Skematik Sistem AVR	5
Gambar 2.3 Diagram Blok Sistem Kendali Lingkar Tertutup	6
Gambar 2.4 Diagram Blok Amplifier	8
Gambar 2.5 Diagram Blok Exciter.....	8
Gambar 2.6 Diagram Blok Generator	9
Gambar 2.7 Diagram Blok Sensor	9
Gambar 2.8 Diagram Blok AVR Lingkar Tertutup	10
Gambar 2.9 Diagram Blok AVR dengan Sensor.....	10
Gambar 2.10 Spesifikasi Tanggapan Peralihan	17
Gambar 2.11 Konfigurasi Pengendali Tunggal.....	19
Gambar 2.12 Konfigurasi Pengendali Dua Derajat Kebebasan.....	19
Gambar 2.13 Diagram blok Pengendali P.....	20
Gambar 2.14 Diagram Blok Pengendali I.....	21
Gambar 2.15 Diagram Blok Pengendali D	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian.....	23
Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem AVR dengan Umpan Balik.....	24
Gambar 3.3 Diagram Blok Sistem AVR dengan pengendali tanpa Sensor	25
Gambar 3.4 Diagram Blok Sistem AVR dengan Pengendali dan Sensor.....	26
Gambar 3.5 Tampilan Perancangan Simulasi AVR Pada MATLAB	27
Gambar 4.1 Respons Peralihan Sistem AVR Tanpa Pengendali	29
Gambar 4.2 Posisi Pole Sistem AVR Tanpa Pengendali	30
Gambar 4.3 Respons Peralihan Sistem AVR Tanpa Pengendali (Sensor).....	31
Gambar 4.4 Posisi Pole Sistem AVR Tanpa Pengendali (Sensor)	32
Gambar 4.5 Respons <i>Transient</i> dan <i>Steady State</i> Sistem AVR	39
Gambar 4.6 Respons Kestabilan Sistem AVR Dengan Pengendali PDF-PDF.....	40
Gambar 4.7 Respons <i>Transient</i> dan <i>Steady State</i> Sistem AVR (sensor)	42
Gambar 4.8 Respons Kestabilan Sistem AVR Dengan Pengendali PDF-PDF.....	43

DAFTAR SIMBOL



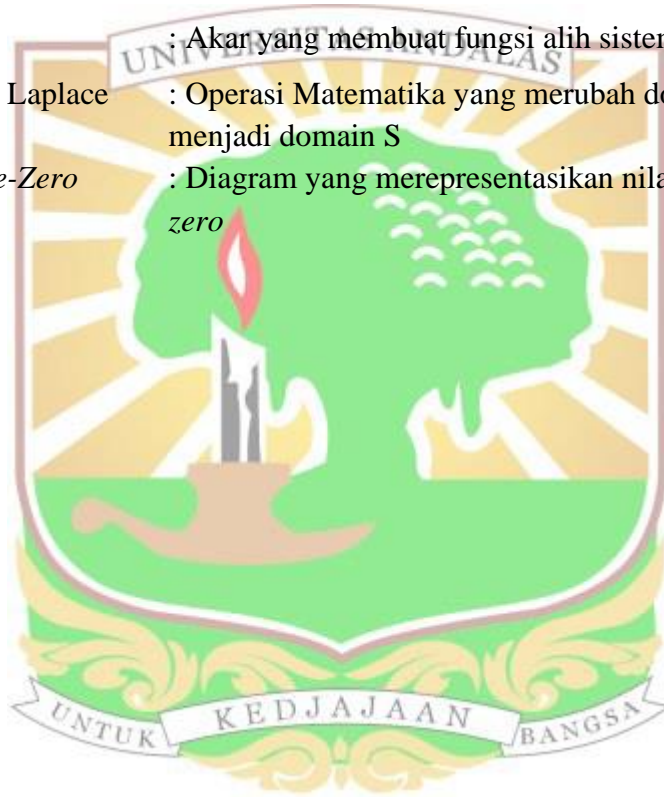
$R(s)$: Sinyal Masukan
$E(s)$: Sinyal Kesalahan
$C(s)$: Sinyal Keluaran
$B(s)$: Sinyal Umpan Balik
$G(s)$: Sistem <i>Plant</i>
$H(s)$: Sistem Umpan Balik
K_A	: Faktor Penguatan <i>Amplifier</i>
K_E	: Faktor Penguatan <i>Exciter</i>
K_G	: Faktor Penguatan Generator
T_A	: Konstanta Waktu <i>Amplifier</i>
T_E	: Konstanta Waktu <i>Exciter</i>
T_G	: Konstanta Waktu Generator
V_t	: Sinyal Keluaran Sistem AVR
V_{ref}	: Sinyal Referensi Sistem AVR
V_e	: Sinyal Kesalahan Sistem AVR
V_r	: Sinyal Keluaran <i>Amplifier</i>
V_f	: Sinyal Keluaran <i>Eksiter</i>
C_1	: Konstanta Pengendali 1
C_2	: Konstanta Pengendali 2
K_p	: Konstanta Kesalahan Posisi
K_v	: Konstanta Kesalahan Kecepatan
K_a	: Konstanta Kesalahan Percepatan
e_{ss}	: Kesalahan Keadaan Mantap
Σ	: Operator Penjumlahan
ζ	: Rasio Redaman
ω_n	: Frekuensi Teredam
t_r	: Waktu Naik
t_p	: Waktu Puncak
t_s	: Waktu Keadaan Mantap
y_p	: Nilai Puncak
M_p	: Lewatan Maksimum

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Data Hasil Analisis Kesalahan Sistem AVR dengan Pengendali ...	42
Lampiran B Data Hasil Analisis Kesalahan pada Sistem AVR (Sensor) dengan Pengendali	43
Lampiran C Data Hasil Analisis Peralihan pada Sistem AVR dengan Pengendali	44
Lampiran D Data Hasil Analisis Peralihan pada Sistem AVR (Sensor) dengan Pengendali	46
Lampiran E Data Hasil Analisis Kestabilan pada Sistem AVR dengan Pengendali	48
Lampiran F Data Hasil Analisis Kestabilan pada Sistem AVR (Sensor) dengan Pengendali	55
Lampiran G Grafik Respons Peralihan pada Sistem AVR dengan Pengendali ..	97
Lampiran H Grafik Respons Peralihan pada Sistem AVR (Sensor) dengan Pengendali	113
Lampiran I Grafik Posisi Pole pada Sistem AVR dengan Pengendali	130
Lampiran J Grafik Posisi Pole pada Sistem AVR (Sensor) dengan Pengendali	146
Lampiran K Listing Program Analisis Kesalahan	163
Lampiran L Listing Program Analisis Kesalahan (Sensor)	164
Lampiran M Listing Program Analisis Peralihan	166
Lampiran N Listing Program Analisis Peralihan (Sensor)	169
Lampiran O Listing Program Analisis Kestabilan	172
Lampiran P Listing Program Analisis Kestabilan (Sensor)	175

DAFTAR ISTILAH

Kriteria Perancangan	: Nilai Ketetapan yang diinginkan dari hasil Perancangan
PIDTune	: Metode penentuan konstanta pengendali pada MATLAB
<i>Plant</i>	: Objek yang akan dikendalikan pada sistem kendali
<i>Pole</i>	: Akar yang membuat fungsi alih sistem bernilai tak hingga
<i>Zero</i>	: Akar yang membuat fungsi alih sistem bernilai nol
Transformasi Laplace	: Operasi Matematika yang merubah domain t menjadi domain S
Diagram <i>Pole-Zero</i>	: Diagram yang merepresentasikan nilai <i>pole</i> dan <i>zero</i>



DAFTAR SINGKATAN

AVR	: <i>Automatic Voltage Regulator</i>
2 DOF	: Dua Derajat Kebebasan
GGL	: Gaya Gerak Listrik
P	: Pengendali Proporsional
I	: Pengendali Integral
PI	: Pengendali Proporsional-Integral
PD	: Pengendali Proporsional-Diferensial
PID	: Pengendali Proporsional-Integral-Diferensial
PDF	: Pengendali Proporsional-Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial
PIDF	: Pengendali Proporsional-Integral-Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan energi listrik telah menjadi hal yang sangat penting dalam kehidupan sehari-hari saat ini. Energi listrik memiliki manfaat yang sangat beragam bagi manusia, seperti sebagai sumber tenaga, penerangan, penggerak perangkat, pemanas, dan banyak lagi [1]. Seiring dengan pertumbuhan populasi penduduk di Indonesia yang terus meningkat, penggunaan energi listrik juga mengalami peningkatan yang signifikan. Sejumlah upaya telah dilakukan untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat, termasuk dalam sektor industri di mana beberapa perusahaan mengandalkan pembangkit energi listrik melalui penggunaan generator[2].

Generator merupakan komponen inti dalam sistem pembangkit listrik, menghasilkan arus bolak-balik sebagai keluaran utama. Generator terdapat pada jenis pembangkit listrik tenaga uap, air, dan lainnya. Tegangan yang dihasilkan generator merupakan hasil dari perubahan fluks magnetik yang dihasilkan oleh perputaran rotor pada generator [3], [4]. Besaran beban berpengaruh terhadap keluaran daya reaktif, hal ini berdampak pada proses pembangkitan tenaga listrik menggunakan generator. Fluktuasi daya reaktif merupakan faktor utama yang mempengaruhi stabilitas tegangan terminal keluaran [5]. Ketika menyediakan daya kepada beban, penting untuk menjaga stabilitas generator agar tegangan keluaran tetap konstan sesuai kebutuhan daya reaktif beban. Untuk mengatasi ketidakstabilan generator, digunakan perangkat yang secara otomatis mengatur tegangan keluaran dengan mengendalikan arus eksitasi generator. Tegangan terminal keluaran generator dipertahankan pada *setpoint* yang telah ditetapkan menggunakan *Automatic Voltage Regulator (AVR)*[6]. Hal ini diperlukan dalam memenuhi kebutuhan daya reaktif yang memiliki stabilitas yang baik untuk beban.

Dalam mencapai kinerja yang optimal, sebuah sistem AVR harus mampu untuk menjaga nilai tegangan pada *setpoint* bahkan ketika terjadi fluktuasi beban yang dapat menghasilkan ketidak stabilan keluaran daya [6]. Meskipun demikian, sistem AVR tidak selalu mencapai tingkat optimal dalam menjaga stabilitas arus eksitasi dari generator. Oleh karena itu, diperlukan tambahan pengendali dalam sistem AVR untuk meningkatkan kinerjanya [7].

Penelitian terkait pengendali dalam sistem AVR pernah dilakukan oleh Albi Dwika [8]. Penelitian ini membahas terkait respons domain frekuensi sistem AVR menggunakan pengendali P, PI, PD, PID, PDF, dan PIDF. Penelitian sebelumnya tentang pengendali dalam sistem AVR dilakukan oleh Danar Adi [9]. Penelitian ini membahas terkait respons keadaan *transient* sistem AVR menggunakan pengendali P, PI, PD, PID, PDF, dan PIDF.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, belum terdapat analisa sistem AVR pada domain waktu di keadaan *transien* dan *steady state*. Analisis kestabilan juga belum ada pada perancangan pengendali pada sistem AVR. Penelitian tugas akhir ini berfokus pada analisis kombinasi pengendali pada konfigurasi dua derajat kebebasan untuk sistem AVR tanpa sensor dan sistem AVR dengan sensor. Analisis dilakukan dengan melihat respon dinamis yaitu pada keadaan *transient*, serta kondisi waktu tak hingga pada keadaan *steady state*, dan evaluasi pada nilai kestabilan dari sistem AVR. Analisis ini dilakukan setelah memperoleh fungsi alih sistem AVR, yang terdiri dari bagian penyusun sistem AVR yaitu: *amplifier*, *exciter*, generator, sensor*, serta bagian kombinasi pengendali berupa konstanta pengendali. Konstanta pengendali pada sistem AVR didapatkan menggunakan metode PIDTune pada perangkat lunak MATLAB. Kombinasi pengendali dua derajat kebebasan terdiri dari pengendali Proporsional (P), Integral (I), Proporsional-Integral (PI), Proporsional Derivatif (PD), Proporsional-Integral-Derivatif (PID), Proporsional-Derivatif-Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF), dan Proporsional-Integral-Derivatif-Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF). Keseluruhan sistem akan disimulasikan melalui penggunaan perangkat lunak MATLAB.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang pengendali yang paling optimal pada sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan cara mengkombinasikan pengendali pada konfigurasi dua derajat kebebasan untuk sistem AVR tanpa sensor dan AVR dengan sensor?
2. Bagaimana kinerja dari masing-masing kombinasi pengendali dalam mencapai respon optimal pada domain waktu dengan analisis peralihan dan kesalahan, serta respon kestabilan sistem AVR?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Merancang pengendali yang optimal pada AVR menggunakan simulasi melalui perangkat lunak MATLAB
2. Melakukan analisis kinerja kombinasi dalam mencapai respon optimal pada domain waktu dengan analisis peralihan, kesalahan, dan analisis kestabilan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini dijelaskan untuk membatasi cakupan topik sehingga penelitian ini lebih memiliki fokus yang jelas dan tujuan penelitian dapat dicapai secara efisien. Adapun batasan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Pada penelitian ini pengendali yang dibahas khusus untuk AVR.

2. Penentuan nilai konstanta pengendali pada sistem AVR dalam penelitian ini menggunakan metode PIDTune.
3. Analisis kombinasi pengendali terhadap respon AVR.
4. Analisis yang dilakukan adalah analisis tanggapan domain waktu (analisis kesalahan dan analisis peralihan) serta analisis kestabilan
5. Analisis dilakukan dalam tahap simulasi pada perangkat lunak MATLAB.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan informasi mengenai kombinasi pengendali yang paling optimal dalam tanggapan domain waktu dan kestabilan pada AVR. Penelitian ini memberikan informasi pengendali yang paling optimal digunakan untuk sistem AVR berdasarkan hasil kombinasi pengendali pada konfigurasi dua derajat kebebasan serta analisis domain waktu dan kestabilan. Konstanta Pengendali P, I, PI, PD, PID, PDF, dan PIDF ditentukan dengan menggunakan metode PIDTune.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori dasar yang mendukung dalam penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang penjelasan dan langkah-langkah mengenai penelitian yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Bab ini berisi tentang analisis dari penelitian yang dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran yang bisa disampaikan berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pendahuluan

Sistem eksitasi dalam generator berperan penting dalam menciptakan fluks magnet yang bervariasi seiring waktu dengan mengalirkan arus searah (DC) ke kumparan medan [10]. Prinsip dasar yang mendasari kerja sistem ini adalah bahwa saat arus searah mengalir melalui konduktor, ia menghasilkan medan magnet di sekitar konduktor tersebut. Kemudian, kumparan medan, tempat arus eksitasi disuplai, akan berputar sejalan dengan rotasi rotor generator. Selanjutnya, medan magnet yang berputar dihasilkan oleh kumparan medan ini akan diinduksi ke dalam kumparan jangkar, menciptakan fluks magnet yang nilainya berubah seiring berjalannya waktu. Perubahan fluks magnet yang mengelilingi kumparan ini menghasilkan Gaya Gerak Listrik (GGL) yang terinduksi pada ujung-ujung kumparan tersebut [11]. Hubungan antara tegangan induksi dan medan magnet yang dihasilkan oleh generator sinkron dapat dijelaskan dengan menggunakan persamaan 2.1 berikut ini:

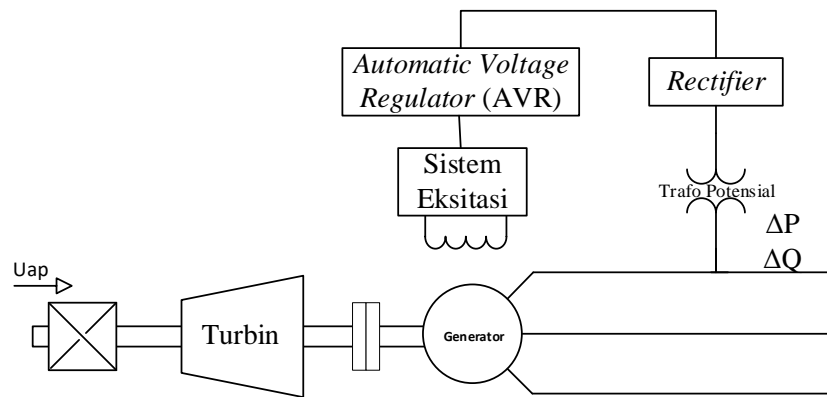
$$E = c.n.\varphi \quad (2.1)$$

Dimana :

- E = GGL Induksi (Volt)
- c = Konstanta Generator
- n = Putaran Generator (Rpm)
- φ = Fluks Magnet (Weber)

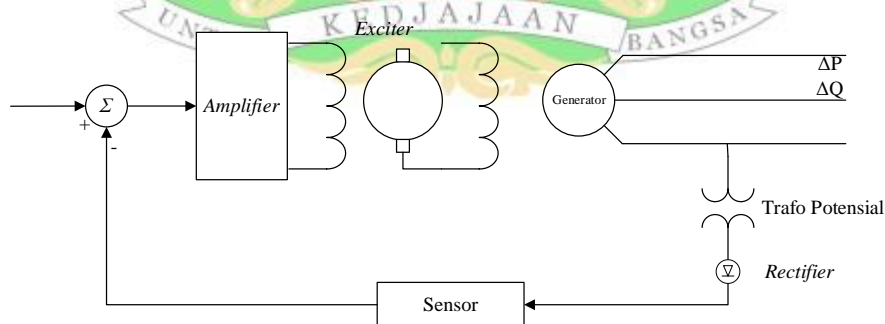
Berdasarkan persamaan 2.1, terdapat tiga variabel yang mempengaruhi gaya gerak listrik. Untuk konstanta generator merupakan nilai tetap dengan kata lain untuk nilai yang dapat diubah yaitu besarnya putaran generator dan fluks magnet. Untuk pengaturan rotasi dari generator dilakukan oleh perangkat yang dinamakan *Governor* dan pengaturan fluks magnet dilakukan oleh *Automatic Voltage Regulator (AVR)*.

Pada sebuah interkoneksi sistem tenaga listrik AVR terpasang pada generator dan memiliki kemampuan untuk secara otomatis mengatur tegangan yang dihasilkan oleh generator agar tetap stabil [10]. Dengan adanya AVR, generator dapat menjaga konsistensi tegangan keluaran, yang sangat penting untuk menjaga kestabilan sistem listrik. Gambar 2.1 merupakan skema generator dengan AVR, yang menunjukkan bagaimana perangkat ini terintegrasi untuk memastikan pasokan listrik yang handal dan aman.



Gambar 2.1 Skema Generator Sinkron dengan AVR

Pada generator sinkron AVR bekerja saat generator terhubung ke beban. Pada tahap ini arus mengalir melalui kumparan stator dengan besaran yang sesuai dengan beban yang terhubung. Arus yang mengalir pada kumparan stator menghasilkan gaya magnet yang berlawanan arah dengan garis medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan rotor. Karena adanya gaya magnet yang berlawanan ini, medan magnet dari rotor berkurang, yang pada gilirannya mengurangi tegangan yang dihasilkan oleh lilitan stator. Penurunan tegangan ini kemudian dideteksi oleh AVR, yang membandingkannya dengan tegangan referensi. Jika tegangan terminal generator lebih rendah dari tegangan referensi, AVR akan memberikan arus tambahan dengan meningkatkan tegangan eksiter. Ketika arus rotor exciter meningkat, arus yang disuplai ke rotor generator utama juga meningkat, sehingga medan magnetnya juga meningkat. Peningkatan medan magnet ini sebanding dengan perlawanan medan magnet yang dihasilkan oleh arus lilitan stator, sehingga tegangan yang dihasilkan tetap stabil[12]. Pada Gambar 2.2 merupakan diagram skematik sederhana dari sistem AVR.



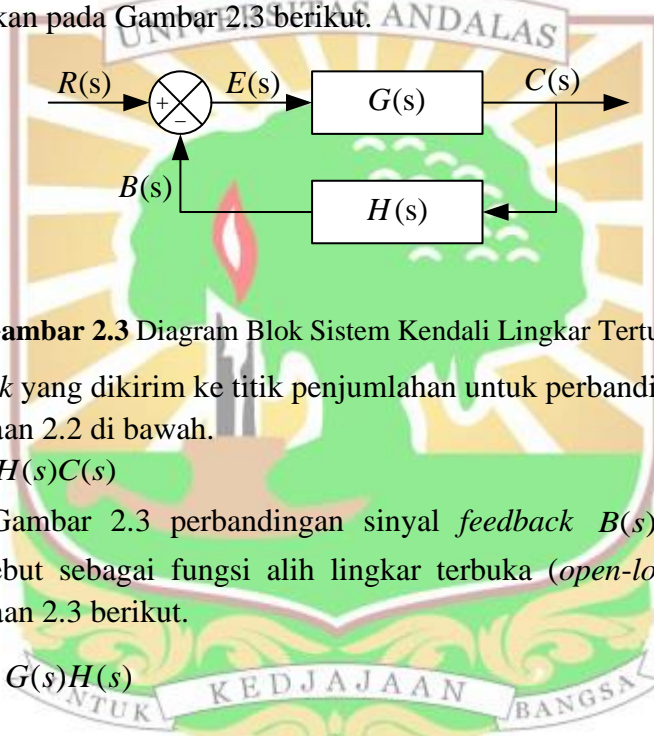
Gambar 2.2 Diagram Skematik Sistem AVR

Diagram skematik AVR menggambarkan parameter dasar dari sistem AVR yang terdiri dari *amplifier*, *exciter*, dan generator. Parameter-parameter dasar ini digunakan untuk pemodelan secara matematis sistem AVR. Pemodelan ini dibutuhkan untuk perancangan sistem kendali pada AVR.

2.2 Sistem Kendali

Sistem kendali adalah salah satu cabang ilmu yang paling penting di bidang teknik dan sains. Pada sistem kendali, teori kontrol modern membuat desain dari sistem kendali lebih simpel karena teorinya berdasarkan model aktual dari sebuah sistem kendali. Dari model fisis dapat diturunkan model matematis, yaitu hubungan keluaran (*output*) dengan masukan (*input*) suatu sistem dalam bentuk matematis, yang dalam sistem kendali biasa disebut fungsi alih (*transform function*)[13].

Untuk menunjukkan performansi fungsi dari komponen-komponen dalam sistem kendali biasa digunakan sebuah diagram yang disebut diagram blok. Blok diagram terdiri dari beberapa blok yang mempresentasikan suatu sistem, panah yang merepresentasikan sinyal, titik penjumlahan (*summing point*) dan titik percabangan (*branch point*)[14]. Diagram blok dari sistem lingkaran tertutup (*close loop*) ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Diagram Blok Sistem Kendali Lingkaran Tertutup

Sinyal *feedback* yang dikirim ke titik penjumlahan untuk perbandingan dinyatakan dalam Persamaan 2.2 di bawah.

$$B(s) = H(s)C(s) \quad (2.2)$$

Berdasarkan Gambar 2.3 perbandingan sinyal *feedback* $B(s)$ dengan sinyal kesalahan disebut sebagai fungsi alih lingkaran terbuka (*open-loop*) ditunjukkan dalam Persamaan 2.3 berikut.

$$\frac{B(s)}{E(s)} = G(s)H(s) \quad (2.3)$$

Hasil perbandingan *output* $C(s)$ terhadap sinyal kesalahan $E(s)$ ini disebut sebagai fungsi alih umpan maju (*feedforward*) ditunjukkan dalam Persamaan 2.4 di bawah.

$$\frac{C(s)}{E(s)} = G(s) \quad (2.4)$$

Hubungan keluaran $C(s)$ dan masukan $R(s)$ dari sistem pada Gambar 2.5 ditunjukkan dalam Persamaan 2.5, 2.6 dan 2.7 dibawah.

$$C(s) = G(s)H(s) \quad (2.5)$$

$$E(s) = R(s) - B(s) \quad (2.6)$$

$$E(s) = R(s) - H(s)C(s) \quad (2.7)$$

Eliminasi $E(s)$ dengan cara substitusi nilai $E(s)$ ke persamaan keluaran sehingga didapatkan Persamaan 2.8 berikut.

$$C(s) = G(s)[R(s) - H(s)C(s)] \quad (2.8)$$

atau dengan persamaan 2.9 dibawah ini.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.9)$$

Hubungan dari fungsi alih $C(s)$ dan $R(s)$ pada Persamaan 2.9 disebut fungsi alih lingkaran tertutup (*close-loop*).

2.3 Pemodelan *Automatic Voltage Regulator* (AVR)

AVR merupakan suatu instrumen yang digunakan untuk mengatur besaran tegangan dari keluaran generator agar tegangan yang dihasilkan tetap stabil. AVR bekerja dengan mendeteksi dan mengkomparasi besaran tegangan masukan dengan tegangan referensi. Pada sistem AVR komponen yang terlibat dimodelkan untuk melakukan perancangan sistem pengendali.

2.3.1 Model *Amplifier*

Amplifier yang digunakan pada sistem eksitasi dapat berupa *magnetic amplifier*, *electronic amplifier*, atau *rotating amplifier*. Pada *amplifier* tersebut terdapat faktor *gain* (K_A) dan konstanta waktu (T_A). Fungsi alih dari *amplifier* dapat ditunjukkan oleh Persamaan 2.10 sebagai berikut.

$$V_R(t) + V_R(t) \frac{dT_A}{dt} = K_A V_E(t) \quad (2.10)$$

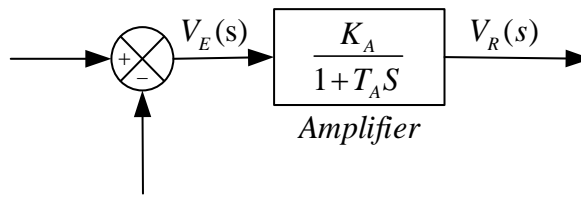
dilakukan transformasi *Laplace*, sehingga didapatkan Persamaan 2.11, 2.12 dan 2.13 berikut.

$$V_R(s) + V_R(s) T_A s = K_A V_E(s) \quad (2.11)$$

$$V_R(s) [1 + T_A s] = K_A V_E(s) \quad (2.12)$$

$$\frac{V_R(s)}{V_E(s)} = \frac{K_A}{1 + T_A s} \quad (2.13)$$

Nilai K_A berkisar dari 10-400 dan untuk T_A memiliki nilai berkisar 0,02-0,1 detik. Fungsi alih *amplifier* dalam representasi diagram blok terdapat pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Diagram Blok Amplifier

2.3.2 Model Exciter

Sistem eksitasi merupakan sistem dengan *supply direct* sebagai sebuah penguatan yang terdapat pada generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik yang memiliki tegangan *output* generatormya bergantung terhadap besar dari arus eksitasi. Dalam persamaan yang sederhana, fungsi alih dari *modern exciter* dapat dinyatakan dalam konstanta waktu tunggal T_E dan penguatan (*gain*) K_E , sehingga dapat dituliskan sebagai Persamaan 2.14 sebagai berikut.

$$V_F(t) + V_F(t) \frac{dT_E}{dt} = K_E V_R(t) \quad (2.14)$$

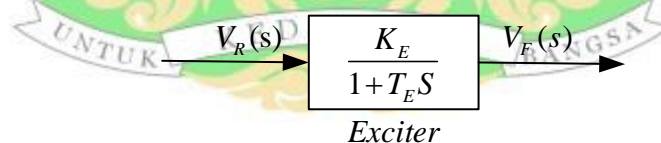
Dilakukan transformasi *Laplace*, sehingga didapatkan Persamaan 2.15, 2.16 dan 2.17 berikut.

$$V_F(s) + V_F(s) T_E s = K_E V_R(s) \quad (2.15)$$

$$V_F(s) [1 + T_E s] = K_E V_R(s) \quad (2.16)$$

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + T_E s} \quad (2.17)$$

Fungsi alih *amplifier* dalam representasi diagram blok terdapat pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Diagram Blok Exciter

2.3.3 Model Generator

Beban generator mempengaruhi tegangan terminalnya. Dalam mode linear sebuah generator dapat dinyatakan dalam sebuah fungsi alih seperti yang terdapat pada Persamaan 2.18 berikut.

$$V_t(t) + V_t(t) \frac{dT_G}{dt} = K_G V_F(t) \quad (2.18)$$

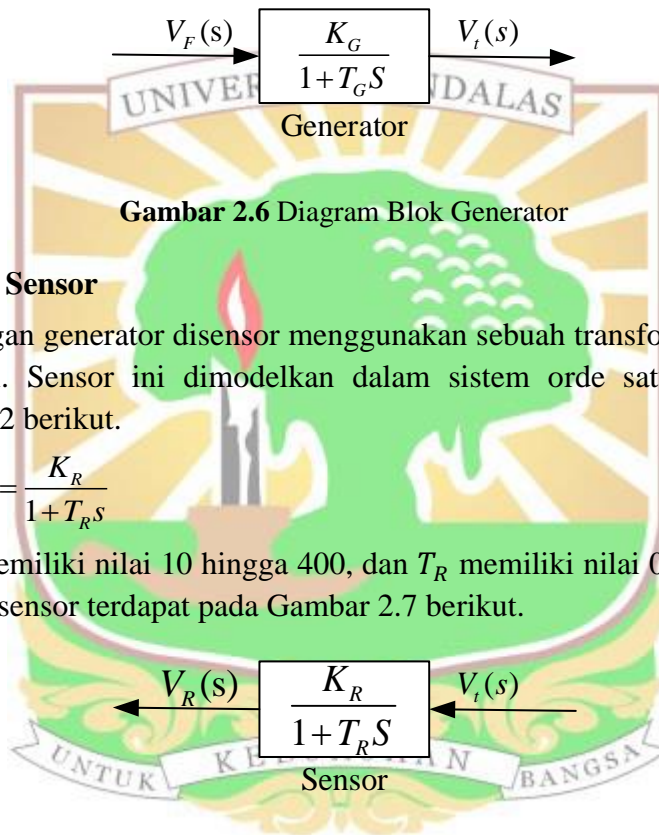
dilakukan transformasi *Laplace*, sehingga didapatkan Persamaan 2.19, 2.20 dan 2.21 berikut.

$$V_t(s) + V_t(s)T_G s = K_G V_F(s) \quad (2.19)$$

$$V_t(s)[1 + T_G s] = K_G V_F(s) \quad (2.20)$$

$$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{K_G}{1 + T_G s} \quad (2.21)$$

Faktor penguat (K_G) memiliki nilai yang berkisar dari 0,7-1,0 sedangkan konstanta generator (T_G) memiliki kisaran nilai 1,0000-2,0000 detik dalam keadaan nol sampai kondisi beban penuh[15]. Fungsi alih *amplifier* dalam representasi diagram blok terdapat pada Gambar 2.6 berikut.

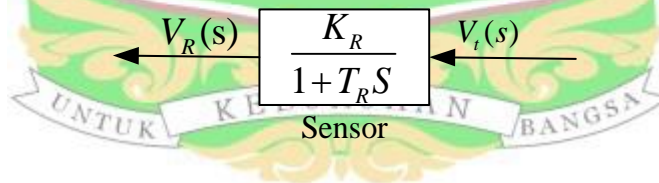


2.3.4 Model Sensor

Tegangan generator disensor menggunakan sebuah transformator tegangan atau potensial. Sensor ini dimodelkan dalam sistem orde satu seperti dalam persamaan 2.22 berikut.

$$\frac{V_R(s)}{V_E(s)} = \frac{K_R}{1 + T_R s} \quad (2.22)$$

Dimana K_R memiliki nilai 10 hingga 400, dan T_R memiliki nilai 0,01 hingga 0,06. Blok diagram sensor terdapat pada Gambar 2.7 berikut.

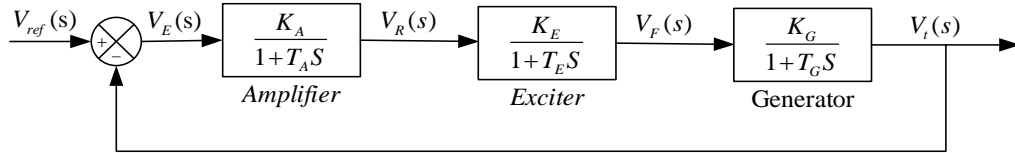


2.3.5 Model AVR tanpa Sensor

Pemodelan AVR dengan umpan balik menggabungkan model *amplifier*, *exciter*, generator dan memberi umpan balik. Dari blok diagram tersebut didapatkan fungsi alih lingkaran terbuka pada persamaan 2.22 dan fungsi alih lingkaran tertutup dalam persamaan 2.23 berikut.

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G}{(1 + T_A s)(1 + T_E s)(1 + T_G s)} \quad (2.22)$$

$$\frac{V_i(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G}{(1+T_A s)(1+T_E s)(1+T_G s) + K_A K_E K_G} \quad (2.23)$$



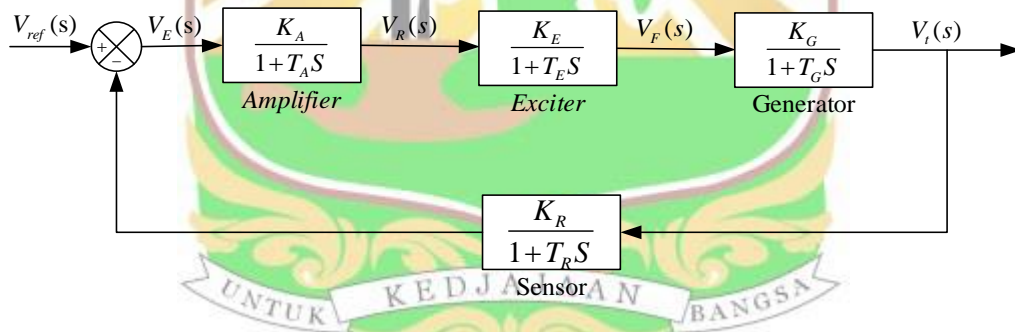
Gambar 2.8 Diagram Blok AVR Lingkar Tertutup

2.3.6 Model AVR dengan Sensor

Pemodelan AVR dengan umpan balik menggabungkan parameter *amplifier*, *exciter*, generator, sensor dan memberi umpan balik. Dari blok diagram tersebut didapatkan fungsi alih lingkaran terbuka pada persamaan 2.24 dan fungsi alih lingkaran tertutup dalam persamaan 2.25 berikut.

$$\frac{V_i(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G}{(1+T_A s)(1+T_E s)(1+T_G s)} \quad (2.24)$$

$$\frac{V_i(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G (1+T_R s)}{(1+T_A s)(1+T_E s)(1+T_G s)(1+T_R s) + K_A K_E K_G K_R} \quad (2.25)$$



Gambar 2.9 Diagram Blok AVR dengan Sensor

2.4 Analisis Sistem Kendali

Dalam penelitian ini, digunakan analisis sistem kendali yang melibatkan dua aspek dalam domain waktu, yaitu analisis peralihan dan analisis kesalahan. Selain itu, penelitian juga mencakup analisis kestabilan pada sistem AVR.

2.4.1 Analisis Kesalahan

Parameter-parameter yang diamati analisis kesalahan adalah tipe sistem, kecepatan, percepatan, konstanta kesalahan posisi, serta kesalahan keadaan mantap pada masukan undak satuan, masukan laju satuan dan masukan parabolik satuan. Amati fungsi alih pada persamaan 2.26 berikut.

$$G(s)H(s) = G(s) = \frac{K(s+z_1)(s+z_1)\cdots(s+z_m)}{s^N(s+p_1)(s+p_1)\cdots(s+p_m)} \quad (2.26)$$

- Dengan Ketentuan:
- N adalah tipe sistem
 - $n > m$
 - z_1, z_2, \dots, z_n merupakan *zero* dari $G(s)$
 - p_1, p_2, \dots, p_n merupakan *pole* dari $G(s)$

Pada persamaan 2.24 dalam penulisannya, fungsi alih menggunakan bentuk s^N yaitu menunjukkan *pole* rangkap N di titik asal serta menyatakan tipe sistem. Jika $N = 0$, $N = 1$, $N = 2$, dan seterusnya maka sistem disebut tipe 0, tipe 1, tipe 2 dan seterusnya pula. Ketelitian sistem menjadi semakin baik kalau angka tipe sistem diperbesar, namun kestabilan sistem akan semakin buruk. Dalam realisasinya sangat jarang ditemukan sistem dengan tipe 3 atau lebih tinggi karena biasanya sulit untuk membuat desain sistem dengan lebih dari 2 integrasi pada lintasan umpan maju yang stabil [16].

Dari Gambar 2.3 diketahui persamaan 2.27 dan persamaan 2.28 dengan bentuk sebagai berikut.

$$C(s) = G(s)E(s) \quad (2.27)$$

$$E(s) = R(s) - H(s)C(s) \quad (2.28)$$

Eliminasi $C(s)$ dengan melakukan substitusi persamaan 2.27 ke persamaan 2.28 sebagai berikut. Sehingga didapat persamaan 2.32

$$E(s) = R(s) - H(s)G(s)E(s) \quad (2.29)$$

$$E(s) + H(s)G(s)E(s) = R(s) \quad (2.30)$$

$$E(s)(1 + H(s)G(s)) = R(s) \quad (2.31)$$

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.32)$$

Persamaan 2.30 adalah fungsi alih sinyal kesalahan keadaan mantap $e(t)$, dimana $e(t)$ merupakan selisih antara sinyal input dan sinyal umpan balik. Performa keadaan mantap untuk sistem stabil karena $E(s)$ dapat ditentukan dengan menggunakan teorema nilai akhir dan dinyatakan dalam bentuk persamaan 2.33 berikut .

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.33)$$

Untuk kesalahan keadaan mantap dengan masukan undak satuan ($R(s) = \frac{1}{s}$) dinyatakan dalam bentuk persamaan 2.34 sebagai berikut.

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)} \frac{1}{s} = \frac{1}{1 + G(0)H(0)} \quad (2.34)$$

Berdasarkan persamaan 2.34 di atas didapatkan besar konstanta kesalahan posisi yang ditunjukkan pada bentuk persamaan 2.35 sebagai berikut.

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s) = G(0)H(0) \quad (2.35)$$

Untuk sistem tipe 0, konstanta kesalahan posisi ditentukan menggunakan persamaan 2.36 berikut.

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_m)}{s^N(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_m)} = K \quad (2.36)$$

Untuk sistem tipe 1 atau di atasnya, konstanta kesalahan posisi ditentukan menggunakan persamaan 2.37 berikut.

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_m)}{s^N(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_m)} = \infty = K \geq 1 \quad (2.37)$$

Berdasarkan persamaan 2.33 sampai persamaan 2.35 dapat dilihat bahwa konstanta kesalahan posisi bernilai terhingga untuk sistem tipe 0 dan bernilai tak terhingga untuk tipe 1 atau lebih tinggi. Maka dari itu besarnya kesalahan keadaan mantap untuk masukan undak satuan tipe 0 ditunjukkan pada bentuk persamaan 2.38 berikut [10].

$$e_{ss} = \frac{1}{1+K_p} \quad (2.38)$$

Dan besarnya kesalahan keadaan mantap dengan masukan undak satuan untuk tipe 1 atau lebih tinggi ditunjukkan dalam persamaan 2.39 berikut.

$$e_{ss} = 0 \quad (2.39)$$

Kesalahan keadaan mantap terhadap *input* laju satuan ($R(s) = \frac{1}{s^2}$) dinyatakan dalam persamaan 2.40 berikut.

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1+G(s)H(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^2} \frac{1}{1+G(s)H(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{sG(s)H(s)} \quad (2.40)$$

Berdasarkan persamaan 2.40 diperoleh konstanta kesalahan kecepatan yang dinyatakan dalam persamaan 2.41 dan kesalahan keadaan mantap untuk masukan laju satuan pada persamaan 2.42 berikut.

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)H(s) \quad (2.41)$$

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v} \quad (2.42)$$

Kesalahan kecepatan tidak berarti kesalahan dengan satuan kecepatan, namun merupakan kesalahan posisi yang disebabkan akibat *input ramp* (masukan laju satuan). Untuk sistem tipe 0, konstanta kesalahan kecepatan ditentukan menggunakan persamaan 2.43 berikut.

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sK(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_k)} = \infty \quad (2.43)$$

Konstanta kesalahan kecepatan untuk sistem tipe 1 dihitung dengan persamaan 2.44 berikut.

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sK(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_k)} = K \quad (2.44)$$

Konstanta kesalahan kecepatan untuk sistem tipe 2 atau lebih tinggi ditentukan menggunakan persamaan 2.45 berikut.

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sK(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_k)} = 0, N \geq 2 \quad (2.45)$$

Kesalahan keadaan mantap terhadap input parabolik satuan ($R(s) = \frac{1}{s^3}$) dinyatakan dalam bentuk persamaan 2.46 berikut.

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{1+G(s)H(s)} \frac{1}{s^3} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1+G(s)H(s)} \frac{1}{s^2} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^2 G(s)H(s)} \quad (2.46)$$

Masukan parabolik direpresentasikan pada bentuk persamaan 2.47 dan 2.48 berikut.

$$r(t) = \frac{t^2}{2}, t \geq 0 \quad (2.47)$$

$$r(t) = 0, t < 0 \quad (2.48)$$

Berdasarkan persamaan 2.47 dan 2.48 didapatkan besar konstanta kesalahan untuk masukan parabolik yang direpresentasikan pada persamaan 2.49 berikut.

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)H(s) \quad (2.49)$$

Konstanta kesalahan terhadap input parabolik satuan disebut dengan konstanta kesalahan percepatan. Dimana berdasarkan persamaan 2.50 dapat tentukan nilai untuk konstanta kesalahan percepatan dengan persamaan berikut.

$$e_{ss} = \frac{1}{K_a} \quad (2.50)$$

Sama halnya seperti kesalahan kecepatan, kesalahan percepatan tidak berarti kesalahan dalam satuan percepatan, akan tetapi merupakan kesalahan posisi yang disebabkan karena input parabolik satuan. Konstanta kesalahan percepatan untuk sistem tipe 0 dihitung menggunakan persamaan 2.51 berikut [10].

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^2 K(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_k)} = \infty \quad (2.51)$$

Konstanta kesalahan percepatan untuk sistem tipe 1 dihitung menggunakan persamaan 2.52 berikut.

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^2 K(s + z_1)(s + z_2) \cdots (s + z_m)}{s(s + p_1)(s + p_2) \cdots (s + p_k)} = \infty \quad (2.52)$$

Konstanta kesalahan percepatan untuk sistem tipe 2 dihitung menggunakan persamaan 2.53 berikut.

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^2 K(s + z_1)(s + z_2) \cdots (s + z_m)}{s(s + p_1)(s + p_2) \cdots (s + p_k)} = K \quad (2.53)$$

Konstanta kesalahan percepatan untuk sistem tipe 3 dihitung menggunakan persamaan 2.55 berikut.

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^2 K(s + z_1)(s + z_2) \cdots (s + z_m)}{s(s + p_1)(s + p_2) \cdots (s + p_k)} = \infty, N \geq 3 \quad (2.54)$$

Rangkuman kesalahan keadaan mantap sistem tipe 0, tipe 1 dan tipe2 dengan berbagai jenis masukan terdapat pada Tabel 2.1 berikut [10].

Tabel 2.1 Kesalahan Keadaan Mantap dengan berbagai jenis masukan

Tipe Sistem	Masukan Undak satuan	Masukan Laju Satuan	Masukan Parabolik Satuan
0	$\frac{1}{1 + K_p}$	∞	∞
1	0	$\frac{1}{K_v}$	∞
2	0	0	$\frac{1}{K_a}$

2.4.2 Analisis Peralihan

Analisis peralihan digunakan dalam mengetahui kestabilan dan akurasi suatu sistem. Analisis peralihan merupakan bagian dari analisis domain waktu. Analisis ini dilakukan pada kondisi *transient* hingga pada keadaan tunak (*steady state*).

Pada sistem orde satu dinyatakan persamaan 2.55, fungsi alih pada persamaan 2.55 diberi masukan undak ($\frac{1}{s}$) satuan sehingga menghasilkan *output* dalam domain waktu dari sistem orde satu yang dinyatakan dalam persamaan 2.56 sebagai berikut.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{T_s + 1} \quad (2.55)$$

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{1}{T}t} \quad (2.56)$$

Sistem orde dua dinyatakan secara umum melalui persamaan 2.57 Berdasarkan persamaan 2.57 dapat diturunkan persamaan pada bagian *denominator* untuk mendapatkan akar-akar persamaan karakteristik dari sistem orde dua dinyatakan dalam persamaan 2.58 dan 2.59.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.57)$$

$$s_1 = -\zeta\omega_n + \omega_n^2 \sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.58)$$

$$s_2 = -\zeta\omega_n - \omega_n^2 \sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.59)$$

Persamaan *output* sistem orde dua jika diberi masukan undak satuan dan nilai rasio redaman > 0 dan < 1 diperlihatkan dalam persamaan 2.60 berikut.

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \quad (2.60)$$

Persamaan *output* sistem orde dua jika diberi masukan undak satuan dan nilai rasio redaman sama dengan 1 diperlihatkan dalam persamaan 2.61 berikut.

$$y(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) \quad (2.61)$$

Persamaan *output* sistem orde dua jika diberi masukan undak satuan dan nilai rasio redaman > 1 diperlihatkan dalam persamaan 2.62 berikut.

$$y(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \cosh \left[\left(\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1} t \right) + \frac{1}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \sinh \left(\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1} t \right) \right] \quad (2.62)$$

Persamaan *output* sistem orde dua jika diberi masukan undak satuan dan nilai rasio redaman sama dengan 0 diperlihatkan dalam persamaan 2.63 berikut

$$y(t) = 1 - \cos \omega_n t \quad (2.63)$$

Parameter – parameter dari analisis peralihan ini meliputi waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai lewatan maksimum dan nilai puncak. Adapun perhitungan masing-masing parameter sebagai berikut.

- Waktu Naik (t_r)

Waktu naik merujuk pada durasi yang dibutuhkan oleh respon sistem untuk mencapai 10% sampai 90%, 5% sampai 95%, atau 0% sampai 100% dari nilai akhir. Untuk sistem orde dua dengan redaman kurang biasanya digunakan waktu naik 0% sampai 100% dan untuk sistem dengan redaman lebih biasanya digunakan waktu naik 10% sampai 90%. Perhitungan waktu naik ini diturunkan dari persamaan 2.64 berikut.

$$t_r = \frac{1.00 + 1.10\zeta + 1.40\zeta^2}{\omega_n} \quad (2.64)$$

Untuk nilai ζ antara 0.30 sampai 0.80, waktu naik juga bisa dihitung menggunakan persamaan 2.61 berikut.

$$t_r = \frac{2.16\zeta + 0.60}{\omega_n} \quad (2.61)$$

Semakin kecil waktu naik maka performansi sistem kendali semakin baik.

- Waktu Puncak (t_p)

Waktu puncak adalah waktu yang dibutuhkan tanggapan sistem untuk mencapai puncak lewatan pertama kali yang dinyatakan pada persamaan 2.65 berikut.

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.65)$$

Semakin kecil waktu puncak maka performansi sistem kendali semakin baik.

- Waktu Keadaan Mantap (t_s)

Waktu keadaan mantap merupakan interval waktu yang dibutuhkan oleh grafik respons untuk mencapai dan tetap stabil di sekitar nilai akhirnya. Penentuan Waktu keadaan mantap dilakukan dengan menggunakan persentase mutlak dari nilai akhir, yakni 5%, 2%, atau 0,50%, dengan variabel rasio redaman berkisar antara 0,00 hingga 0,90. Untuk kriteria kurang dari 2%, perhitungan Waktu keadaan mantap dilakukan dengan menerapkan persamaan 2.66 berikut.

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (2.66)$$

Selain persamaan di atas, waktu keadaan mantap untuk kriteria lebih kurang dari 2% juga dapat dihitung dengan persamaan 2.67 berikut.

$$t_s = \frac{\pi}{\zeta\omega_n} \quad (2.67)$$

Untuk kriteria lebih kurang dari 5%, waktu keadaan mantap dihitung dengan persamaan 2.68 berikut.

$$t_s = \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad (2.68)$$

Untuk kriteria lebih kurang dari 0.50%, waktu keadaan mantap dihitung dengan persamaan 2.69 berikut.

$$t_s = \frac{5}{\zeta\omega_n} \quad (2.69)$$

Semakin kecil waktu keadaan mantap maka performansi sistem kendali semakin baik.

- Nilai Puncak

Nilai puncak adalah nilai yang dicapai tanggapan untuk mencapai puncak lewatan pertama kali. Nilai puncak dihitung dengan persamaan 2.70 berikut.

$$y_p = 1.00 - e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (2.70)$$

- Lewatan Maksimum

Lewatan maksimum adalah nilai puncak maksimum dari kurva tanggapan yang diukur dari nilai akhir yang ditetapkan. Jika nilai keadaan mantap tanggapan tidak sama dengan nilai akhir maka digunakan persentase lewatan maksimum yang dinyatakan dalam persamaan 2.71 berikut.

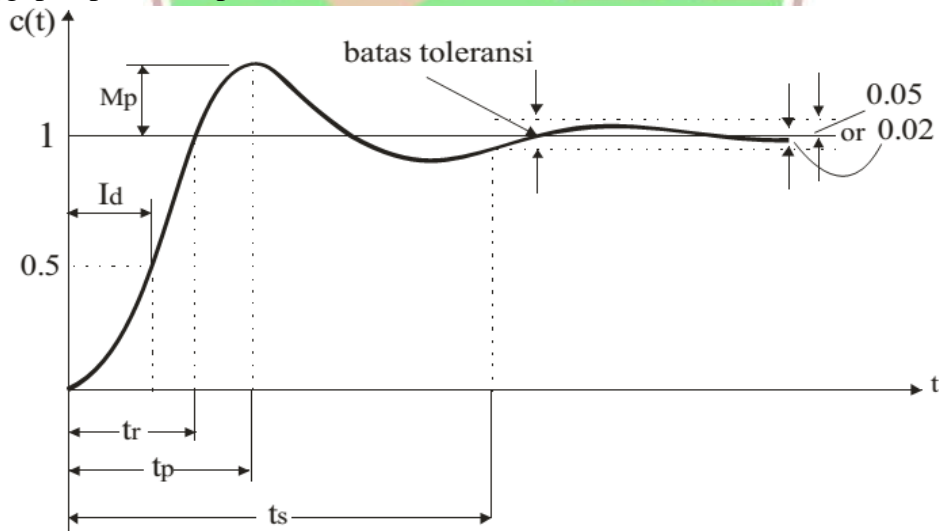
$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (2.71)$$

Selain persamaan di atas, persentase lewatan maksimum juga dapat dihitung menggunakan persamaan 2.72 berikut.

$$M_p = 100e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (2.72)$$

Agar sistem kendali mempunyai performansi yang baik maka diusahakan nilai lewatan maksimum kecil dari 20.00%.

Nilai parameter-parameter t_r , t_s , t_p , y_p , dan M_p disebut juga dengan performansi sistem lingkaran tertutup dalam domain waktu. Berikut bentuk kurva tanggapan peralihan jika nilai parameter-parameter performansi sistem lingkaran tertutup dalam domain waktu diketahui. Berikut merupakan grafik spesifikasi tanggapan peralihan pada Gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Spesifikasi Tanggapan Peralihan

2.4.3 Analisis Kestabilan

Sistem dikatakan stabil apabila nilai keluaran dari suatu sistem adalah tetap atau konstan pada waktu tak hingga dan mendekati nilai input yang diberikan. Ada

banyak cara untuk menganalisis kestabilan dalam suatu sistem kendali, pada penelitian tugas akhir ini digunakan salah satunya yaitu dengan metode akar-akar persamaan karakteristik.

Berdasarkan blok diagram dari Gambar 2.3 didapati fungsi alih pada persamaan 2.73 yang dapat diubah sebagai berikut.

$$C(s) = \frac{G(s)R(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.73)$$

Dari persamaan (2.70) diketahui bahwa fungsi keluaran adalah hasil kali dari fungsi alih lingkaran tertutup terhadap fungsi input. Dikarenakan fungsi input tidak mempengaruhi bentuk fungsi peralihan, maka dari itu tidak ada hubungan dengan kestabilan suatu sistem, sehingga $R(s)$ dapat dibuat nol (0) dan persamaannya menjadi persamaan 2.74 berikut [11].

$$G(s)R(s) = C(s)[1 + G(s)H(s)] = 0 \quad (2.74)$$

Atau persamaan 2.75 berikut.

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (2.75)$$

Persamaan 2.75 disebut persamaan karakteristik lingkaran tertutup dan dari persamaan tersebut dapat ditentukan kestabilan suatu sistem. Persamaan karakteristik tersebut dapat direpresentasikan pada bentuk yang lebih sederhana dalam orde n pada persamaan 2.76 berikut [11].

$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n = 0 \quad (2.76)$$

Akar-akar persamaan 2.76 dapat ditentukan sehingga bentuk dari persamaan tersebut dapat dijabarkan menjadi sebagai persamaan 2.77 berikut.

$$(s + r_1)(s + r_2) \dots (s + r_n) = 0 \quad (2.77)$$

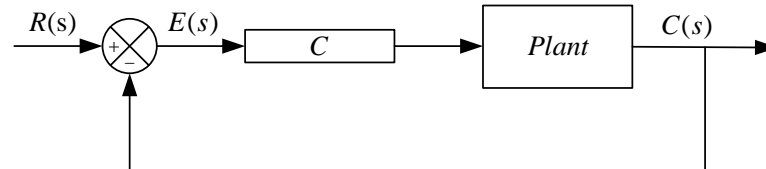
dengan $-r_1, -r_2, \dots, -r_n$ merupakan akar akar polinomial dari persamaan 2.77 yang disebut juga dengan akar-akar persamaan karakteristik [12]. Jika bagian nilai real dari akar-akar persamaan karakteristik tersebut negatif pada diagram *pole-zero* maka sistem dapat dikatakan stabil [11].

2.5 Konfigurasi Pengendali

Konfigurasi pengendali merujuk pada pengaturan sistem kendali dalam suatu sistem. Hal ini melibatkan penggunaan berbagai jenis atau pengkombinasian parameter pengendali seperti P, I, PI, PD, PID, PDF, dan PIDF. Konfigurasi pengendali digunakan untuk mengoptimalkan kinerja sistem kendali dan perancangan sistem kendali yang efisien.

2.5.1 Konfigurasi Pengendali Tunggal

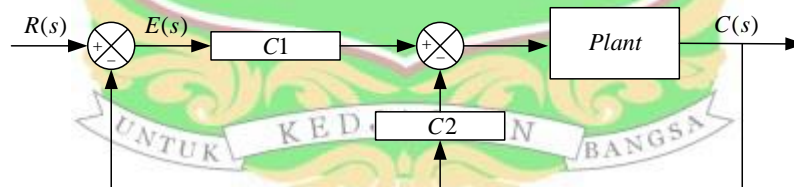
Pengendali tunggal adalah sistem pengendalian yang menggunakan satu pengendali (C) yang berada pada *forward path* untuk mengontrol suatu variabel proses secara langsung. Nilai keluaran sistem diatur oleh pengontrol berdasarkan perbandingan antara nilai referensi (*set point*) dan *output* aktual sistem. Diagram blok dari sistem dengan pengendali tunggal dapat dilihat pada gambar 2.11 berikut.



Gambar 2.11 Konfigurasi Pengendali Tunggal

2.5.2 Konfigurasi Pengendali Dua Derajat Kebebasan

Pengendali dua derajat kebebasan adalah sistem pengendalian yang menggunakan dua pengendali. pengendali pertama (C_1) yang berada pada *forward path* dan pengendali kedua (C_2) yang diposisikan pada *feedback path*. Pengendali pertama digunakan untuk membandingkan nilai referensi dengan *output* sistem, sedangkan pengendali kedua memberikan fleksibilitas tambahan dalam mengoptimalkan respons sistem. Pengendali pada *feedback path* digunakan untuk melakukan penyesuaian lebih lanjut berdasarkan umpan balik dari *output* sistem. Diagram blok dari sistem dengan pengendali dua derajat kebebasan dapat dilihat pada Gambar 2.12 Berikut[17].



Gambar 2.12 Konfigurasi Pengendali Dua Derajat Kebebasan

2.6 Pengendali PID

Sistem pengendali adalah sebuah sistem yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem secara optimal. Komponen pengendali dasar terdiri dari tiga jenis yang dapat divariasikan, yaitu proporsional (P), integral (I), dan diferensial (D). Masing-masing komponen ini memiliki peran khusus dalam mengendalikan suatu sistem[18], [19].

Untuk merancang pengendali biasanya dilakukan dengan metode *trial and error*, sehingga harus dicoba satu persatu kombinasi dari setiap pengendali. Tiap-

tiap pengendali memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri. Penjelasan detail mengenai setiap variasi komponen pengendali terdapat pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Respon Perubahan Konstanta Pengendali

Pengendali	Waktu Naik	Lewatan Maksimum	Waktu Keadaan Mantap	Kesalahan Keadaan Mantap
K_p	Menurun	Meningkat	Perubahan Kecil	Menurun
K_i	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
K_d	Perubahan Kecil	Menurun	Menurun	Perubahan Kecil

2.6.1 Pengendali Proporsional (P)

Pengendali proporsional merupakan amplifikasi sinyal pada suatu sistem yang disesuaikan. Hubungan antara sinyal kesalahan dan sinyal keluaran dalam pengendali dirumuskan dalam persamaan domain waktu. Persamaan proporsional domain waktu ditransformasikan menggunakan transformasi Laplace untuk mendapatkan persamaan dalam domain S. Persamaan Proporsional dalam domain waktu terdapat pada persamaan 2.78 berikut [20].

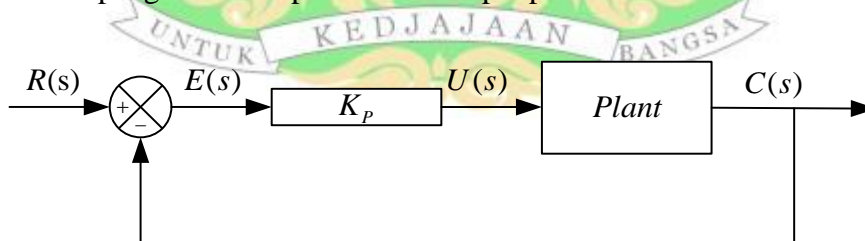
$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \cdot e(t) \quad (2.78)$$

Persamaan 2.78 ditransformasikan menjadi domain S seperti pada persamaan 2.79, 2.80.

$$U(s) = K_p E(s) \quad (2.79)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.80)$$

Diagram blok pengendali Proporsional terdapat pada Gambar 2.13 berikut.



Gambar 2.13 Diagram blok Pengendali P

2.6.2 Pengendali Integral (I)

Pengendali integral adalah suatu bentuk kontrol yang mempertimbangkan akumulasi kesalahan dari waktu ke waktu dan memberikan sinyal keluaran yang berbanding lurus dengan integral dari kesalahan tersebut. Persamaan kendali integral dapat dilihat pada persamaan 2.81 dan 2.82 berikut[20].

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \cdot e(t) \quad (2.81)$$

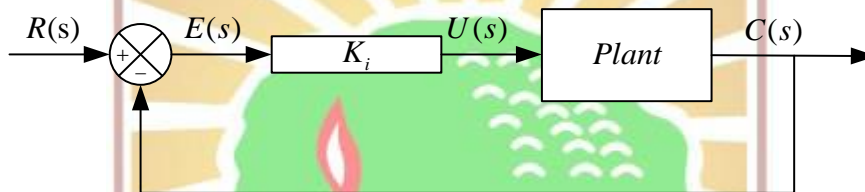
$$U(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.82)$$

Persamaan 2.82 ditransformasi Laplace menjadi persamaan 2.83 dan 2.84 berikut.

$$U(s) = \frac{K_i}{s} \cdot E(s) \quad (2.83)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.84)$$

Diagram blok pengendali Integral terdapat pada Gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.14 Diagram Blok Pengendali I

2.6.3 Pengendali Diferensial (D)

Pengendali Diferensial adalah suatu komponen kontrol yang memberikan sinyal keluaran berdasarkan laju perubahan kesalahan terhadap waktu. Pengendali Diferensial memberikan sinyal kontrol (u) yang sama dengan laju perubahan sinyal kesalahan, seperti yang dinyatakan pada persamaan 2.85 dan 2.86 berikut[20].

$$\frac{u(t)}{e(t)} = K_d \frac{d}{dt} \quad (2.85)$$

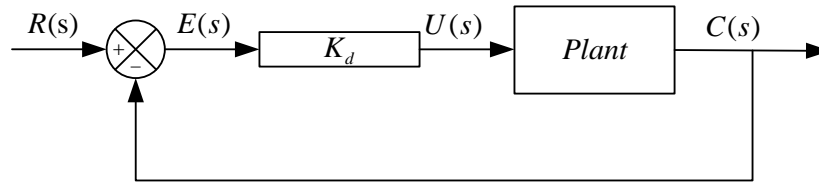
$$u(t) = K_d \int \frac{1}{e(t)} dt \quad (2.86)$$

Persamaan 2.86 ditransformasi Laplace menjadi persamaan 2.87 dan 2.88 berikut.

$$U(s) = K_d s E(s) \quad (2.87)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad (2.88)$$

Diagram blok pengendali Diferensial terdapat pada Gambar 2.15 berikut.



Gambar 2.15 Diagram Blok Pengendali D

2.7 PIDTune

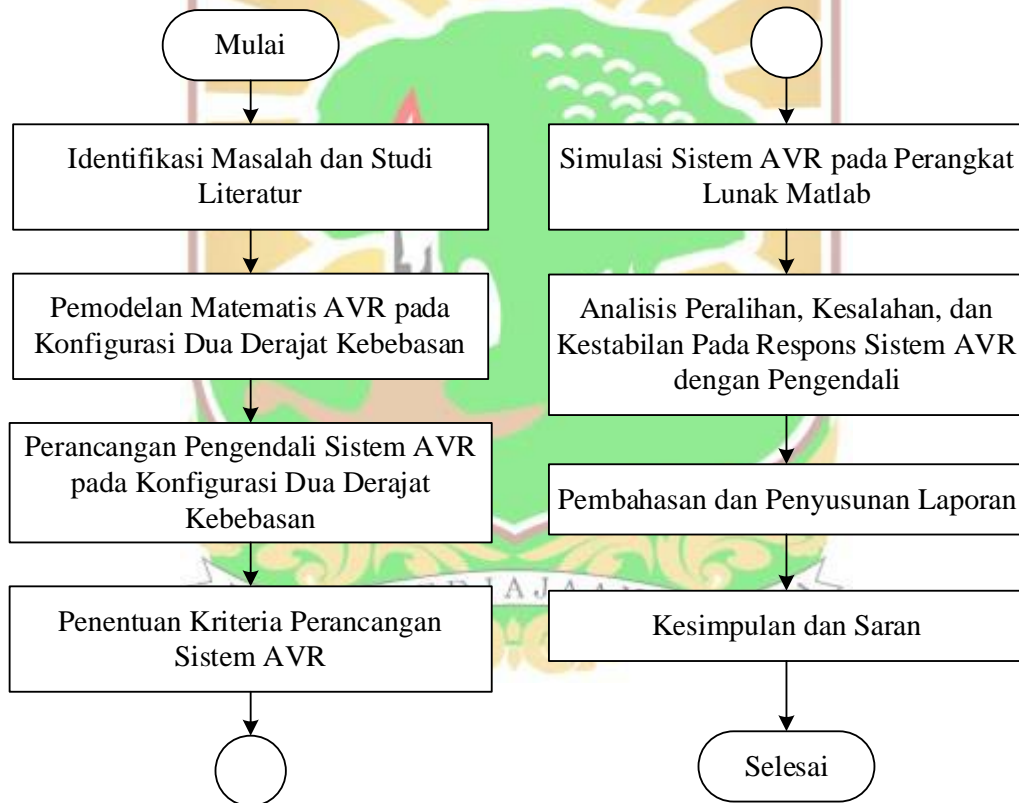
PIDTune MATLAB merupakan alat bantu perancangan pengendali untuk sistem yang dikendalikan dalam sistem lingkaran tertutup dengan umpan balik tunggal. Perwakilan dari pengendali yang dirancang diberikan pada Tabel 2.3 di bawah ini [21]:

Tabel 2.3 Tipe-Tipe Pengendali pada PIDTune [22]

Tipe Pengendali	Representasi Matematis
Proporsional (P)	K_p
Integral (I)	$\frac{K_i}{s}$
Proporsional Integral (PI)	$K_p + \frac{K_i}{s}$
Proporsional Diferensial (PD)	$K_p + K_d s$
Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF)	$K_p + \frac{K_d s}{T_f s + 1}$
Proporsional Integral Diferensial (PID)	$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d$
Proporsional Integral Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF)	$K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{T_f s + 1}$

BAB III METODE PENELITIAN

Pelaksanaan tugas akhir ini menerapkan jenis penelitian dengan menggunakan pendekatan simulasi menggunakan MATLAB. Dalam simulasi ini, variabel bebas dimanipulasi dan dikontrol menggunakan berbagai parameter yang dapat diatur secara presisi melalui perangkat lunak MATLAB. Pengaruhnya terhadap variabel-variabel terikat diamati dan dianalisis untuk menemukan parameter paling optimal dengan manipulasi terhadap variabel bebas tersebut. Simulasi ini melibatkan beberapa tahapan, termasuk studi literatur, identifikasi masalah, perancangan sistem simulasi, pelaksanaan simulasi, serta analisis dan interpretasi hasil. Diagram alir penelitian tugas akhir terdapat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian

3.1 Studi literatur

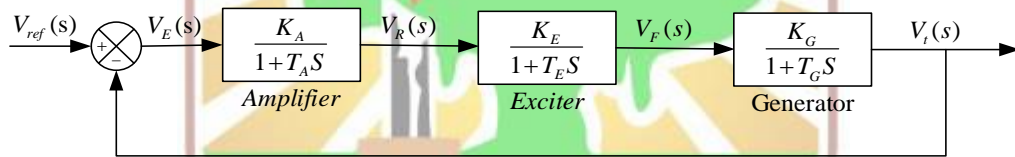
Tahapan awal dalam pelaksanaan penelitian ini dengan melakukan studi literatur dengan tujuan menemukan referensi beserta teori-teori yang mendukung dan berkaitan dengan topik tugas akhir ini. Referensi ini dapat didapatkan melalui dari jurnal, buku, artikel dan laporan penelitian yang sudah dilakukan pada

penelitian sebelumnya yang relevan dengan rumusan masalah. Beberapa hal yang menjadi bahasan utama dalam studi literatur dijabarkan sebagai berikut.

1. Mempelajari penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya terutama rumusan penelitian, metode penelitian, serta hasil penelitian.
2. Mempelajari perangkat lunak MATLAB yang digunakan untuk melakukan simulasi dan pengambilan data.
3. Mempelajari sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR).
4. Mempelajari analisis sistem kendali domain waktu (analisis kesalahan dan peralihan) serta analisis kestabilan pada sistem kendali.
5. Mempelajari parameter pengendali P, I, D, dan Filter serta kombinasi konfigurasi parameter tersebut.

3.2 Pemodelan Sistem AVR pada Konfigurasi Dua Derajat Kebebasan

Pada bagian ini, dilakukan pemodelan matematis sistem AVR dengan umpan balik. Model matematis tersebut berbentuk fungsi alih, yang kemudian dijadikan dasar referensi dalam proses desain pengendali menggunakan model standar PIDTune. Desain pengendali dilakukan dengan mempertimbangkan konfigurasi dua derajat kebebasan, di mana parameter pengendali pada kedua tingkat kontrol dikombinasikan untuk mencapai kinerja yang diinginkan.



Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem AVR dengan Umpan Balik

Berdasarkan Gambar 3.2 diatas dapat diturunkan fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup seperti pada persamaan 3.1 dan 3.2 berikut.

$$\frac{V_i(S)}{V_{ref}(S)} = \frac{K_A K_E K_G}{(1 + T_A s)(1 + T_E s)(1 + T_G s)} \quad (3.1)$$

$$\frac{V_i(S)}{V_{ref}(S)} = \frac{K_A K_E K_G}{(1 + T_A s)(1 + T_E s)(1 + T_G s) + K_A K_E K_G} \quad (3.2)$$

Berdasarkan fungsi alih dari persamaan 3.2 dilakukan penurunan fungsi alih pada konfigurasi dua derajat kebebasan tanpa sensor dan dengan sensor. Fungsi alih sistem AVR dengan konfigurasi pengendali dua derajat kebebasan tanpa sensor dapat dilihat pada persamaan 3.3 dan 3.4 berikut ini.

$$\frac{V_i(S)}{V_{ref}(S)} = \frac{C_1(s)K_A K_E K_G}{s^3(T_A T_E T_G) + s^2(T_A T_E + T_A T_G + T_E T_G) + s(T_A T_E T_G) + C_2(s)K_A K_E K_G + 1} \quad (3.3)$$

$$\frac{V_i(S)}{V_{ref}(S)} = \frac{A}{s^3 B + s^2 C + s + E} \quad (3.4)$$

Dimana :

$$A = C_1(s)K_A K_E K_G$$

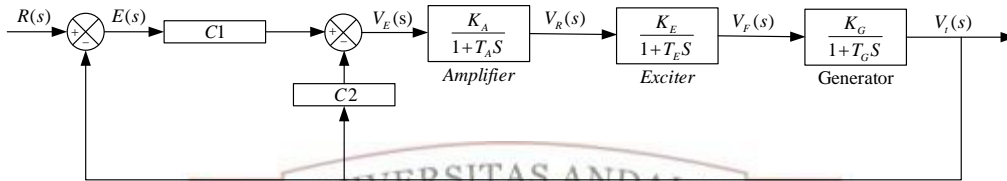
$$B = T_A T_E T_G$$

$$C = T_A T_E + T_A T_G + T_E T_G$$

$$D = T_A + T_E + T_G$$

$$E = C_2(s)K_A K_E K_G + C_1(s)K_A K_E K_G + 1$$

Berikut merupakan diagram blok sistem AVR dengan konfigurasi pengendali dua derajat kebebasan tanpa sensor pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Diagram Blok Sistem AVR dengan pengendali tanpa Sensor

Fungsi alih sistem AVR dengan konfigurasi pengendali dua derajat kebebasan dengan sensor dilakukan penurunan fungsi alih. Fungsi alih merujuk pada persamaan 3.1. Berikut merupakan fungsi alih sistem AVR dengan konfigurasi pengendali dua derajat kebebasan dengan sensor pada persamaan 3.5 dan persamaan 3.6.

$$\frac{V_i(S)}{V_{ref}(S)} = \frac{C_1(s)K_A K_E K_G}{s^3(T_A T_E T_G) + s^2(T_A T_E + T_A T_G + T_E T_G) + s(T_A T_E T_G) + C_2(s) \frac{K_R}{1 + T_R S} K_A K_E K_G + 1} \quad (3.5)$$

$$\frac{V_i(S)}{V_{ref}(S)} = \frac{A}{s^3 B + s^2 C + s + E} \quad (3.6)$$

Berikut merupakan diagram blok sistem AVR dengan konfigurasi pengendali dua derajat kebebasan tanpa sensor pada gambar di bawah.

Dimana :

$$A = C_1(s)K_A K_E K_G$$

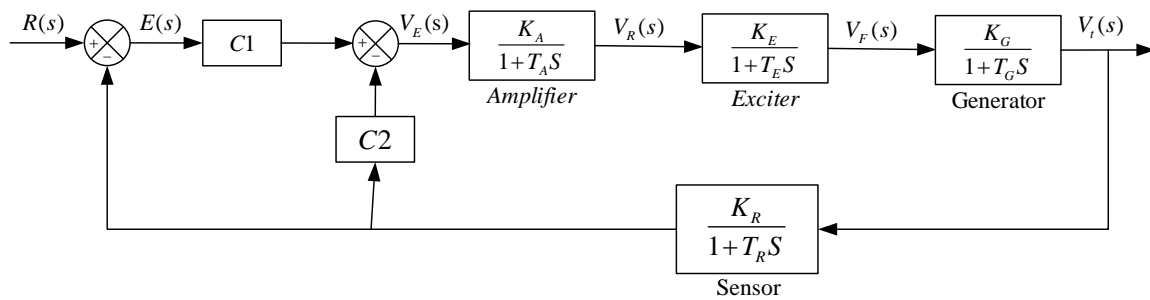
$$B = T_A T_E T_G$$

$$C = T_A T_E + T_A T_G + T_E T_G$$

$$D = T_A + T_E + T_G$$

$$E = C_2(s)K_A K_E K_G + C_1(s) \frac{K_R}{T_R S} K_A K_E K_G + 1$$

Berikut merupakan diagram blok sistem AVR dengan konfigurasi pengendali dua derajat kebebasan dengan sensor pada Gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3.4 Diagram Blok Sistem AVR dengan Pengendali dan Sensor

3.3 Perancangan Kombinasi Pengendali Dua Derajat Kebebasan

Perancangan kombinasi parameter pengendali terdiri dari pengendali P, I, PI, PD, PID, PDF, dan PIDF. Kombinasi dilakukan dengan cara meletakkan satu parameter pengendali pada jalur *feedforward* sedangkan satu pengendali lain akan diletakkan pada jalur *feedback*. Sehingga dari tujuh parameter pengendali yang digunakan menghasilkan kombinasi sebanyak 49 kombinasi parameter pengendali. Tabel 3.1 merupakan kombinasi pengendali yang digunakan pada konfigurasi dua derajat kebebasan.

Tabel 3.1 Kombinasi Pengendali

C1 \ C2	P	I	PI	PD	PID	PDF	PIDF
P	P-P	I-P	PI-P	PD-P	PID-P	PDF-P	PIDF-P
I	P-I	I-I	PI-I	PD-I	PID-I	PDF-I	PIDF-I
PI	P-PI	I-PI	PI-PI	PD-PI	PID-PI	PDF-PI	PIDF-PI
PD	P-PD	I-PD	PI-PD	PD-PD	PID-PD	PDF-PD	PIDF-PD
PID	P-PID	I-PID	PI-PID	PD-PID	PID-PID	PDF-PID	PIDF-PID
PDF	P-PDF	I-PDF	PI-PDF	PD-PDF	PID-PDF	PDF-PDF	PIDF-PDF
PIDF	P-PIDF	I-PIDF	PI-PIDF	PD-PIDF	PID-PIDF	PDF-PIDF	PIDF-PIDF

3.4 Penentuan Kriteria Perancangan Sistem AVR

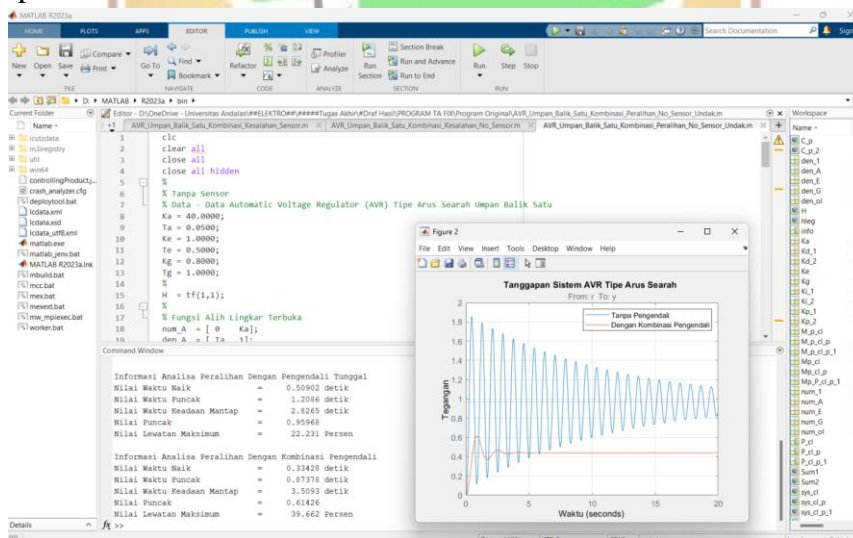
Dalam penelitian tugas akhir ini, dilakukan analisis sistem kendali yang melibatkan tiga aspek penting: analisis kesalahan, peralihan dan kestabilan pada sistem AVR. Analisis peralihan mencakup pengamatan terhadap waktu naik, waktu mencapai keadaan mantap, waktu puncak, nilai puncak, dan nilai lewatan maksimum. Analisis kesalahan mencakup pada kriteria kesalahan keadaan mantap pada masukan undak. Analisis kestabilan dilakukan dengan metode akar-akar persamaan karakteristik. Kriteria perancangan yang digunakan dalam analisis ini melibatkan parameter-parameter tersebut. Kriteria perancangan pada penelitian ini merujuk pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Kriteria Perancangan

Analisis	Kriteria	Nilai
Kesalahan	Kesalahan Keadaan Mantap Undak Satuan	<0.05
	Waktu Naik	< 0,14 detik
	Waktu Puncak	< 0,4 detik
Peralihan	Waktu Keadaan Mantap	< 10,0 detik
	Nilai Puncak	<1,3
	Lewatan Maksimum	< 25 %
Kestabilan	Akar-akar persamaan karakteristik	$R < 0$

3.5 Simulasi Sistem AVR Pada Perangkat Lunak MATLAB

Tahapan ini, simulasi dilakukan dengan menggunakan pemrograman *script* pada perangkat lunak MATLAB. Pemrograman ini digunakan untuk menampilkan data-data hasil simulasi dalam bentuk nilai pada bagian *Command Windows* dan Grafik Respon pada fitur *figure* MATLAB. Tampilan simulasi pada MATLAB terdapat pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.5 Tampilan Perancangan Simulasi AVR Pada MATLAB

3.6 Analisis Sistem AVR dengan Pengendali

Analisis Sistem AVR dilakukan dengan cara membandingkan hasil kriteria perancangan dengan hasil pengujian. Hasil Pengujian didapatkan dari simulasi sistem AVR dengan konfigurasi dua derajat kebebasan pada perangkat lunak MATLAB. Analisis yang digunakan terdiri dari analisis peralihan, analisis kesalahan, dan analisis kestabilan.

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

4.1 Pendahuluan

Pada bagian hasil dan analisis dilakukan pengujian terhadap perancangan pengendali. Dimana digunakan konfigurasi dua derajat kebebasan untuk sistem kendali *Automatic Voltage Regulator* (AVR). Konstanta pengendali pada perancangan tersebut ditentukan dengan metode PIDTune menggunakan perangkat lunak MATLAB.

Perancangan pengendali beserta konstanta pengendali ditambahkan pada fungsi alih AVR tanpa sensor dan AVR dengan sensor. Persamaan fungsi alih lingkaran tertutup sistem AVR tanpa sensor dengan konfigurasi pengendali dua derajat kebebasan terdapat pada persamaan 4.1 dan 4.2 berikut.

$$\frac{V_i(S)}{V_{ref}(S)} = \frac{C_1 \cdot K_A \cdot K_E \cdot K_G}{(1 + T_A S)(1 + T_E S)(1 + T_G S) + K_A \cdot K_E \cdot K_G \cdot C_2} \quad (4.1)$$

$$\frac{V_i(S)}{V_{ref}(S)} = \frac{C_1 \cdot 32}{0,25s^3 \cdot C_2 + 0,575s^2 \cdot C_2 + 1,55 \cdot C_2 + C_2 + 33} \quad (4.2)$$

Persamaan fungsi alih lingkaran tertutup sistem AVR dengan sensor dengan konfigurasi pengendali dua derajat kebebasan terdapat pada persamaan 4.3 dan 4.4 berikut.

$$\frac{V_i(S)}{V_{ref}(S)} = \frac{C_1 \cdot K_A \cdot K_E \cdot K_G (1 + T_R S)}{(1 + T_A S)(1 + T_E S)(1 + T_G S)(1 + T_R S) + K_A \cdot K_E \cdot K_G \cdot K_R \cdot C_2} \quad (4.3)$$

$$\frac{V_i(S)}{V_{ref}(S)} = \frac{C_1 (0,0032S + 32)}{0,0000025s^4 \cdot C_2 + 0,02506s^3 \cdot C_2 + 0,5752s^2 \cdot C_2 + 1,55s^2 \cdot C_2 + C_2 + 33} \quad (4.4)$$

Dimana :

C_1 = Konstanta Pengendali *Foward Path*

C_2 = Konstanta Pengendali *Feedback Path*

K_A = Konstanta *Gain Amplifier* [40,0*]

K_E = Konstanta *Gain Exciter* [1,0*]

K_G = Konstanta *Gain Generator* [0,8*]

K_R = Konstanta *Gain Sensor* [1,0*]

T_A = Konstanta Waktu Amplifier [0,05*]

T_E = Konstanta Waktu Exciter [0,5*]

T_G = Konstanta Waktu Generator [1,0*]

T_R = Konstanta Waktu Sensor [0,0001*]

*konstanta yang digunakan penulis dalam penelitian

4.2 Respons Sistem AVR Tanpa Pengendali

Respon sistem AVR tanpa pengendali disimulasikan pada perangkat lunak MATLAB. Pada bagian ini simulasi dilakukan untuk sistem AVR tanpa sensor dan sistem AVR dengan sensor.

4.2.1 Respons Sistem AVR Tanpa Pengendali dan Tanpa Sensor

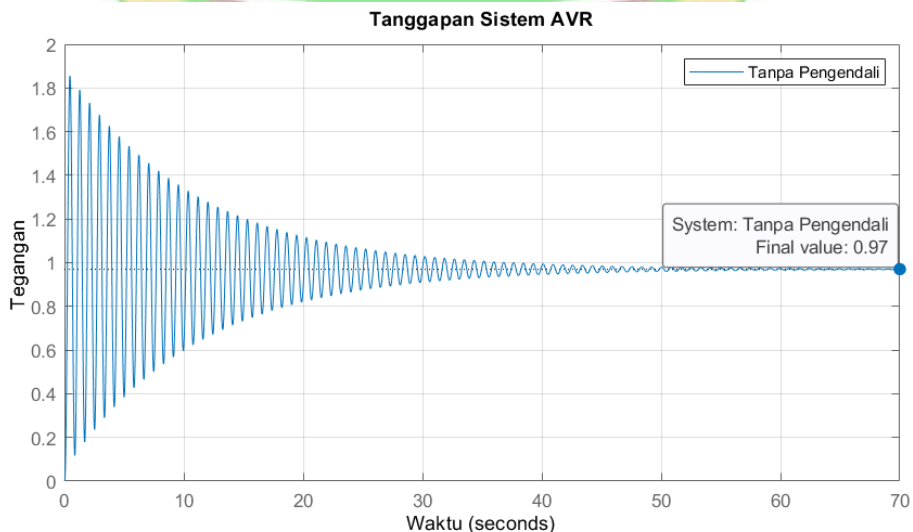
Pada simulasi sistem AVR tanpa pengendali dan sensor, didapatkan hasil simulasi analisis kesalahan bahwa sistem ini memiliki Tipe-0, dengan Konstanta Kesalahan Posisi (K_p) sebesar 32. Untuk nilai kesalahan keadaan mantap (e_{ss}) dengan masukan undak didapatkan nilai sebesar **0,0303**.

Hasil analisis peralihan didapat nilai-nilai berupa waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak, dan nilai lewatan maksimum. Hasil analisis peralihan terdapat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Respons Peralihan Sistem AVR Tanpa Pengendali

Parameter	Nilai
Waktu Naik	0,146 s
Waktu Puncak	0,456 s
Waktu Keadaan Mantap	42,20 s
Nilai Puncak	1,85 s
Lewatan Maksimum	91,3%

Respons peralihan sistem AVR tanpa pengendali dan tanpa sensor terdapat pada Gambar 4.1 berikut.



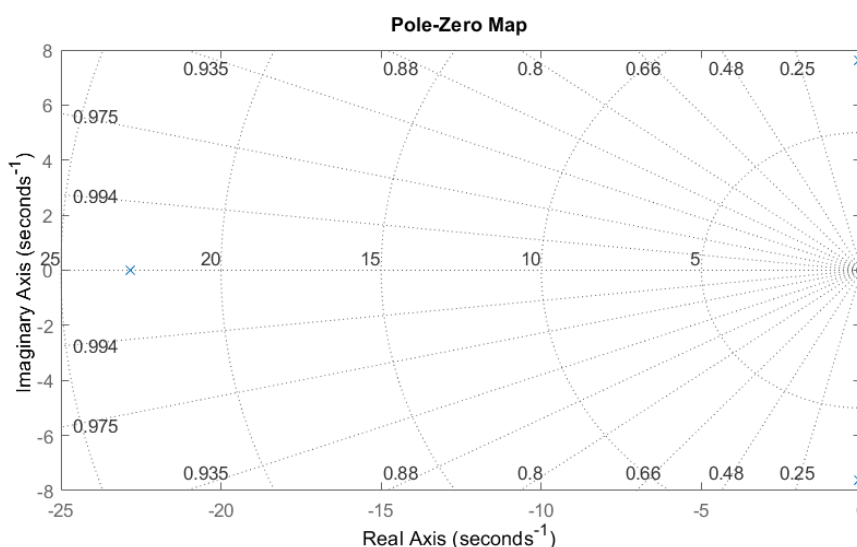
Gambar 4.1 Respons Peralihan Sistem AVR Tanpa Pengendali

Kestabilan sistem didapatkan melalui simulasi dengan melihat hasil dari akar-akar persamaan karakteristik sistem. Dimana untuk sistem ini memiliki tiga nilai akar-akar persamaan karakteristik (*Pole*) yang terdapat pada Tabel 4.2 Berikut.

Tabel 4.2 Posisi Pole Sistem AVR Tanpa Pengendali

Posisi Pole	Nilai
Pole 1	$-9,10e-02 + 7,6e+00i$
Pole 2	$-9,10e-02 - 7,61e+00i$
Pole 3	$-2,28e+01$

Posisi akar-akar persamaan karakteristik sistem AVR tanpa pengendali dan tanpa sensor terdapat pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Posisi Pole Sistem AVR Tanpa Pengendali

4.2.2 Respons Sistem AVR Tanpa Pengendali dan dengan Sensor

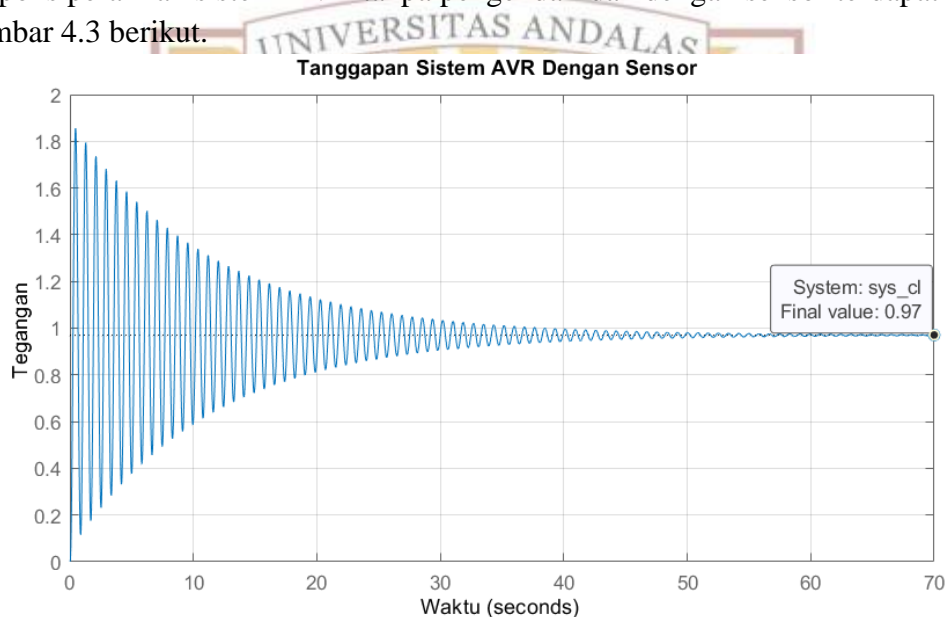
Pada simulasi sistem AVR tanpa pengendali dan sensor, didapatkan hasil simulasi analisis kesalahan bahwa sistem ini memiliki Tipe-0, dengan Konstanta Kesalahan Posisi (K_p) sebesar 32. Untuk nilai kesalahan keadaan mantap (e_{ss}) dengan masukan undak didapatkan nilai sebesar **0,0303**.

Hasil analisis peralihan didapat nilai-nilai waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak, dan nilai lewatan maksimum. Hasil analisis peralihan terdapat pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Respons Peralihan Sistem AVR Tanpa Pengendali (Sensor)

Parameter	Nilai
Waktu Naik	0,1464 s
Waktu Puncak	0,4560 s
Waktu Keadaan Mantap	43,449 s
Nilai Puncak	1,85 s
Lewatan Maksimum	91,45%

Respons peralihan sistem AVR tanpa pengendali dan dengan sensor terdapat pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Respons Peralihan Sistem AVR Tanpa Pengendali (Sensor)

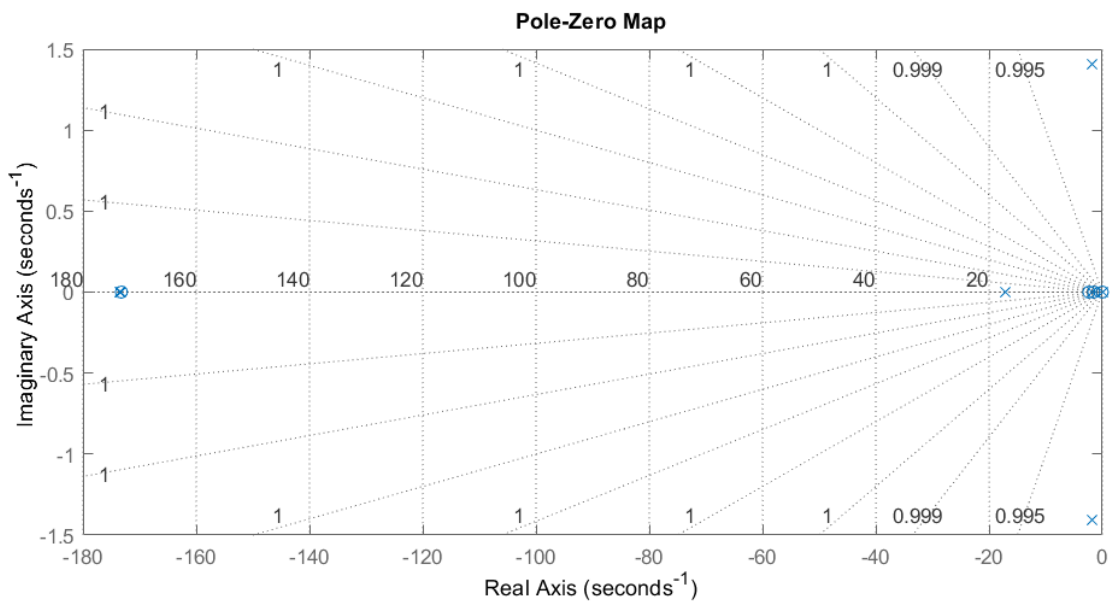
Kestabilan sistem didapatkan melalui simulasi dengan melihat hasil dari akar-akar persamaan karakteristik sistem. Dimana untuk sistem ini memiliki tujuh nilai akar-akar persamaan karakteristik (*Pole*) yang terdapat pada Tabel 4.4 Berikut.

Tabel 4.4 Posisi Pole Sistem AVR Tanpa Pengendali (Sensor)

Posisi <i>Pole</i>	Nilai
Pole 1	1.42e-14
Pole 2	-1.73e+00
Pole 3	-1.89e+00 + 1.41e+00i

Pole 4	; -1.89e+00 - 1.41e+00i
Pole 5	-1.72e+01
Pole 6	-1.73e+02
Pole 7	-1.74e+02

Posisi akar-akar persamaan karakteristik sistem AVR tanpa pengendali dan dengan sensor terdapat pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Posisi Pole Sistem AVR Tanpa Pengendali (Sensor)

4.3 Analisis Kesalahan Respons Sistem AVR dengan Pengendali

Respons kesalahan pada sistem AVR merujuk pada nilai-nilai keadaan waktu tak-hingga (*steady state*). Pada analisis kesalahan ini respon keluaran dianalisis berdasarkan sinyal uji masukan undak. Respons kesalahan dari sistem AVR dengan pengendali disimulasikan pada perangkat lunak MATLAB. Pada bagian ini simulasi dilakukan untuk sistem AVR tanpa sensor dan sistem AVR dengan sensor dengan kombinasi pengendali.

4.3.1 Analisis Kesalahan Sistem AVR dengan Pengendali dan Tanpa Sensor

Simulasi Analisis kesalahan sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor dilakukan dengan melihat nilai kesalahan waktu keadaan tak-hingga atau *Error Steady State* (e_{ss}). Nilai e_{ss} pada masukan undak satuan digunakan untuk melihat sistem ini masuk kedalam kriteria perancangan. Data hasil Pengujian sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kesalahan Sistem AVR

C2 \ C1	P	I	PI	PD	PID	PDF	PIDF
P	x	x	x	x	x	x	x
I	x	x	x	x	x	x	x
PI	x	x	x	x	x	x	x
PD	x	x	x	x	x	x	x
PID	x	x	x	x	x	x	x
PDF	x	x	x	x	x	✓	x
PIDF	x	x	x	x	x	x	x

Keterangan:

- ✓ : Masuk Kriteria Perancangan
- x : Tidak Masuk Kriteria Perancangan

Berdasarkan Tabel 4.5 diperoleh hasil simulasi pengujian untuk sistem AVR dengan kombinasi pengendali dan tanpa sensor. Terdapat satu kombinasi pengendali yang memenuhi kriteria perancangan, dimana respons kesalahan mantap (e_{ss}) terhadap masukan undak dari pengendali ini $<0,05$ detik pada masukan undak. Selanjutnya terdapat 48 kombinasi pengendali yang tidak memenuhi kriteria perancangan, dimana respons (e_{ss}) terhadap masukan dari pengendali ini $>0,05$ detik.

Pengendali yang memenuhi kriteria perancangan pada analisis kesalahan yaitu Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial - Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF-PDF). Pada respon PDF-PDF pada sistem AVR didapatkan nilai konstanta percepatan (K_p) pada tipe sistem 0 sebesar 19,407 dengan nilai kesalahan (e_{ss}) sebesar 0,049.

4.3.2 Analisis Kesalahan Sistem AVR dengan Pengendali dan Sensor

Simulasi Analisis kesalahan sistem AVR dengan pengendali dan dengan sensor dilakukan dengan melihat nilai kesalahan posisi keadaan tak hingga atau *Error Steady State* (e_{ss}). Nilai e_{ss} pada masukan undak satuan digunakan untuk melihat sistem ini masuk kedalam kriteria perancangan. Data hasil Pengujian sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kesalahan Sistem AVR (Sensor)

C2 \ C1	P	I	PI	PD	PID	PDF	PIDF
P	x	x	x	x	x	x	x
I	x	x	x	x	x	x	x
PI	x	x	x	x	x	x	x
PD	x	x	x	x	x	x	x
PID	x	x	x	x	x	x	x
PDF	x	x	x	x	x	✓	x
PIDF	x	x	x	x	x	x	x

Keterangan:

- ✓ : Masuk Kriteria Perancangan
- x : Tidak Masuk Kriteria Perancangan

Berdasarkan Tabel 4.6 diperoleh hasil simulasi pengujian untuk sistem AVR dengan kombinasi pengendali dan tanpa sensor. Terdapat satu kombinasi pengendali yang memenuhi kriteria perancangan, dimana respons kesalahan mantap (e_{ss}) terhadap masukan undak dari pengendali ini $<0,05$ detik pada masukan undak. Selanjutnya terdapat 48 kombinasi pengendali yang tidak memenuhi kriteria perancangan, dimana respons (e_{ss}) terhadap masukan dari pengendali ini $>0,05$ detik.

Pengendali yang memenuhi kriteria perancangan pada analisis kesalahan yaitu Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial - Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF-PDF). Pada respon PDF-PDF pada sistem AVR didapatkan nilai konstanta percepatan (K_p) pada tipe sistem 0 sebesar 19,408 dengan nilai kesalahan (e_{ss}) sebesar 0,049.

4.4 Analisis Peralihan Respons Sistem AVR dengan Pengendali

Respons peralihan sistem AVR merujuk pada nilai-nilai keadaan *transient* sistem dengan pengendali. Respons peralihan dari sistem AVR dengan pengendali disimulasikan pada perangkat lunak MATLAB. Pada bagian ini simulasi dilakukan untuk sistem AVR tanpa sensor dan sistem AVR dengan sensor dengan kombinasi pengendali.

4.4.1 Analisis Peralihan Sistem AVR dengan Pengendali dan Tanpa Sensor

Simulasi Analisis peralihan sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor dilakukan dengan melihat nilai pada kondisi *transient* sistem. Dimana nilai-nilai yang dilihat berupa waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak, dan nilai lewatan maksimum. Data hasil Pengujian sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Peralihan Sistem AVR

C2 \ C1	P	I	PI	PD	PID	PDF	PIDF
P	x	x	x	x	x	x	x
I	x	x	x	x	x	x	x
PI	x	x	x	x	x	x	x
PD	x	x	x	✓	x	x	x
PID	x	x	x	x	x	x	x
PDF	x	x	x	✓	x	✓	x
PIDF	x	x	x	x	x	x	x

Keterangan:

✓ : Masuk Kriteria Perancangan

x : Tidak Masuk Kriteria Perancangan

Berdasarkan tabel 4.7 diperoleh hasil pengujian peralihan sistem AVR dengan kombinasi pengendali dan tanpa sensor. Terdapat tiga kombinasi pengendali yang memenuhi kriteria perancangan yaitu: Proporsional Diferensial-Proporsional Diferensial (PD-PD), Proporsional Diferensial-Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PD-PDF), dan Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial - Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF-PDF). Selanjutnya terdapat 46 kombinasi pengendali yang tidak memenuhi kriteria perancangan pada sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor.

4.4.2 Analisis Peralihan Sistem AVR dengan Pengendali dan Sensor

Simulasi Analisis peralihan sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor dilakukan dengan melihat nilai pada kondisi *transient* sistem. Dimana nilai-nilai yang dilihat berupa waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai

puncak, dan nilai lewatan maksimum. Data hasil Pengujian sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil Pengujian Peralihan Sistem AVR (Sensor)

C2 \ C1	P	I	PI	PD	PID	PDF	PIDF
P	x	x	x	x	x	x	x
I	x	x	x	x	x	x	x
PI	x	x	x	x	x	x	x
PD	x	x	x	✓	x	x	x
PID	x	x	x	x	x	x	x
PDF	x	x	x	✓	x	✓	x
PIDF	x	x	x	x	x	x	x

Keterangan:

- ✓ : Masuk Kriteria Perancangan
- x : Tidak Masuk Kriteria Perancangan

Berdasarkan tabel 4.8 diperoleh hasil pengujian peralihan sistem AVR dengan kombinasi pengendali dan tanpa sensor. Terdapat tiga kombinasi pengendali yang memenuhi kriteria perancangan yaitu: Proporsional Diferensial-Proporsional Diferensial (PD-PD), Proporsional Diferensial-Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PD-PDF), dan Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial - Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF-PDF). Selanjutnya terdapat 46 kombinasi pengendali yang tidak memenuhi kriteria perancangan pada sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor.

4.5 Analisis Kestabilan Respons sistem AVR dengan Pengendali

Respons peralihan dari sistem AVR dengan pengendali disimulasikan pada perangkat lunak MATLAB. Pada bagian ini simulasi dilakukan untuk sistem AVR tanpa sensor dan sistem AVR dengan sensor dengan kombinasi pengendali.

4.5.1 Analisis Kestabilan Respons Sistem AVR dengan Pengendali dan Tanpa Sensor

Simulasi Analisis kestabilan sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor dilakukan dengan melihat nilai pada akar-akar persamaan karakteristik. Posisi nilai ini dapat dilihat pada diagram *pole-zero*, apabila bernilai negatif maka sistem sudah stabil dengan pengendali yang digunakan. Apabila salah satu nilai dari akar-akar persamaan karakteristik ini berada pada sebelah kanan sumbu imajiner atau bernilai positif maka sistem dengan pengendali tersebut tidak stabil. Data hasil Pengujian sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Pengujian Stabilitas Sistem AVR

C2 \ C1	P	I	PI	PD	PID	PDF	PIDF
P	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil
I	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Stabil
PI	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Tidak Stabil
PD	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil
PID	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Stabil
PDF	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Stabil
PIDF	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Stabil

Berdasarkan Tabel 4.9 diperoleh hasil simulasi pengujian untuk pengujian sistem AVR dengan kombinasi pengendali dan tanpa sensor, 46 tipe kombinasi pengendali masuk kedalam kategori stabil. Untuk Tiga Tipe kombinasi pengendali (I-PIDF, PID-I, PID-PDF, PID-PIDF) masuk kategori tidak stabil. Dimana Pengendali tersebut memiliki salah satu akar-akar persamaan karakteristik dengan nilai negatif.

4.5.2 Analisis Kestabilan Respons Sistem AVR dengan Pengendali dan Sensor

Simulasi Analisis kestabilan sistem AVR dilakukan dengan melihat nilai-nilai pada akar-akar persamaan karakteristik. Nilai akar-akar persamaan karakteristik yang berada pada bidang s apabila bernilai negatif maka sistem sudah stabil dengan pengendali yang digunakan. Apabila salah satu nilai dari akar-akar persamaan karakteristik berada pada sumbu sebelah kanan bidang s atau bernilai

positif maka sistem dengan pengendali tersebut tidak stabil. Data hasil Pengujian sistem AVR dengan pengendali dan tanpa sensor dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil Pengujian Stabilitas Sistem AVR (Sensor)

C2 \ C1	P	I	PI	PD	PID	PDF	PIDF
P	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil
I	Stabil	Tidak Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Tidak Stabil
PI	Stabil	Tidak Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil
PD	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil
PID	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil
PDF	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Stabil
PIDF	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Stabil

Berdasarkan tabel 4.10 diperoleh hasil simulasi pengujian untuk pengujian sistem AVR dengan kombinasi pengendali dan tanpa sensor, 46 tipe kombinasi pengendali masuk kedalam kategori stabil. Untuk Tiga Tipe kombinasi pengendali (I-PIDF, PID-I, PID-PDF, PID-PIDF) masuk kategori tidak stabil. Dimana Pengendali tersebut memiliki salah satu akar-akar persamaan karakteristik dengan nilai negatif.

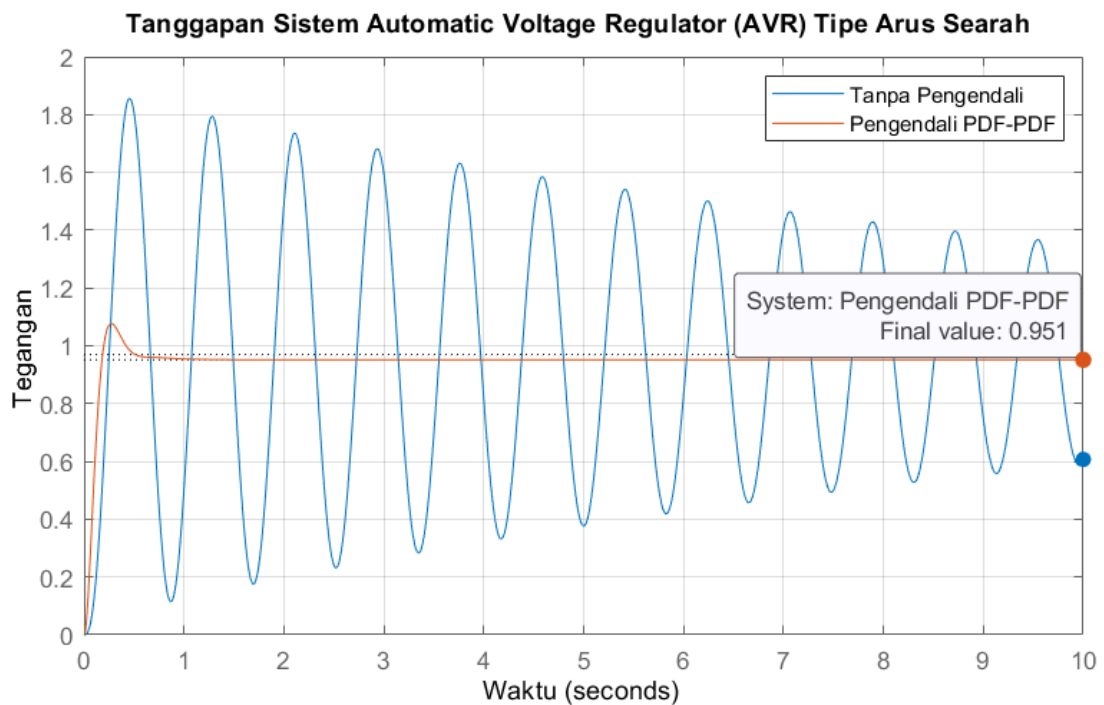
4.6 Hasil Analisis Keseluruhan Respons Sistem AVR Dengan Pengendali Tanpa Sensor

Berdasarkan hasil analisis pada sistem AVR tanpa sensor dengan 49 kombinasi pengendali. Didapatkan satu pengendali yang memiliki respon paling optimal jika ditinjau menggunakan kriteria perancangan yaitu pengendali Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial - Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF-PDF). Pengendali ini memiliki respon pada keadaan *steady state* yang dengan nilai konstanta percepatan (K_p) pada tipe sistem 0 sebesar 19,408 dengan nilai kesalahan (e_{ss}) sebesar 0,049. Sedangkan untuk kondisi *transient* menggunakan analisis peralihan didapatkan nilai pada waktu naik 0,12228 detik, waktu puncak 0,27445 detik, waktu keadaan mantap 0,51518 detik, nilai puncak 1,0779 dan nilai lewatan maksimum sebesar 13,2%. Perbandingan respons sistem AVR dengan pengendali PDF-PDF dan tanpa pengendali pada keadaan *transient* dan *steady state* terdapat pada Tabel 4.11 berikut.

Tabel 4.11 Perbandingan respons sistem AVR Tanpa dan Dengan Pengendali PDF-PDF

Analisis	Parameter	Respons Tanpa Pengendali	Respons Pengendali PDF-PDF
Kesalahan	Kesalahan Keadaan Mantap (Ess)	0,0303	0,049
	Waktu Naik	0,146 detik	0,12228 detik
	Waktu Puncak	0,456 detik	0,27445 detik
Peralihan	Waktu Keadaan Mantap	42,20 detik	0,51518 detik
	Nilai Puncak	1,85	1,0779
	Lewatan Maksimum	91,30%	13,288

Berikut merupakan plot nilai respon sistem AVR dengan pengendali PDF-PDF dan tanpa pengendali pada keadaan *transient* dan *steady state* pada grafik waktu terhadap tegangan pada Gambar 4.5 berikut.



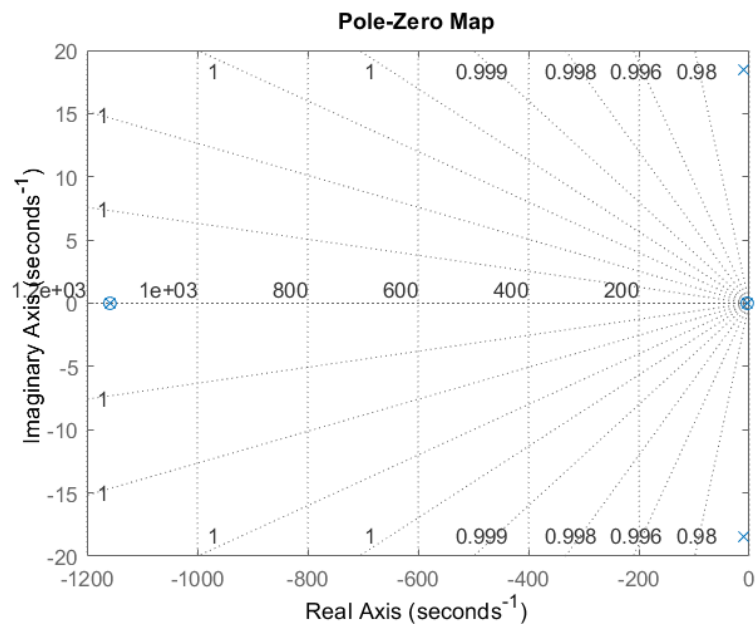
Gambar 4.5 Respons *Transient* dan *Steady State* Sistem AVR

Untuk kestabilan sistem AVR menggunakan pengendali didapatkan akar-akar persamaan karakteristik bernilai negatif pada semua *pole*. Perbandingan nilai *Pole* Sistem AVR dengan pengendali dan tanpa pengendali terdapat pada Tabel 4.12 berikut.

Tabel 4.12 Perbandingan respons kestabilan sistem AVR Tanpa dan Dengan Pengendali PDF-PDF

Analisis	Posisi <i>Pole</i>	Respons Tanpa Pengendali	Respons Pengendali PDF-PDF
Kestabilan (Akar-akar Persamaan Karakteristik)	Pole 1	-9,10e-02 + 7,6e+00i	-3.75e+00
	Pole 2	-9,10e-02 - 7,61e+00i	-9.43e+00 + 1.84e+01i
	Pole 3	-2,28e+01	-9.43e+00 - 1.84e+01i
	Pole 4	-	-1.16e+03
	Pole 5	-	-1.16e+03

Berikut merupakan plot nilai respon sistem AVR dengan pengendali PDF-PDF dan tanpa pengendali ditampilkan pada grafik *Pole Zero Map* pada gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 Respons Kestabilan Sistem AVR Dengan Pengendali PDF-PDF

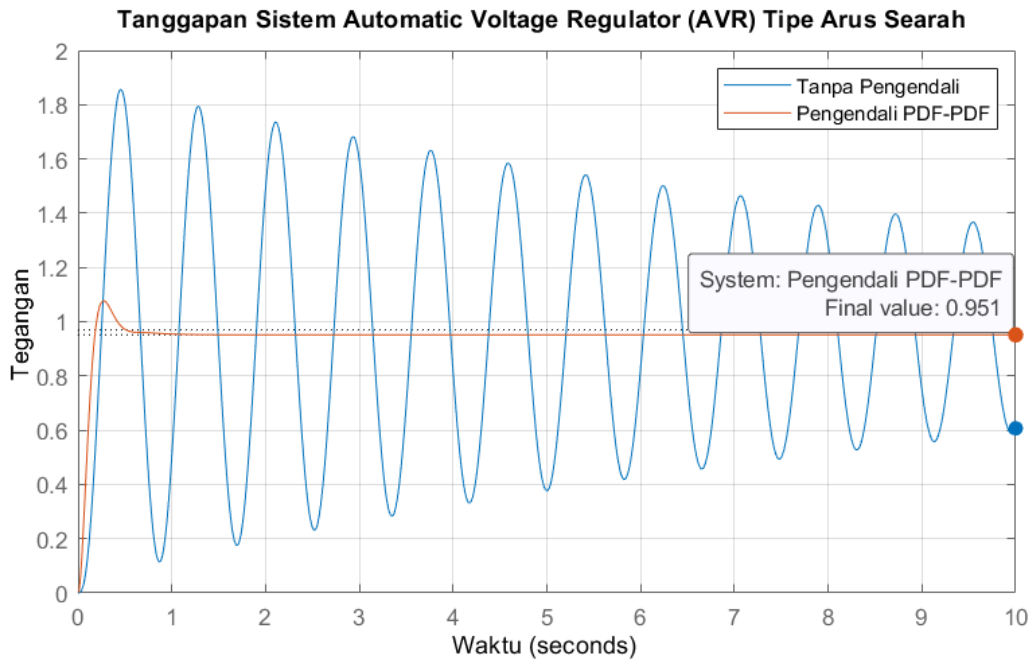
4.7 Hasil Analisis Keseluruhan Respons Sistem AVR Dengan Pengendali Dengan Sensor

Berdasarkan hasil analisis pada sistem AVR dengan sensor dengan 49 kombinasi pengendali. Didapatkan satu pengendali yang memiliki respon paling optimal jika ditinjau menggunakan kriteria perancangan yaitu pengendali Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial - Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF-PDF). Pengendali ini memiliki respon pada keadaan *steady state* yang dengan nilai konstanta percepatan (K_p) pada tipe sistem 0 sebesar 19,408 dengan nilai kesalahan (e_{ss}) sebesar 0,049. Sedangkan Untuk keadaan *transient* menggunakan analisis peralihan didapatkan nilai pada waktu naik 0,1213 detik, waktu puncak 0,27366 detik, waktu keadaan mantap 0,501716 detik, nilai puncak 1,0773 dan nilai lewatan maksimum sebesar 13,231%. Perbandingan respons sistem AVR dengan pengendali PDF-PDF dan tanpa pengendali pada keadaan *transient* dan *steady state* terdapat pada Tabel 4.12 berikut.

Tabel 4.13 Perbandingan respons sistem AVR Tanpa dan Dengan Pengendali PDF-PDF (sensor)

Analisis	Parameter	Respons Tanpa Pengendali	Respons Pengendali PDF-PDF
Kesalahan	Kesalahan Keadaan Mantap (Ess)	0,0303	0,049
	Waktu Naik	0,146 detik	0,1213 detik
Peralihan	Waktu Puncak	0,456 detik	0,27366 detik
	Waktu Keadaan Mantap	42,20 detik	0,501716 detik
	Nilai Puncak	1,85	1,0773
	Lewatan Maksimum	91,30%	13,231 %

Berikut merupakan plot nilai respon sistem AVR dengan pengendali PDF-PDF dan tanpa pengendali pada keadaan *transient* dan *steady state* pada grafik waktu terhadap tegangan pada Gambar 4.7 berikut.



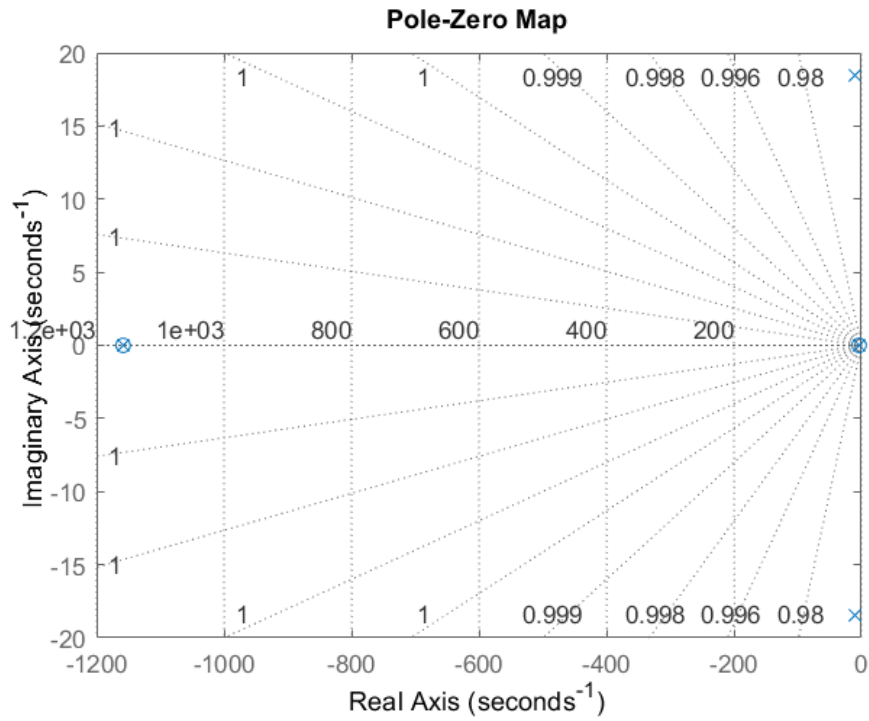
Gambar 4.7 Respons *Transient* dan *Steady State* Sistem AVR (sensor)

Untuk kestabilan sistem AVR menggunakan pengendali didapatkan akar-akar persamaan karakteristik bernilai negatif pada semua *pole*. Perbandingan nilai *Pole* Sistem AVR dengan pengendali dan tanpa pengendali terdapat pada Tabel 4.14 berikut.

Tabel 4.14 Perbandingan respons kestabilan sistem AVR Tanpa dan Dengan Pengendali PDF-PDF (Sensor)

Analisis	Posisi <i>Pole</i>	Respons Tanpa Pengendali	Respons Pengendali PDF-PDF
Kestabilan (Akar-akar Persamaan Karakteristik)	Pole 1	$-9,10e-02 + 7,6e+00i$	$-3.75e+00$
	Pole 2	$-9,10e-02 - 7,61e+00i$	$-9.43e+00 + 1.84e+01i$
	Pole 3	$-2,28e+01$	$-9.43e+00 - 1.84e+01i$
	Pole 4	-	$-1.16e+03$
	Pole 5	-	$-1.16e+03$

Berikut merupakan plot nilai respon sistem AVR dengan pengendali PDF-PDF dan tanpa pengendali ditampilkan pada grafik *Pole Zero Map* pada gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Respons Kestabilan Sistem AVR Dengan Pengendali PDF-PDF



BAB V SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, simulasi untuk menganalisis domain waktu dan kestabilan sistem kendali *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan kombinasi pengendali pada konfigurasi dua derajat kebebasan telah berhasil dilakukan. Pada penelitian ini terdiri dari 49 kombinasi pengendali yang digunakan. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Hasil analisis peralihan dan kesalahan pada keadaan *transien* dan *steady state* sistem AVR diperoleh sistem dengan performansi terbaik pada beberapa pengendali. Pengendali PDF-PDF merupakan pengendali yang paling optimal digunakan pada sistem AVR baik tanpa sensor maupun sistem AVR dengan Sensor. Penentuan ini berdasarkan nilai kriteria perancangan pada analisa peralihan dan analisis kesalahan (e_{ss}).
2. Hasil analisis kestabilan dengan menggunakan akar-akar persamaan karakteristik untuk sistem AVR, didapatkan bahwa terdapat 7 pengendali yang tidak stabil dan 42 sistem yang stabil pada sistem AVR dengan atau tanpa sensor. Dimana Untuk sistem AVR tanpa sensor tidak stabil pada pengendali: I-I, I-PI, I-PIDF, PID-I, PID-PID, PID-PIDF, PIDF-PI. Untuk sistem AVR dengan sensor tidak stabil pada pengendali I-I, I-PI, I-PIDF, PI-I, PI-PI, PID-I, PIDF-I.
3. Pengendali yang paling optimal memiliki respons *transient*, *steady state*, dan stabil adalah sistem AVR dengan pengendali PDF-PDF

5.2 Saran

Adapun tindak lanjut dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Untuk penelitian selanjutnya dapat mencari bagaimana respons sistem AVR dengan penentuan konstanta pengendali konfigurasi dua derajat kebebasan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO).
2. Untuk metode analisis kestabilan menggunakan analisis lain seperti Kriteria Hurwitz, Kriteria Bode, Kriteria Nyquist.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Zohuri, "Electricity, an Essential Necessity in Our Life," *Springer International Publishing*, hlm. 17–35, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-23537-0_2.
- [2] Boldea Ion's, "Electric Generators and Motors: An overview," *IEEE*, vol. 1, 2017, doi: 10.23919/TEMS.2017.7911104.
- [3] I. Boldea, "Control of Electric Generators: A Review," *IEEE*, 2004, doi: 10.1109/IECON.2003.1280114.
- [4] C.-T. Chen, R. Adnan Islam, dan S. Priya, "Electric Energy Generator," *IEEE*, vol. 53, no. 3, 2006, [Daring]. Tersedia pada: <http://www.nrel.gov/features/>
- [5] S.D. Naik dan S.S. Bhat, "Effect of generator reactive power limit on proximity to voltage instability of multibus power system," *IEEE*, 2018, doi: 10.1109/ICIEA.2017.8282916.
- [6] P. M. Patil dan D. S. K. Patil, "Automatic Voltage Regulator," *International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering, ic-ETITE 2020*, Feb 2020, doi: 10.1109/ic-ETITE47903.2020.476.
- [7] E. Kose, "Optimal Control of AVR System with Tree Seed Algorithm-Based PID Controller," *IEEE Access*, vol. 8, hlm. 89457–89467, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993628.
- [8] A. D. Orizasatifa, "Simulasi Dan Analisa Sistem Automatic Voltage Regulator Tipe Arus Searah Dengan Kombinasi Pengendali," *Andalas University, Padang*, 2023.
- [9] A. L. Dinar, "Analisa Sistem Automatic Voltage Regulator Tipe Arus Searah Dengan Pengendali Dua Derajat Kebebasan," *Andalas University, Padang*, 2023.
- [10] David L, "Superconducting DC Generators and Motor," *IEEE Spectr*, vol. 1, no. 12, 1964, doi: 10.1109/MSPEC.1964.6501279.
- [11] Q. Duan dan Y. Zhang, "Analysis and implementation of series excitation DC motor control system," *IEEE*, hlm. 144–147, 2020, doi: 10.1109/ITAIC49862.2020.9338887.
- [12] G. Dhawale, P. Patil, N. Kumbhar, R. Mandlik, P. Nikam, dan S. Kamble, "Automatic Voltage Regulator," *International Journal of Scientific Engineering and Science*, vol. 3, no. 4, hlm. 2456–7361, 2019, [Daring]. Tersedia pada: <http://ijses.com/>
- [13] Katsuhiko. Ogata, *Modern control engineering*. Prentice-Hall, 2010.
- [14] R. J McGrath, "Control System Performance Measures: Past, Present, and Future'," *IEEE*, doi: 10.1109/TAC.1961.6429306.

- [15] Prabha Kundur, *Power System Stability And Control*. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [16] H. D. Laksono, *Perancangan dan Analisa Sistem Kendali Dengan Berbagai Pengendali*. Padang: Andalas University Press, 2015.
- [17] “Feedback Control Architectures,” <https://www.mathworks.com/help/control/ug/feedback-control-architectures.html>.
- [18] K. H. Ang, G. Chong, dan Y. Li, “PID control system analysis, design, and technology,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, hlm. 559–576, Jul 2005, doi: 10.1109/TCST.2005.847331.
- [19] K.J. Åström, “The future of PID control,” *Elsivier Science Direct*, vol. 9, hlm. 1163–1175, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00062-4).
- [20] Liuping Wang, “Basics of PID Control,” Wiley-IEEE Press, hlm. 1–30.
- [21] Abdul Latif, “Simulasi Dan Analisa Sistem Kendali Buck Boost Converter Dengan Menggunakan Pengendali 1 Derajat Kebebasan Dan Pengendali 2 Derajat Kebebasan,” Master Thesis, Universitas Andalas, Padang, 2018.
- [22] Heru Dibyo Laksono, *Sistem Kendali Dengan MATLAB*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2013.



LAMPIRAN

Lampiran A Data Hasil Analisis Kesalahan masukan undak pada Sistem AVR dengan Pengendali

No.	Pengendali	Tipe Sistem	Kp	Ess Undak
1	P-P	0	0,785	0,56
2	P-I	1	0	0
3	P-PI	1	0	0
4	P-PD	0	0,173	0,852
5	P-PID	1	0	0
6	P-PDF	0	0,1778	0,849
7	P-PIDF	1	0	0
8	I-P	1	0	0
9	I-I	2	0	0
10	I-PI	2	0	0
11	I-PD	1	0	0
12	I-PID	2	0	0
13	I-PDF	1	0	0
14	I-PIDF	2	0	0
15	PI-P	1	0	0
16	PI-I	2	0	0
17	PI-PI	2	0	0
18	PI-PD	1	0	0
19	PI-PID	2	0	0
20	PI-PDF	1	0	0
21	PI-PIDF	2	0	0
22	PD-P	0	4,3191	0,188
23	PD-I	1	0	0
24	PD-PI	1	0	0
25	PD-PD	0	0,953	0,512
26	PD-PID	1	0	0
27	PD-PDF	0	1,0242	0,494
28	PD-PIDF	1	0	0
29	PID-P	1	0	0
30	PID-I	2	0	0
31	PID-PI	2	0	0
32	PID-PD	1	0	0
33	PID-PID	2	0	0
34	PID-PDF	1	0	0

35	PID-PIDF	2	0	0
36	PDF-P	0	4,208	0.192
37	PDF-I	1	0	0
38	PDF-PI	1	0	0
39	PDF-PD	0	0,930	0,518
40	PDF-PID	1	0	0
41	PDF-PDF	0	19,407	0,049
42	PDF-PIDF	1	0	0
43	PIDF-P	1	0	0
44	PIDF-I	2	0	0
45	PIDF-PI	2	0	0
46	PIDF-PD	1	0	0
47	PIDF-PID	2	0	0
48	PIDF-PDF	1	0	0
49	PIDF-PIDF	2	0	0

Lampiran B Data Hasil Analisis Kesalahan pada Sistem AVR (Sensor) dengan Pengendali

No.	Pengendali	Tipe Sistem	Kp	Ess Undak
1	P-P	0	0,9607	0,51
2	P-I	1	0	0
3	P-PI	1	0	0
4	P-PD	0	0,187	0,842
5	P-PID	1	0	0
6	P-PDF	0	0,175	0,851
7	P-PIDF	1	0	0
8	I-P	1	0	0
9	I-I	2	0	0
10	I-PI	2	0	0
11	I-PD	1	0	0
12	I-PID	2	0	0
13	I-PDF	1	0	0
14	I-PIDF	2	0	0
15	PI-P	1	0	0
16	PI-I	2	0	0
17	PI-PI	2	0	0
18	PI-PD	1	0	0
19	PI-PID	2	0	0
20	PI-PDF	1	0	0
21	PI-PIDF	2	0	0

22	PD-P	0	4,431	0,184
23	PD-I	1	0	0
24	PD-PI	1	0	0
25	PD-PD	0	0,934	0,517
26	PD-PID	1	0	0
27	PD-PDF	0	1,06228	0,4849
28	PD-PIDF	1	0	0
29	PID-P	1	0	0
30	PID-I	2	0	0
31	PID-PI	2	0	0
32	PID-PD	1	0	0
33	PID-PID	2	0	0
34	PID-PDF	1	0	0
35	PID-PIDF	2	0	0
36	PDF-P	0	4,076	0,197
37	PDF-I	1	0	0
38	PDF-PI	1	0	0
39	PDF-PD	0	0,956	0,511
40	PDF-PID	1	0	0
41	PDF-PDF	0	19,408	0,049
42	PDF-PIDF	1	0	0
43	PIDF-P	1	0	0
44	PIDF-I	2	0	0
45	PIDF-PI	2	0	0
46	PIDF-PD	1	0	0
47	PIDF-PID	2	0	0
48	PIDF-PDF	1	0	0
49	PIDF-PIDF	2	0	0

Lampiran C Data Hasil Analisis Peralihan pada Sistem AVR dengan Pengendali

No .	Pengendali	Waktu Naik (s)	Waktu Puncak (s)	Waktu Keadaan Mantap (s)	Nilai Puncak	Nilai Lewatan Maksimum
1	P-P	0,33428	0,87378	3,5093	0,61426	39,662
2	P-I	0	1,174	NaN	0,94102	Inf
3	P-PI	0	0,93133	NaN	0,69448	Inf
4	P-PD	0,40054	2,2545	0,82511	0,14763	0
5	P-PID	0	0,9334	NaN	0,58698	Inf
6	P-PDF	0,41683	1,4381	0,85218	0,15044	0

7	P-PIDF	0	0,93992	NaN	0,58995	Inf
8	I-P	26,698	88,948	47,851	0,99932	0
9	I-I	1,9041	4,8119	14,607	0,64946	29,904
10	I-PI	2,699	38,476	5,7019	0,22384	0
11	I-PD	123,55	411,76	220,33	0,99934	0
12	I-PID	1,5432	3,3273	4,4777	0,16097	5,7765
13	I-PDF	120,68	402,18	215,22	0,99934	0
14	I-PIDF	1,5431	3,3466	4,4468	0,16162	5,602
15	PI-P	9,4894	30,395	17,85	0,99836	0
16	PI-I	0,65272	1,6427	2,8929	1,008	29,873
17	PI-PI	0,49359	1,1676	3,5823	0,63322	26,645
18	PI-PD	38,631	145,1	67,624	0,99975	0
19	PI-PID	0,44598	1,2351	4,0976	0,53649	39,848
20	PI-PDF	37,77	104,36	66,135	0,99781	0
21	PI-PIDF	0,44468	1,2432	4,0975	0,53875	39,858
22	PD-P	0,10106	0,25244	0,60189	1,0383	27,876
23	PD-I	0	0,27383	NaN	1,08	Inf
24	PD-PI	0	0,26275	NaN	1,0541	Inf
25	PD-PD	0,072407	0,16853	0,36887	0,60378	23,761
26	PD-PID	0	0,2533	NaN	0,98979	Inf
27	PD-PDF	0,073042	0,1697	0,38187	0,60622	22,798
28	PD-PIDF	0	0,25535	NaN	0,99308	Inf
29	PID-P	5,8912	21,358	10,855	0,99939	0
30	PID-I	0,75749	1,8101	3,3546	0,98533	16,219
31	PID-PI	0,61508	9,9267	3,317	0,61633	0
32	PID-PD	24,135	90,008	41,853	0,99976	0
33	PID-PID	0,54587	1,2861	2,2969	0,53922	7,8475
34	PID-PDF	23,589	109,44	40,917	0,99997	0
35	PID-PIDF	0,54277	1,2697	2,2587	0,5406	7,7571
36	PDF-P	0,10029	0,25324	0,61654	1,0364	28,241
37	PDF-I	0	0,27434	NaN	1,0776	Inf
38	PDF-PI	0	0,26295	NaN	1,052	Inf
39	PDF-PD	0,071153	0,1697	0,35835	0,60326	25,221
40	PDF-PID	0	0,25409	NaN	0,9876	Inf
41	PDF-PDF	0,12228	0,27445	0,51518	1,0779	13,288
42	PDF-PIDF	NaN	0,25615	NaN	0,99083	0
43	PIDF-P	5,9214	21,508	10,922	0,9994	0
44	PIDF-I	0,75047	1,7899	3,3404	0,98676	16,508

45	PIDF-PI	0,60652	9,8954	3,3097	0,61474	0
46	PIDF-PD	24,287	81,112	42,126	0,99943	0
47	PIDF-PID	0,53968	1,275	2,3031	0,53938	8,2405
48	PIDF-PDF	23,737	66,59	41,184	0,99813	0
49	PIDF-PIDF	0,53658	1,2637	2,266	0,54079	8,1571

Lampiran D Data Hasil Analisis Peralihan pada Sistem AVR (Sensor) dengan Pengendali

No	Pengendali	Waktu Naik (s)	Waktu Puncak (s)	Waktu Keadaan Mantap (s)	Nilai Puncak	Nilai Lewatan Maksimum
1	P-P	0,33428	0,87486	3,5114	0,61439	39,698
2	P-I	0	1,1747	NaN	0,94105	Inf
3	P-PI	0	0,93274	NaN	0,69273	Inf
4	P-PD	0,40998	2,7512	0,84047	0,1477	0
5	P-PID	0	0,93143	NaN	0,58464	Inf
6	P-PDF	0,42696	1,4706	0,8678	0,15057	0
7	P-PIDF	0	0,93664	NaN	0,58733	Inf
8	I-P	26,683	88,9	47,825	0,99932	0
9	I-I	1,9037	4,8115	14,608	0,64955	29,922
10	I-PI	2,8067	39,212	5,7924	0,22463	0
11	I-PD	123,41	411,27	220,07	0,99934	0
12	I-PID	1,54	3,3277	4,458	0,15948	5,7075
13	I-PDF	120,47	401,5	214,86	0,99934	0
14	I-PIDF	1,5392	3,334	4,4315	0,16004	5,567
15	PI-P	9,5508	30,441	17,978	0,9983	0
16	PI-I	0,64786	1,6097	2,8765	1,0076	29,956
17	PI-PI	0,49036	1,1661	3,5549	0,6335	26,699
18	PI-PD	38,794	116,9	67,911	0,99874	0
19	PI-PID	0,43954	1,1915	4,1377	0,53543	40,85
20	PI-PDF	37,911	106,83	66,385	0,99806	0
21	PI-PIDF	0,43812	1,1978	4,1353	0,53777	40,964
22	PD-P	0,10025	0,2582	0,6064	1,0391	27,984
23	PD-I	0	0,27331	NaN	1,0799	Inf
24	PD-PI	0	0,26207	NaN	1,0542	Inf
25	PD-PD	0,071754	0,1688	0,37035	0,60476	23,964

26	PD-PID	0	0,25305	NaN	0,98977	Inf
27	PD-PDF	0,072403	0,16999	0,38188	0,60713	22,953
28	PD-PIDF	0	0,25508	NaN	0,99274	Inf
29	PID-P	5,8358	21,861	10,76	0,99952	0
30	PID-I	0,75213	1,7978	3,3377	0,98688	16,222
31	PID-PI	0,61596	9,1611	3,3377	0,61976	0
32	PID-PD	23,87	83,983	41,397	0,99962	0
33	PID-PID	0,54047	1,2732	2,2813	0,53934	7,8696
34	PID-PDF	23,318	69,319	40,451	0,99871	0
35	PID-PIDF	0,53736	1,2625	2,2501	0,54056	7,8051
36	PDF-P	0,099336	0,24972	0,62497	1,037	28,338
37	PDF-I	0	0,27388	NaN	1,0774	Inf
38	PDF-PI	0	0,26235	NaN	1,052	Inf
39	PDF-PD	0,070488	0,16999	0,36178	0,60413	25,437
40	PDF-PID	0	0,25388	NaN	0,98748	Inf
41	PDF-PDF	0,1213	0,27366	0,501716	1,0773	13,231
42	PDF-PIDF	0	0,24609	NaN	0,99061	Inf
43	PIDF-P	5,86	21,983	10,816	0,99952	0
44	PIDF-I	0,74521	1,7809	3,3252	0,98822	16,48
45	PIDF-PI	0,60763	13,986	3,3375	0,6185	0
46	PIDF-PD	23,996	117,52	41,625	0,99998	0
47	PIDF-PID	0,53435	1,2678	2,2859	0,53949	8,2071
48	PIDF-PDF	23,442	71,454	40,674	0,99891	0
49	PIDF-PIDF	0,53125	1,257	2,255	0,54073	8,1462

Lampiran E Data Hasil Analisis Kestabilan pada Sistem AVR dengan Pengendali

No.	Pengendali	Akar-akar Persamaan Karakteristik		
1	P-P	-1.11e+00	+	3.84e+00i
		-1.11e+00	-	3.84e+00i
		-2.08e+01		
2	P-I	-8.23e-02		
		-1.26e+00	+	2.70e+00i
		-1.26e+00	-	2.70e+00i
		-2.04e+01		

3	P-PI	-1.99e-01 -1.09e+00 -1.09e+00 -2.06e+01	+ - - -	3.38e+00i 3.38e+00i
4	P-PD	-5.29e+00 -8.85e+00 -8.85e+00	+ - -	1.04e+01i 1.04e+01i
5	P-PID	-3.33e-01 -1.68e+00 -1.68e+00 -1.93e+01	+ - - -	3.18e+00i 3.18e+00i
6	P-PDF	-5.09e+00 -8.86e+00 -8.86e+00 -1.16e+03	+ - - -	1.06e+01i 1.06e+01i
7	P-PIDF	-3.31e-01 -1.67e+00 -1.67e+00 -1.92e+01 -1.73e+02	+ - - -	3.20e+00i 3.20e+00i
8	I-P	-8.23e-02 -1.26e+00 -1.26e+00 -2.04e+01	+ - - -	2.70e+00i 2.70e+00i
9	I-I	0.00e+00 -2.68e-01 -2.68e-01 -2.47e+00 -2.00e+01	+ - - -	7.30e-01i 7.30e-01i
10	I-PI	0.00e+00 -7.29e-01 -1.02e+00 -1.02e+00 -2.02e+01	+ - - -	1.87e+00i 1.87e+00i
11	I-PD	-1.78e-02 -4.15e+00 -9.42e+00 -9.42e+00	+ - - -	1.07e+01i 1.07e+01i
12	I-PID	0.00e+00 -9.41e-01 -9.41e-01	+ - -	1.18e+00i 1.18e+00i

		-2.30e+00 -1.88e+01		
13	I-PDF	-1.82e-02 -3.99e+00 -9.40e+00 -9.40e+00 -1.16e+03	+ -	1.08e+01i 1.08e+01i
14	I-PIDF	6.19e-18 -9.52e-01 -9.52e-01 -2.26e+00 -1.87e+01 -1.73e+02	+ -	1.18e+00i 1.18e+00i
15	PI-P	-1.99e-01 -1.09e+00 -1.09e+00 -2.06e+01	+ -	3.38e+00i 3.38e+00i
16	PI-I	0.00e+00 -7.29e-01 -1.02e+00 -1.02e+00 -2.02e+01	+ -	1.87e+00i 1.87e+00i
17	PI-PI	0.00e+00 -5.70e-01 -9.86e-01 -9.86e-01 -2.05e+01	+ -	2.81e+00i 2.81e+00i
18	PI-PD	-5.67e-02 -4.72e+00 -9.11e+00 -9.11e+00 - 1.05e+01i	+ -	1.05e+01i
19	PI-PID	0.00e+00 -8.58e-01 -1.52e+00 -1.52e+00 -1.91e+01	+ -	2.43e+00i 2.43e+00i
20	PI-PDF	-5.79e-02 -4.54e+00 -9.11e+00 -9.11e+00 -1.16e+03	+ -	1.07e+01i 1.07e+01i

21	PI-PIDF	4.80e-17 -8.52e-01 -1.51e+00 + 2.45e+00i -1.51e+00 - 2.45e+00i -1.90e+01 -1.73e+02
22	PD-P	-5.29e+00 -8.85e+00 + 1.04e+01i -8.85e+00 - 1.04e+01i
23	PD-I	-1.78e-02 -4.15e+00 -9.42e+00 + 1.07e+01i -9.42e+00 - 1.07e+01i
24	PD-PI	-5.67e-02 -4.72e+00 -9.11e+00 + 1.05e+01i -9.11e+00 - 1.05e+01i
25	PD-PD	-3.87e+00 -9.56e+00 + 1.83e+01i -9.56e+00 - 1.83e+01i
26	PD-PID	-9.18e-02 -4.00e+00 -9.45e+00 + 1.17e+01i -9.45e+00 - 1.17e+01i
27	PD-PDF	-3.81e+00 -9.50e+00 + 1.84e+01i -9.50e+00 - 1.84e+01i -1.16e+03
28	PD-PIDF	-9.12e-02 -4.00e+00 -9.38e+00 + 1.17e+01i -9.38e+00 - 1.17e+01i -1.73e+02
29	PID-P	-3.33e-01 -1.68e+00 + 3.18e+00i -1.68e+00 - 3.18e+00i -1.93e+01
30	PID-I	4.83e-19 -9.41e-01 + 1.18e+00i -9.41e-01 - 1.18e+00i

		-2.30e+00 -1.88e+01		
31	PID-PI	-1.43e-18 -8.58e-01 -1.52e+00 -1.52e+00 -1.91e+01	+ - 	2.43e+00i 2.43e+00i
32	PID-PD	-9.18e-02 -4.00e+00 -9.45e+00 -9.45e+00	+ 	1.17e+01i - 1.17e+01i
33	PID-PID	3.26e-27 -1.83e+00 -1.85e+00 -1.85e+00 -1.75e+01	+ - 	1.34e+00i 1.34e+00i
34	PID-PDF	-9.39e-02 -3.86e+00 -9.42e+00 -9.42e+00 -1.16e+03	+ - 	1.18e+01i 1.18e+01i
35	PID-PIDF	3.69e-19 -1.77e+00 -1.87e+00 -1.87e+00 -1.73e+01 -1.73e+02	+ - 	1.37e+00i 1.37e+00i
36	PDF-P	-5.09e+00 -8.86e+00 -8.86e+00 -1.16e+03	+ - 	1.06e+01i 1.06e+01i
37	PDF-I	-1.82e-02 -3.99e+00 -9.40e+00 -9.40e+00 -1.16e+03	+ - 	1.08e+01i 1.08e+01i
38	PDF-PI	-5.79e-02 -4.54e+00 -9.11e+00 -9.11e+00 -1.16e+03	+ - 	1.07e+01i 1.07e+01i

39	PDF-PD	-3.81e+00 -9.50e+00 -9.50e+00 -1.16e+03	+ -	1.84e+01i 1.84e+01i
40	PDF-PID	-9.39e-02 -3.86e+00 -9.42e+00 -9.42e+00 -1.16e+03	+ -	1.18e+01i 1.18e+01i
41	PDF-PDF	-3.75e+00 -9.43e+00 -9.43e+00 -1.16e+03 -1.16e+03	+ -	1.84e+01i 1.84e+01i
42	PDF-PIDF	-9.33e-02 -3.87e+00 -9.35e+00 -9.35e+00 -1.73e+02 -1.16e+03	+ -	1.19e+01i 1.19e+01i
43	PIDF-P	-3.31e-01 -1.67e+00 -1.67e+00 -1.92e+01 -1.73e+02	+ -	3.20e+00i 3.20e+00i
44	PIDF-I	-2.28e-17 -9.52e-01 -9.52e-01 -2.26e+00 -1.87e+01 -1.73e+02	+ -	1.18e+00i 1.18e+00i
45	PIDF-PI	3.06e-17 -8.52e-01 -1.51e+00 -1.51e+00 -1.90e+01 -1.73e+02	+ -	2.45e+00i 2.45e+00i
46	PIDF-PD	-9.12e-02 -4.00e+00 -9.38e+00 -9.38e+00 -1.73e+02	+ -	1.17e+01i 1.17e+01i

47	PIDF-PID	-1.74e-20 -1.77e+00 -1.87e+00 -1.87e+00 -1.73e+01 -1.73e+02	+ - 	1.37e+00i 1.37e+00i
48	PIDF-PDF	-9.33e-02 -3.87e+00 -9.35e+00 -9.35e+00 -1.73e+02 -1.16e+03	+ - 	1.19e+01i 1.19e+01i
49	PIDF-PIDF	0.00e+00 -1.73e+00 -1.89e+00 -1.89e+00 -1.72e+01 -1.73e+02 -1.74e+02	+ - 	1.41e+00i 1.41e+00i

Lampiran F Data Hasil Analisis Kestabilan pada Sistem AVR (Sensor) dengan Pengendali

No.	Pengendali	Akar-akar Persamaan Karakteristik		
1	P-P	-1.11e+00 -1.11e+00 -2.08e+01 -1.00e+04 -1.00e+04	+ - 	3.84e+00i 3.84e+00i
2	P-I	-8.24e-02 -1.25e+00 -1.25e+00 -2.04e+01 -1.00e+04 -1.00e+04	+ - 	2.70e+00i 2.70e+00i
3	P-PI	-1.98e-01 -1.09e+00 -1.09e+00 -2.06e+01 -1.00e+04 -1.00e+04	+ - 	3.38e+00i 3.38e+00i

4	P-PD	-5.17e+00 -8.89e+00 + 1.06e+01i -8.89e+00 - 1.06e+01i -1.00e+04 + 1.49e+01i -1.00e+04 - 1.49e+01i
5	P-PID	-3.36e-01 -1.68e+00 + 3.18e+00i -1.68e+00 - 3.18e+00i -1.93e+01 -1.00e+04 + 4.85e+00i -1.00e+04 - 4.85e+00i
6	P-PDF	-4.98e+00 -8.89e+00 + 1.08e+01i -8.89e+00 - 1.08e+01i -1.17e+03 -9.99e+03 -1.00e+04
7	P-PIDF	-3.34e-01 -1.67e+00 + 3.20e+00i -1.67e+00 - 3.20e+00i -1.92e+01 -1.75e+02 -1.00e+04 -1.00e+04
8	I-P	-8.24e-02 -1.25e+00 + 2.70e+00i -1.25e+00 - 2.70e+00i -2.04e+01 -1.00e+04 -1.00e+04
9	I-I	6.50e-29 -2.68e-01 + 7.30e-01i -2.68e-01 - 7.30e-01i -2.47e+00 -2.00e+01 -1.00e+04 + 5.82e-04i -1.00e+04 - 5.82e-04i
10	I-PI	9.94e-29 -7.15e-01 -1.02e+00 + 1.88e+00i -1.02e+00 - 1.88e+00i -2.02e+01

		-1.00e+04 -1.00e+04		
11	I-PD	-1.78e-02 -4.07e+00 -9.44e+00 -9.44e+00 -1.00e+04 -1.00e+04	+ - +	1.08e+01i 1.08e+01i 1.49e+01i
12	I-PID	- -9.48e-01 -9.48e-01 -2.30e+00 -1.88e+01 -1.00e+04 -1.00e+04	+ - +	0.00e+00 1.18e+00i 1.18e+00i 4.85e+00i
13	I-PDF	-1.82e-02 -3.91e+00 -9.42e+00 -9.42e+00 -1.17e+03 -9.99e+03 -1.00e+04	+ - 	1.10e+01i 1.10e+01i
14	I-PIDF	1.53e-17 -9.57e-01 -9.57e-01 -2.27e+00 -1.87e+01 -1.75e+02 -1.00e+04 -1.00e+04	+ - 	1.19e+00i 1.19e+00i
15	PI-P	-1.98e-01 -1.09e+00 -1.09e+00 -2.06e+01 -1.00e+04 -1.00e+04	+ - 	3.38e+00i 3.38e+00i
16	PI-I	2.96e-29 -7.15e-01 -1.02e+00 -1.02e+00 -2.02e+01	+ - 	1.88e+00i 1.88e+00i

		-1.00e+04 -1.00e+04		
17	PI-PI	6.38e-29 -5.60e-01 -9.87e-01 -9.87e-01 -2.05e+01 -1.00e+04 -1.00e+04	+ - + - + - +	2.83e+00i 2.83e+00i
18	PI-PD	-5.64e-02 -4.62e+00 -9.14e+00 -9.14e+00 -1.00e+04 -1.00e+04 - 1.49e+01i	+ - + - + - +	1.07e+01i 1.07e+01i 1.49e+01i
19	PI-PID	- -8.50e-01 -1.53e+00 -1.53e+00 -1.91e+01 -1.00e+04 -1.00e+04 - 4.85e+00i	+ - + - + - +	0.00e+00 2.45e+00i 2.45e+00i 4.85e+00i
20	PI-PDF	-5.77e-02 -4.45e+00 -9.13e+00 -9.13e+00 -1.17e+03 -9.99e+03 -1.00e+04	+ - + - + - +	1.08e+01i 1.08e+01i
21	PI-PIDF	-2.07e-16 -8.46e-01 -1.52e+00 -1.52e+00 -1.90e+01 -1.75e+02 -1.00e+04 -1.00e+04	+ - + - + - + - +	2.47e+00i 2.47e+00i
22	PD-P	-5.17e+00 -8.89e+00 -8.89e+00 -1.00e+04 -1.00e+04 - 1.49e+01i	+ - + - + - +	1.06e+01i 1.06e+01i 1.49e+01i

23	PD-I	-1.78e-02 -4.07e+00 -9.44e+00 + 1.08e+01i -9.44e+00 - 1.08e+01i -1.00e+04 + 1.49e+01i -1.00e+04 - 1.49e+01i
24	PD-PI	-5.64e-02 -4.62e+00 -9.14e+00 + 1.07e+01i -9.14e+00 - 1.07e+01i -1.00e+04 + 1.49e+01i -1.00e+04 - 1.49e+01i
25	PD-PD	-3.81e+00 -9.55e+00 + 1.85e+01i -9.55e+00 - 1.85e+01i -1.00e+04 + 2.11e+01i -1.00e+04 - 2.11e+01i
26	PD-PID	-9.28e-02 -3.93e+00 -9.46e+00 + 1.19e+01i -9.46e+00 - 1.19e+01i -1.00e+04 + 1.57e+01i -1.00e+04 - 1.57e+01i
27	PD-PDF	-3.75e+00 -9.48e+00 + 1.85e+01i -9.48e+00 - 1.85e+01i -1.17e+03 -1.00e+04 + 1.39e+01i -1.00e+04 - 1.39e+01i
28	PD-PIDF	-9.23e-02 -3.93e+00 -9.39e+00 + 1.19e+01i -9.39e+00 - 1.19e+01i -1.75e+02 -1.00e+04 + 1.49e+01i -1.00e+04 - 1.49e+01i
29	PID-P	-3.36e-01 -1.68e+00 + 3.18e+00i -1.68e+00 - 3.18e+00i -1.93e+01 -1.00e+04 + 4.85e+00i -1.00e+04 - 4.85e+00i

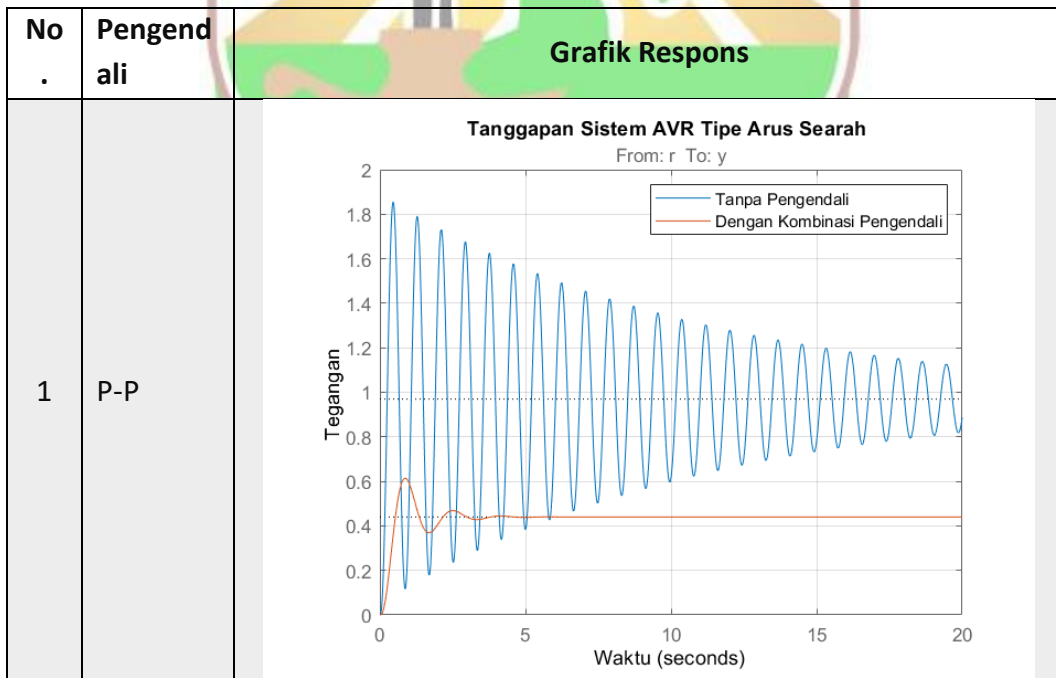
30	PID-I	$1.26e-22$ $-9.48e-01$ + $1.18e+00i$ $-9.48e-01$ - $1.18e+00i$ $-2.30e+00$ $-1.88e+01$ $-1.00e+04$ + $4.85e+00i$ $-1.00e+04 - 4.85e+00i$
31	PID-PI	$-$ $2.31e-22$ $-8.50e-01$ $-1.53e+00$ + $2.45e+00i$ $-1.53e+00$ - $2.45e+00i$ $-1.91e+01$ $-1.00e+04$ + $4.85e+00i$ $-1.00e+04 - 4.85e+00i$
32	PID-PD	$-9.28e-02$ $-3.93e+00$ $-9.46e+00$ + $1.19e+01i$ $-9.46e+00$ - $1.19e+01i$ $-1.00e+04$ + $1.57e+01i$ $-1.00e+04 - 1.57e+01i$
33	PID-PID	$-$ $0.00e+00$ $-1.83e+00$ $-1.87e+00$ + $1.34e+00i$ $-1.87e+00$ - $1.34e+00i$ $-1.74e+01$ $-1.00e+04$ + $6.86e+00i$ $-1.00e+04 - 6.86e+00i$
34	PID-PDF	$-9.49e-02$ $-3.80e+00$ $-9.43e+00$ + $1.20e+01i$ $-9.43e+00$ - $1.20e+01i$ $-1.17e+03$ $-1.00e+04$ $-1.00e+04$
35	PID-PIDF	$-2.22e-21$ $-1.78e+00$ $-1.88e+00$ + $1.37e+00i$ $-1.88e+00$ - $1.37e+00i$ $-1.73e+01$ $-1.75e+02$ $-1.00e+04$ + $4.81e+00i$ $-1.00e+04 - 4.81e+00i$

36	PDF-P	-4.98e+00 -8.89e+00 -8.89e+00 -1.17e+03 -9.99e+03 -1.00e+04	+ - - - - -	1.08e+01i 1.08e+01i
37	PDF-I	-4.98e+00 -8.89e+00 -8.89e+00 -1.17e+03 -9.99e+03 -1.00e+04	+ - - - - -	1.08e+01i 1.08e+01i
38	PDF-PI	-5.77e-02 -4.45e+00 -9.13e+00 -9.13e+00 -1.17e+03 -9.99e+03 -1.00e+04	+ - - - - -	1.08e+01i 1.08e+01i
39	PDF-PD	-3.75e+00 -9.48e+00 -9.48e+00 -1.17e+03 -1.00e+04 -1.00e+04 - 1.39e+01i	+ - - + - -	1.85e+01i 1.85e+01i 1.39e+01i
40	PDF-PID	-9.49e-02 -3.80e+00 -9.43e+00 -9.43e+00 -1.17e+03 -1.00e+04 -1.00e+04	+ - - - - -	1.20e+01i 1.20e+01i
41	PDF-PDF	-3.69e+00 -9.41e+00 -9.41e+00 -1.17e+03 -1.17e+03 -9.99e+03 -1.00e+04	+ - - - - -	1.86e+01i 1.86e+01i
42	PDF-PIDF	-9.44e-02 -3.80e+00 -9.36e+00	+ - +	1.20e+01i

		-9.36e+00	-	1.20e+01i
		-1.75e+02		
		-1.17e+03		
		-9.99e+03		
		-1.00e+04		
43	PIDF-P	-3.34e-01		
		-1.67e+00	+	3.20e+00i
		-1.67e+00	-	3.20e+00i
		-1.92e+01		
		-1.75e+02		
		-1.00e+04		
		-1.00e+04		
44	PIDF-I	1.26e-19		
		-9.57e-01	+	1.19e+00i
		-9.57e-01	-	1.19e+00i
		-2.27e+00		
		-1.87e+01		
		-1.75e+02		
		-1.00e+04		
		-1.00e+04		
45	PIDF-PI	-2.39e-18		
		-8.46e-01		
		-1.52e+00	+	2.47e+00i
		-1.52e+00	-	2.47e+00i
		-1.90e+01		
		-1.75e+02		
		-1.00e+04		
		-1.00e+04		
46	PIDF-PD	-9.23e-02		
		-3.93e+00		
		-9.39e+00	+	1.19e+01i
		-9.39e+00	-	1.19e+01i
		-1.75e+02		
		-1.00e+04	+	1.49e+01i
		-1.00e+04	-	1.49e+01i
47	PIDF-PID	-6.84e-21		
		-1.78e+00		
		-1.88e+00	+	1.37e+00i
		-1.88e+00	-	1.37e+00i
		-1.73e+01		
		-1.75e+02		

		-1.00e+04 + 4.81e+00i -1.00e+04 - 4.81e+00i
48	PIDF-PDF	-9.44e-02 -3.80e+00 -9.36e+00 + 1.20e+01i -9.36e+00 - 1.20e+01i -1.75e+02 -1.17e+03 -9.99e+03 -1.00e+04
49	PIDF-PIDF	-9.27e-19 -1.74e+00 -1.90e+00 + 1.40e+00i -1.90e+00 - 1.40e+00i -1.71e+01 -1.75e+02 -1.75e+02 -1.00e+04 -1.00e+04

Lampiran G Grafik Respons Peralihan pada Sistem AVR dengan Pengendali



2	P-I	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
3	P-PI	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
4	P-PD	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

5	P-PID	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
6	P-PDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
7	P-PIDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

8	I-P	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
9	I-I	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
10	I-PI	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

11	I-PD	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
12	I-PID	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
13	I-PDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

14	I-PIDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
15	PI-P	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
16	PI-I	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

17	PI-PI	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
18	PI-PD	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
19	PI-PID	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

20	PI-PDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
21	PI-PIDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
22	PD-P	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

S

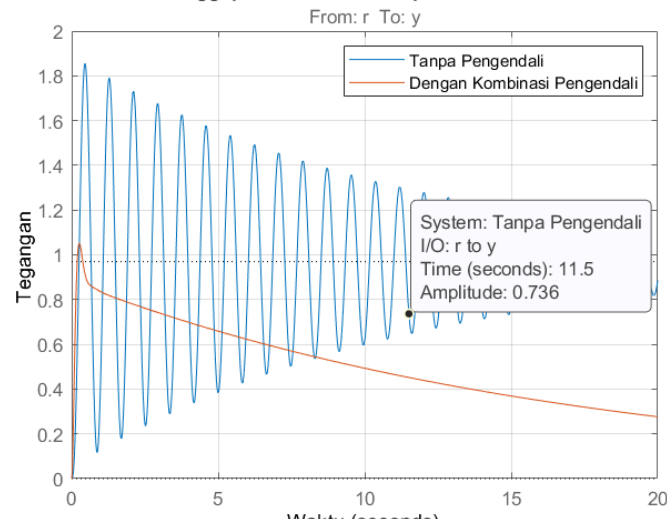
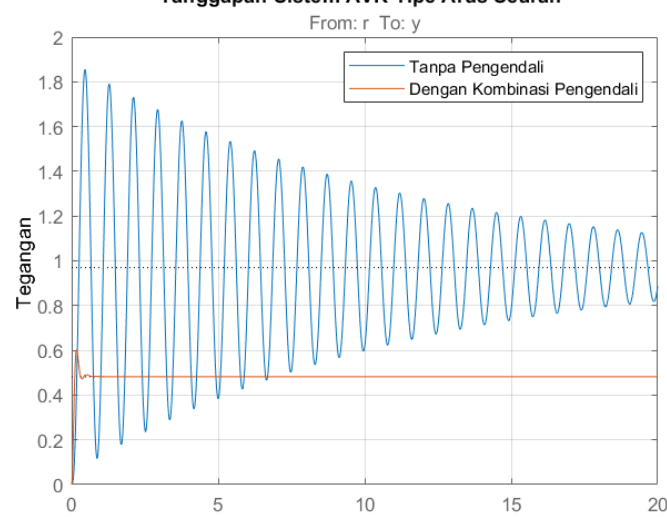

23	PD-I	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
24	PD-PI	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
25	PD-PD	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

26	PD-PID	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
27	PD-PDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
28	PD-PIDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

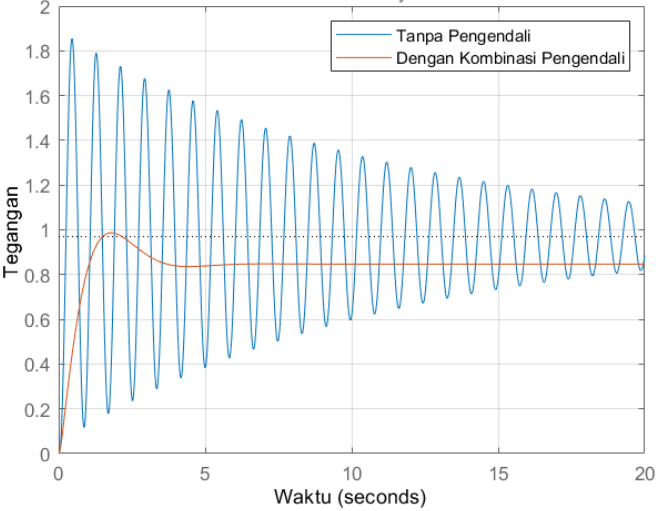
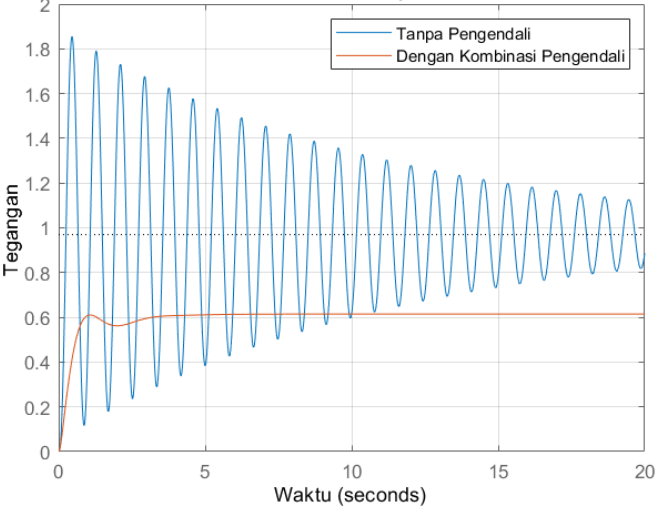
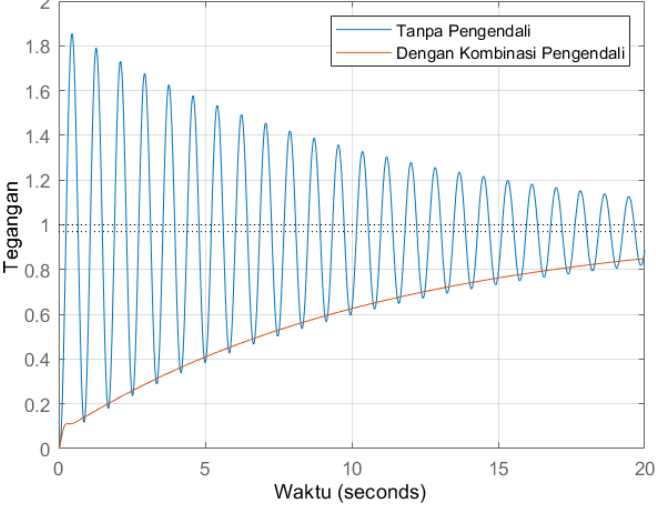
29	PID-P	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
30	PID-I	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
31	PID-PI	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

32	PID-PD	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p> <p>The graph displays the voltage response of an AVR system over a 20-second period. The y-axis represents voltage (Tegangan) from 0 to 2.0, and the x-axis represents time (Waktu) in seconds from 0 to 20. Two curves are shown: a blue line for 'Tanpa Pengendali' (uncontrolled) and an orange line for 'Dengan Kombinasi Pengendali' (with combined control). The uncontrolled response shows large, sustained oscillations between approximately 0.6 and 1.85. The controlled response shows a smooth, monotonic rise from 0 to approximately 0.85.</p>
33	PID-PID	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p> <p>The graph displays the voltage response of an AVR system over a 20-second period. The y-axis represents voltage (Tegangan) from 0 to 2.0, and the x-axis represents time (Waktu) in seconds from 0 to 20. Two curves are shown: a blue line for 'Tanpa Pengendali' (uncontrolled) and an orange line for 'Dengan Kombinasi Pengendali' (with combined control). The uncontrolled response shows large, sustained oscillations between approximately 0.5 and 1.85. The controlled response shows a smooth rise from 0 to approximately 0.55.</p>
34	PID-PDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p> <p>The graph displays the voltage response of an AVR system over a 20-second period. The y-axis represents voltage (Tegangan) from 0 to 2.0, and the x-axis represents time (Waktu) in seconds from 0 to 20. Two curves are shown: a blue line for 'Tanpa Pengendali' (uncontrolled) and an orange line for 'Dengan Kombinasi Pengendali' (with combined control). The uncontrolled response shows large, sustained oscillations between approximately 0.6 and 1.85. The controlled response shows a smooth, monotonic rise from 0 to approximately 0.85.</p>

35	PID-PIDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
36	PDF-P	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
37	PDF-I	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

38	PDF-PI	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p> 
39	PDF-PD	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p> 
40	PDF-PID	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p> 

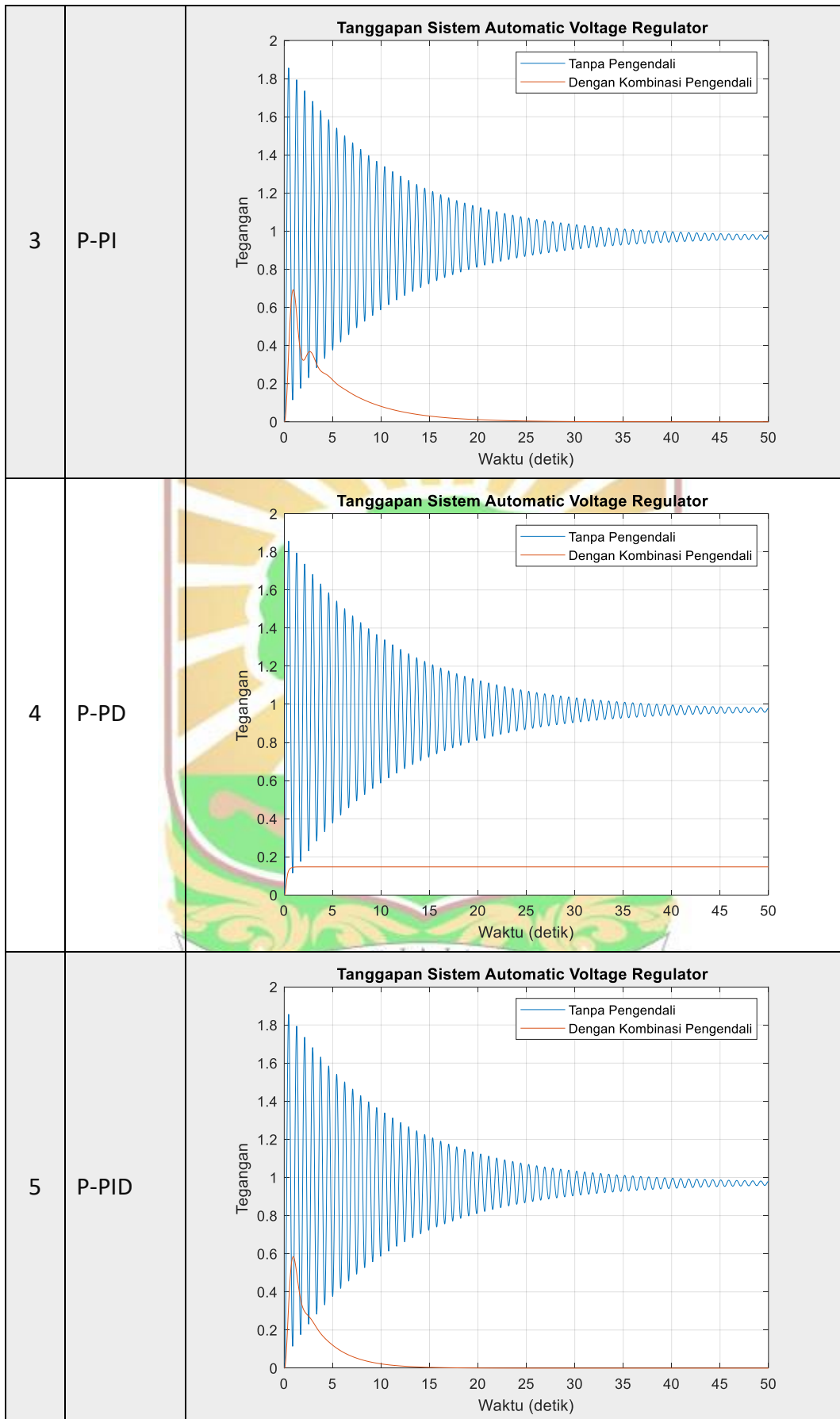
41	PDF-PDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah</p>
42	PDF-PIDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
43	PIDF-P	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

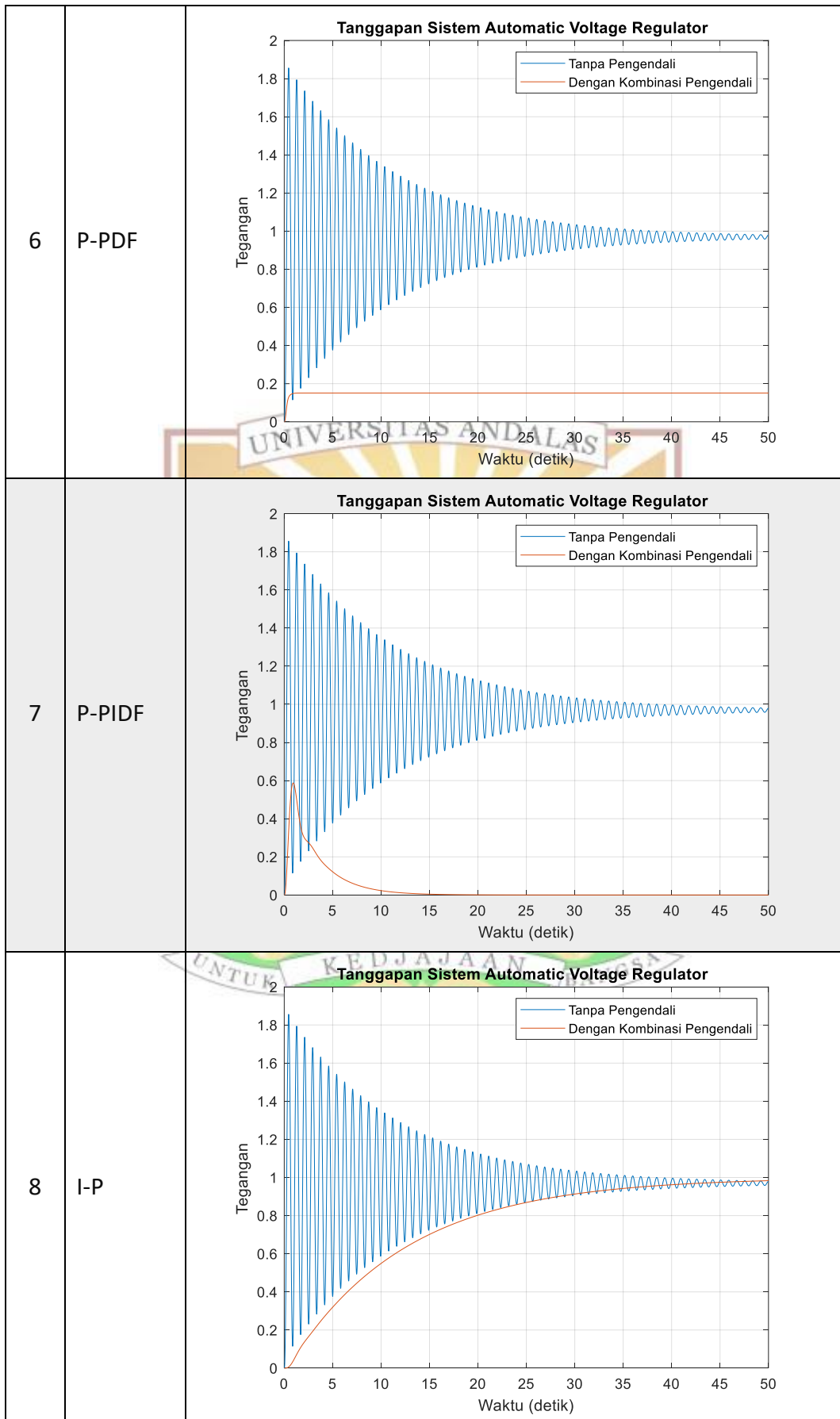
44	PIDF-I	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p> 
45	PIDF-PI	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p> 
46	PIDF-PD	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p> 

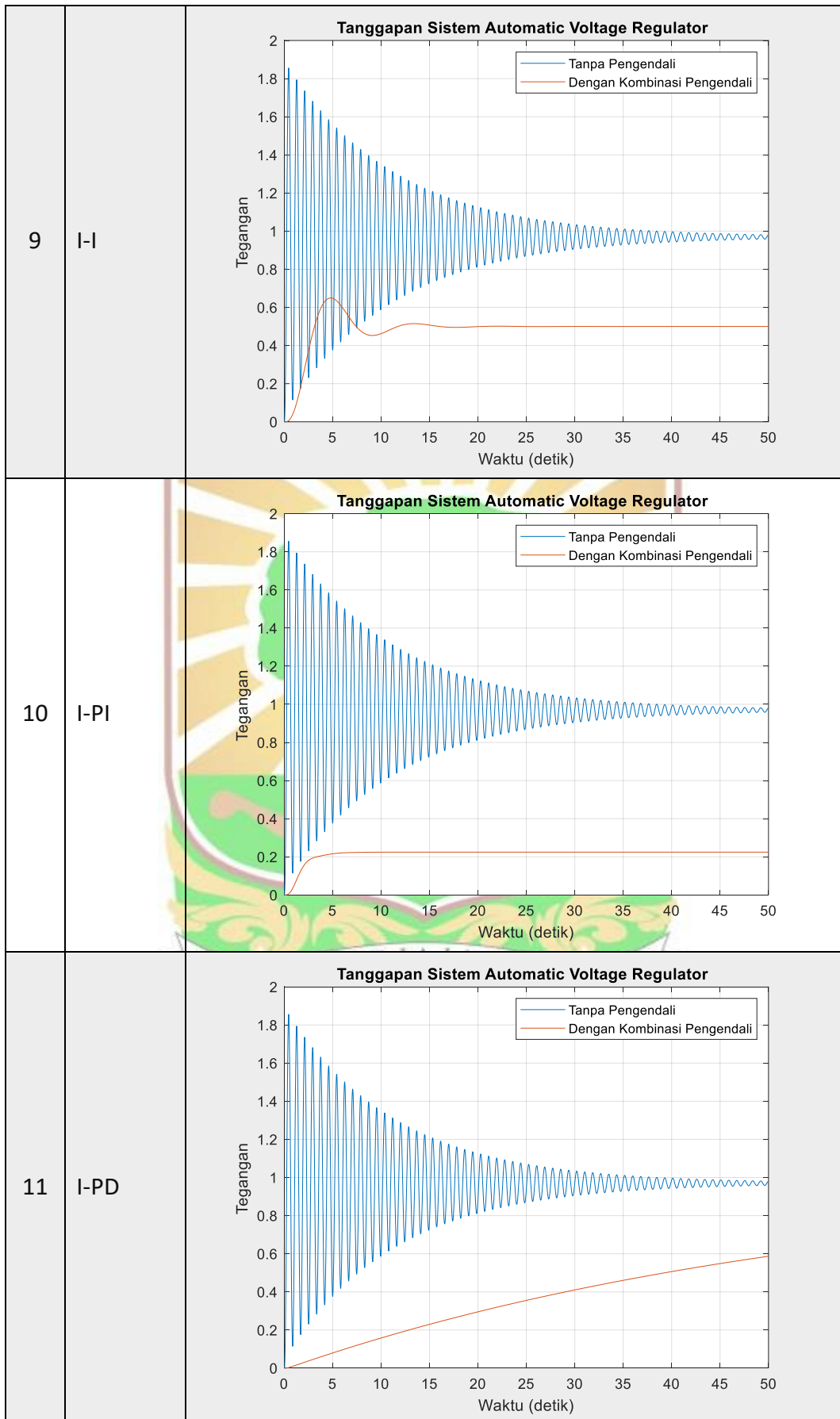
47	PIDF-PID	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
48	PIDF-PDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>
49	PIDF- PIDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah From: r To: y</p>

Lampiran H Grafik Respons Peralihan pada Sistem AVR (Sensor) dengan Pengendali

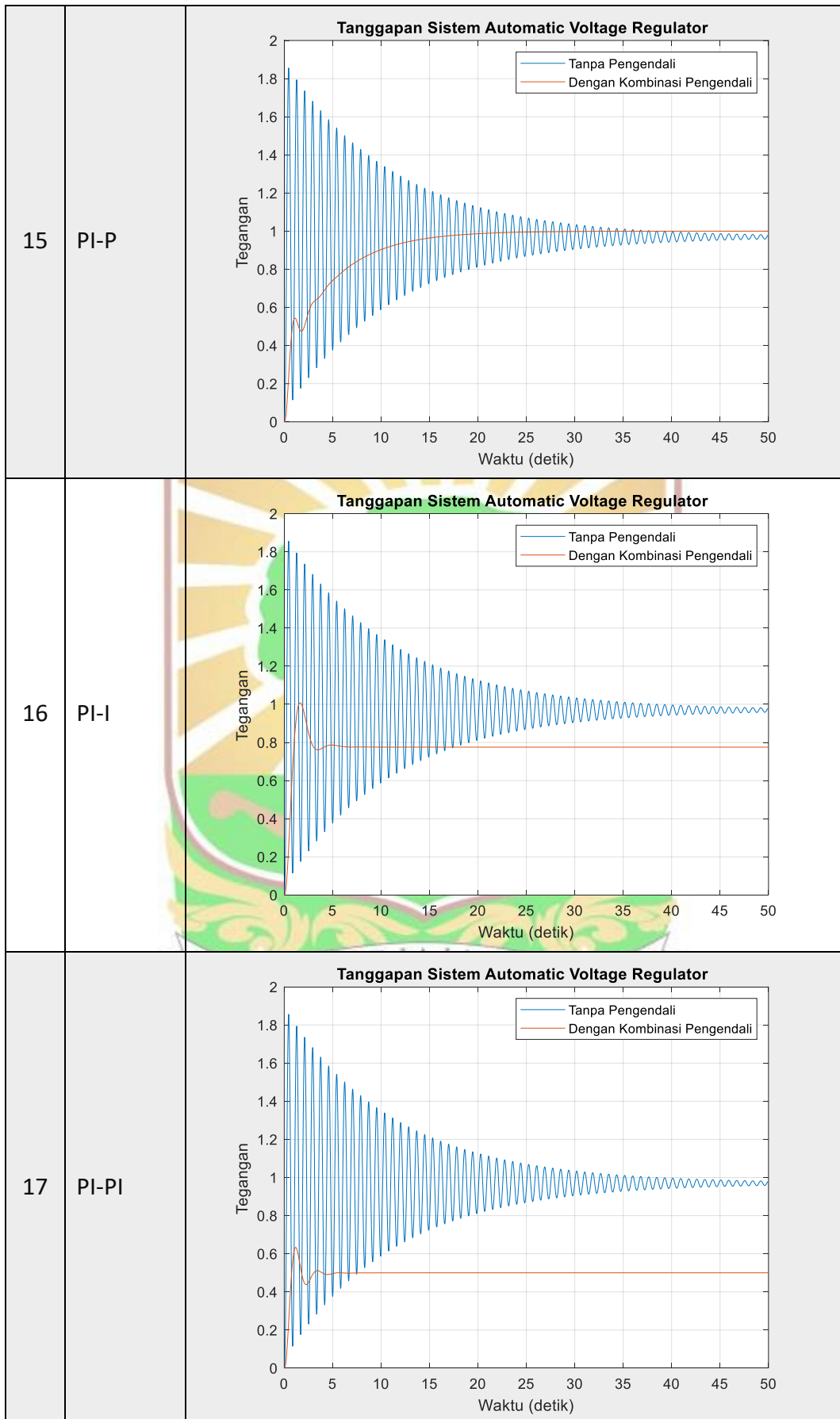
No .	Pengendali	Grafik Respons
1	P-P	
2	P-I	

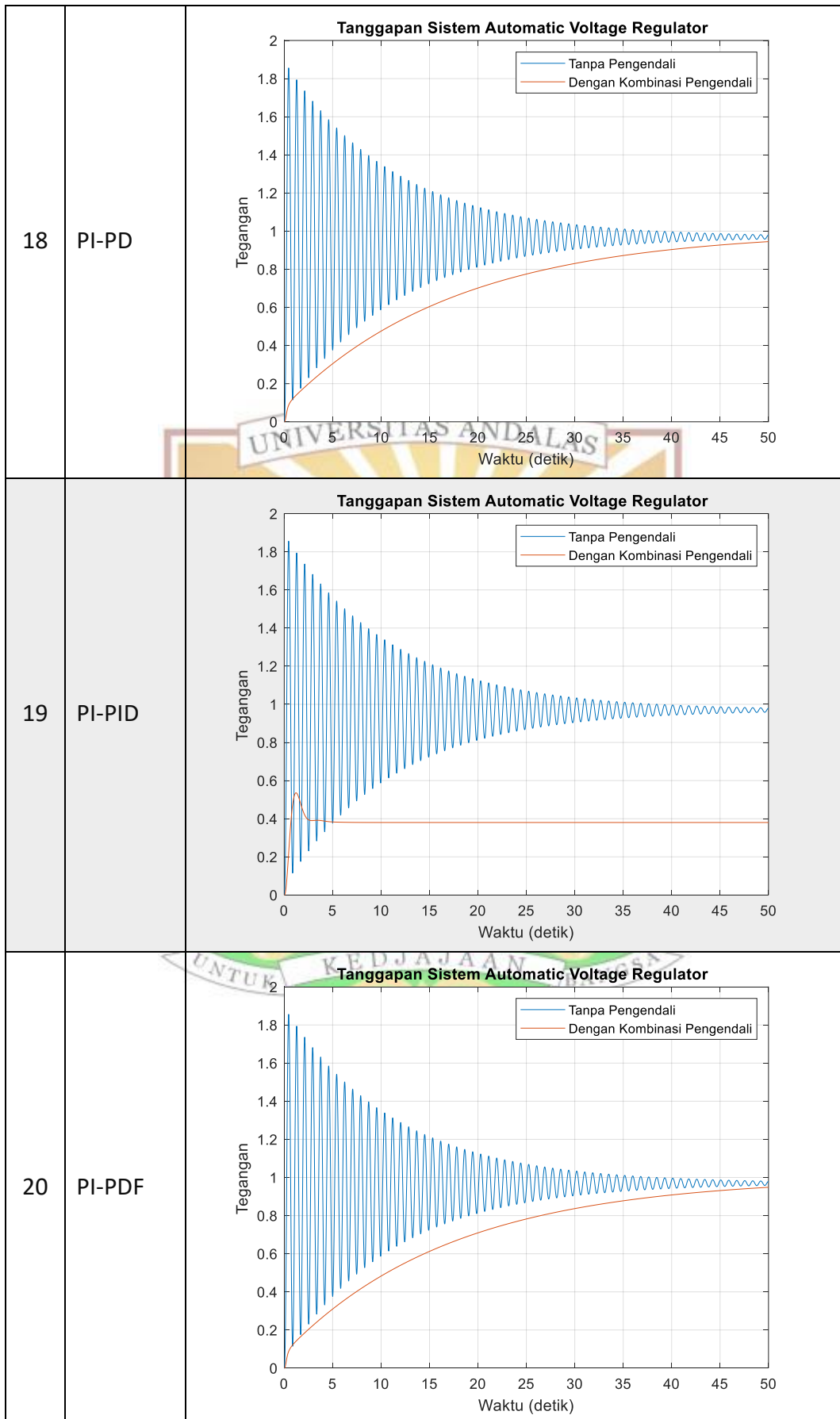


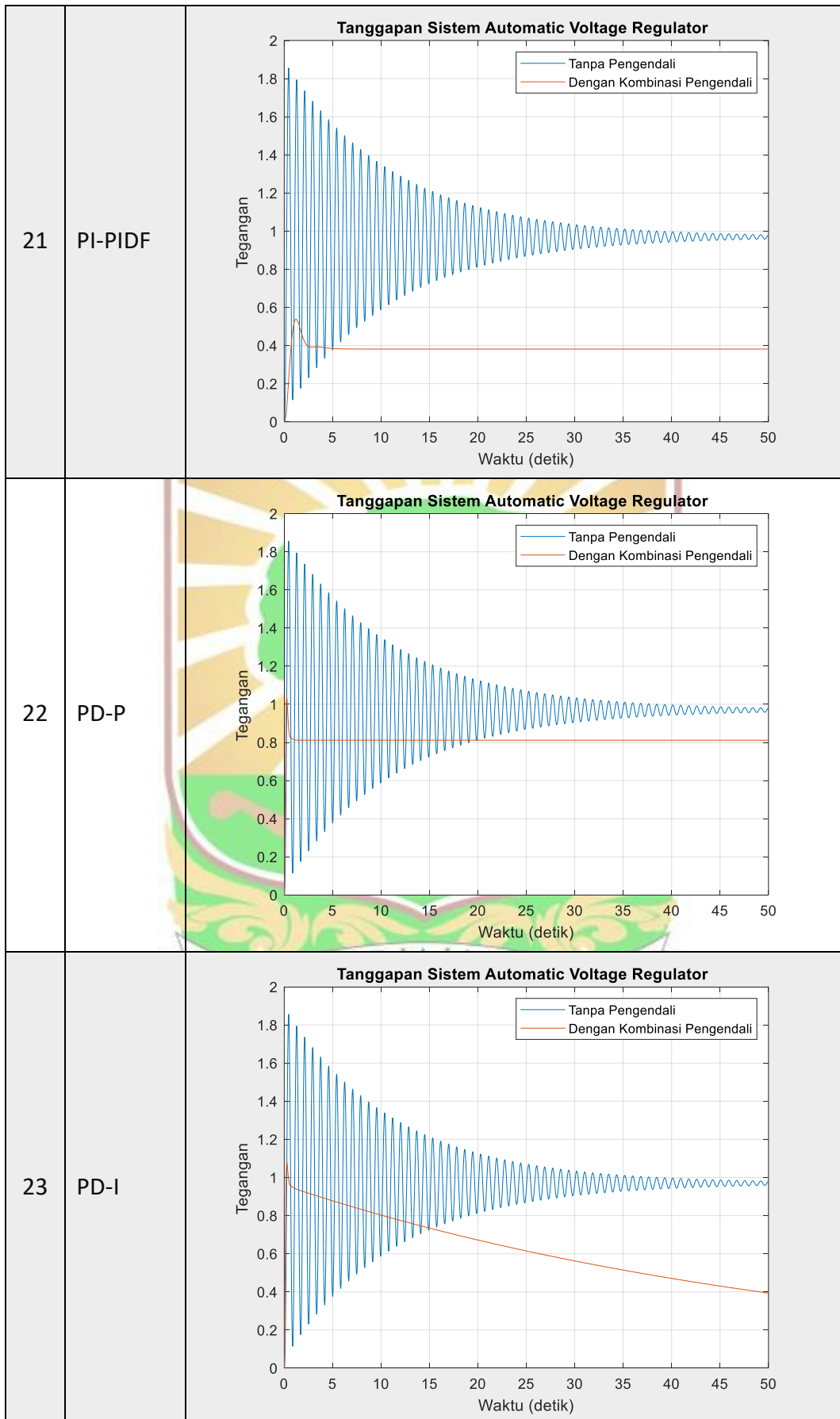


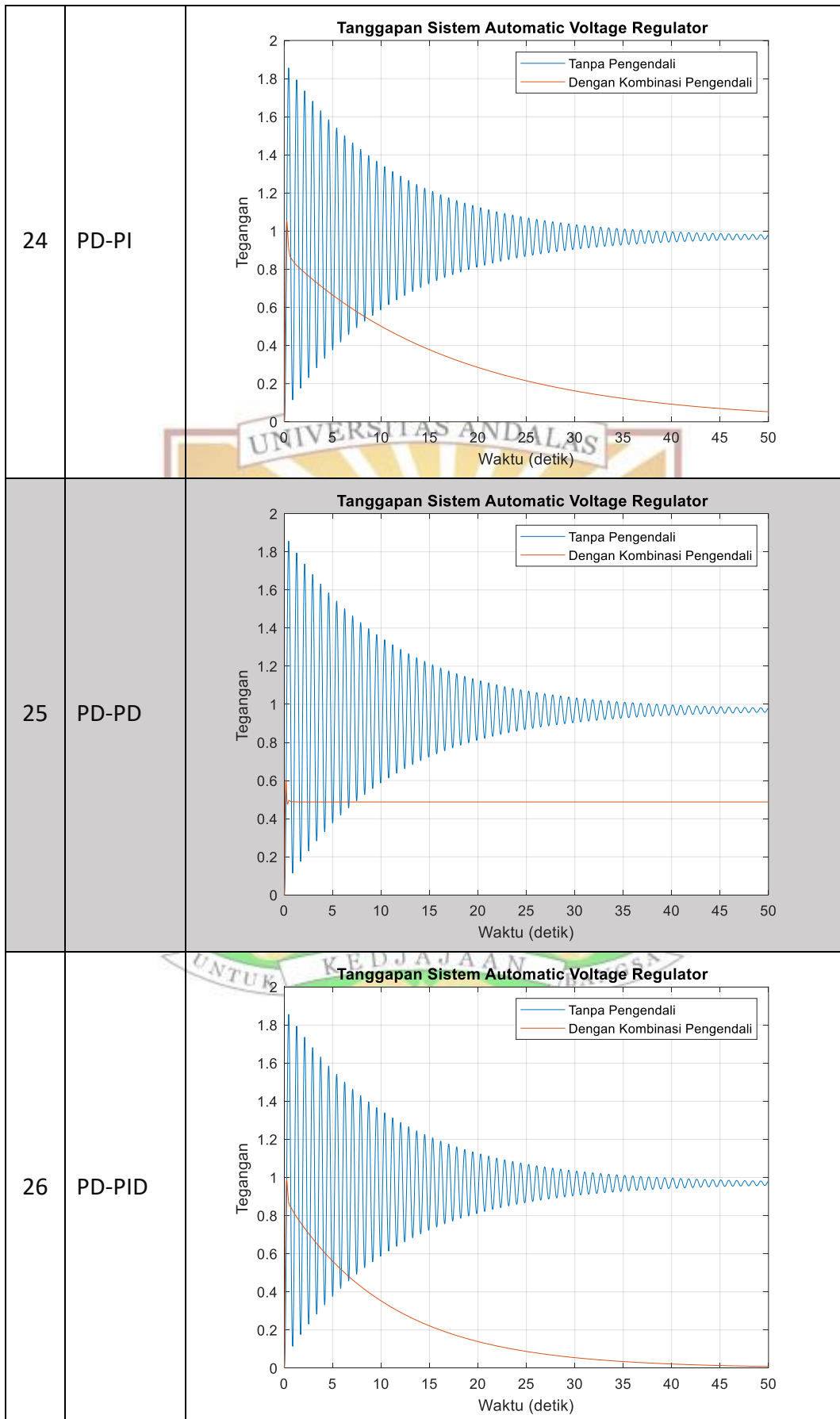


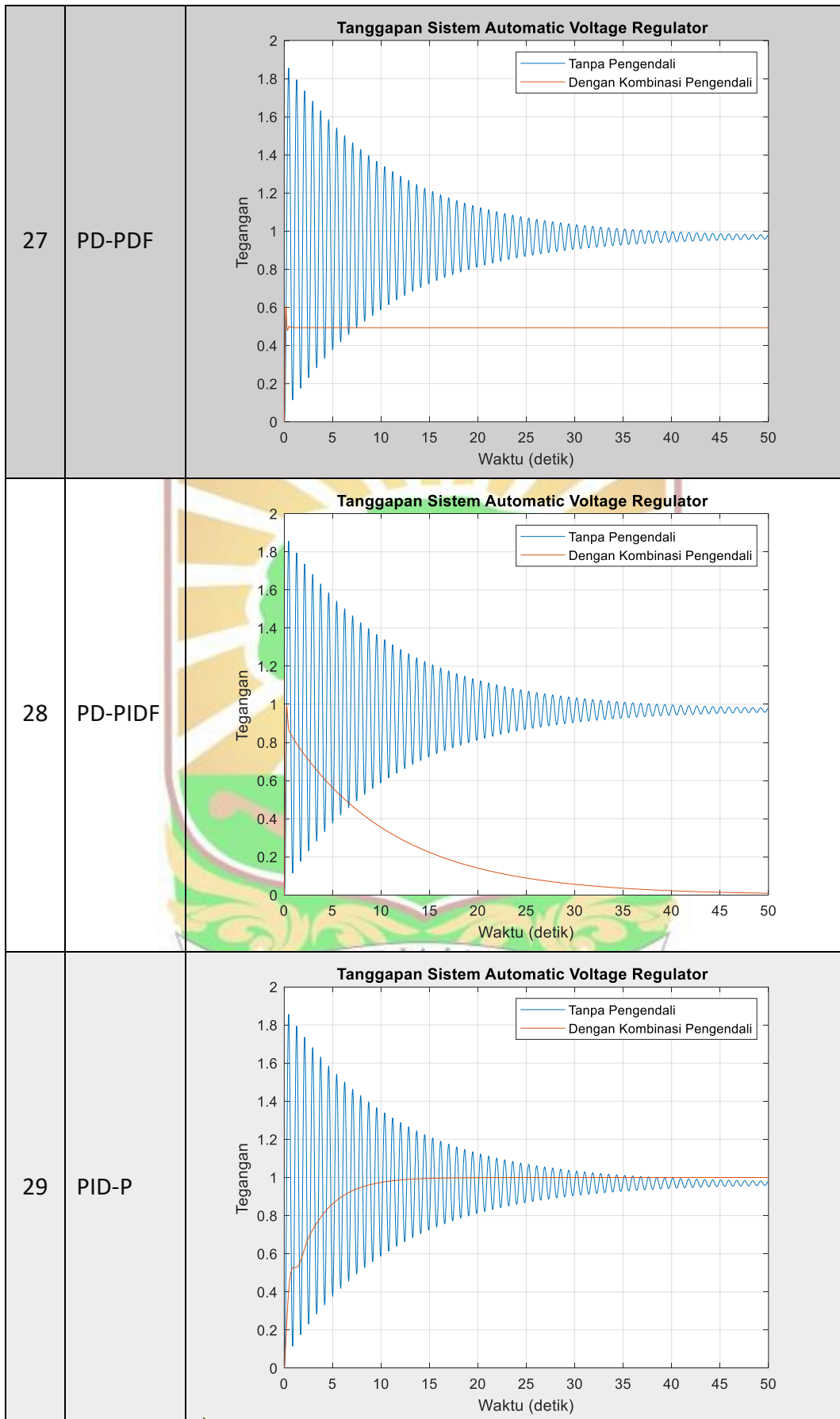
12	I-PID	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator</p>
13	I-PDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator</p>
14	I-PIDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator</p>

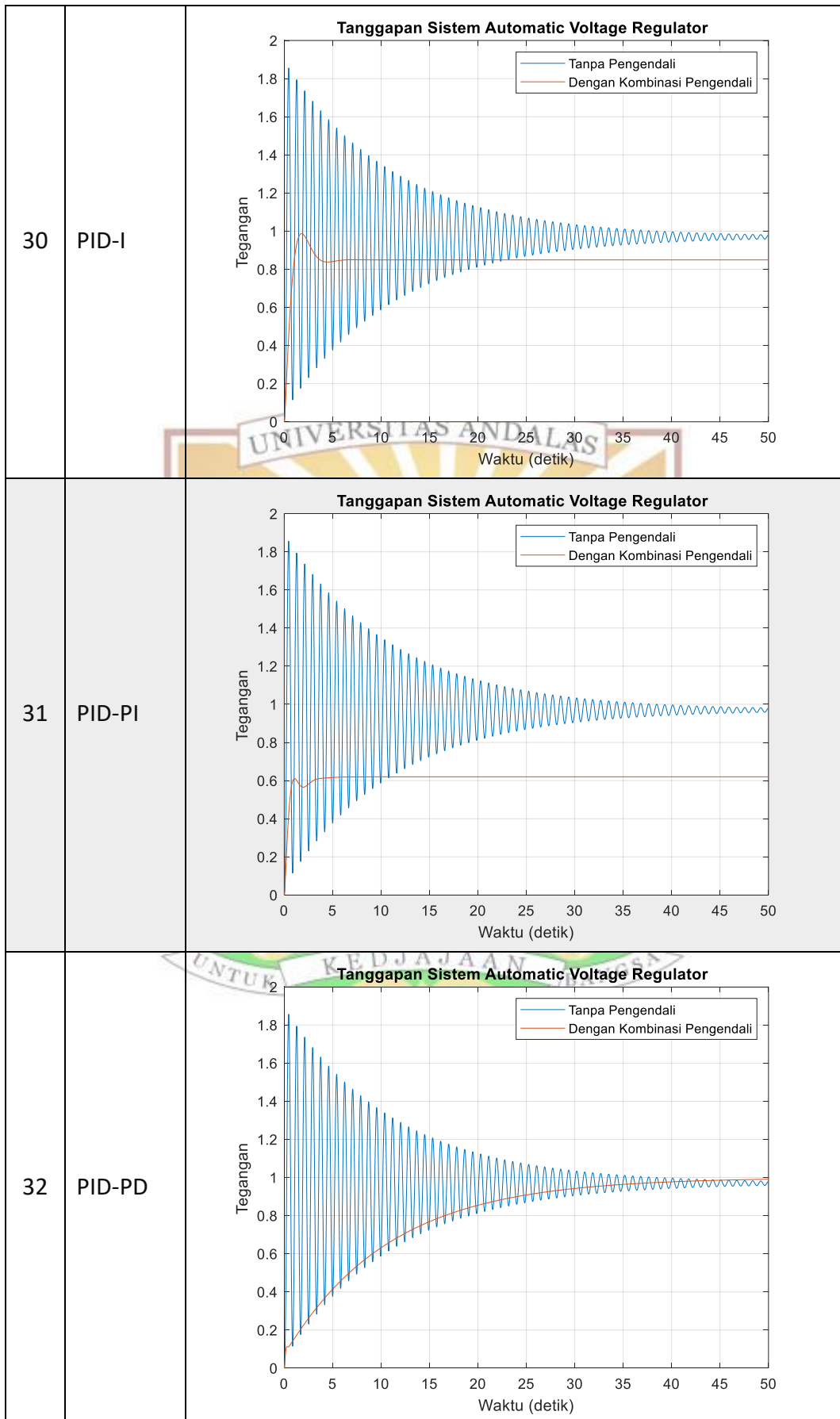


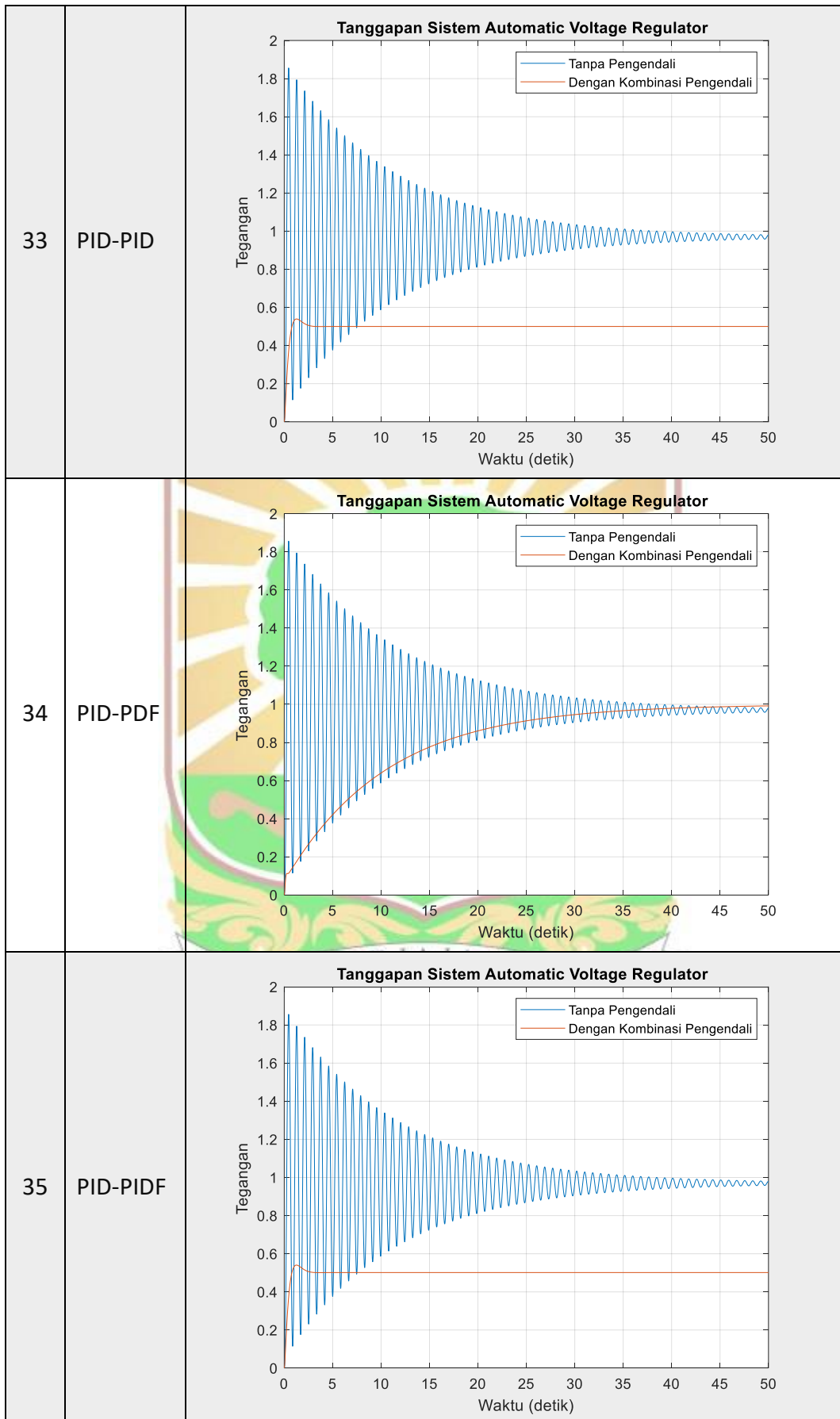








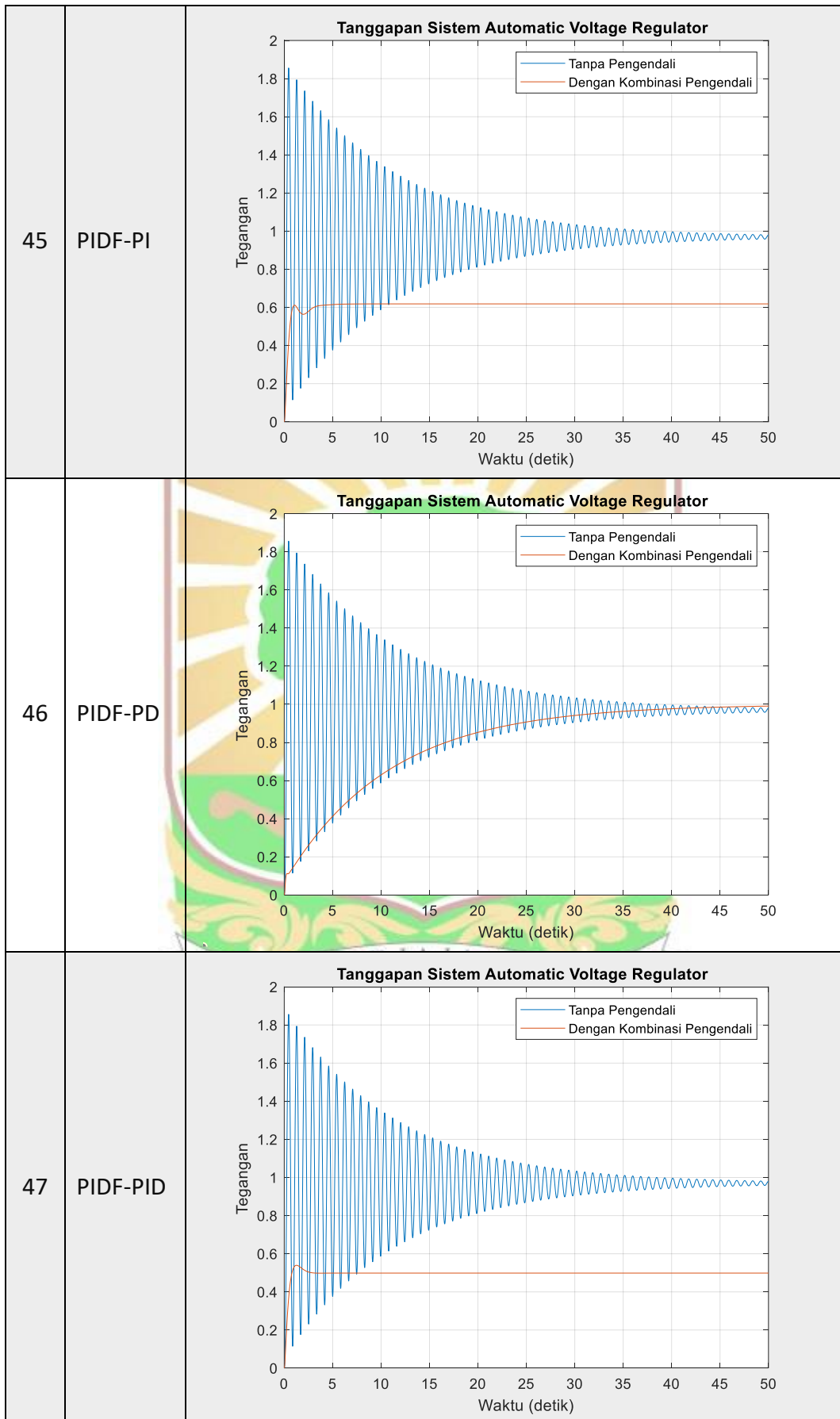


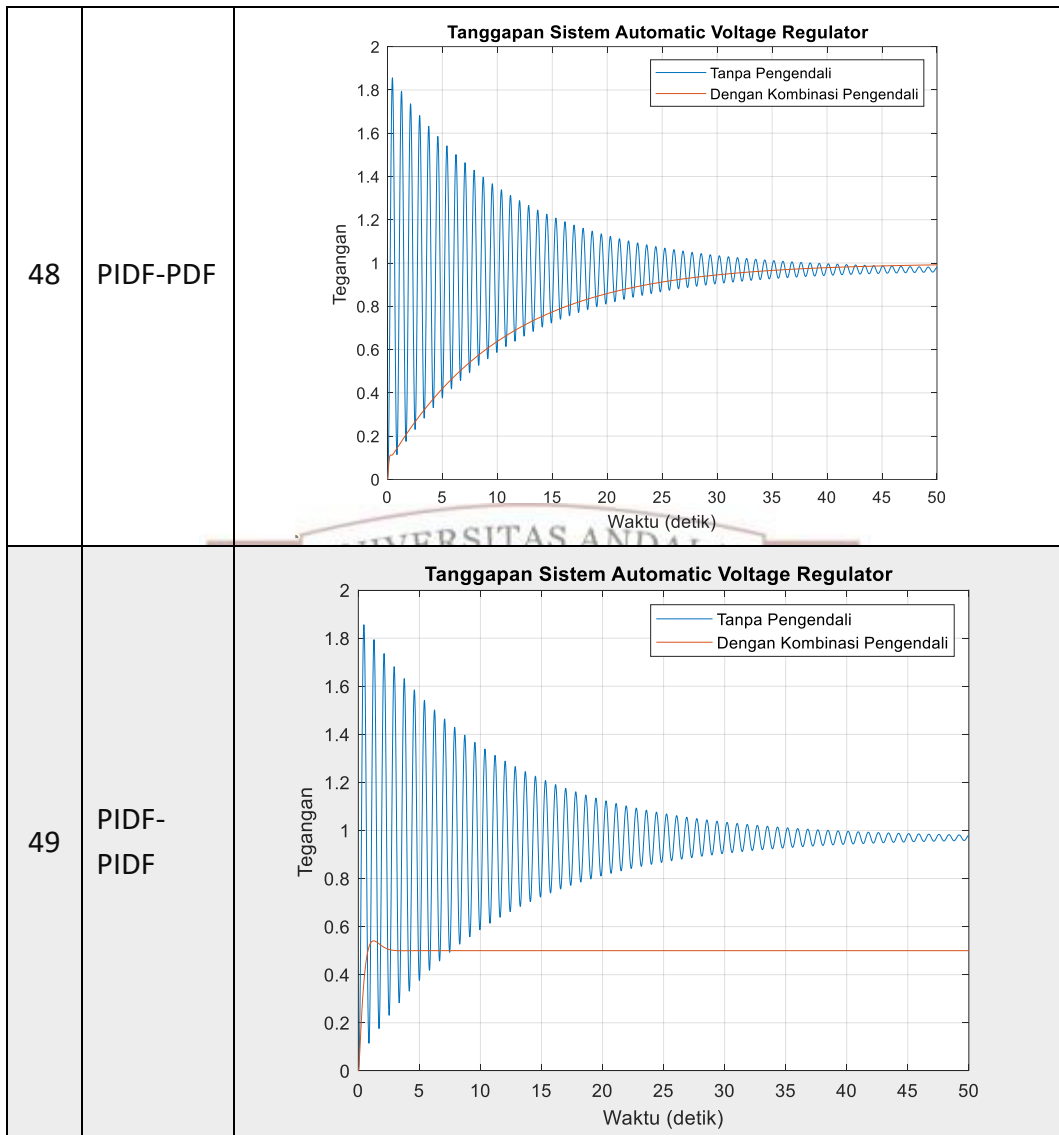


36	PDF-P	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator</p>
37	PDF-I	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator</p>
38	PDF-PI	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator</p>

39	PDF-PD	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator</p>
40	PDF-PID	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator</p>
41	PDF-PDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus Searah</p>

42	PDF-PIDF	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator</p>
43	PIDF-P	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator</p>
44	PIDF-I	<p style="text-align: center;">Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator</p>

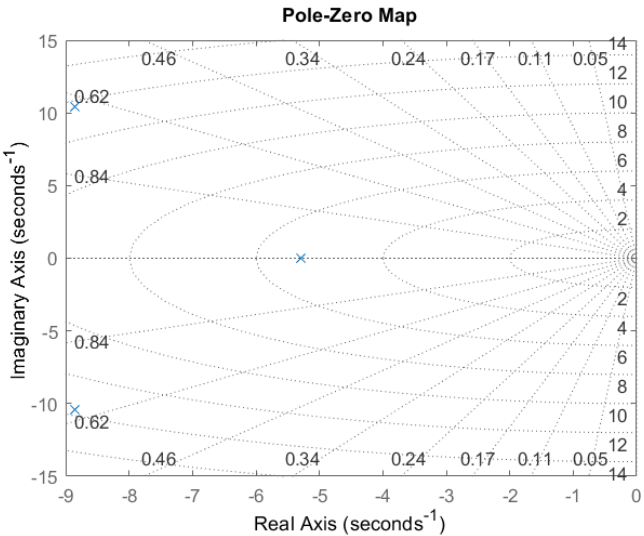
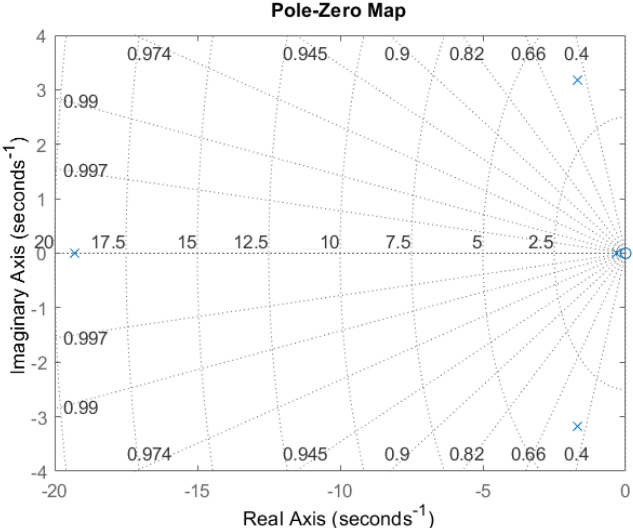
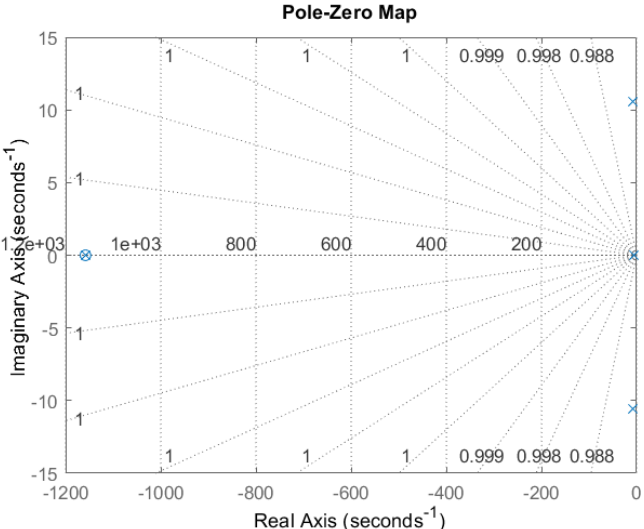


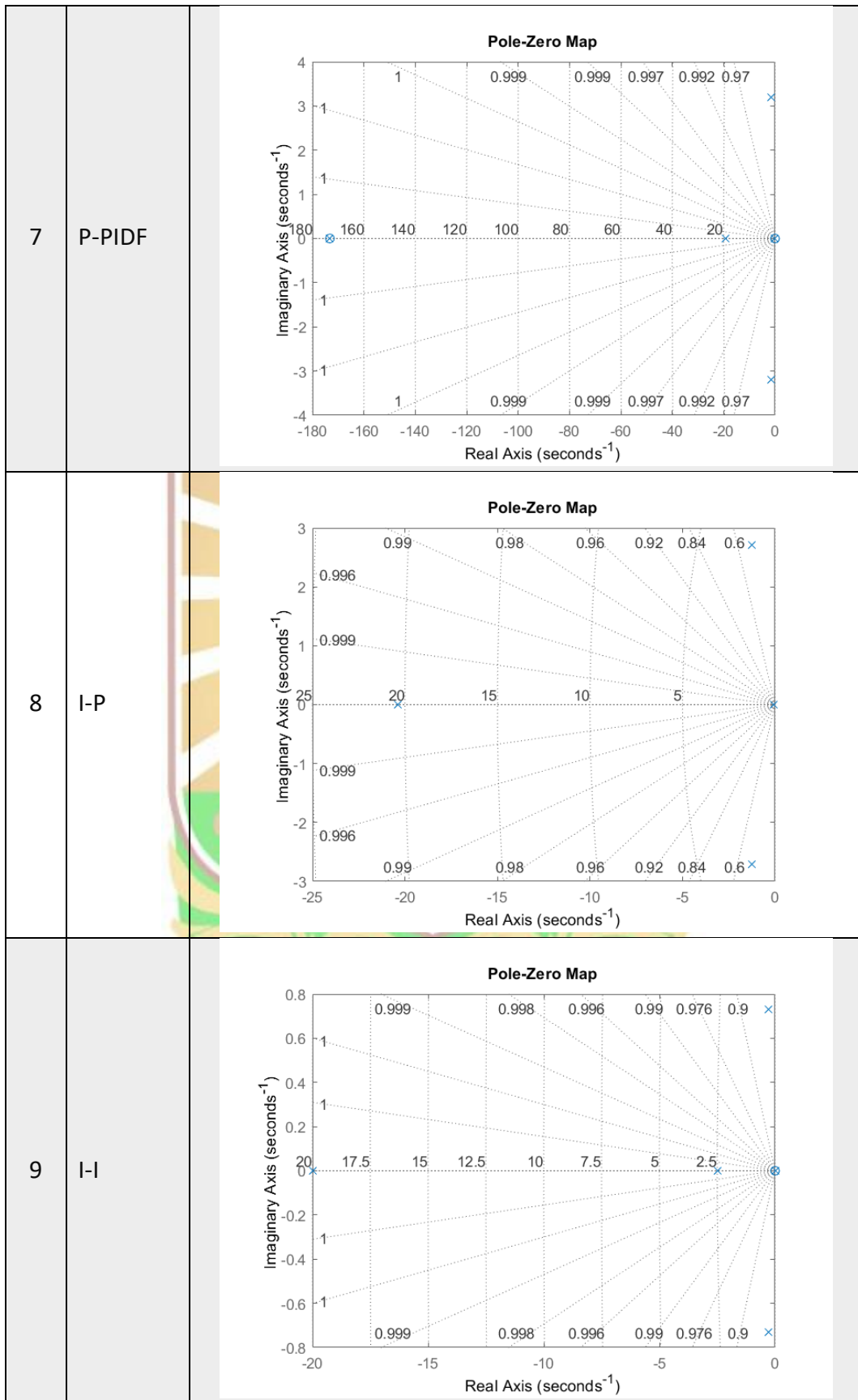


Lampiran I Grafik Posisi *Pole* (akar-akar persamaan karakteristik) pada Sistem AVR dengan Pengendali

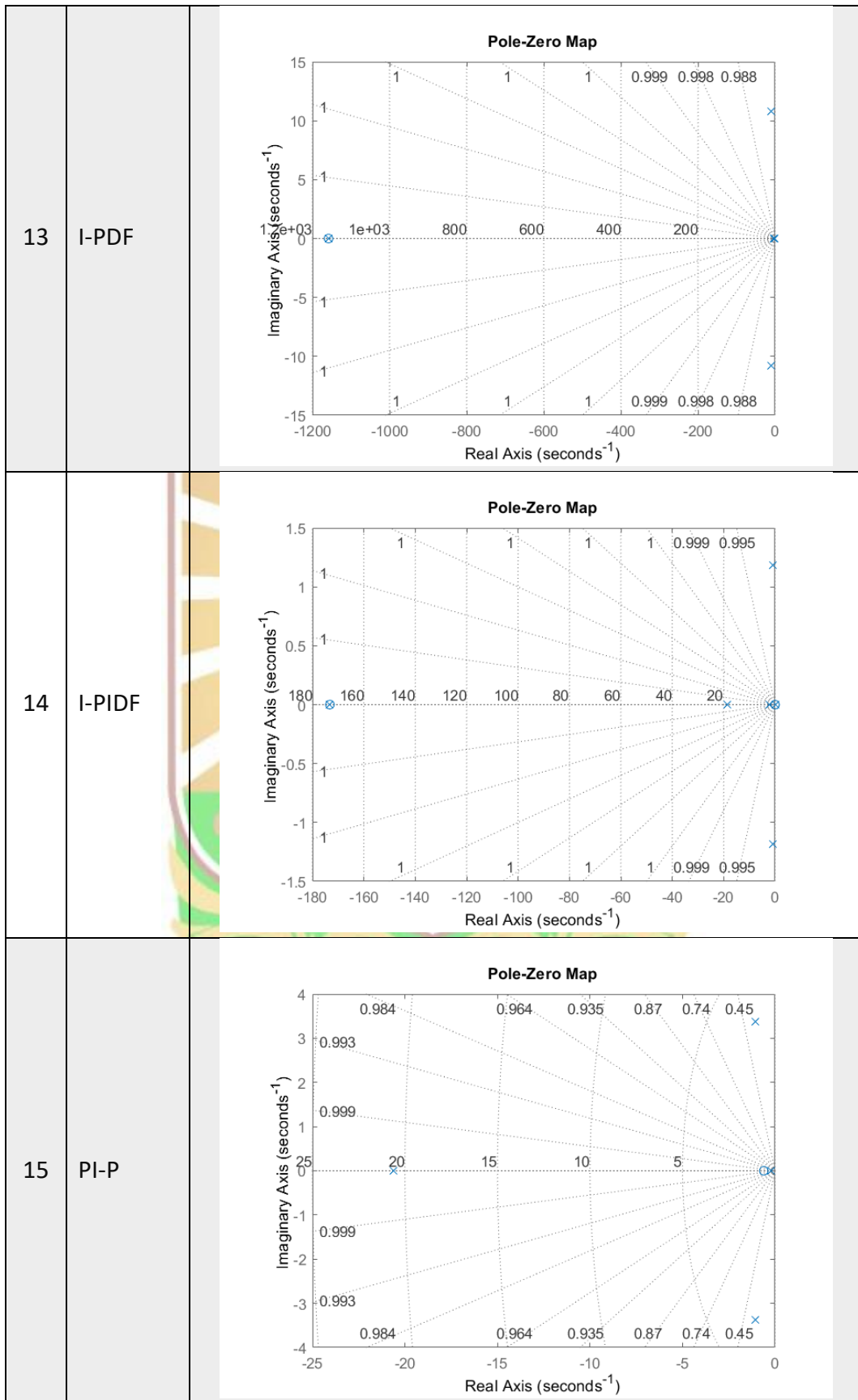
No	Pengendali	Grafik Respons
.	ali	

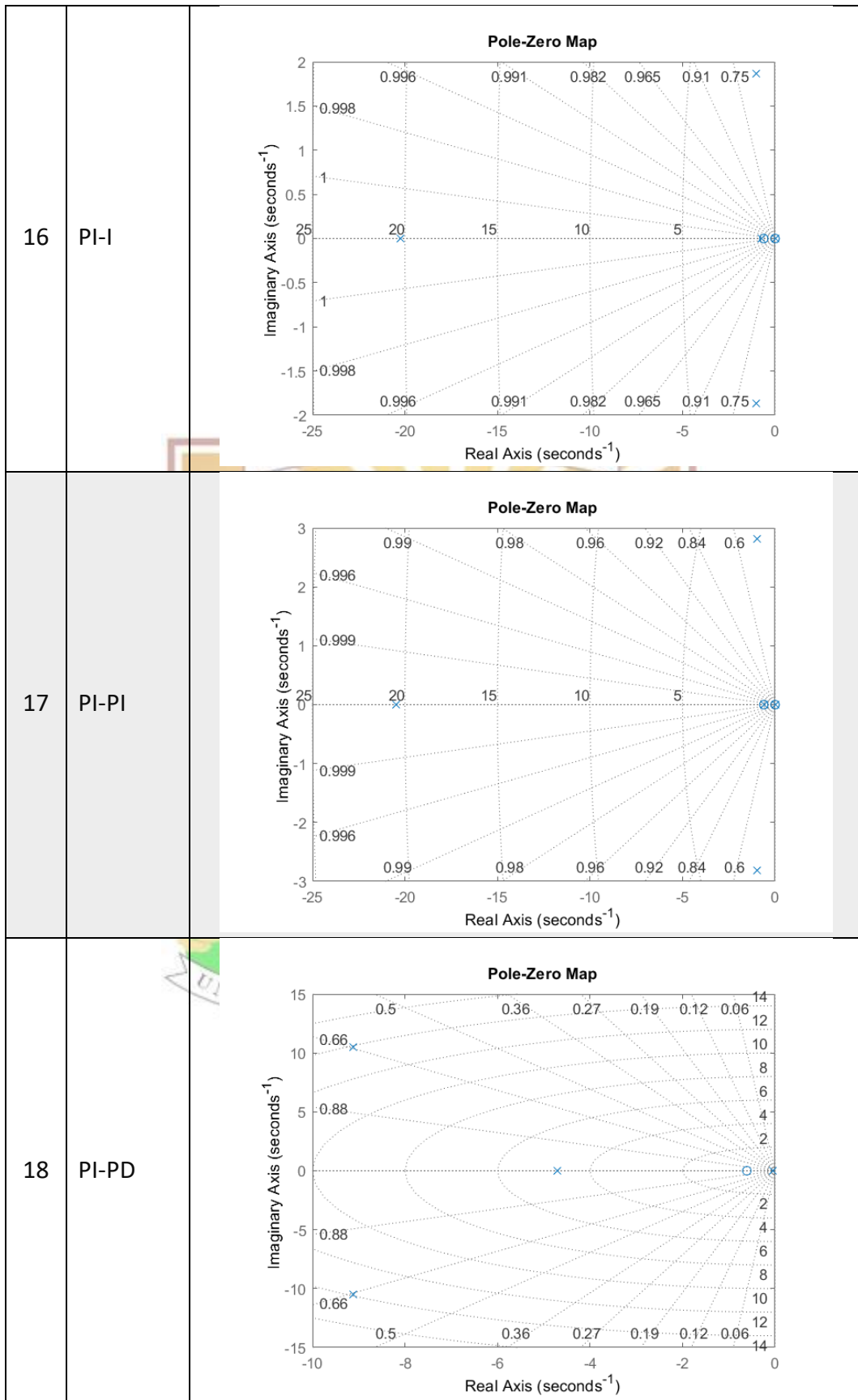
1	P-P	
2	P-I	
3	P-PI	

4	P-PD	 <p>Pole-Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p> <p>The plot shows a zero at the origin (0,0) and a pole at approximately (-5.5, 0). Damped natural frequency lines are labeled with values: 0.05, 0.11, 0.17, 0.24, 0.34, 0.46, 0.62, and 0.84.</p>
5	P-PID	 <p>Pole-Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p> <p>The plot shows a zero at the origin (0,0) and a pole at approximately (-17.5, 0). Damped natural frequency lines are labeled with values: 0.4, 0.66, 0.82, 0.9, 0.945, 0.974, 0.99, and 0.997.</p>
6	P-PDF	 <p>Pole-Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p> <p>The plot shows a zero at the origin (0,0) and a pole at approximately (-1000, 0). Damped natural frequency lines are labeled with values: 0.988, 0.998, 0.999, 1, 200, 400, 600, 800, 1e+03, and 1e+03.</p>



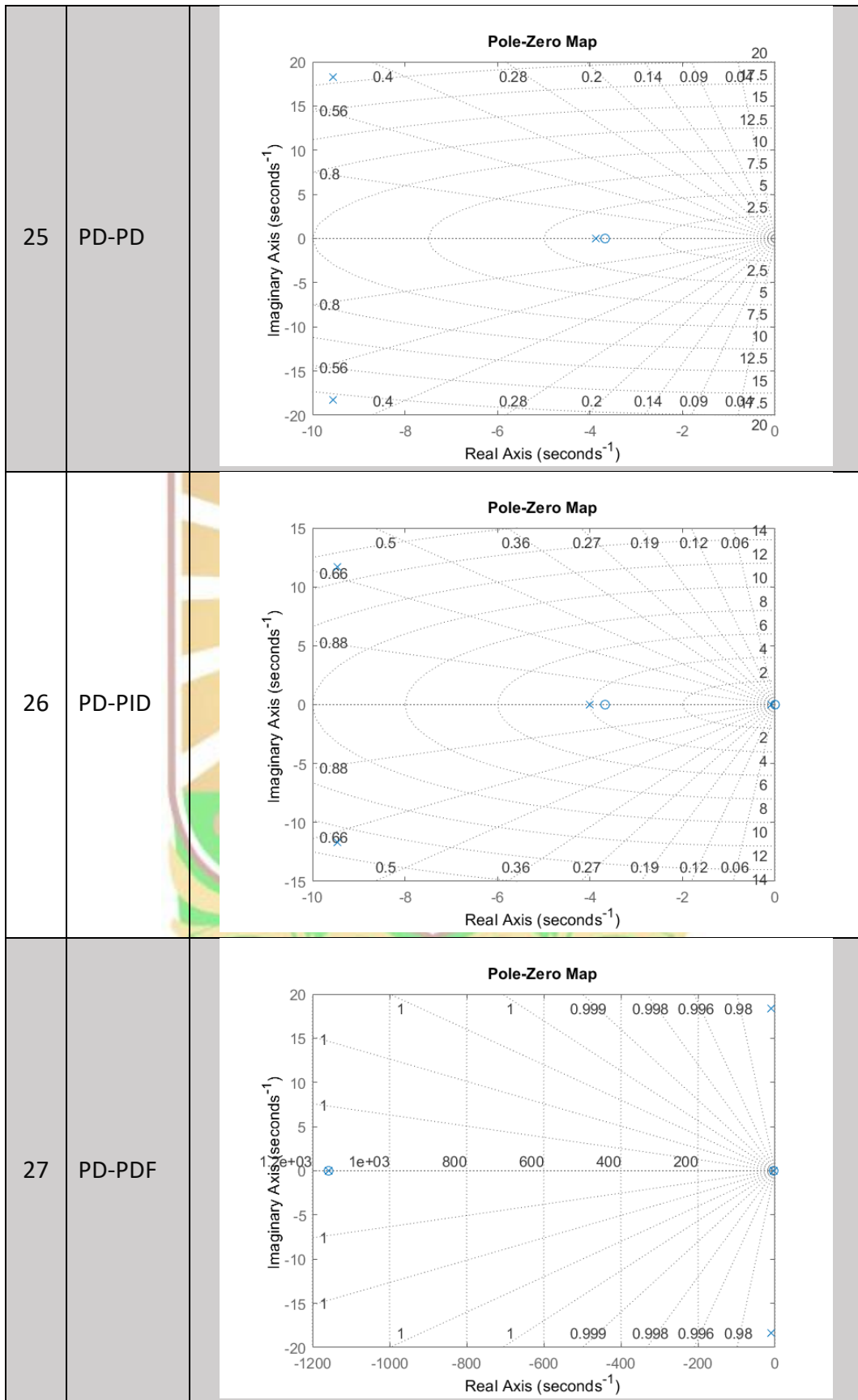
10	I-PI	<p>Pole-Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
11	I-PD	<p>Pole-Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
12	I-PID	<p>Pole-Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>

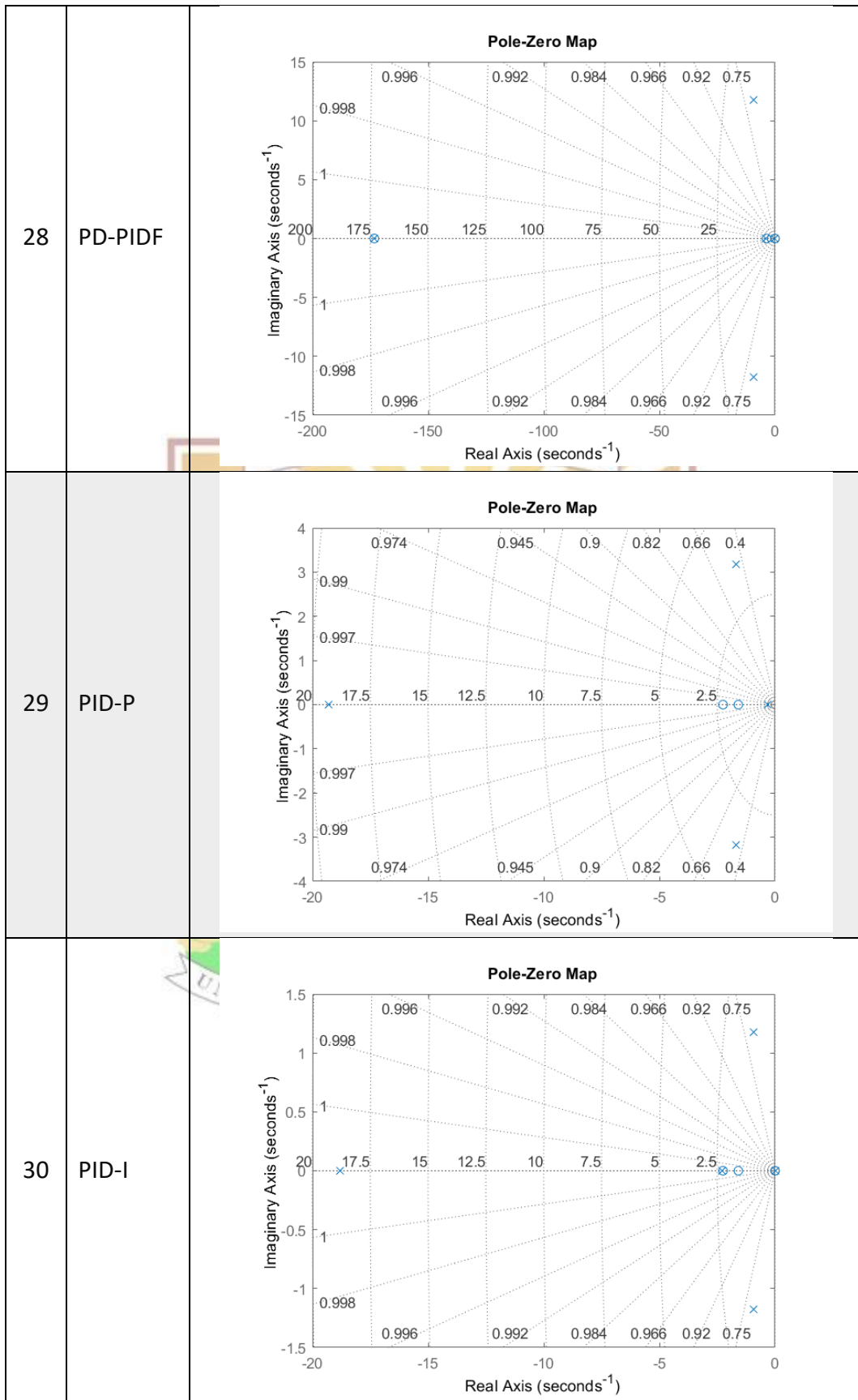


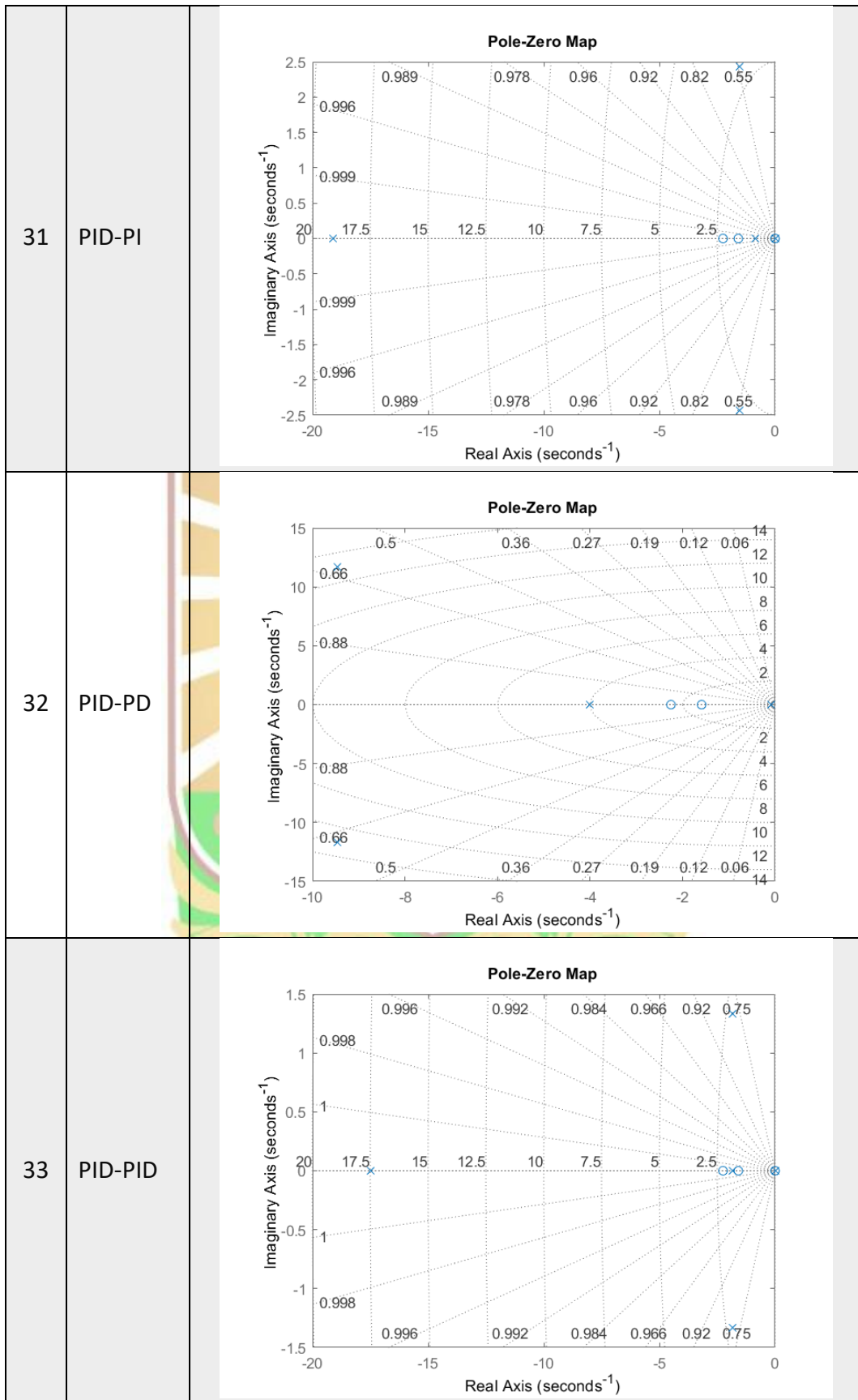


19	PI-PID	
20	PI-PDF	
21	PI-PIDF	

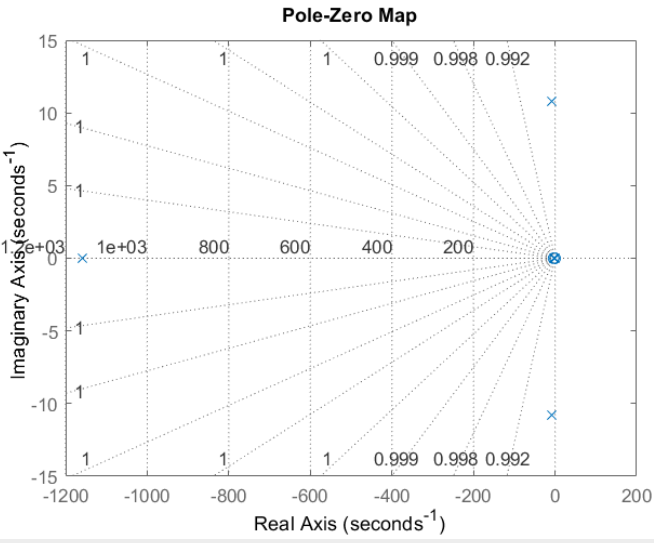
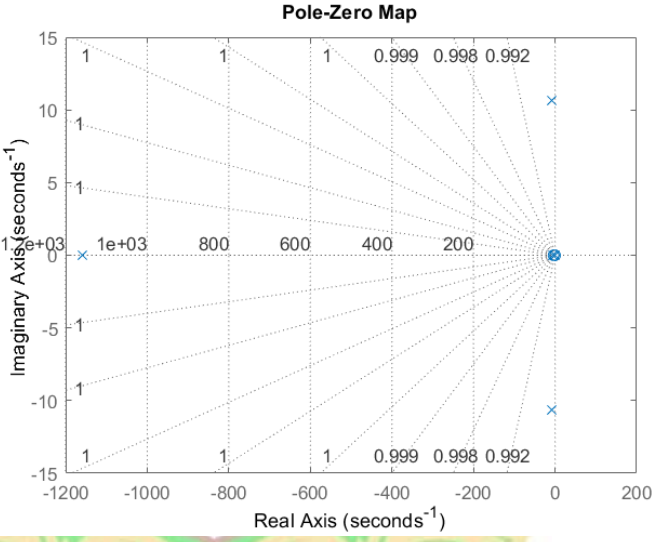
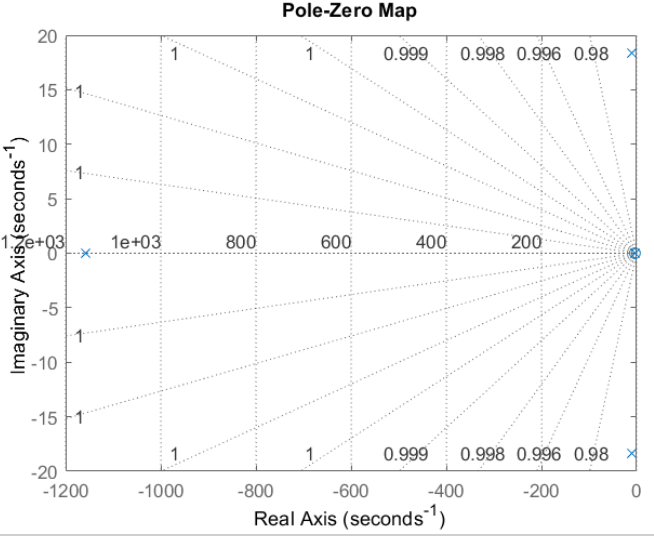
22	PD-P	
23	PD-I	
24	PD-PI	

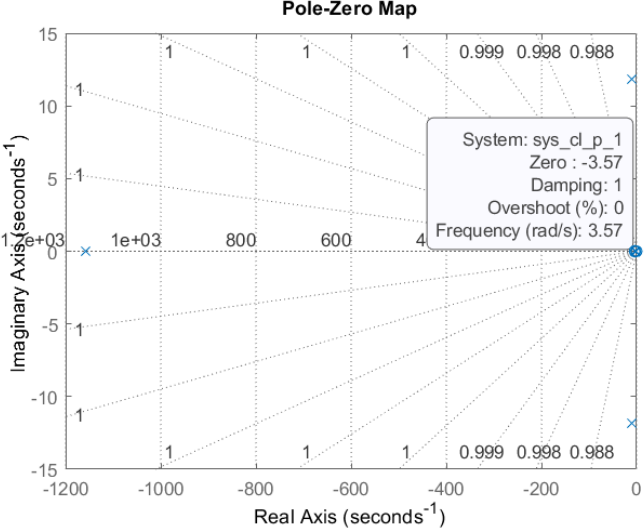
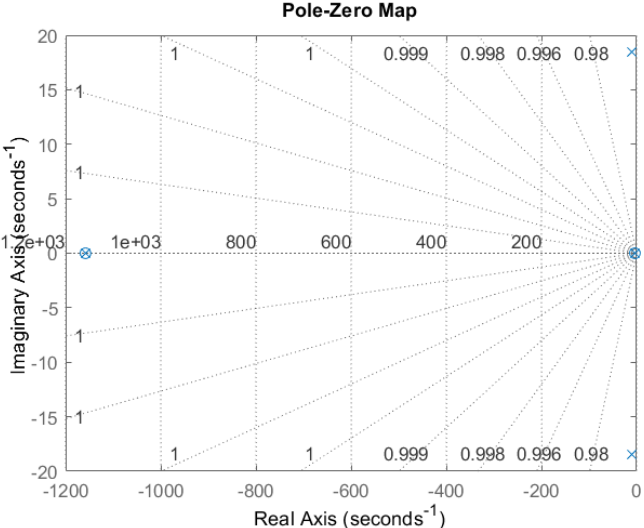
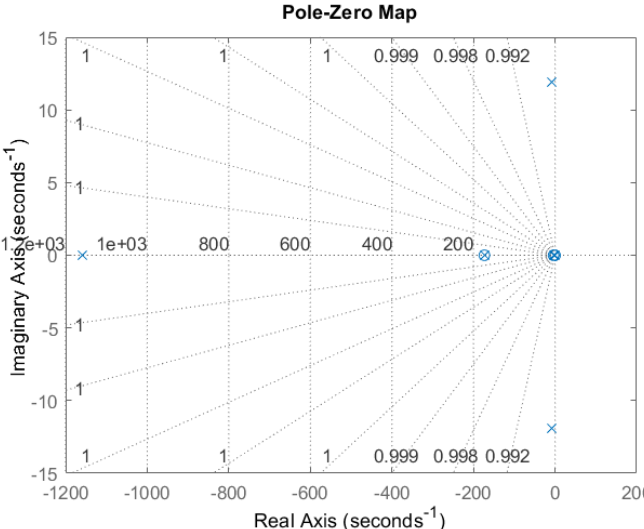


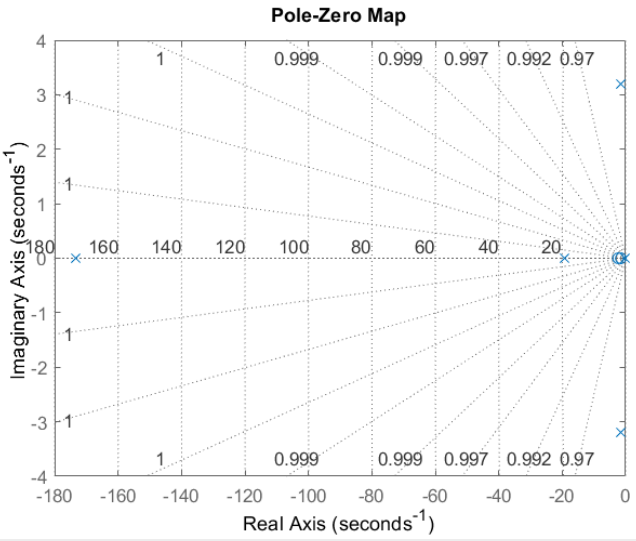
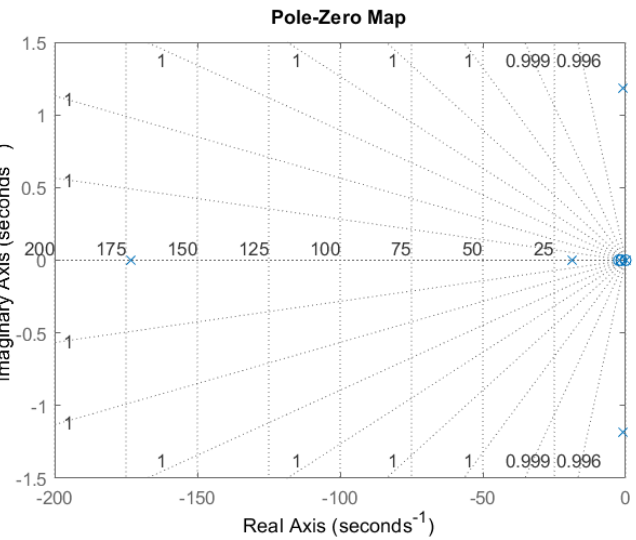
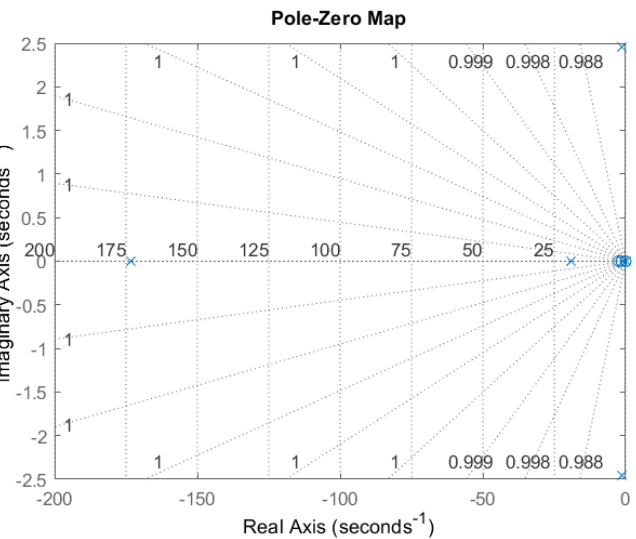




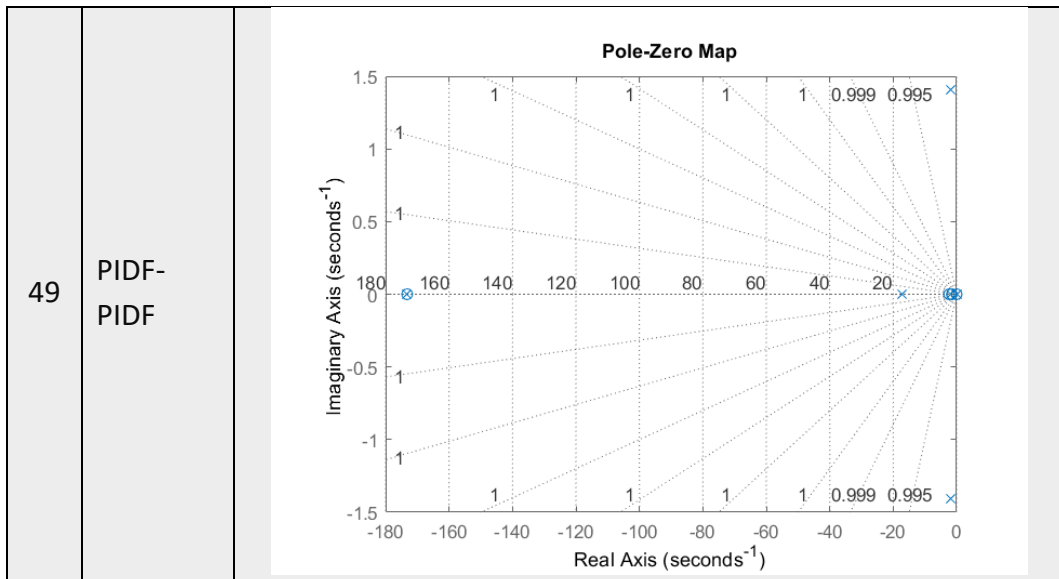
34	PID-PDF	
35	PID-PIDF	
36	PDF-P	

37	PDF-I	 <p>Pole-Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
38	PDF-PI	 <p>Pole-Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
39	PDF-PD	 <p>Pole-Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>

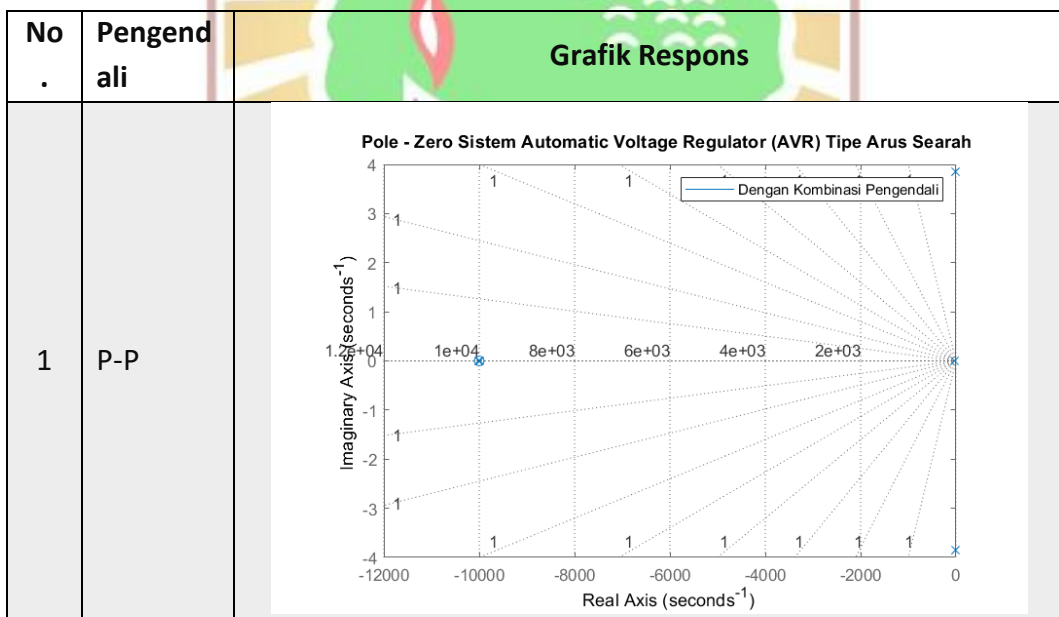
40	PDF-PID	 <p>Pole-Zero Map</p> <p>System: sys_cl_p_1 Zero: -3.57 Damping: 1 Overshoot (%): 0 Frequency (rad/s): 3.57</p>
41	PDF-PDF	 <p>Pole-Zero Map</p>
42	PDF-PIDF	 <p>Pole-Zero Map</p>

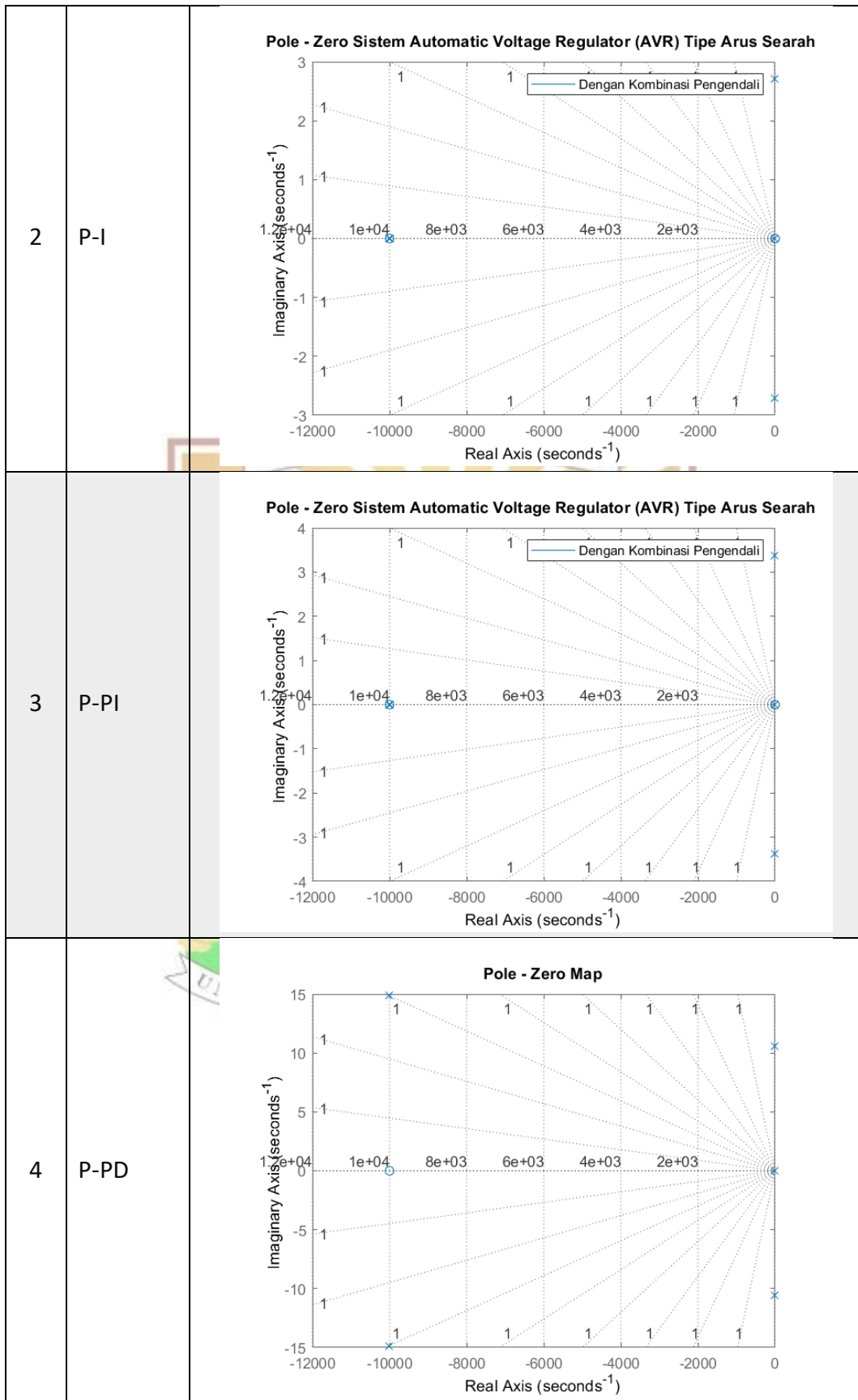
43	PIDF-P	 <p>Pole-Zero Map</p> <p>The plot shows the complex plane with the Real Axis (seconds⁻¹) on the x-axis ranging from -180 to 0 and the Imaginary Axis (seconds⁻¹) on the y-axis ranging from -4 to 4. A zero is located at the origin (0,0). Poles are marked with 'x' at approximately (-170, 0), (-170, 3.2), (-170, -3.2), and (-170, 0). Dotted lines represent asymptotes originating from the real axis at -170, with angles of approximately ±18°, ±54°, and ±90°. The damping ratio (ζ) values for the poles are labeled as 0.999, 0.999, 0.997, 0.992, and 0.97.</p>
44	PIDF-I	 <p>Pole-Zero Map</p> <p>The plot shows the complex plane with the Real Axis (seconds⁻¹) on the x-axis ranging from -200 to 0 and the Imaginary Axis (seconds⁻¹) on the y-axis ranging from -1.5 to 1.5. A zero is located at the origin (0,0). Poles are marked with 'x' at approximately (-175, 0), (-175, 1.2), (-175, -1.2), and (-175, 0). Dotted lines represent asymptotes originating from the real axis at -175, with angles of approximately ±18°, ±54°, and ±90°. The damping ratio (ζ) values for the poles are labeled as 0.999 and 0.996.</p>
45	PIDF-PI	 <p>Pole-Zero Map</p> <p>The plot shows the complex plane with the Real Axis (seconds⁻¹) on the x-axis ranging from -200 to 0 and the Imaginary Axis (seconds⁻¹) on the y-axis ranging from -2.5 to 2.5. A zero is located at the origin (0,0). Poles are marked with 'x' at approximately (-175, 0), (-175, 2.4), (-175, -2.4), and (-175, 0). Dotted lines represent asymptotes originating from the real axis at -175, with angles of approximately ±18°, ±54°, and ±90°. The damping ratio (ζ) values for the poles are labeled as 0.999, 0.998, and 0.988.</p>

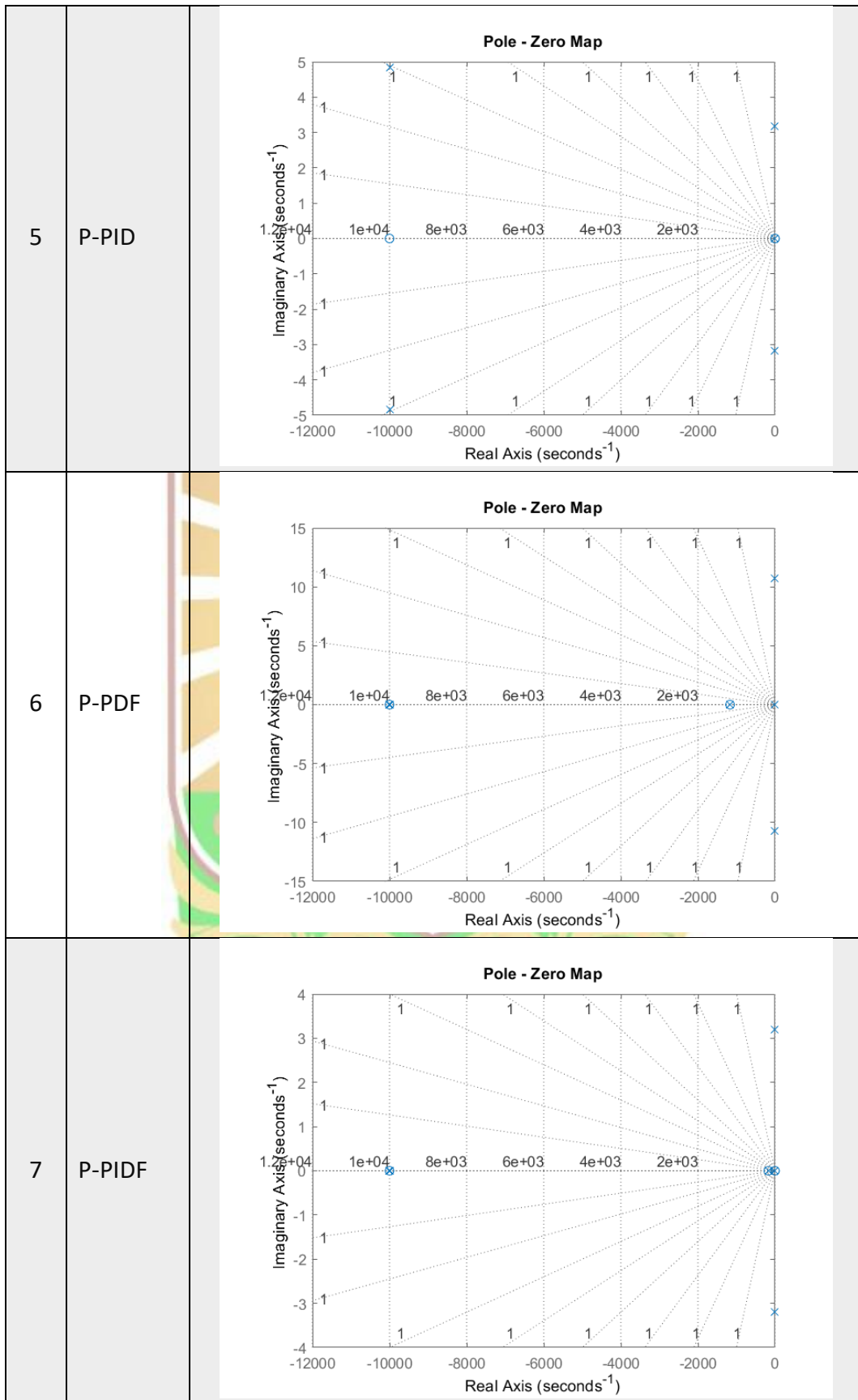
46	PIDF-PD	<p style="text-align: center;">Pole-Zero Map</p>
47	PIDF-PID	<p style="text-align: center;">Pole-Zero Map</p>
48	PIDF-PDF	<p style="text-align: center;">Pole-Zero Map</p>



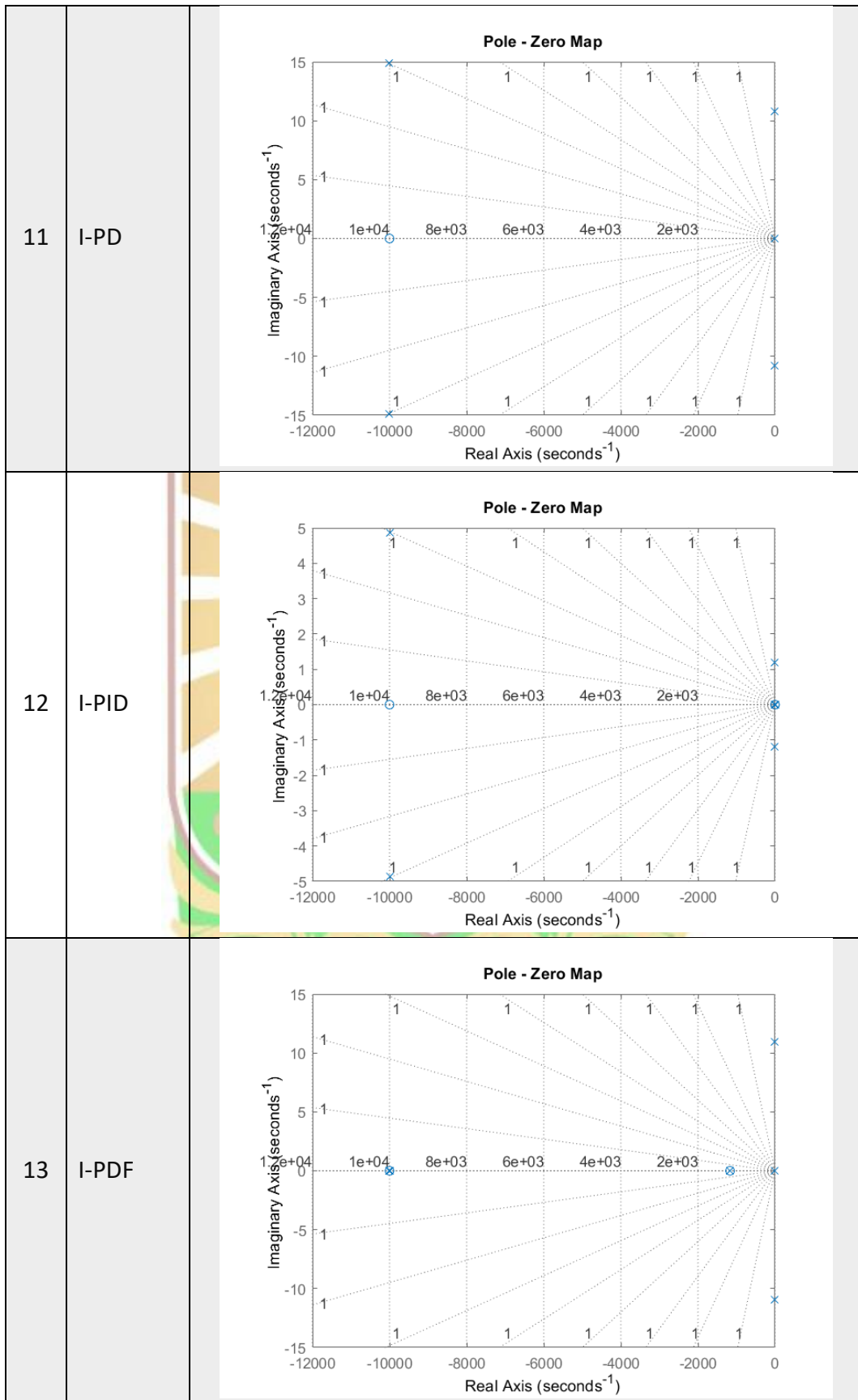
Lampiran J Grafik Posisi *Pole* (akar-akar persamaan karakteristik) pada Sistem AVR (Sensor) dengan Pengendali



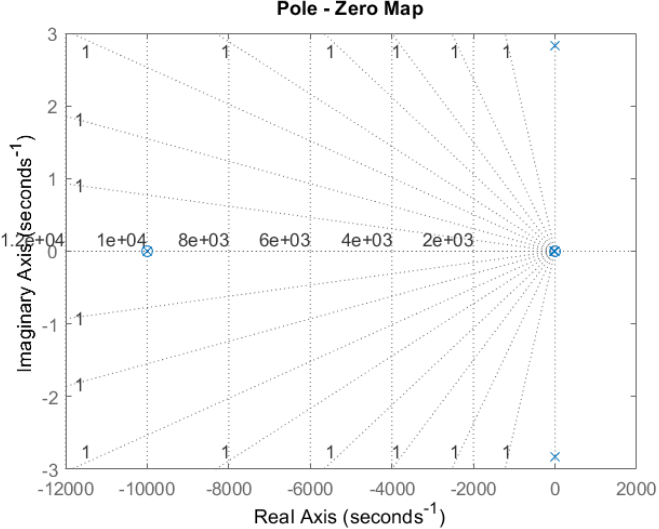
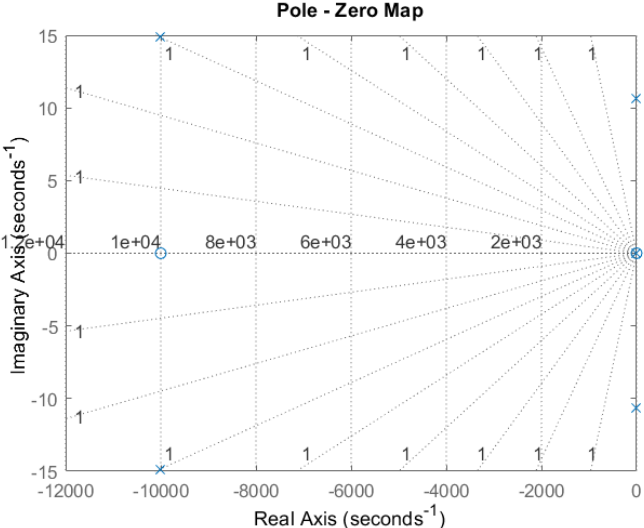
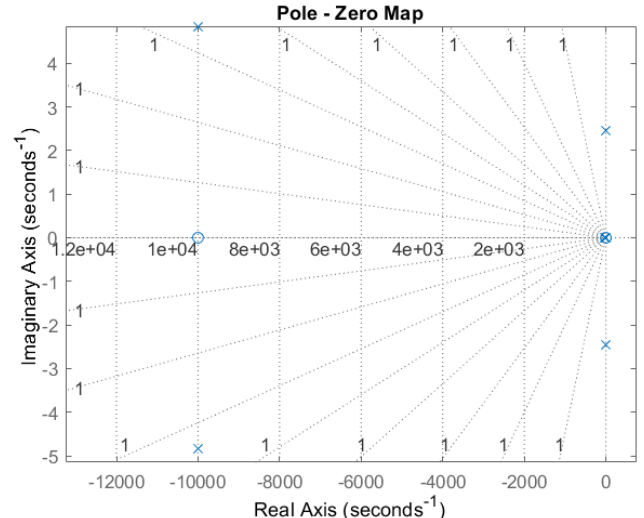




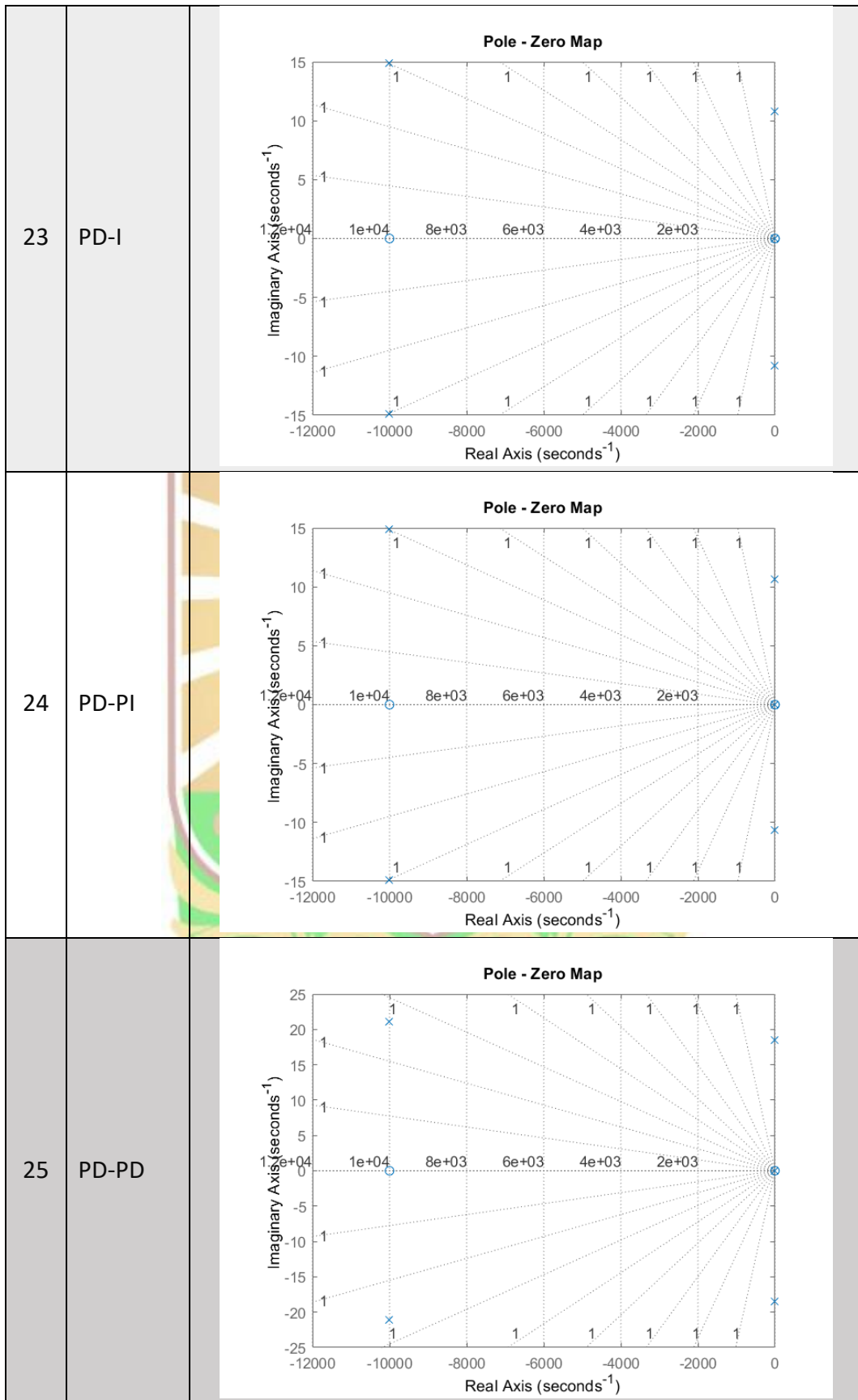
8	I-P	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
9	I-I	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
10	I-PI	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>



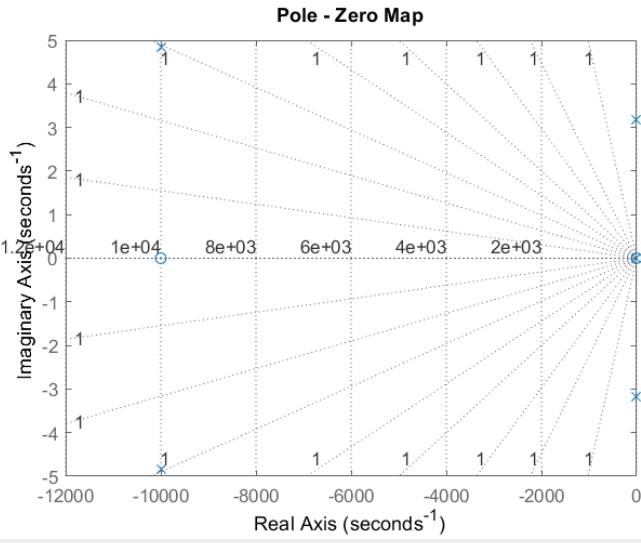
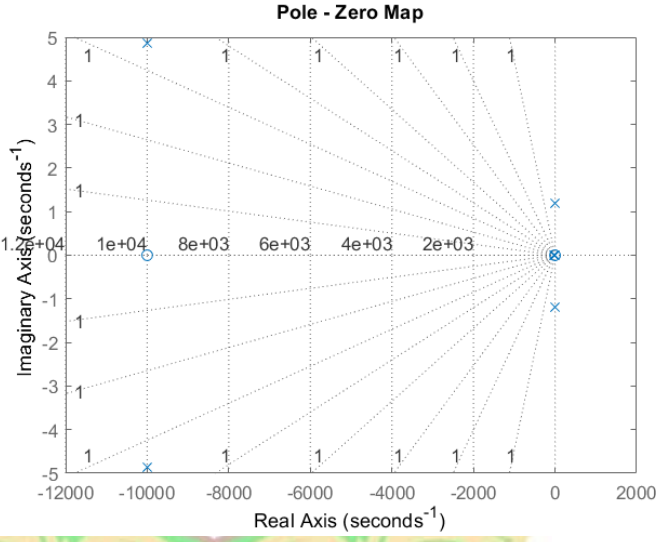
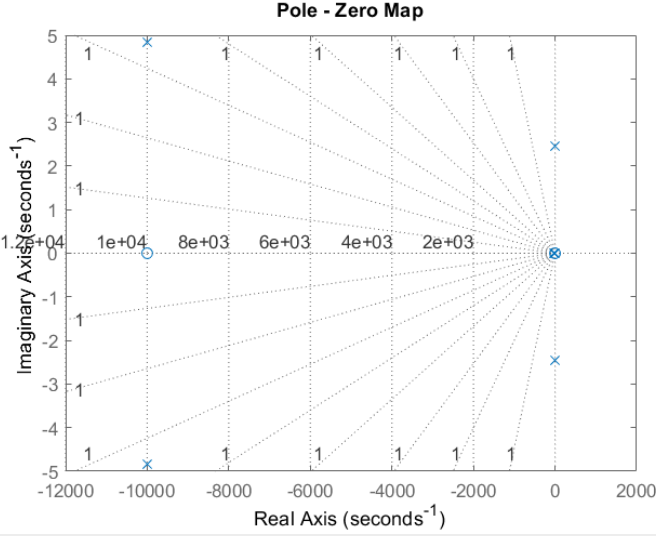
14	I-PIDF	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p>
15	PI-P	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p>
16	PI-I	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p>

17	PI-PI	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
18	PI-PD	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
19	PI-PID	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>

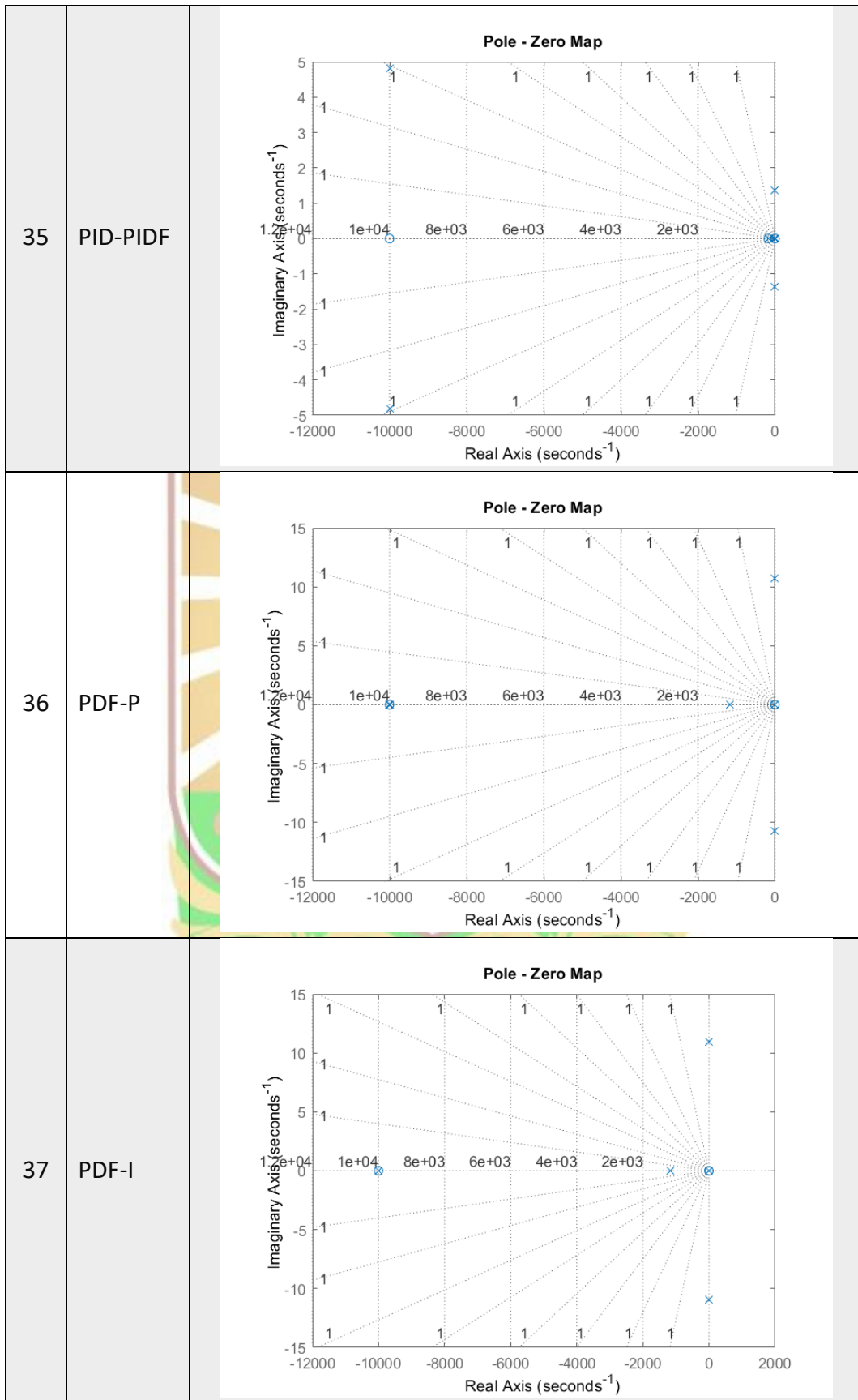
20	PI-PDF	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p>
21	PI-PIDF	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p>
22	PD-P	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p>

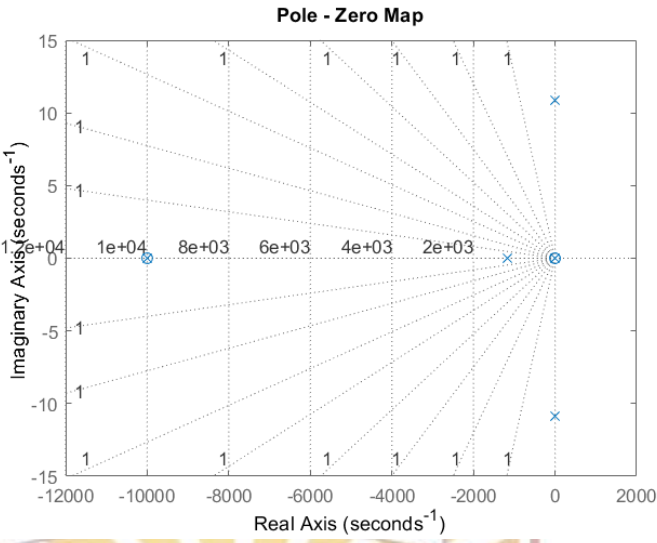
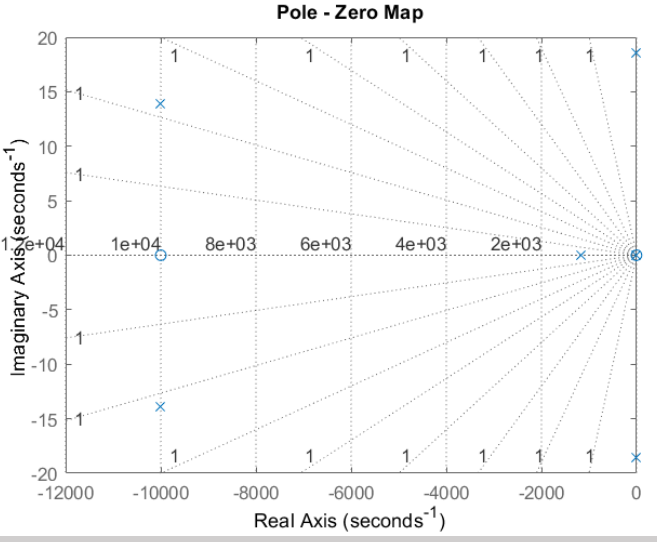
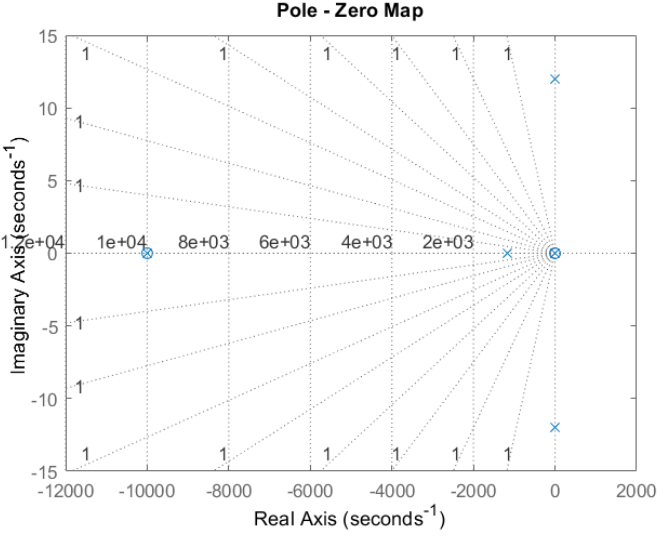


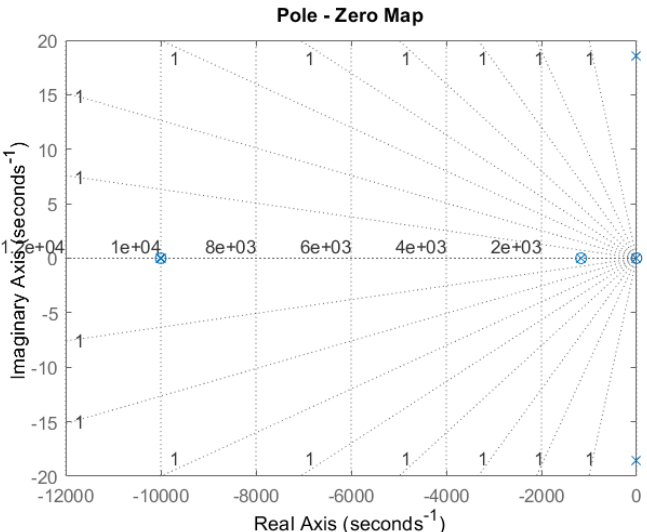
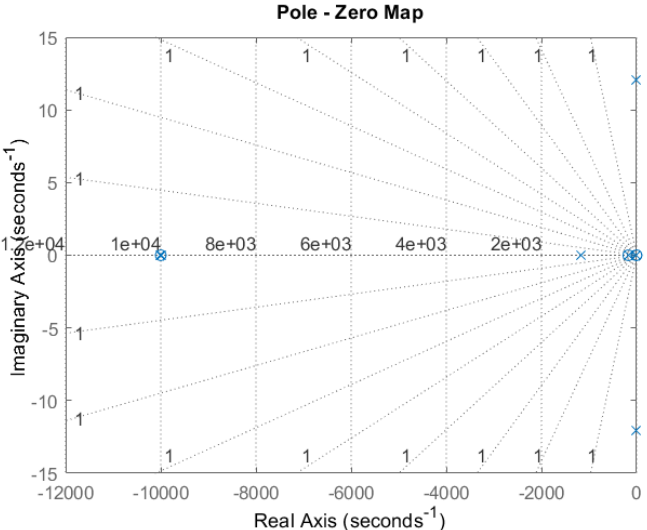
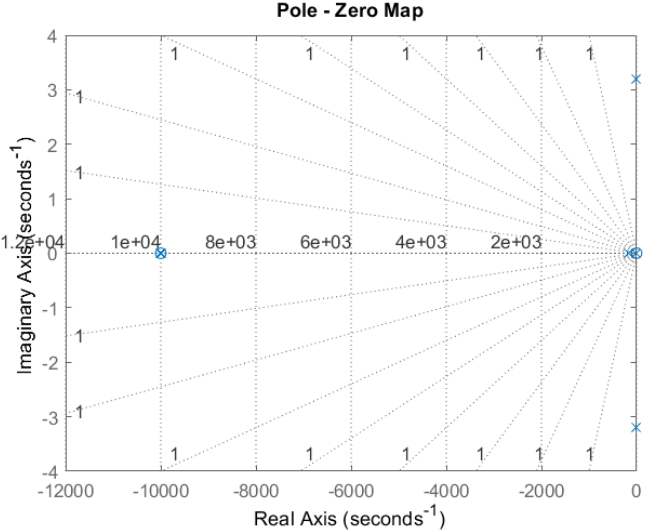
26	PD-PID	<p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
27	PD-PDF	<p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
28	PD-PIDF	<p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>

29	PID-P	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
30	PID-I	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
31	PID-PI	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>

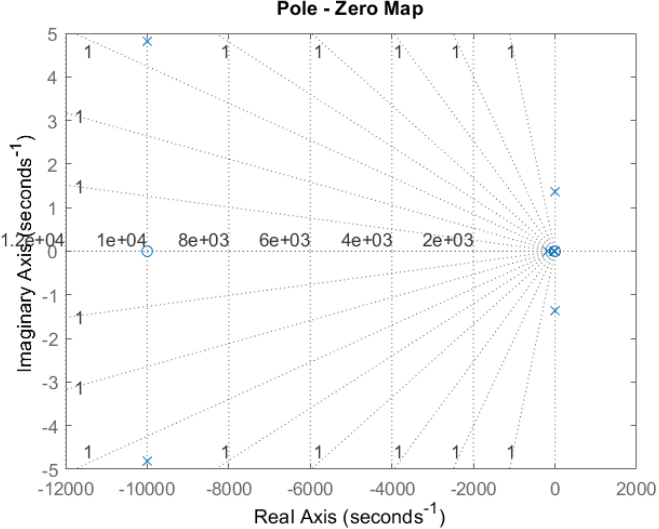
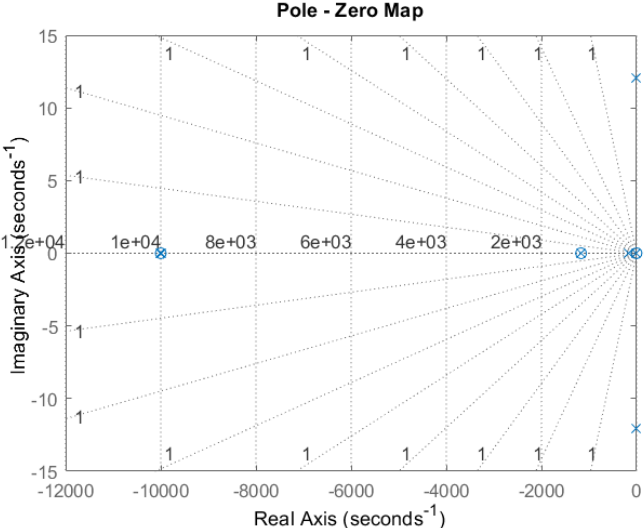
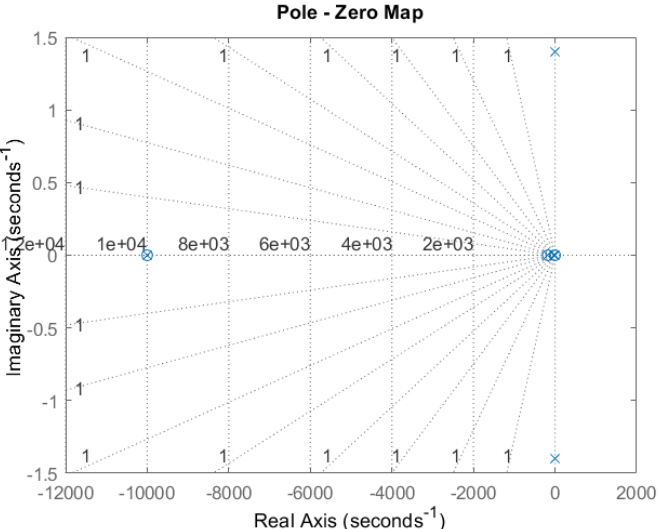
32	PID-PD	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p>
33	PID-PID	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p>
34	PID-PDF	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p>



38	PDF-PI	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>The plot shows the complex plane with the Real Axis (seconds⁻¹) on the x-axis ranging from -12000 to 2000 and the Imaginary Axis (seconds⁻¹) on the y-axis ranging from -15 to 15. A zero is located at approximately -10000 on the real axis. Poles are located at approximately -10000 ± j10000 and -10000 ± j15000. Asymptotes are shown as dashed lines originating from the real axis at -10000, with angles of approximately ±45° and ±135°. The centroid of the asymptotes is at approximately -10000.</p>
39	PDF-PD	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>The plot shows the complex plane with the Real Axis (seconds⁻¹) on the x-axis ranging from -12000 to 0 and the Imaginary Axis (seconds⁻¹) on the y-axis ranging from -20 to 20. A zero is located at approximately -10000 on the real axis. Poles are located at approximately -10000 ± j10000 and -10000 ± j15000. Asymptotes are shown as dashed lines originating from the real axis at -10000, with angles of approximately ±45° and ±135°. The centroid of the asymptotes is at approximately -10000.</p>
40	PDF-PID	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>The plot shows the complex plane with the Real Axis (seconds⁻¹) on the x-axis ranging from -12000 to 2000 and the Imaginary Axis (seconds⁻¹) on the y-axis ranging from -15 to 15. A zero is located at approximately -10000 on the real axis. Poles are located at approximately -10000 ± j10000 and -10000 ± j15000. Asymptotes are shown as dashed lines originating from the real axis at -10000, with angles of approximately ±45° and ±135°. The centroid of the asymptotes is at approximately -10000.</p>

41	PDF-PDF	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p> <p>This plot shows the pole-zero map for a PDF-PDF controller. The real axis ranges from -12000 to 0, and the imaginary axis ranges from -20 to 20. There are poles (marked with 'x') at approximately ±18000j and ±15000j. There are zeros (marked with 'o') at approximately ±10000, ±8000, ±6000, ±4000, and ±2000. Dotted lines represent the root locus branches.</p>
42	PDF-PIDF	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p> <p>This plot shows the pole-zero map for a PDF-PIDF controller. The real axis ranges from -12000 to 0, and the imaginary axis ranges from -15 to 15. There are poles (marked with 'x') at approximately ±18000j and ±12000j. There are zeros (marked with 'o') at approximately ±10000, ±8000, ±6000, ±4000, and ±2000. Dotted lines represent the root locus branches.</p>
43	PIDF-P	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p> <p>This plot shows the pole-zero map for a PIDF-P controller. The real axis ranges from -12000 to 0, and the imaginary axis ranges from -4 to 4. There are poles (marked with 'x') at approximately ±18000j and ±12000j. There are zeros (marked with 'o') at approximately ±10000, ±8000, ±6000, ±4000, and ±2000. Dotted lines represent the root locus branches.</p>

44	PIDF-I	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p> <p style="text-align: center;">Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p style="text-align: center;">Real Axis (seconds⁻¹)</p>
45	PIDF-PI	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p> <p style="text-align: center;">Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p style="text-align: center;">Real Axis (seconds⁻¹)</p>
46	PIDF-PD	<p style="text-align: center;">Pole - Zero Map</p> <p style="text-align: center;">Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p style="text-align: center;">Real Axis (seconds⁻¹)</p>

47	PIDF-PID	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
48	PIDF-PDF	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>
49	PIDF-PIDF	 <p>Pole - Zero Map</p> <p>Imaginary Axis (seconds⁻¹)</p> <p>Real Axis (seconds⁻¹)</p>

Lampiran K Listing Program Analisis Kesalahan

```
clc
clear all
close all
close all hidden
%
% Tanpa Sensor
% Data - Data Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus Searah Umpan
Balik Satu
Ka = 40.0000;
Ta = 0.0500;
Ke = 1.0000;
Te = 0.5000;
Kg = 0.8000;
Tg = 1.0000;
%
H = tf(1,1);
%
% Fungsi Alih Lingkaran Terbuka
num_A = [ 0 Ka];
den_A = [ Ta 1];
num_E = [ 0 Ke];
den_E = [ Te 1];
[num_1,den_1] = series(num_A,den_A,num_E,den_E);
num_G = [ 0 Kg];
den_G = [ Tg 1];
[num_ol,den_ol] = series(num_1,den_1,num_G,den_G);
sys_ol = tf(num_ol,den_ol);
%
% Fungsi Alih Lingkaran Tertutup
sys_cl = feedback(sys_ol,1);
%
% Perancangan Pengendali 1 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p,info] = pidtune(sys_ol,'pdf');
%%
% Perancangan Pengendali 2 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p_2,info] = pidtune(sys_ol,'pi');
%
% Konfigurasi 1
% Fungsi Alih Lingkaran Terbuka Dengan Pengendali Tunggal
sys_ol_p = C_p*sys_ol;
%
% Fungsi Alih Lingkaran Tertutup Dengan Pengendali Tunggal
sys_cl_p = feedback(sys_ol_p,1);
%
% Konfigurasi 2
% Fungsi Alih Lingkaran Terbuka Dengan Kombinasi Pengendali
sys_ol_p_1 = sys_ol*C_p*C_p_2*H;
%
```

```

% Fungsi Alih Lingkaran Tertutup Dengan Kombinasi Pengendali
sys_ol.u = 'u'; sys_ol.y = 'y';
C_p.u = 'e'; C_p.y = 'uc1';
C_p_2.u = 'yh'; C_p_2.y = 'uc2';
H.u = 'y'; H.y = 'yh';
Sum1 = sumblk('e = r-yh');
Sum2 = sumblk('u = uc1-uc2');
sys_cl_p_1 = tf(connect(sys_ol,C_p,C_p_2,H,Sum1,Sum2,'r','y'));
%
% Informasi Analisa Peralihan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe Arus Searah
disp('Informasi Analisa Kesalahan Tanpa Pengendali ')
[num_ol,den_ol] = tfdata(sys_ol,'v');
den_cl = get(sys_cl).Denominator;
sys_e = tf(1,den_cl);
Errorrf(num_ol,den_ol)
%
%
% Informasi Analisa Kesalahan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe Arus Searah
% Untuk Kombinasi Pengendali
fprintf('\n')
disp('Informasi Analisa Kesalahan Dengan Kombinasi Pengendali ')
[num_ol_p_1,den_ol_p_1] = tfdata(sys_ol_p_1,'v');
den_cl_p_1 = get(sys_cl_p_1).Denominator;
sys_e_p_1 = tf(1,den_cl_p_1);
Errorrf(num_ol_p_1,den_ol_p_1)
%
% Tanggapan Kesalahan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe
Arus Searah Terhadap Masukan Undak Satuan
t = 0.000 : 0.01 : 100;
%
figure
stepplot(sys_e_p_1,t );
ylabel('Tegangan')
xlabel('Waktu')
grid on
title('Tanggapan Kesalahan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) ')
hleg = legend('Dengan Kombinasi Pengendali');

```

Lampiran L Listing Program Analisis Kesalahan (Sensor)

```

clc
clear all
close all
close all hidden
%
```

```

% Tanpa Sensor
% Data - Data Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus Searah Umpam
Balik Satu
Ka = 40.0000;
Ta = 0.0500;
Ke = 1.0000;
Te = 0.5000;
Kg = 0.8000;
Tg = 1.0000;
Ks = 1.0000;
Ts = 0.0001;
%
% Fungsi Alih Lingkak Terbuka
num_A = [ 0 Ka];
den_A = [ Ta 1];
num_E = [ 0 Ke];
den_E = [ Te 1];
[num_1,den_1] = series(num_A,den_A,num_E,den_E);
num_G = [ 0 Kg];
den_G = [ Tg 1];
[num_2,den_2] = series(num_1,den_1,num_G,den_G);
num_H = [0 Ks];
den_H = [Ts 1];
H = tf(num_H,den_H);
[num_ol,den_ol] = series(num_2,den_2,num_H,den_H);
sys_ol = tf(num_ol,den_ol);
%
% Fungsi Alih Lingkak Tertutup
sys_cl = feedback(tf(num_2,den_2),tf(num_H,den_H));
%
% Perancangan Pengendali 1 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p,info] = pidtune(sys_ol,'pd');
% %
% Perancangan Pengendali 2 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p_2,info] = pidtune(sys_ol,'pd');
%
% Konfigurasi 1
% Fungsi Alih Lingkak Terbuka Dengan Pengendali Tunggal
sys_ol_p = C_p*sys_ol;
%
% Fungsi Alih Lingkak Tertutup Dengan Pengendali Tunggal
sys_cl_p = feedback(C_p*tf(num_2,den_2),tf(num_H,den_H));
%
% Konfigurasi 2
% Fungsi Alih Lingkak Terbuka Dengan Kombinasi Pengendali
sys_ol_p_1 = sys_ol*C_p*C_p_2*H;
%
% Fungsi Alih Lingkak Tertutup Dengan Kombinasi Pengendali
sys_ol.u = 'u'; sys_ol.y = 'y';

```



```

C_p.u = 'e'; C_p.y = 'uc1';
C_p_2.u = 'yh'; C_p_2.y = 'uc2';
H.u = 'y'; H.y = 'yh';
Sum1 = sumblk('e = r-yh');
Sum2 = sumblk('u = uc1-uc2');
sys_cl_p_1 = tf(connect(sys_ol,C_p,C_p_2,H,Sum1,Sum2,'r','y'));
%
% Informasi Analisa Peralihan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe Arus Searah
disp('Informasi Analisa Kesalahan Tanpa Pengendali ')
[num_ol,den_ol] = tfdata(sys_ol,'v');
den_cl = get(sys_cl).Denominator;
sys_e = tf(1,den_cl);
Errorrf(num_ol,den_ol)
%
%
% Informasi Analisa Kesalahan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe Arus Searah
% Untuk Kombinasi Pengendali
fprintf('\n')
disp('Informasi Analisa Kesalahan Dengan Kombinasi Pengendali ')
[num_ol_p_1,den_ol_p_1] = tfdata(sys_ol_p_1,'v');
den_cl_p_1 = get(sys_cl_p_1).Denominator;
sys_e_p_1 = tf(1,den_cl_p_1);
Errorrf(num_ol_p_1,den_ol_p_1)
%
% Tanggapan Kesalahan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe
Arus Searah Terhadap Masukan Undak Satuan
t = 0.000 : 0.01 : 100;
%
figure
stepplot(sys_e_p_1,t );
ylabel('Tegangan')
xlabel('Waktu')
grid on
title('Tanggapan Kesalahan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) ')
hleg = legend('Dengan Kombinasi Pengendali');

```

Lampiran M Listing Program Analisis Peralihan

```

clc
clear all
close all
close all hidden
%
% Tanpa Sensor

```

```

% Data - Data Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus Searah Umpam
Balik Satu
Ka = 40.0000;
Ta = 0.0500;
Ke = 1.0000;
Te = 0.5000;
Kg = 0.8000;
Tg = 1.0000;
%
H = tf(1,1);
%
% Fungsi Alih Lingkak Terbuka
num_A = [ 0 Ka];
den_A = [ Ta 1];
num_E = [ 0 Ke];
den_E = [ Te 1];
[num_1,den_1] = series(num_A,den_A,num_E,den_E);
num_G = [ 0 Kg];
den_G = [ Tg 1];
[num_ol,den_ol] = series(num_1,den_1,num_G,den_G);
sys_ol = tf(num_ol,den_ol);
%
% Fungsi Alih Lingkak Tertutup
sys_cl = feedback(sys_ol,1);
%
% Perancangan Pengendali 1 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p,info] = pidtune(sys_ol,'p');

Kp_1 = C_p.Kp;
Ki_1 = C_p.Ki;
Kd_1 = C_p.Kd;

disp('Konstanta PID Pengendali 1:');
disp(['Kp: ', num2str(Kp_1)]);
disp(['Ki: ', num2str(Ki_1)]);
disp(['Kd: ', num2str(Kd_1)]);

% %
% Perancangan Pengendali 2 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p_2,info] = pidtune(sys_ol,'P');
%

Kp_2 = C_p_2.Kp;
Ki_2 = C_p_2.Ki;
Kd_2 = C_p_2.Kd;

disp('Konstanta PID Pengendali 2:');
disp(['Kp: ', num2str(Kp_2)]);
disp(['Ki: ', num2str(Ki_2)]);

```

```

disp(['Kd: ', num2str(Kd_2)]);

% Konfigurasi 1
% Fungsi Alih Lingkar Terbuka Dengan Pengendali Tunggal
sys_ol_p = C_p*sys_ol;
%
% Fungsi Alih Lingkar Tertutup Dengan Pengendali Tunggal
sys_cl_p = feedback(sys_ol_p,1);
%
% Konfigurasi 2
sys_ol.u = 'u'; sys_ol.y = 'y';
C_p.u = 'e'; C_p.y = 'uc1';
C_p_2.u = 'yh'; C_p_2.y = 'uc2';
H.u = 'y'; H.y = 'yh';
Sum1 = sumblk('e = r-yh');
Sum2 = sumblk('u = uc1-uc2');
sys_cl_p_1 = connect(sys_ol,C_p,C_p_2,H,Sum1,Sum2,'r','y');
%
% Informasi Analisa Peralihan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe Arus Searah
disp('Informasi Analisa Peralihan Tanpa Pengendali ')
P_cl = stepinfo(sys_cl);
Tr_cl = P_cl.RiseTime;
Tp_cl = P_cl.PeakTime;
Ts_cl = P_cl.SettlingTime;
M_p_cl = P_cl.Peak;
Mp_cl = P_cl.Overshoot;
%
fprintf('Nilai Waktu Naik           = %10.5g detik\n',Tr_cl)
fprintf('Nilai Waktu Puncak          = %10.5g detik\n',Tp_cl)
fprintf('Nilai Waktu Keadaan Mantap     = %10.5g detik\n',Ts_cl)
fprintf('Nilai Puncak                    = %10.5g \n',M_p_cl)
fprintf('Nilai Lewatan Maksimum          = %10.5g Persen\n',Mp_cl)
%
% Informasi Analisa Peralihan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe
% Arus Searah Dengan Pengendali Tunggal
fprintf('\n')
disp('Informasi Analisa Peralihan Dengan Pengendali Tunggal')
P_cl_p = stepinfo(sys_cl_p);
Tr_cl_p = P_cl_p.RiseTime;
Tp_cl_p = P_cl_p.PeakTime;
Ts_cl_p = P_cl_p.SettlingTime;
M_p_cl_p = P_cl_p.Peak;
Mp_cl_p = P_cl_p.Overshoot;
%
fprintf('Nilai Waktu Naik           = %10.5g detik\n',Tr_cl_p)
fprintf('Nilai Waktu Puncak          = %10.5g detik\n',Tp_cl_p)
fprintf('Nilai Waktu Keadaan Mantap     = %10.5g detik\n',Ts_cl_p)

```

```

fprintf('Nilai Puncak                = %10.5g \n',M_p_cl_p)
fprintf('Nilai Lewatan Maksimum      = %10.5g Persen\n',Mp_cl_p)
%
% Informasi Analisa Peralihan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe Arus Searah Dengan Pengendali
% Untuk Konfigurasi Kaskade
fprintf('\n')
disp('Informasi Analisa Peralihan Dengan Kombinasi Pengendali ')
P_cl_p_1 = stepinfo(sys_cl_p_1);
Tr_cl_p_1 = P_cl_p_1.RiseTime;
Tp_cl_p_1 = P_cl_p_1.PeakTime;
Ts_cl_p_1 = P_cl_p_1.SettlingTime;
M_p_cl_p_1 = P_cl_p_1.Peak;
Mp_P_cl_p_1 =P_cl_p_1.Overshoot;
%
fprintf('Nilai Waktu Naik              = %10.5g detik\n',Tr_cl_p_1)
fprintf('Nilai Waktu Puncak              = %10.5g detik\n',Tp_cl_p_1)
fprintf('Nilai Waktu Keadaan Mantap       = %10.5g detik\n',Ts_cl_p_1)
fprintf('Nilai Puncak                    = %10.5g \n',M_p_cl_p_1)
fprintf('Nilai Lewatan Maksimum           = %10.5g Persen\n',Mp_P_cl_p_1)
%
% Tanggapan Peralihan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe
Arus Serah Terhadap Masukan Undak Satuan
t = 0.000 : 0.01 : 20;
figure
stepplot(sys_cl,sys_cl_p,t );
ylabel('Tegangan')
xlabel('Waktu')
grid on
title('Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah ')
hleg = legend('Tanpa Pengendali','Pengendali Tunggal');
%
figure
stepplot(sys_cl,sys_cl_p_1,t);
ylabel('Tegangan')
xlabel('Waktu')
grid on
title('Tanggapan Sistem AVR Tipe Arus Searah ')
hleg = legend('Tanpa Pengendali','Dengan Kombinasi Pengendali');

```

Lampiran N Listing Program Analisis Peralihan (Sensor)

```

clc
clear all
close all
close all hidden
%

```

```

% Tanpa Sensor
% Data - Data Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus Searah Umpam
Balik Satu
Ka = 40.0000;
Ta = 0.0500;
Ke = 1.0000;
Te = 0.5000;
Kg = 0.8000;
Tg = 1.0000;
Ks = 1.0000;
Ts = 0.0001;
%
% Fungsi Alih Lingkaran Terbuka
num_A = [ 0 Ka];
den_A = [ Ta 1];
num_E = [ 0 Ke];
den_E = [ Te 1];
[num_1,den_1] = series(num_A,den_A,num_E,den_E);
num_G = [ 0 Kg];
den_G = [ Tg 1];
[num_2,den_2] = series(num_1,den_1,num_G,den_G);
num_H = [0 Ks];
den_H = [Ts 1];
H = tf(num_H,den_H);
[num_ol,den_ol] = series(num_2,den_2,num_H,den_H);
sys_ol = tf(num_ol,den_ol);
%
% Fungsi Alih Lingkaran Tertutup
sys_cl = feedback(tf(num_2,den_2),tf(num_H,den_H));
%
% Perancangan Pengendali 1 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p,info] = pidtune(sys_ol,'p');
% %
% Perancangan Pengendali 2 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p_2,info] = pidtune(sys_ol,'P');
%
% Konfigurasi 1
% Fungsi Alih Lingkaran Terbuka Dengan Pengendali Tunggal
sys_ol_p = C_p*sys_ol;
%
% Fungsi Alih Lingkaran Tertutup Dengan Pengendali Tunggal
sys_cl_p = feedback(C_p*tf(num_2,den_2),tf(num_H,den_H));
%
% Konfigurasi 2
sys_ol.u = 'u'; sys_ol.y = 'y';
C_p.u = 'e'; C_p.y = 'uc1';
C_p_2.u = 'yh'; C_p_2.y = 'uc2';
H.u = 'y'; H.y = 'yh';
Sum1 = sumblk('e = r-yh');

```

```

Sum2 = sumblk('u = uc1-uc2');
sys_cl_p_1 = connect(sys_ol,C_p,C_p_2,H,Sum1,Sum2,'r','y');
%
% Informasi Analisa Peralihan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe Arus Searah
disp('Informasi Analisa Peralihan Tanpa Pengendali ')
P_cl = stepinfo(sys_cl);
Tr_cl = P_cl.RiseTime;
Tp_cl = P_cl.PeakTime;
Ts_cl = P_cl.SettlingTime;
M_p_cl = P_cl.Peak;
Mp_cl = P_cl.Overshoot;
%
fprintf('Nilai Waktu Naik           = %10.5g detik\n',Tr_cl)
fprintf('Nilai Waktu Puncak         = %10.5g detik\n',Tp_cl)
fprintf('Nilai Waktu Keadaan Mantap   = %10.5g detik\n',Ts_cl)
fprintf('Nilai Puncak                  = %10.5g \n',M_p_cl)
fprintf('Nilai Lewatan Maksimum         = %10.5g Persen\n',Mp_cl)
%
% Informasi Analisa Peralihan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe
% Arus Searah Dengan Pengendali
fprintf('\n')
disp('Informasi Analisa Peralihan Dengan Pengendali Tunggal')
P_cl_p = stepinfo(sys_cl_p);
Tr_cl_p = P_cl_p.RiseTime;
Tp_cl_p = P_cl_p.PeakTime;
Ts_cl_p = P_cl_p.SettlingTime;
M_p_cl_p = P_cl_p.Peak;
Mp_cl_p = P_cl_p.Overshoot;
%
fprintf('Nilai Waktu Naik           = %10.5g detik\n',Tr_cl_p)
fprintf('Nilai Waktu Puncak         = %10.5g detik\n',Tp_cl_p)
fprintf('Nilai Waktu Keadaan Mantap   = %10.5g detik\n',Ts_cl_p)
fprintf('Nilai Puncak                  = %10.5g \n',M_p_cl_p)
fprintf('Nilai Lewatan Maksimum         = %10.5g Persen\n',Mp_cl_p)
%
% Informasi Analisa Peralihan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe Arus Searah Dengan Pengendali
% Untuk Kombinasi Penngendali
fprintf('\n')
disp('Informasi Analisa Peralihan Dengan Kombinasi Pengendali ')
P_cl_p_1 = stepinfo(sys_cl_p_1);
Tr_cl_p_1 = P_cl_p_1.RiseTime;
Tp_cl_p_1 = P_cl_p_1.PeakTime;
Ts_cl_p_1 = P_cl_p_1.SettlingTime;
M_p_cl_p_1 = P_cl_p_1.Peak;
Mp_P_cl_p_1 = P_cl_p_1.Overshoot;
%

```

```

fprintf('Nilai Waktu Naik           = %10.5g detik\n',Tr_cl_p_1)
fprintf('Nilai Waktu Puncak         = %10.5g detik\n',Tp_cl_p_1)
fprintf('Nilai Waktu Keadaan Mantap = %10.5g detik\n',Ts_cl_p_1)
fprintf('Nilai Puncak                 = %10.5g \n',M_p_cl_p_1)
fprintf('Nilai Lewatan Maksimum       = %10.5g Persen\n',Mp_P_cl_p_1)
%
% Tanggapan Peralihan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe
Arus Serah Terhadap Masukan Undak Satuan
t = 0.000 : 0.01 : 50;
figure
stepplot(sys_cl,sys_cl_p,t );
ylabel('Tegangan')
xlabel('Waktu')
grid on
title('Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus
Searah ')
hleg = legend('Tanpa Pengendali','Dengan Pengendali');
%
figure
stepplot(sys_cl,sys_cl_p_1,t );
ylabel('Tegangan')
xlabel('Waktu')
grid on
title('Tanggapan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus
Searah ')
hleg = legend('Tanpa Pengendali','Dengan Kombinasi Pengendali');

```

Lampiran O Listing Program Analisis Kestabilan

```

clc
clear all
close all
close all hidden
%
% Tanpa Sensor
% Data - Data Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus Searah Umpan
Balik Satu
Ka = 40.0000;
Ta = 0.0500;
Ke = 1.0000;
Te = 0.5000;
Kg = 0.8000;
Tg = 1.0000;
%
H = tf(1,1);
%
% Fungsi Alih Lingkaran Terbuka

```

```

num_A = [ 0 Ka];
den_A = [ Ta 1];
num_E = [ 0 Ke];
den_E = [ Te 1];
[num_1,den_1] = series(num_A,den_A,num_E,den_E);
num_G = [ 0 Kg];
den_G = [ Tg 1];
[num_ol,den_ol] = series(num_1,den_1,num_G,den_G);
sys_ol = tf(num_ol,den_ol);
%
% Fungsi Alih Lingkaran Tertutup
sys_cl = feedback(sys_ol,1);
%
% Perancangan Pengendali 1 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p,info] = pidtune(sys_ol,'i');
%%
% Perancangan Pengendali 2 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p_2,info] = pidtune(sys_ol,'pi');
%
% Konfigurasi 1
% Fungsi Alih Lingkaran Terbuka Dengan Pengendali Tunggal
sys_ol_p = C_p*sys_ol;
%
% Fungsi Alih Lingkaran Tertutup Dengan Pengendali Tunggal
sys_cl_p = feedback(sys_ol_p,1);
%
% Konfigurasi 2
% Fungsi Alih Lingkaran Terbuka Dengan Kombinasi Pengendali
sys_ol_p_1 = sys_ol*C_p*C_p_2*H;
%
% Fungsi Alih Lingkaran Tertutup Dengan Kombinasi Pengendali
sys_ol.u = 'u'; sys_ol.y = 'y';
C_p.u = 'e'; C_p.y = 'uc1';
C_p_2.u = 'yh'; C_p_2.y = 'uc2';
H.u = 'y'; H.y = 'yh';
Sum1 = sumblk('e = r-yh');
Sum2 = sumblk('u = uc1-uc2');
sys_cl_p_1 = tf(connect(sys_ol,C_p,C_p_2,H,Sum1,Sum2,'r','y'));
%
% Informasi Analisa Kestabilan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe Arus Searah
disp('Informasi Analisa Kestabilan Tanpa Pengendali ')
damp(sys_cl)
%
% Informasi Analisa Kestabilan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe
% Arus Searah Dengan Pengendali
fprintf('\n')
disp('Informasi Analisa Kestabilan Dengan Pengendali Tunggal')

```



```

damp(sys_cl_p)
%
% Informasi Analisa Kestabilan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe Arus Searah
% Untuk Kombinasi Pengendali
fprintf('\n')
disp('Informasi Analisa Kesalahan Dengan Kombinasi Pengendali ')
damp(sys_cl_p_1)
%
% Pole - Zero Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus Searah
pzmap(sys_cl,sys_cl_p, sys_cl_p_1)
grid on
title('Pole - Zero Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus
Searah ')
hleg = legend('Tanpa Pengendali','Pengendali Tunggal','Dengan Kombinasi
Pengendali');

```

Lampiran P Listing Program Analisis Kestabilan (Sensor)

```

clc
clear all
close all
close all hidden
%
% Tanpa Sensor
% Data - Data Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus Searah Umpan
Balik Satu
Ka = 40.0000;
Ta = 0.0500;
Ke = 1.0000;
Te = 0.5000;
Kg = 0.8000;
Tg = 1.0000;
Ks = 1.0000;
Ts = 0.0001;
%
% Fungsi Alih Lingkaran Terbuka
num_A = [ 0 Ka];
den_A = [ Ta 1];
num_E = [ 0 Ke];
den_E = [ Te 1];
[num_1,den_1] = series(num_A,den_A,num_E,den_E);
num_G = [ 0 Kg];
den_G = [ Tg 1];
[num_2,den_2] = series(num_1,den_1,num_G,den_G);
num_H = [0 Ks];
den_H = [Ts 1];

```

```

H      = tf(num_H,den_H);
[num_ol,den_ol] = series(num_2,den_2,num_H,den_H);
sys_ol = tf(num_ol,den_ol);
%
% Fungsi Alih Lingkaran Tertutup
sys_cl = feedback(tf(num_2,den_2),tf(num_H,den_H));
%
% Perancangan Pengendali 1 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p,info] = pidtune(sys_ol,'pidf');
% %
% Perancangan Pengendali 2 Dengan PIDTune Model Paralel
[C_p_2,info] = pidtune(sys_ol,'i');
%
% Konfigurasi 1
% Fungsi Alih Lingkaran Terbuka Dengan Pengendali Tunggal
sys_ol_p = C_p*sys_ol;
%
% Fungsi Alih Lingkaran Tertutup Dengan Pengendali Tunggal
sys_cl_p = feedback(C_p*tf(num_2,den_2),tf(num_H,den_H));
%
% Konfigurasi 2
% Fungsi Alih Lingkaran Terbuka Dengan Kombinasi Pengendali
sys_ol_p_1 = sys_ol*C_p*C_p_2*H;
%
% Fungsi Alih Lingkaran Tertutup Dengan Kombinasi Pengendali
sys_ol.u = 'u'; sys_ol.y = 'y';
C_p.u = 'e'; C_p.y = 'uc1';
C_p_2.u = 'yh'; C_p_2.y = 'uc2';
H.u = 'y'; H.y = 'yh';
Sum1 = sumblk('e = r-yh');
Sum2 = sumblk('u = uc1-uc2');
sys_cl_p_1 = tf(connect(sys_ol,C_p,C_p_2,H,Sum1,Sum2,'r','y'));
% Informasi Analisa Kestabilan Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)
Tipe Arus Searah
% Untuk Kombinasi Pengendali
fprintf('\n')
disp('Informasi Analisa Kesalahan Dengan Kombinasi Pengendali ')
damp(sys_cl_p_1)
%
% Pole - Zero Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) Tipe Arus Searah
pzmap( sys_cl_p_1)
grid on
title('Pole - Zero Map')

```