

SKRIPSI

**ANALISIS PARAMETER GAIN AMPLIFIER SISTEM AUTOMATIC
VOLTAGE REGULATOR PADA UNIT TURBIN GAS 11
PLTGU SENGKANG**

Disusun dan diajukan oleh:

A.YULY ASRIAMAN

D41114023



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

SKRIPSI
ANALISIS PARAMETER GAIN AMPLIFIER SISTEM AUTOMATIC
VOLTAGE REGULATOR PADA UNIT TURBIN GAS 11
PLTGU SENGKANG

Disusun dan diajukan oleh:

A.YULY ASRIAMAN

D41114023



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR

2021

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**ANALISIS PARAMETER GAIN AMPLIFIER SISTEM AUTOMATIC
VOLTAGE REGULATOR PADA UNIT TURBIN GAS 11
PLTGU SENGKANG**

Disusun dan diajukan oleh:

A.YULY ASRIAMAN

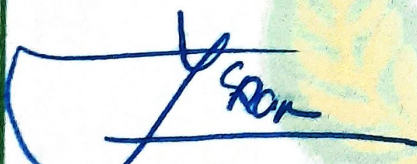
D41114023

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 4 Agustus 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.

NIP. 19750404 200012 1 001



Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T.

NIP. 19731118 199803 2 001

**Ketua Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**



Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.

NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

NAMA : A.YULY ASRIAMAN
NIM : D41114023
PROGRAM STUDI : TEKNIK ELEKTRO
JENJANG : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya yang berjudul

ANALISIS PARAMETER GAIN AMPLIFIER SISTEM AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR PADA UNIT TURBIN GAS 11 PLTGU SENKANG

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 4 Agustus 2021

Yang menyatakan,



A.YULY ASRIAMAN

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, atas berkat dan rahmat-Nya sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar kesarjanaan pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis banyak mendapat bimbingan dan dorongan serta bantuan dari berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada:

- III.4.1. Pembimbing I yaitu Bapak Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T. dan Pembimbing II yaitu Bapak Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T, M.T. atas segala saran, bimbingan dan nasehatnya selama perkuliahan, penelitian dan selama penyusunan tugas akhir ini.
- III.4.2. Penguji yaitu Bapak Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D., dan ibu Dr. Ir. Hasniaty A, S.T., M.T. atas segala saran dan nasehatnya selama perkuliahan, penelitian dan selama penyusunan tugas akhir ini.
- III.4.3. Bapak dan Ibu Dosen lainnya yang tidak sedikit telah memberikan ilmunya selama penulis menuntut ilmu di Departemen Teknik Elektro.
- III.4.4. Seluruh staf Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik yang banyak membantu penulis selama menempuh proses perkuliahan.
- III.4.5. Ayah dan ibu yang senantiasa memberikan kasih sayang serta doa dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, serta buat istri dan anak-anak atas segala doa dan dukungannya.
- III.4.6. Pihak PT.CEPA PLTGU Sengkang yang telah banyak membantu dalam penelitian/pengambilan data.
- III.4.7. Sahabat serta teman-teman RECTIFIER 14 tanpa terkecuali, adik-adik sepupu di KPI A2 atas segala doanya.
- III.4.8. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan yang telah memberikan bantuan dan dukungannya selama ini.

Penulis telah berusaha semaksimal mungkin agar tugas akhir ini dapat terselesaikan sesuai dengan harapan, namun keterbatasan kemampuan sehingga tugas akhir ini tampil dengan segala kekurangannya. Oleh karena itu, penulis

senantiasa membuka diri terhadap saran dan kritik yang bertujuan untuk penyempurnaan tugas akhir ini. Dan akhirnya semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kita. Semoga Allah senantiasa melindungi langkah kita. Amin

Makassar, Agustus 2021

Penulis

ABSTRAK

A.YULY ASRIAMAN, *Analisis Parameter Gain Amplifier Sistem Automatic Voltage Regulator Pada Unit Turbin Gas 11 PLTGU Sengkang* (dibimbing oleh Yusran dan Indar Chaerah Gunadin).

Seiring pertambahan beban, khususnya beban-beban yang membutuhkan daya reaktif, masalah kestabilan sistem sangat diperhatikan. Dalam studi kestabilan pembangkit, diperlukan penentuan batas *setting* konstanta-konstanta yang terdapat pada pembangkit agar dapat bekerja dengan stabil.

Nilai-nilai konstanta ini merupakan nilai *setting* untuk sistem kontrol pembangkit yang ada. Salah satu parameter yang berubah yaitu *gain amplifier* (K_A). Tujuan penelitian ini yaitu mencari *range* nilai K_A pada *automatic voltage regulator* (AVR) serta mengetahui nilai K_A terbaik. Membandingkan nilai tegangan keluaran generator pada perubahan parameter K_A dan parameter perubahan tegangan (ΔV) pada penelitian. Membandingkan tegangan keluaran generator dengan sistem AVR tanpa pengendali *proportional, integral, derivated* (PID) dan sistem AVR dengan PID.

Penelitian dilakukan dengan mencari *range* K_A dengan menggunakan kriteria kestabilan Routh-Hurwitz dan bantuan *software* MATLAB SIMULINK untuk simulasi. Hasil pengamatan menunjukkan *range* nilai K_A yang stabil mulai dari -1 sampai 35,641. Semakin besar nilai K_A akan membuat V_t semakin besar, serta membuat waktu yang dibutuhkan untuk stabil semakin lama. Semakin besar nilai ΔV akan membuat tegangan keluaran generator menurun. Tegangan keluaran generator sebelum menggunakan PID tidak begitu stabil dimana masih terjadi *swing* /ayunan tegangan hingga 1,524 pu, sedangkan ketika sistem menggunakan PID, tegangan keluaran generator tidak mengalami *swing* /ayunan tegangan hingga 1,096 pu dan dapat dikatakan stabil dengan nilai steady state = 1 pu.

Kata kunci: Kestabilan, Metode Routh-Hurwitz. Pengendalian, Daya Reaktif, AVR, MATLAB.

ABSTRACT

A.YULY ASRIAMAN, *Analysis Of Parameter Gain Amplifier System Automatic Voltage Regulator on Gas Turbine Unit 11 PLTGU Sengkang* (supervised by Yusran and Indar Chaerah Gunadin).

As the load increases, especially loads that require reactive power, the problem of system stability is of great concern. In the study of the stability of the power plant, it is necessary to determine the limit setting of the constants contained in the generator so that it can work stably.

These constant values are the setting values for the existing generator control system. One of the parameters that changes is the gain amplifier K_A . The purpose of this study is to find the range of K_A values on the automatic voltage regulator (AVR) and to find out the best K_A value. Comparing the value of the generator output voltage on changes in the K_A parameter and the voltage change parameter (ΔV) in the study. Comparing generator output voltage with AVR system without proportional, integral, derivative (PID) controller and AVR system with PID.

The research was conducted by looking for the K_A range using the Routh-Hurwitz stability criteria and the help of the MATLAB SIMULINK software for simulation. The observation results show a stable range of K_A values ranging from -1 to 35,641. The larger the value of K_A , the greater the V_t , and the longer it takes to stabilize. The greater the value of ΔV will make the generator output voltage decrease. The generator output voltage before using PID is not so stable where there is still a voltage swing of up to 1.524 pu, while when the system uses PID, the generator output voltage does not experience a voltage swing of up to 1.096 pu and can be said to be stable with a steady state value = 1 pu.

Keywords: Stability, Routh-Hurwitz Method. Control, Reactive Power, AVR, MATLAB.

DAFTAR ISI

	halaman
Skripsi	i
Lembar Pengesahan	ii
Pernyataan Keaslian.....	iii
Kata Pengantar	iv
Abstrak.....	vi
Abstract.....	vii
Daftar Isi	viii
Daftar Tabel	xi
Daftar Gambar	xii
Daftar Arti Lambang dan Singkatan.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Sistematika Penulisan.....	3
BAB II LANDASAN TEORI.....	5
2.1. Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.2. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.....	6
2.3. Generator Sinkron	7
2.3.1. Prinsip dasar generator sinkron	7
2.3.2. Konstruksi generator.....	9
2.3.3. Hubungan paralel generator sinkron.....	12
2.3.4. Rangkaian ekuivalen.....	14
2.4. Daya Aktif, Reaktif, dan Kompleks	14

2.5.	Kompensasi Dan Pengaturan Tegangan	16
2.6.	Daya Reaktif	19
2.6.1.	Daya Reaktif Pada Sistem Tenaga Listrik	19
2.6.2.	Pengaturan Daya Reaktif Generator	20
2.7.	Sistem Per Unit	21
2.8.	PLTG	22
2.8.1.	Prinsip kerja	22
2.8.2.	Diagram alir <i>turbine</i> gas	23
2.8.3.	Siklus turbin gas	24
2.8.4.	Proses pengoperasian PLTG	25
2.9.	AVR	27
2.9.1.	<i>Amplifier</i>	27
2.9.2.	Exciter	27
2.9.3.	Generator	28
2.9.4.	Sensor	28
2.10.	Pengantar Sistem Kontrol	28
2.10.1.	Definisi	28
2.10.2.	Persyaratan umum sistem kontrol	29
2.10.3.	Kontrol <i>loop</i> tertutup dan kontrol <i>loop</i> terbuka	29
2.10.4.	Kriteria Routh-Hurwitz	32
2.10.5.	Kendali PID	34
BAB III METODE PENELITIAN		37
3.2.	Waktu dan Lokasi Penelitian	37
3.3.	Alat dan Instrumen Penelitian	37

3.4. Pengambilan Data.....	37
3.5. Diagram Alir.....	38
3.6. Langkah-langkah Penelitian	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1. Data Parameter AVR.....	41
4.2. Analisis Perhitungan Parameter K_A	41
4.1. Simulasi MATLAB	45
4.2. Hasil simulasi MATLAB.....	46
4.3. Pembahasan hasil simulasi MATLAB.....	55
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	60
5.1. Kesimpulan.....	60
5.2. Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN.....	64

DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 2.1. Konvensi untuk Pembangkitan dan Penyerapan Daya Reaktif.....	16
Tabel 4.1 Data Parameter AVR.....	41
Tabel 4.2 Hasil Simulasi AVR dengan Perubahan ΔV dan $KA = 10$	48
Tabel 4.3 Hasil Simulasi AVR dengan Perubahan ΔV dan $KA = 20$	50
Tabel 4.4 Hasil Simulasi AVR dengan Perubahan ΔV dan $KA = 30$	52
Tabel 4.5 Hasil Simulasi AVR dengan Pengontrol PID serta Perubahan ΔV pada $KA = 10$	55
Tabel 4.6 Hasil Simulasi AVR dengan Perubahan ΔV dan KA	55
Tabel 4.7 Hasil Simulasi AVR tanpa PID dan AVR dengan PID pada $KA = 10$	58

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 2.1. Komponen Sistem Tenaga Listrik.....	6
Gambar 2.2. Rotor Generator	9
Gambar 2.3. Stator Generator.....	10
Gambar 2.4. Slip Ring.....	10
Gambar 2.5. Pengkoneksian Dua Generator Secara Paralel.....	12
Gambar 2.6. Sinyal Sinus Tegangan dari 2 Generator yang akan Diparalelkan .	13
Gambar 2.7. Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron	14
Gambar 2.8. Fasor Sederhana dan Segitiga Daya	14
Gambar 2.9. Sistem Simetris.....	15
Gambar 2.10. Diagram Fasor Beban Induktif	16
Gambar 2.11. Rangkaian Segaris Sumber dan Beban.....	17
Gambar 2.12. Diagram Fasor Sistem Tidak Terkompensasi.....	17
Gambar 2.13. Sistem Garis Beban	17
Gambar 2.14. Diagram Fasor, Dikompensasi untuk Tegangan Konstan	18
Gambar 2.15. Kurva Q-V	21
Gambar 2.16. Diagram Alir Turbin Gas.....	24
Gambar 2.17. Siklus Turbin Gas	24
Gambar 2.18. Bagian Utama Turbin Gas	25
Gambar 2.19. Skema Sederhana dari Sistem AVR.....	27
Gambar 2.20. Sistem Kontrol <i>Loop</i> Tertutup.....	29
Gambar 2.21. Sistem Kontrol <i>Loop</i> Terbuka	30
Gambar 2.22. Diagram Blok Sistem <i>Loop</i> Tertutup	31
Gambar 2.23. Sistem <i>Loop</i> Tertutup	31
Gambar 4.1. Blok Diagram Sederhana dari Sistem AVR	41
Gambar 4.2. Diagram Blok AVR dari data PLTG	42
Gambar 4.3. Penyederhanaan Diagram Blok AVR dari Data PLTG.....	42
Gambar 4.4. Bentuk Blok Diagram Fungsi Alih Sederhana	42
Gambar 4.5. <i>Range</i> Nilai K_A	44
Gambar 4.5. Blok Diagram Simulasi AVR dengan Perubahan ΔV	45

Gambar 4.6. Blok Diagram Simulasi AVR Diluar <i>Range KA</i>	45
Gambar 4.7. Blok Diagram Simulasi AVR dengan PID <i>Kontroler</i> dan Perubahan ΔV	46
Gambar 4.8. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = 0.5$ pu	46
Gambar 4.9. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = 0.3$ pu	47
Gambar 4.10. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = 0.1$ pu	47
Gambar 4.11. Hasil simulasi pada $KA = 20$, dengan $\Delta V = 0.5$ pu	48
Gambar 4.12. Hasil simulasi pada $KA = 20$, dengan $\Delta V = 0.3$ pu	49
Gambar 4.13. Hasil simulasi pada $KA = 20$, dengan $\Delta V = 0.1$ pu	49
Gambar 4.14. Hasil simulasi pada $KA = 30$, dengan $\Delta V = 0.5$ pu	50
Gambar 4.15. Hasil simulasi pada $KA = 30$, dengan $\Delta V = 0.3$ pu	51
Gambar 4.16. Hasil simulasi pada $KA = 30$, dengan $\Delta V = 0.1$ pu	51
Gambar 4.17. Hasil simulasi pada $KA = 36$	52
Gambar 4.18. Hasil simulasi pada $KA = -1$	53
Gambar 4.19. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = 0.5$ pu	53
Gambar 4.20. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = 0.3$ pu	54
Gambar 4.21. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = 0.1$ pu	54
Gambar 4.22. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = -0.1$ pu	65
Gambar 4.23. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = -0.3$ pu	65
Gambar 4.24. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = -0.5$ pu	66
Gambar 4.25. Hasil simulasi pada $KA = 20$, dengan $\Delta V = -0.1$ pu	66
Gambar 4.26. Hasil simulasi pada $KA = 20$, dengan $\Delta V = -0.3$ pu	67
Gambar 4.27. Hasil simulasi pada $KA = 20$, dengan $\Delta V = -0.5$ pu	67
Gambar 4.28. Hasil simulasi pada $KA = 30$, dengan $\Delta V = -0.1$ pu	68
Gambar 4.29. Hasil simulasi pada $KA = 30$, dengan $\Delta V = -0.3$ pu	68
Gambar 4.30. Hasil simulasi pada $KA = 30$, dengan $\Delta V = -0.5$ pu	69
Gambar 4.31. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = -0.1$ pu	69
Gambar 4.32. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = -0.3$ pu	70
Gambar 4.33. Hasil simulasi pada $KA = 10$, dengan $\Delta V = -0.5$ pu	70

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Singkatan	Arti dan Keterangan
PLTG	Pembangkit listrik tenaga gas
PLTGU	Pembangkit listrik tenaga gas uap
GT	<i>Gas turbine</i>
AVR	<i>Automatic voltage regulator</i>
LFC	<i>Load frequency control</i>
AGC	<i>Automatic generation control</i>
ggl	Gaya gerak listrik
pu	Per unit
VAr	Volt-ampere reaktif
IEC	<i>International electrotechnical commission</i>
PLC	<i>Programmable logic controller</i>
OLTF	<i>Open loop transfer function</i>
CLTF	<i>Close loop transfer function</i>
V_{ref}	Tegangan referensi
K_A	<i>Gain Amplifier</i>
K_E	<i>Gain exciter</i>
K_G	<i>Gain generator</i>
K_R	<i>Gain sensor</i>
T_A	<i>Time constant Amplifier</i>
T_E	<i>Time constant exciter</i>
T_G	<i>Time constant generator</i>
T_R	<i>Time constant sensor</i>
V_t	Tegangan terminal generator
V_{ref}	Tegangan referensi
PT	<i>Potential transformer</i>
PID	<i>Proportional, integral, derivated</i>
K_p	Konstanta <i>proportional</i>
K_i	Konstanta <i>integral</i>
K_d	Konstanta <i>derivative</i>
ΔV	Perubahan tegangan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perubahan daya reaktif yang disuplai ke beban oleh sebuah pembangkit merupakan suatu hal yang pasti terjadi, kondisi ini harus dijaga agar pembangkit tetap bekerja dalam kondisi stabil. Perubahan daya reaktif tersebut harus diimbangi dengan mengubah tegangan keluaran pembangkit tersebut, dalam hal ini dengan mengatur penguatan dari pembangkit, dimana semua proses pengaturan tegangan tersebut dapat dilakukan secara otomatis dengan menggunakan AVR. Dalam studi kestabilan pembangkit, diperlukan penentuan batas *setting* konstanta-konstanta yang terdapat pada pembangkit tersebut, yang dapat dihitung secara matematis dengan menggunakan kriteria kestabilan Routh-Hurwitz sehingga diperoleh *range setting* salah satu konstanta yaitu K_A .

Mengingat banyaknya penambahan beban, khususnya beban-beban yang membutuhkan daya reaktif, masalah kestabilan sistem sangat diperhatikan. Masalah kestabilan dapat mengganggu kontinuitas pembangkitan, penyaluran, dan tentunya pelayanan terhadap konsumen sehingga diperlukan suatu sistem pengendalian yang dapat menanggulangi atau mengkompensasi ketidakstabilan pada suatu sistem pembangkitan yang terhubung ke sistem interkoneksi yang ada.

Pengaturan eksitasi generator memiliki peranan penting untuk masalah tersebut. Untuk itu nilai parameter-parameter pengontrolan dari sistem eksitasi ini sangat penting dalam sistem pembangkitan agar generator bekerja dalam operasi yang aman dan dengan *output* yang stabil. Nilai-nilai parameter ini merupakan nilai *setting* untuk sistem kontrol pembangkit yang ada. Salah satu parameter yang berubah yaitu K_A . Nilai batasan K_A dapat dihitung dari data-data dari pembangkit, dimana pada penelitian ini dihitung dengan suatu metode yang disebut metode Routh-Hurwitz *array*. Metode Routh-Hurwitz memberikan cara perhitungan pada persamaan polinomial, dan jika diterapkan pada sistem kontrol, maka informasi kestabilan mutlak dapat diperoleh secara langsung.

Pengendalian pada suatu sistem eksitasi juga mempengaruhi suplai daya reaktif dan tegangan keluaran. Suplai daya reaktif dari generator tidak boleh

melebihi nilai kapasitas maksimum dari generator. Bila terjadi daya reaktif berlebih maka generator akan menanggung beban berlebih. Jika hal ini terus berlangsung maka akan terjadi kerusakan pada generator. Agar kerusakan pada generator dapat dihindari, maka diperlukan suatu penelitian apakah generator yang bekerja tetap beroperasi pada daerah kerja yang aman. Masalah yang juga timbul yaitu tegangan keluaran yang berubah-ubah akibat pembebanan pada terminal keluaran generator. Semakin banyak pembebanan yang diberikan maka tegangan keluaran generator akan semakin kecil.

Daya Reaktif lebih mengacu pada perubahan nilai tegangan, dan untuk mengontrolnya diperkenalkan beberapa sistem, seperti AVR yang mampu mengatur suplai daya reaktif dari pembangkit maupun nilai tegangan. Penulisan ini akan memperlihatkan bagaimana pengendalian daya reaktif dengan sistem AVR, dalam hal ini pengaturan parameter eksitasi yang sangat berhubungan dengan daya reaktif Q yang dihasilkan dari eksitasi pada rotor generator, dan hubungannya dengan tegangan keluaran.

Berdasarkan uraian tersebut maka disusun penelitian ini dengan judul: “Analisis Parameter Gain Amplifier Sistem Automatic Voltage Regulator Pada Unit Turbin Gas 11 PLTGU Sengkang”

1.2. Perumusan Masalah

Dari uraian singkat mengenai latar belakang pembuatan tugas akhir ini, maka masalah yang akan dibahas dalam penulisan ini terarah pada permasalahan yang akan dianalisis sebagai berikut:

1. Bagaimana mencari *range* nilai K_A pada AVR serta mengetahui nilai K_A terbaik.
2. Bagaimana perbandingan nilai tegangan keluaran generator pada perubahan parameter K_A dan parameter ΔV pada penelitian.
3. Bagaimana perbandingan tegangan keluaran generator dengan sistem AVR tanpa PID dan sistem AVR dengan PID.

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mencari *range* nilai K_A pada AVR serta mengetahui nilai K_A terbaik.
2. Membandingkan nilai tegangan keluaran generator pada perubahan parameter K_A dan parameter ΔV pada penelitian.
3. Membandingkan tegangan keluaran generator dengan sistem AVR tanpa PID dan sistem AVR dengan PID.

1.4. Batasan Masalah

Oleh karena permasalahan sebuah sistem begitu kompleks, maka dalam penulisan ini dilakukan batasan-batasan masalah agar lebih terarah pada permasalahan yang dianalisis:

1. Simulasi dilakukan pada sistem AVR.
2. Kondisi yang dibahas adalah kondisi tunak (*steady state*) dalam hal ini stabilitas tegangan.
3. Parameter-parameter yang digunakan diambil dari Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan dibatasi pada unit GT 11 PLTGU sengkang.

1.5. Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini disusun dengan menggunakan sistematika sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian serta sistematika penulisan.

BAB II Landasan Teori

Merupakan bab yang membahas tentang teori-teori mengenai sistem tenaga listrik, prinsip dasar dari generator sinkron, kestabilan tegangan dan kurva Q-V, serta teori-teori lainnya yang mendukung.

BAB III Metodologi

Menguraikan tentang pengambilan data, analisis data, pengenalan *software* MATLAB, lokasi penelitian, waktu dan tempat penelitian, serta alur penelitian.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Merupakan bab yang membahas tentang sistem AVR, pengaturan parameter K_A pada sistem AVR, serta mencari nilai K_A terbaik untuk sistem yang stabil.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Merupakan bagian yang berisi kesimpulan dan saran dari analisis dan simulasi yang telah diperoleh.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Sistem Tenaga Listrik

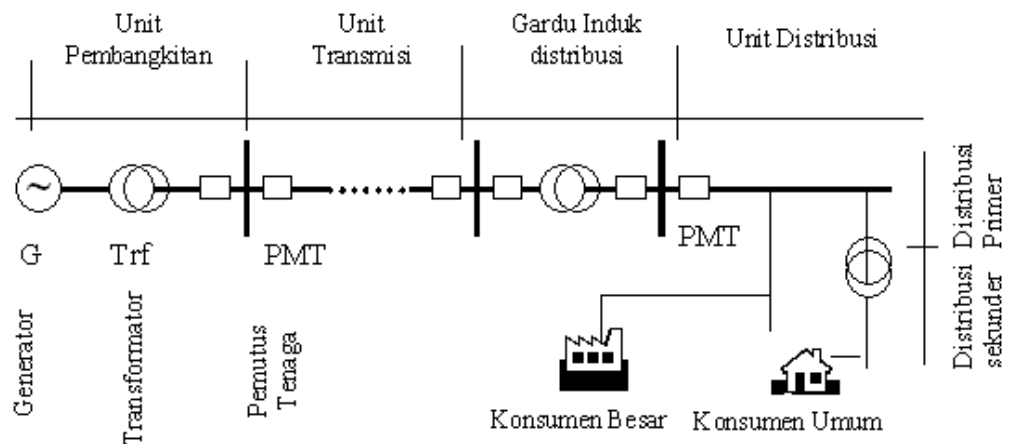
Pada umumnya, sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu pembangkit tenaga listrik, penyaluran tenaga listrik, dan distribusi tenaga listrik. Ketiga bagian ini tidak dapat dipisahkan karena merupakan suatu sistem yang kompleks yang bekerja untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban (Patoding & Sau, 2019). Pembangkitan yaitu produksi tenaga listrik, dilakukan dalam pusat tenaga listrik atau sentral, dengan mempergunakan penggerak mula dan generator. Transmisi atau penyaluran adalah memindahkan tenaga listrik dari pusat tenaga listrik secara besar-besaran ke gardu induk, yang terletak berdekatan dengan suatu pusat pemakaian berupa kota atau industri besar. Dari gardu induk tenaga listrik didistribusikan ke gardu distribusi memperlihatkan secara sistematis urutan fungsi-fungsi pembangkitan, transmisi dan distribusi suatu sistem penyedia tenaga listrik (Syam, 2020).

Tegangan yang dibangkitkan generator pada umumnya menengah, antara 6 kV sampai 24 kV, maka tegangan ini dinaikkan melalui transformator penaik tegangan (*step up transformer*) ke tingkat tegangan transmisi yang tergolong tegangan tinggi atau tegangan *extra* tinggi, antara 30 kV sampai 500 kV. Tingkat tegangan yang lebih tinggi ini dimaksudkan untuk memperbesar daya hantar dari saluran yang berbanding lurus dengan kuadrat tegangan, dan untuk memperkecil rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran. Penurunan tegangan dari tingkat tegangan transmisi pertama-tama dilakukan pada gardu induk, yaitu tegangan diturunkan ke tegangan yang lebih rendah, misalnya dari 500 kV menjadi 150 kV atau dari 150 kV ke 70 kV melalui transformator penurun tegangan (*step down transformer*). Kemudian penurunan kedua dilakukan pada gardu induk distribusi dari 150 kV ke 20 kV, atau dari 70 kV ke 20 kV. Tegangan 20 kV ini disebut tegangan distribusi *prime* r. Pada bagian distribusi, daya listrik selanjutnya akan disalurkan ke pemakai untuk berbagai kebutuhan.

Untuk penyediaan tenaga listrik yang besar, diadakanlah sambungan antara sistem-sistem yang berdekatan. Bilamana masing-masing sistem bekerja

sendiri-sendiri dan tidak saling tersambung, setiap pusat tenaga listrik dapat beroperasi dengan masing-masing frekuensinya, dan gangguan pada salah satu sistem tidak akan mempengaruhi sistem yang lain. Akan tetapi lebih baik untuk melakukan interkoneksi antara ketiga sistem itu karena:

1. Akan meningkatkan stabilitas secara menyeluruh.
2. Memberikan kontinuitas yang lebih baik.
3. Lebih ekonomis



Gambar 2.1. Komponen Sistem Tenaga Listrik (Wibowo, 2018)

2.2. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan sistem (Kundur, 1994). Pada keadaan operasional stabil dari sistem tenaga listrik, terdapat keseimbangan antara daya *input* mekanis pada penggerak mula dengan daya *output* listrik pada sistem.

Adanya gangguan kecil atau besar pada sistem tenaga listrik akan mempengaruhi sistem operasi. Perubahan dinamik terhadap pemakaian maupun pelepasan secara simultan kebutuhan daya reaktif beban sistem dalam *rating* yang besar (*heavy loading*) akan menyebabkan fluktuasi tegangan sistem dimana jika fluktuasi tegangan melewati *konstrain* (-10% dan +5%) maka dapat mempengaruhi kestabilan tegangan atau regulasi sistem.

2.3. Generator Sinkron

1. Prinsip dasar generator sinkron

Prinsip kerja generator sinkron berdasarkan induksi *elektromagnetis*. Setelah rotor diputar oleh penggerak mula (*prime mover*), dengan demikian kutub-kutub yang ada pada rotor akan berputar. Jika kumparan kutub diberi arus searah maka pada permukaan kutub akan timbul medan magnet (garis-garis gaya fluks) yang berputar, kecepatannya sama dengan putaran kutub. Garis-garis gaya fluks yang berputar tersebut akan memotong kumparan jangkar yang ada di stator sehingga pada kumparan jangkar tersebut timbul ggl atau tegangan induksi (Berahim, 1994).

Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang akan disuplai oleh arus searah sehingga menimbulkan fluks yang besarnya tetap terhadap waktu. Kemudian penggerak mula (*prime mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya (Zuhal, 2000).

$$n = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

Keterangan:

n = Kecepatan putar rotor (rpm)

P = Jumlah kutub rotor

f = Frekuensi (Hz)

Besarnya tegangan induksi yang di timbulkan pada kumparan jangkar yang ada pada stator akan mengikuti persamaan:

$$E = C \cdot n \cdot \Phi \quad (2.2)$$

Keterangan:

C = Konstanta mesin

Φ = Fluks medan (weber)

n = Banyaknya putaran

Setelah generator sinkron mencapai kecepatan putar yang sebenarnya oleh penggerak mulanya, medannya dieksitasi dari catu DC. Ketika kutub lewat di bawah konduktor jangkar yang berada pada stator, fluks medan yang memotong

konduktor menginduksikan ggl kepadanya. ggl yang diinduksikan adalah ggl bolak-balik, karena kutub dengan polaritas yang berubah-ubah terus menerus melewati konduktor tersebut. Karena tidak menggunakan komutator, ggl bolak-balik akan diinduksikan dan dibangkitkan pada lilitan stator.

Besarnya ggl yang dibangkitkan bergantung pada kuat medan dan kecepatan putar rotor. Karena generator kebanyakan bekerja pada kecepatan putar yang konstan, maka besarnya ggl yang dibangkitkan menjadi bergantung pada eksitasi medan. Ini berarti bahwa besarnya ggl yang dibangkitkan dapat dikendalikan dengan mengatur besarnya eksitasi medan yang diberikan pada generator. Eksitasi medan dapat langsung dikendalikan dengan mengubah besarnya tegangan eksitasi yang dikenakan pada generator.

Generator serempak (*generator sinkron*) adalah generator yang frekuensi listriknya sebanding dengan jumlah kutub dan putaran yang dimilikinya. Listrik yang dihasilkan adalah listrik arus bolak-balik (listrik AC). Mesin penggerak dapat berasal dari tenaga air, tenaga uap, mesin diesel, dan sebagainya.

Generator AC banyak dijumpai pada pusat-pusat listrik (dengan kapasitas yang relatif besar). Misalnya pada PLTA, PLTU, PLTD, PLTG, PLTGU dan lain-lain. Di sini umumnya generator AC disebut dengan alternator atau generator saja. Selain generator AC dengan kapasitas yang relatif besar tersebut, dikenal pula generator AC dengan kapasitas yang relatif kecil. Misalnya, generator yang dipakai untuk penerangan darurat, untuk penerangan daerah-daerah terpencil (yang belum terjangkau listrik) dan sebagainya, Generator tersebut sering disebut generator set (*home light*).

Dibanding dengan generator DC, generator AC lebih cocok untuk pembangkit tenaga listrik berkapasitas besar (Sumanto, 1996). Hal ini didasarkan atas pertimbangan-pertimbangan:

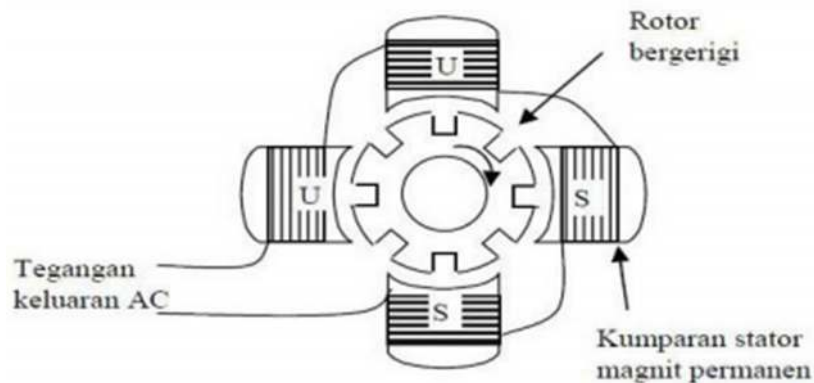
1. Timbulnya masalah komutasi pada generator DC.
2. Timbulnya persoalan dalam hal menaikkan / menurunkan tegangan pada listrik DC.
3. Listrik AC relatif lebih mudah untuk diubah menjadi listrik DC.
4. Masalah efisiensi mesin dan pertimbangan lainnya.

2. Konstruksi generator

Dalam definisi teori generator merupakan sumber energi mekanik, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Ditinjau dari konstruksi generator dibedakan menjadi beberapa bagian. Berikut ini adalah bagian-bagian konstruksi generator sebagai berikut :

1. Rotor

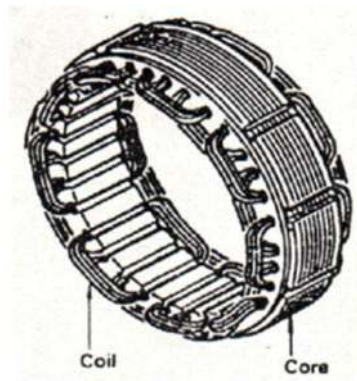
Bagian Rotor ialah bagian generator yang dapat berputar. Bagian rotor dalam generator terdiri atas besi magnet yang berputar pada porosnya. Bagian rotor terletak di bagian tengah stator. Kutub magnet yang dipergunakan pada bagian rotor ada yang satu pasang kutub magnet dan dua pasang kutub atau lebih. Pada rotor terdapat kutub-kutub magnet dengan lilitannya yang dialiri arus searah melewati cincin geser dan sikat-sikat (Sumanto, 1996).



Gambar 2.2. Rotor Generator (Sumanto, 1996)

2. Stator

Bagian stator pesawat generator merupakan bagian yang tetap. Bagian stator terdiri atas alur-alur yang dililiti gulungan kawat email. Gulungan kawat email pada stator dirangkai dalam hubungan tertentu. Dan gulungan kawat ini dipotong atau dilindungi oleh rumah generator itu sendiri dari guncangan yang diakibatkan oleh putaran rotor (Sumanto, 1996).



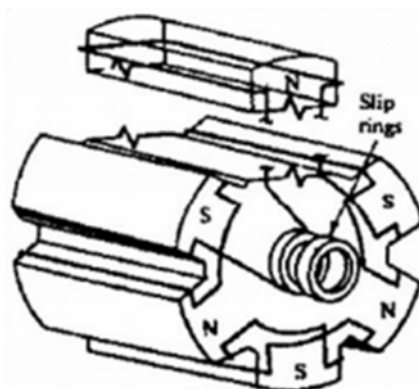
Gambar 2.3. Stator Generator (Sumanto, 1996)

3. Rangka Stator

Rangka stator adalah bagian generator yang sangat penting sebagai tempat kedudukan bagian-bagian komponen generator. Rangka stator dibuat dari besi tuang. Rangka stator merupakan rumah dari bagian-bagian generator yang lain

4. Slip Ring atau Cincin Geser

Dibuat dari bahan kuningan atau tembaga yang dipasang pada poros dengan memakai bahan isolasi. Slip ring ini berputar bersama-sama dengan poros dan rotor. Jumlah slip ring ada dua buah yang masing-masing slip ring dapat menggeser sikat arang yang masing-masing sikat arang positif dan sikat arang negatif, berguna untuk mengalirkan arus penguat magnet ke lilitan magnet ke lilitan magnet rotor.



Gambar 2.4. Slip Ring (Sumanto, 1996)

5. Generator Penguat

Generator penguat adalah suatu generator arus searah yang dipakai sebagai sumber arus. Biasanya yang dipakai adalah dinamo *shunt*. Generator arus

searah ini biasanya dikopel terhadap mesin pemutarnya bersama generator utama. Akan tetapi sekarang banyak generator yang tidak menggunakan generator arus searah (dari luar) sebagai sumber penguat, sumber penguat diambil dari ggl sebagian kecil belitan statornya. ggl tersebut ditransformasikan kemudian disearahkan dengan penyearah elektronik sebelum masuk pada bagian penguat.

Generator-generator sinkron umumnya dibuat sedemikian rupa sehingga lilitan tempat terjadinya ggl tidak bergerak, sedangkan kutub-kutub akan menimbulkan medan magnet berputar. Generator semacam ini disebut generator kutub dalam. Keuntungan generator kutub dalam ialah bahwa untuk mengambil arus tidak dibutuhkan cincin geser dan sikat arang. Hal ini disebabkan lilitan-lilitan tempat terjadinya ggl itu tidak berputar. Generator sinkron tersebut terutama sangat cocok untuk mesin-mesin dengan tegangan yang tinggi dan dengan arus yang besar.

Untuk mengalirkan arus penguat ke lilitan penguat yang berputar tetap diperlukan cincin geser dan sikat-sikat arang. Meskipun demikian bukan berarti bahwa hal tersebut memberatkan karena arus penguat magnet tidak begitu besar dan tegangannya pun rendah.

Inti stator ialah sebuah silinder yang berlubang, terbuat dari plat-plat dengan alur-alur di bagian keliling dalamnya. Di dalam alur-alur itu dipasang lilitan statornya. Ujung-ujung lilitan stator ini dihubungkan dengan jepitan-jepitan penghubung tetap dari mesin. Bagian-bagian yang terpenting dari rotor ialah kutub-kutub, lilitan penguat, cincin geser dan sumbu/as.

Konstruksi generator yang umum digunakan adalah jenis kutub dalam dan yang selanjutnya dibicarakan adalah konstruksi generator kutub dalam ini. Kelebihan generator kutub dalam pada intinya ialah bahwa generator itu dapat menghasilkan tenaga listrik yang sebesar-besarnya, karena tegangan yang terbentuk dapat langsung diambil dari lilitan statornya. Secara umum kutub magnet mesin sinkron dibedakan atas:

1. Kutub magnet dengan bagian kutub yang menonjol (*salient pole*). Konstruksi seperti ini digunakan untuk putaran rendah, dengan jumlah kutub yang banyak.

2. Kutub magnet dengan bagian kutub yang tidak menonjol (*non salient pole*). Konstruksi seperti ini digunakan untuk putaran tinggi, dengan jumlah kutub yang sedikit. Kira-kira $2/3$ dari seluruh permukaan rotor dibuat alur-alur untuk tempat lilitan penguat. Yang $1/3$ bagian lagi merupakan bagian yang utuh, yang berfungsi sebagai inti kutub.

3. Hubungan paralel generator sinkron

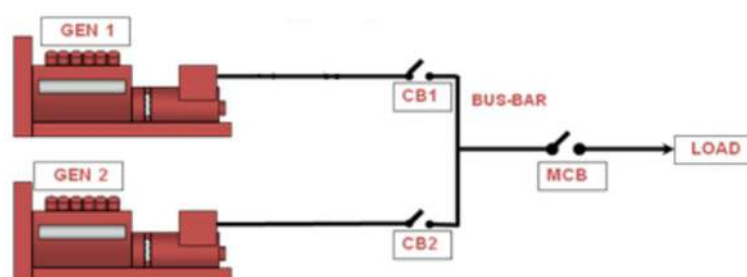
Tujuan kerja paralel generator:

1. Untuk melayani beban yang bertambah (memperbesar kapasitas daya yang dibangkitkan).
2. Untuk menjaga kontinuitas pelayanan apabila ada mesin (generator) yang harus dihentikan (misalnya untuk direparasi).

Sebelum dua generator sinkron diparalelkan harus dipenuhi beberapa syarat-syarat berikut ini:

- 3.4.1. Urutan fasanya harus sama
- 3.4.2. Sudut fasanya harus sama
- 3.4.3. Tegangannya harus sefase
- 3.4.4. Frekuensinya harus sama

Jika dua generator beroperasi dan persyaratan ini dipenuhi maka dikatakan dalam keadaan sinkron (Agiantoro & Prasetyo, 2018) di Gambar 2.5.



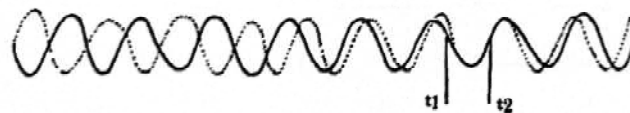
Gambar 2.5. Pengkoneksian Dua Generator Secara Paralel (Agiantoro & Prasetyo, 2018)

Untuk mencapai kesamaan tegangan dan kesamaan frekuensi dari generator yang sudah bekerja generator 1 dengan generator 2 yang akan

diparalelkan ialah dengan mengatur arus penguat magnet dan mengatur kecepatan dari generator tersebut.

Setelah tegangan dan frekuensi dari generator 1 dan generator 2 sama maka selanjutnya diusahakan kesamaan fasenya. Yang dimaksudkan dengan kesamaan fase dari dua generator ialah jalannya (gelombang) sinus tegangan yang dihasilkan harus bersama-sama atau harus tepat bersama-sama mencapai harga nol, bersama-sama meningkat ke harga positif kemudian bersama-sama mencapai harga positif maksimum dan seterusnya.

Syarat-syarat yang telah diterangkan di atas tidak hanya berlaku untuk generator satu fase saja, tetapi juga berlaku untuk generator 3 fase. Perlu diketahui bahwa kumparan-kumparan fase pada generator 3 fase diletakkan / disusun saling bergeser 120° . Ini berarti grafik sinus dari ketiga tegangan fase dari generator 3 fase masing-masing juga bergeser 120° . Jadi untuk memparalelkan 2 buah generator 3 fase cukup dilakukan dengan mengambil salah satu tegangan fasenya saja.



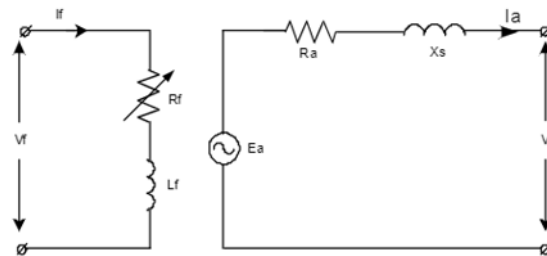
Gambar 2.6. Sinyal Sinus Tegangan dari 2 Generator yang akan Diparalelkan
(Agiantoro & Prasetyo, 2018)

Pada Gambar 2.6, t_1 t_2 adalah saat untuk menyelenggarakan hubungan jajar. Dengan adanya persyaratan untuk menyelenggarakan kerja paralel generator, maka diperlukan peralatan untuk dapat mengetahui apakah persyaratan-persyaratan tersebut sudah terpenuhi atau belum.

Adapun peralatan-peralatan tersebut antara lain:

1. Frekuensi meter yang berfungsi untuk mengetahui frekuensi masing-masing generator.
2. Voltmeter AC yang berfungsi untuk mengetahui besarnya tegangan masing-masing generator.
3. Alat untuk mengetahui apakah tegangan kedua generator tersebut telah sefase.

4. Rangkaian ekuivalen



Gambar 2.7. Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron (Stevenson, 1984)

If adalah arus penguatan generator, R_f adalah belitan penguatan medan. E_a adalah ggl induksi yang dibangkitkan, R_a adalah nilai resistansi dari lilitan stator, I_a adalah arus yang mengalir pada stator ketika generator telah terhubung ke beban, dengan persamaan yang diberikan:

$$V_t = E_a - I_a(R_a + jX_s) \quad (2.3)$$

Keterangan:

R_a = Tahanan Jangkar

V_t = Tegangan keluaran

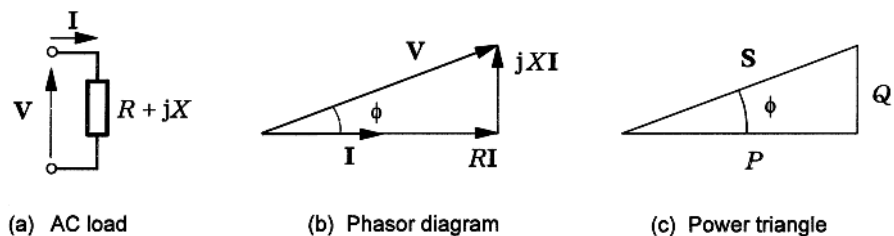
E_a = Gaya Gerak Listrik (ggl)

I_a = Arus Jangkar

X_s = Reaktansi Sinkron

2.4. Daya Aktif, Reaktif, dan Kompleks

Jika suatu sistem dengan beban $R + jX$ dan arus I serta tegangan V , seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut:



Gambar 2.8. Fasor Sederhana dan Segitiga Daya (Acha *et al.*, 2002)

$$S = V \cdot I^* = P + jQ \quad (2.4)$$

Keterangan:

P (W) adalah daya aktif

Q (VAr) adalah daya reaktif

S (VA) adalah daya kompleks

Jika V dijadikan fasor acuan dan dianggap bebannya adalah induktif, maka

$$I = Ie^{-j\theta} = I \cos \phi \quad (2.5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right). I^* = V. (I \cos \phi + jI \sin \phi). I \cos \phi \quad (2.6)$$

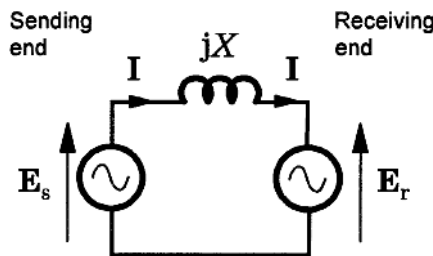
$$Q = V. I \sin \phi \quad (2.7)$$

P dan Q bernilai positif. Beban yang mempunyai daya reaktif positif dikatakan menyerap VAr sehingga beban induktif menyerap VAr. Sementara untuk beban kapasitif

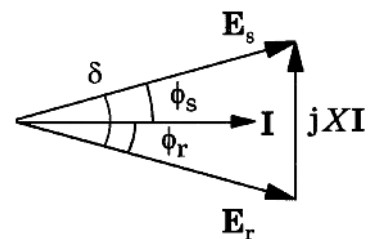
$$I = Ie^{+j\theta} = I \cos \phi + jI \sin \phi \quad (2.8)$$

Arus mendahului tegangan dan bila diselesaikan diperoleh P bernilai positif, Q bernilai negatif sehingga dikatakan beban kapasitif membangkitkan atau menyuplai VAr.

Terdapat perbedaan untuk analisis sisi pengirim dan sisi penerima. Persamaan $V. I \cos \phi$ secara tepat diartikan sebagai daya aktif yang diserap pada sisi penerima. Tapi pada sisi pengirim daya aktif disalurkan ke sistem bukan diserap dari sistem. Perbedaannya adalah bahwa sisi pengirim sebagai sumber dari daya sementara sisi penerima sebagai penyerap dari daya.



3.1. Sistem Simetris
Simetris



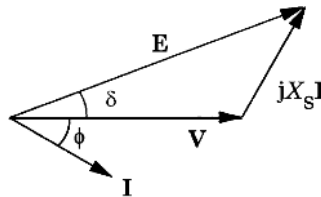
B. Diagram Faso Sistem

Gambar 2.9. Sistem Simetris (Acha *et al.*, 2002)

Pada Gambar 2.9A, daya P_s dan P_r akan bernilai positif yang berarti disalurkan ke sistem pada sisi pengirim dan diserap oleh sisi penerima. Hal yang sama juga berlaku untuk daya reaktif. Sisi penerima pada Gambar 2.9B

mempunyai faktor daya tertinggal dan menyerap VAR. Sisi pengirim mempunyai faktor daya mendahului dan menyuplai VAR.

Pada Gambar 2.10 generator dan beban keduanya mempunyai faktor daya yang mendahului, tapi beban menyerap VAR sedangkan generator membangkitkan VAR. Ketetapan ini disimpulkan pada Tabel 2.1.



Gambar 2.10. Diagram Fasor Beban Induktif (Acha *et al.*, 2002)

Tabel 2.1. Konvensi untuk Pembangkitan dan Penyerapan Daya Reaktif (Acha *et al.*, 2002)

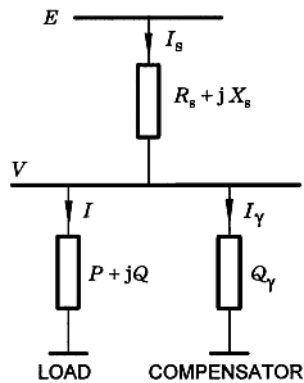
	Lagging PF (I lags V)	Leading PF (I leads V)
Load (sink)	$Q_r > 0$ Absorbing VARs	$Q_r < 0$ Generating VARs
Generator (source)	$Q_s > 0$ Generating VARs	$Q_s < 0$ Absorbing VARs

Sumber: Power Electronic Control In Electrical System, 2002

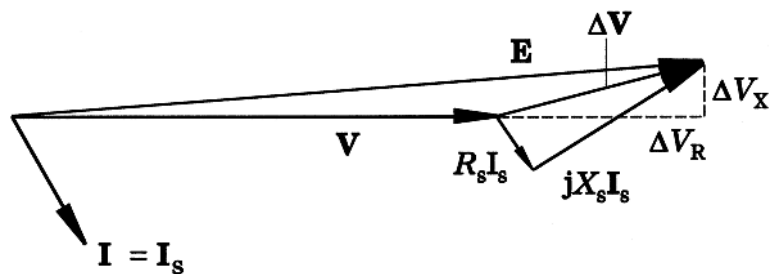
Beberapa peralatan dalam sistem tenaga dapat bertindak sebagai penyerap dan penghasil daya reaktif. Generator dan motor sinkron, motor induksi, transformator, saluran transmisi udara maupun bawah tanah merupakan komponen sistem tenaga yang sangat berpengaruh pada kuantitas daya reaktif dalam suatu sistem tenaga listrik.

2.5. Kompensasi Dan Pengaturan Tegangan

Gambar 2.11 menunjukkan rangkaian segaris sistem tenaga AC yang merupakan representasi dari sistem satu fasa atau dari sistem 3 fasa.

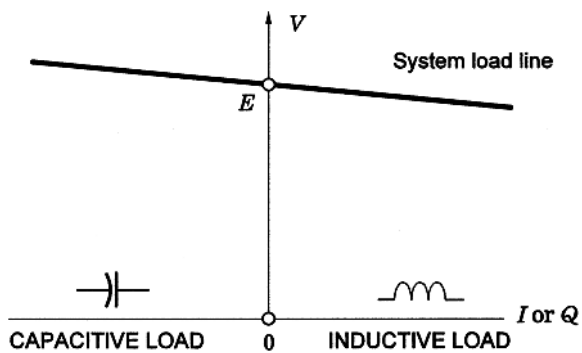


Gambar 2.11. Rangkaian Segaris Sumber dan Beban (Acha *et al.*, 2002)



Gambar 2.12. Diagram Fasor Sistem Tidak Terkompensasi (Acha *et al.*, 2002)

Ketika beban menarik arus dari sumber, tegangan terminal (V) turun dibawah ggl (E). Hubungan antara arus I dan tegangan beban V disebut sistem garis beban dimana ditunjukkan pada Gambar 2.13



Gambar 2.13. Sistem Garis Beban (Acha *et al.*, 2002)

Dari Gambar 2.10 dan 2.11 diperoleh:

$$\Delta F = E - V = Z_s I \tag{2.9}$$

Daya kompleks per fasa beban dirumuskan:

$$S = V \cdot I^* \quad (2.10)$$

$$I = \frac{P-jQ}{V} \quad (2.11)$$

$$\Delta V = (R_s j X_s) \left(\frac{P-jQ}{V} \right) = \frac{R_s P + X_s Q}{V} + j \frac{X_s P - R_s Q}{V} = \Delta V_R + j \Delta V_X \quad (2.12)$$

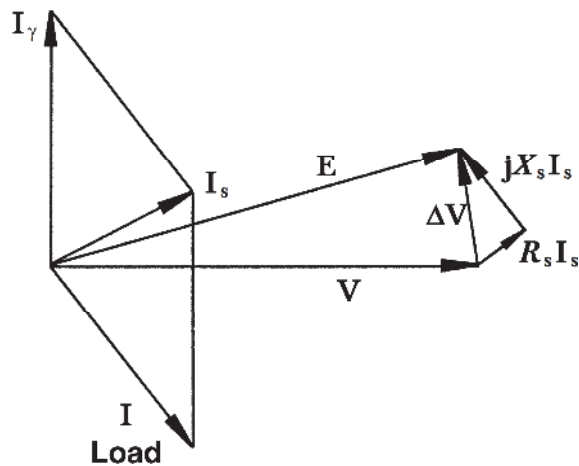
$$|E|^2 = \left[V + \frac{R_s + X_s Q_s}{V} \right]^2 + \left[\frac{X_s P - R_s Q_s}{V} \right]^2 \quad (2.13)$$

Besar dan arah V relatif terhadap E merupakan fungsi dari besar dan arah arus beban serta impedansi sumber. Dengan demikian tegangan tergantung pada daya aktif dan reaktif beban.

Penambahan impedansi kompensator secara paralel dengan beban dapat menjaga agar $|V| = |E|$. Gambar 2.10 memperlihatkan penggunaan kompensator reaktif murni. Daya reaktif beban berubah sesuai dengan persamaan:

$$Q_s = Q + Q_\gamma \quad (2.14)$$

Dimana Q_γ adalah reaktansi kompensator yang dapat diatur sama halnya dengan memutar fasor ΔV sampai $|V| = |E|$. Nilai Q_γ diatur untuk mencapai tegangan konstan untuk Q_γ dengan $|V| = |E|$, sehingga daya reaktif kompensator diperoleh $Q_\gamma = Q_s - Q$. Secara praktek nilai ini bisa ditentukan secara otomatis dengan kontrol *loop* tertutup untuk menjaga nilai tegangan V konstan.



Gambar 2.14. Diagram Fasor, Dikompensasi untuk Tegangan Konstan(Acha *et al.*, 2002)

Kompensator reaktif murni dapat mengurangi variasi tegangan yang disebabkan oleh perubahan daya aktif dan reaktif beban.

2.6. Daya Reaktif

2.10.1. Daya Reaktif Pada Sistem Tenaga Listrik

Dalam sistem tenaga listrik beban tidak hanya menyerap daya aktif tetapi juga menyerap daya atau menghasilkan daya reaktif. Peralatan dalam sistem tenaga listrik dapat bersifat induktif atau kapasitif. VAr diserap oleh suatu beban induktif akan dianggap positif dan yang diserap oleh beban kapasitif dianggap negatif. Konvensi ini direkomendasikan oleh IEC. Suatu beban induktif menyerap VAr positif (*lagging* VAr) dan beban kapasitif menghasilkan *leading* VAr. Aliran daya reaktif ke bus bar adalah positif bila beban bersifat induktif (*lagging*), VAr yang dikirim dari suatu bus bar dianggap negatif untuk suatu faktor daya ketinggalan dan positif untuk VAr mendahului (*leading*).

Beberapa peralatan dalam sistem tenaga dapat bertindak sebagai penyerap dan penghasil daya reaktif. Generator dan motor sinkron, motor induksi, transformator, saluran transmisi udara maupun bawah tanah merupakan komponen sistem tenaga yang sangat berpengaruh pada kuantitas daya reaktif dalam suatu sistem tenaga listrik.

1. Mesin sinkron

Mesin sinkron dapat digunakan untuk membangkitkan atau menyerap daya reaktif. Generator adalah sumber utama suplai VAr positif ke sistem. Mesin sinkron yang diberi penguatan berlebih dari penguatan normalnya (*over-excited*) akan membangkitkan daya reaktif, sebaliknya jika diberi penguatan berkurang (*under-excited*) akan menyerap daya reaktif.

Motor sinkron yang diputar tanpa beban dan diberi penguatan berlebih akan bertindak seperti kapasitor dan mempunyai kemampuan untuk menghasilkan daya reaktif dan memperbaiki faktor daya sistem. Motor sinkron dalam kondisi demikian biasa disebut kompensator sinkron atau kondensator sinkron.

2. Saluran transmisi udara

Kapasitansi suatu saluran transmisi adalah akibat beda potensial antara penghantar (konduktor), kapasitansi menyebabkan penghantar tersebut bermuatan seperti yang terjadi beda potensial diantaranya. Kapasitansi antara

penghantar sejajar adalah suatu yang konstan yang tergantung pada ukuran dan jarak pemisah antara penghantar. Untuk saluran daya yang panjangnya kurang dari 80 km, pengaruh kapasitansinya kecil dan biasanya dapat diabaikan. Untuk saluran-saluran yang lebih panjang dengan tegangan yang lebih tinggi, kapasitansinya menjadi bertambah penting.

3. Kabel bawah tanah

Kabel dapat dikatakan sebagai penghasil daya reaktif disebabkan karena kapasitansinya yang tinggi. Kemampuannya menghasilkan daya reaktif sebanding dengan panjangnya kabel tersebut. Sebuah kabel 275 kV, 240 MVA menghasilkan 6,25 sampai 7,5 MVA_r / km; kabel 132 kV menghasilkan kira-kira 1,9 MVA_r / km dan kabel 33 menghasilkan 0,125 MVA_r / km.

2.10.2. Pengaturan Daya Reaktif Generator

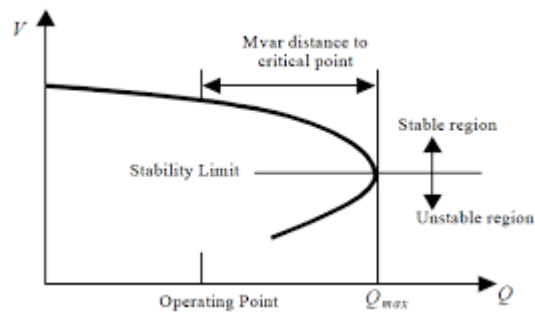
Generator yang biasa dikenal sebagai penghasil energi listrik, selain menghasilkan daya aktif, juga dapat membangkitkan daya reaktif atau menyerap daya reaktif dari sistem. Bila sebuah generator membangkitkan daya reaktif maka generator tersebut mempunyai faktor kerja *lagging*, sebaliknya bila generator beroperasi untuk menyerap daya reaktif dari sistem, generator tersebut mempunyai faktor kerja *leading*.

Pengaturan besar daya reaktif yang dibangkitkan oleh sebuah generator dilakukan dengan memberikan penguatan lebih pada medannya. Kemampuan generator untuk membangkitkan daya reaktif dibatasi oleh “*thermal-ratings*” pada stator dan rotor dan *output* pada *exciter*. Pengaturan besar daya reaktif yang diserap oleh sistem dilakukan dengan memberikan penguatan kurang pada medannya. Kemampuan generator untuk menyerap daya reaktif dari sistem dibatasi oleh stabilitas pembangkit itu sendiri. Dalam kondisi tertentu untuk memperbesar kemampuan generator menyerap daya reaktif, dilakukan dengan mengoperasikan generator sebagai kondensator sinkron, yaitu dengan cara melepas penggerak mulanya.

i. Kurva Q-V

Kurva Q-V adalah kurva yang sering dipakai untuk melihat kestabilan tegangan. Kurva ini memplot hubungan antar tegangan pada bus terhadap

daya reaktif pada bus yang sama. Operator sistem tenaga dapat menggunakan kurva ini untuk mengecek keadaan kestabilan tegangan sehingga dapat mengambil tindakan yang tepat terhadap permasalahan yang ada. Sensitivitas dan perubahan tegangan bus terhadap injeksi daya reaktif dapat diketahui secara jelas dengan menggunakan kurva ini.



Gambar 2.15. Kurva Q-V

Secara umum keuntungan dari kurva ini:

1. Keamanan tegangan sangat berhubungan dengan daya reaktif, sedangkan dengan kurva ini batas daya-daya reaktif pada setiap bus dapat diketahui dengan kurva ini.
2. Karakteristik dari bus yang akan dipasangkan peralatan bantu (kapasitor, SVC dan lain-lain) dapat diplot secara langsung pada kurva Q-V. Titik operasi adalah perpotongan antara karakteristik kurva Q-V sistem dengan karakteristik peralatan kompensasi daya reaktif.
3. Kemiringan dari kurva Q-V menandakan keadaan yang rawan dari bus.

2.7. Sistem Per Unit

Untuk mempermudah perhitungan, nilai impedansi, arus, tegangan, dan daya dinyatakan dalam pu. Harga pu untuk suatu besaran didefinisikan sebagai perbandingan antara besaran tersebut dengan nilai dasarnya yang dinyatakan dalam desimal.

$$\text{Nilai per unit} = \frac{\text{Nilai Asli}}{\text{Nilai Dasar}} \quad (2.15)$$

Cara perhitungan dengan menggunakan nilai pu mempunyai keuntungan tertentu, dimana hasil kali dua nilai pu adalah tetap suatu nilai pu juga. Karena itu perhitungan pu dianggap lebih menarik dari pada perhitungan secara persen,

terutama untuk perhitungan jaringan yang menggunakan banyak transformator dengan tingkat tegangan yang berbeda-beda.

Tegangan, arus, impedansi, dan daya mempunyai hubungan sedemikian rupa sehingga pemilihan nilai dasar untuk dua saja dari besaran-besaran tersebut sudah dengan sendirinya menentukan nilai dasar untuk dua besaran lainnya.

Untuk sistem satu fasa:

$$\text{Arus Dasar (A)} = \frac{\text{dasar KVA}_{1\phi}}{\text{tegangan dasar KV}_{LN}} \quad (2.16)$$

$$\text{Impedansi Dasar (Ohm)} = \frac{(\text{tegangan dasar KV}_{LN})^2}{\text{dasar MVA}_{1\phi}} \quad (2.17)$$

Untuk sistem tiga fasa:

$$\text{Arus Dasar (A)} = \frac{\text{dasar KVA}_{3\phi}}{\sqrt{3} \times \text{tegangan dasar KV}_{LL}} \quad (2.18)$$

$$\text{Impedansi Dasar (Ohm)} = \frac{(\text{tegangan dasar KV}_{LL})^2}{\text{dasar MVA}_{3\phi}} \quad (2.19)$$

2.8. PLTG

PLTG adalah salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan *turbine* sebagai *prime* kovernya dengan gas sebagai fluida kerjanya. Dibandingkan dengan pembangkit listrik lainnya, *turbine* gas merupakan pembangkit yang cukup sederhana yang terdiri atas empat komponen utama yaitu: kompresor, ruang bakar, *turbine* gas dan, generator (ABB, 1997).

2.8.1. Prinsip kerja

Sistem turbin gas menggunakan kompresor aksial, dikatakan kompresor aksial karena aliran udara yang melalui kompresor searah dengan poros dan rotor. Kompresor aksial dapat mencapai efisiensi 90% dan perbandingan tekanan yang dihasilkan setiap tingkat sekitar 1,05-1,15 atm, maka untuk menghasilkan perbandingan tekanan yang tinggi diperlukan jumlah tingkat yang lebih banyak (17 tingkat atau lebih) hal ini mengakibatkan ukuran kompresor aksial menjadi lebih panjang. Udara atmosfer masuk (*air inlet*) melalui kompresor dan masuk ke pompa automiser yang ukurannya lebih kecil sehingga tekanan udaranya menjadi besar. Karena tekanan udara yang besar mengakibatkan temperatur udara naik. Kemudian udara yang bertekanan dan bertemperatur tinggi itu masuk ke dalam

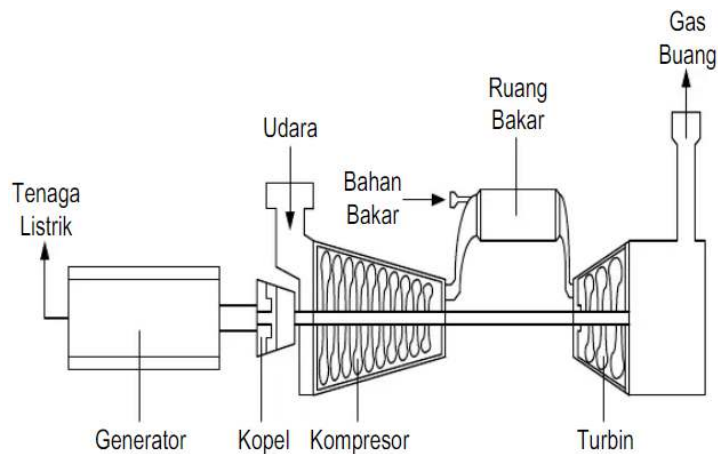
ruang bakar (*combustion chamber*). Di dalam ruang bakar, bahan bakar dan udara yang dikabutkan kemudian diberi pengapian (*ignition*) dari busi sehingga terjadi proses pembakaran (ABB, 1997).

Proses pembakaran adalah ekuivalen dengan proses pemasukan kalor pada siklus Brayton. Proses pembakaran ini terjadi secara kontinu sehingga temperatur gas pembakaran harus dibatasi sesuai dengan kekuatan material sudu-sudu *turbine*. Hal ini perlu dilaksanakan karena kekuatan material akan turun dengan naiknya temperatur.

Tekanan ruang bakar berkisar antara 2,5-10 atm, temperatur gas pembakaran keluar dari ruang bakar sekitar berkisar antara 500 – 1100°C. Untuk membatasi temperatur gas pembakaran keluar dari ruang bakar maka sistem *turbine* gas memerlukan jumlah udara berlebih, dimana udara tersebut diperlukan untuk menyempurnakan proses pembakaran dalam waktu sesingkat-singkatnya. Membandingkan bagian-bagian ruang bakar yang homogen. Gas panas yang dihasilkan dari proses pembakaran masuk ke dalam *turbine* dan berfungsi sebagai fluida kerja yang memutar rotor *turbine* bersudu yang terkopel dengan generator sinkron. Di dalam *turbine* terjadi proses ekspansi untuk menurunkan tekanan dan menambah kecepatan udara. Sekitar 60% daya yang dihasilkan dari *turbine* digunakan untuk memutar beban (generator listrik, pompa, kompresor, baling-baling, dan sebagainya) (ABB, 1997).

2.8.2. Diagram alir *turbine* gas

Seperti juga PLTD, PLTG atau turbin gas merupakan mesin dengan proses pengoperasian dalam (*internal combustion*). Bahan bakar berupa minyak atau gas alam dibakar di dalam ruang pembakaran (*combustor*). Udara yang memasuki kompresor setelah mengalami tekanan bersama-sama dengan bahan bakar disemprotkan ke ruang pembakaran untuk melakukan proses pembakaran. Gas panas ini berfungsi sebagai fluida kerja yang memutar roda turbin bersudu yang terkopel dengan generator sinkron kemudian mengubah energi mekanis menjadi energi listrik (Dietzel & Sriyono, 1996).

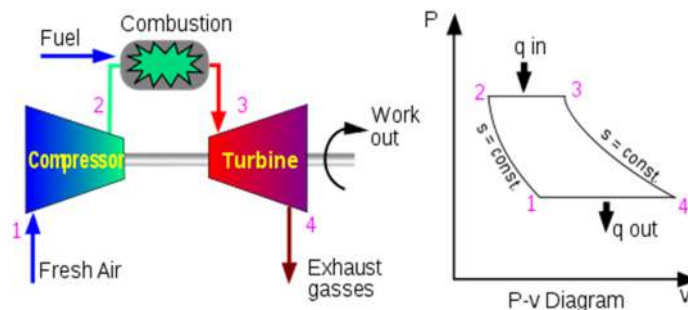


Gambar 2.16. Diagram Alir Turbin Gas (Dietzel & Sriyono, 1996)

PLTG merupakan mesin bebas getaran, tidak terdapat bagian mesin yang bergerak translasi (bolak-balik). Temperatur *turbine* gas (1000°C) jauh lebih tinggi dari pada jenis *turbine* yang lain. Efisiensi konversi termalnya mencapai 20%-30%. PLTG berfungsi memikul beban puncak karena membutuhkan bahan bakar yang sangat besar (biaya investasi rendah tapi biaya operasi tinggi) (Dietzel & Sriyono, 1996).

2.8.3. Siklus turbin gas

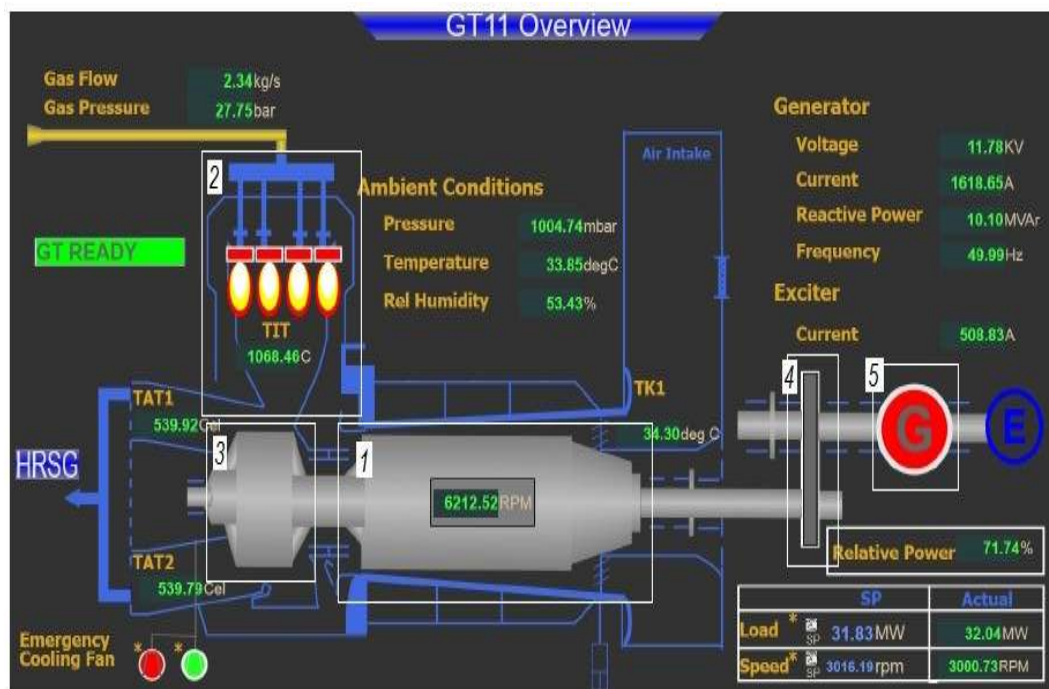
Sesuai dengan teori, bahwa *turbine* gas mengikuti siklus Brayton,. Pada siklus yang sederhana, proses pembakaran atau proses pembuangan gas bekas terjadi pada tekanan konstan sedangkan proses kompresi dan ekspansi terjadi secara kontinu. Gambar 2.17 menunjukkan proses secara sistematis dan berlangsung kontinu.



Gambar 2.17. Siklus Turbin Gas (PT.CEPA, 2017)

Dari siklus Brayton dapat dijelaskan lebih lanjut sebagai berikut:

Pada titik 1 udara dihisap masuk ke dalam kompresor, terjadi pemanfaatan udara sehingga udara tersebut bertekanan tinggi. Udara bertekanan tinggi tersebut dialirkan ke titik 2 dan dicampur dengan bahan bakar di dalam ruang bakar (*Combustion chamber*). Hasil dari pembakaran tersebut gas panas yang bertekanan tinggi dialirkan ke titik 3, untuk selanjutnya menuju turbin dan memutar rotor turbin dikeluarkan ke titik 4 (*Exhaust*). Gambar 2.18 memperlihatkan bagian utama suatu *turbine* gas beserta masing-masing komponennya.



Keterangan:

1. *Compressor*
2. *Combustion Chamber*
3. *Gas Turbine*
4. *Gear Box*
5. *Generator*

Gambar 2.18. Bagian Utama Turbin Gas (PT.CEPA, 2017)

2.8.4. Proses pengoperasian PLTG

Secara garis besar urutan kerja dari proses pengoperasian PLTG tersebut sebagai berikut (ABB, 1997):

2.8.1. Proses *starting*

Pada proses start awal untuk memutar *turbine* menggunakan mesin diesel sampai putaran poros *turbine*/kompresor mencapai putaran 3400 rpm maka secara otomatis diesel dilepas dan akan berhenti.

2.8.2. Proses kompresi

Udara dari luar kemudian dihisap melalui *air inlet* oleh kompresor dan masuk ke ruang bakar dengan cara dikabutkan bersama bahan bakar lewat *nozzle* secara terus menerus dengan kecepatan tinggi.

2.8.3. Transformasi energi *thermis* ke mekanik

Kemudian udara dan bahan bakar dikabutkan ke dalam ruang bakar diberi pengapian (*ignition*) oleh busi (*spark plug*) pada saat permulaan pembakaran. Pembakaran seterusnya terjadi terus menerus dan hasil pembakarannya berupa gas bertemperatur dan bertekanan tinggi dialirkan ke dalam cakram melalui sudu - sudu yang kemudian diubah menjadi tenaga mekanis pada perputaran porosnya.

2.8.4. Transformasi energi mekanik ke energi listrik.

Poros *turbine* berputar hingga 6.200 rpm, yang sekaligus memutar poros generator sehingga menghasilkan tenaga listrik. Putaran turbin 6.200 rpm diturunkan oleh *load gear* menjadi 3000 rpm, dan kecepatan putaran *turbine* ini digunakan untuk memutar generator.

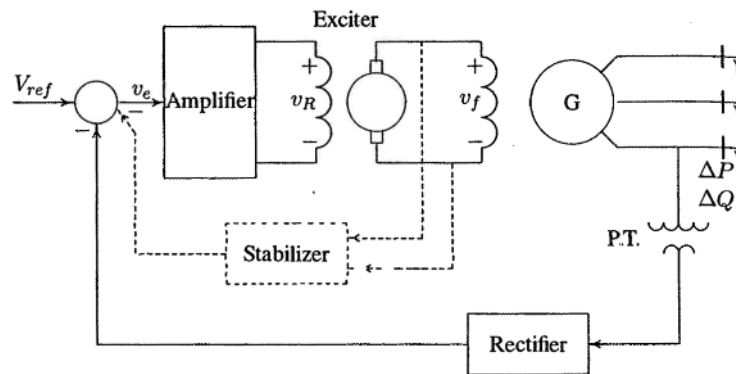
Udara luar yang dihisap masuk kompresor, kemudian dimanfaatkan hingga pada sisi keluarannya menghasilkan tekanan yang cukup tinggi. Bersama dengan udara yang bertekanan tinggi, bahan bakar dikabutkan secara terus menerus dan hasil dari pembakaran tersebut dengan suatu kecepatan yang tinggi mengalir dengan perantaraan *transition piece* menuju *nozzle* dan sudu-sudu turbin.

Turbin gas dapat dioperasikan dalam dua mode yaitu *open cycle operation* dan *combined cycle operation*. Pada *open cycle operation*, *diverter damper* tertutup sehingga gas buang dari *exhaust* GT dibuang ke udara atmosfer melalui *bypass stack*. Sedangkan pada *combined cycle operation*, *diverter damper* terbuka sehingga gas buang mengalir ke HRSG untuk digunakan sebagai bahan bakar di HRSG dalam memproduksi uap kering.

2.9. AVR

AVR adalah suatu perangkat yang dipasang pada generator yang dapat bekerja secara otomatis mengatur tegangan atau amplitudo gelombang yang dihasilkan oleh generator agar tetap stabil (Gunadin, 2008). AVR bekerja dalam mengatur tegangan keluaran generator dengan cara mengontrol arus penguatan dari generator tersebut.

Sebuah AVR bekerja dengan melibatkan beberapa bagian dari suatu generator / pembangkit. Model sederhana dari sebuah AVR pada sebuah generator yang sistem penguatannya menggunakan sebuah generator DC tipe *shunt* ditampilkan seperti Gambar 2.19 berikut:



Gambar 2.19. Skema Sederhana dari Sistem AVR (Saadat, 1999)

1. Amplifier

Amplifier penguatan dari sistem eksitasi dapat berupa penguatan *magnetik*, penguatan putaran, atau penguatan elektronik. *Amplifier* dapat direpresentasikan sebagai K_A , dengan konstanta waktu T_A , yang dalam model matematisnya seperti persamaan berikut (Saadat, 1999).

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1+T_A s} \quad (2.20)$$

Nilai konstanta waktu T_A sangat kecil yaitu berkisar antara 0.02 sampai 0.1 detik dan sering diabaikan.

2. Exciter

Eksitasi yang biasa digunakan dalam sebuah generator terdapat beberapa tipe mulai yang menggunakan generator DC sampai yang tipe modern dengan menggunakan SCR sebagai penyearah untuk menghasilkan daya DC. Eksitasi

dapat direpresentasikan sebagai K_E dengan konstanta waktu T_E , yang dalam model matematisnya seperti persamaan berikut:

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1+T_E s} \quad (2.21)$$

3. Generator

Tegangan terminal sebuah generator sangat tergantung pada bebannya. Dalam bentuk linear, relasi fungsi tegangan terminal dengan tegangan medan dapat direpresentasikan sebagai K_G dengan konstanta waktu T_G dan fungsi transfer-nya sebagai berikut:

$$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{K_G}{1+T_G s} \quad (2.22)$$

4. Sensor

Sensor terdiri atas transformator tegangan dan sebuah penyearah. Sensor dapat direpresentasikan sebagai K_R dengan konstanta waktu T_R dan fungsi transfer-nya sebagai berikut:

$$\frac{V_S(s)}{V_t(s)} = \frac{K_R}{1+T_R s} \quad (2.23)$$

Prinsip kerja dari AVR yaitu Tegangan keluaran generator mulanya diturunkan dengan menggunakan PT atau trafo tegangan kemudian disearahkan. Hasil penyearahan lalu dibandingkan dengan V_{ref} apabila terjadi perbedaan maka AVR akan memerintahkan *Amplifier* untuk menaikkan atau menurunkan arus penguatan generator DC sehingga tegangan keluaran dari generator tersebut juga berubah. Jika tegangan keluaran generator DC berubah maka arus penguatan generator sinkron juga berubah, akibatnya tegangan keluaran generator kembali stabil.

2.10. Pengantar Sistem Kontrol

A. Definisi

Sistem adalah kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama - sama dan melakukan suatu sasaran tertentu. Gangguan (*disturbance*) adalah suatu sinyal yang cenderung mempunyai pengaruh yang merugikan pada harga keluaran sistem. Jika suatu gangguan dibangkitkan di dalam sistem, disebut gangguan internal. Sedangkan gangguan eksternal dibangkitkan di luar sistem.

Kontrol berumpan - balik (*feedback control*) adalah suatu operasi yang dengan adanya beberapa gangguan, cenderung memperkecil selisih antara keluaran sistem dan masukan acuan dengan membandingkannya dan menggunakan selisihnya sebagai parameter pengontrolan.

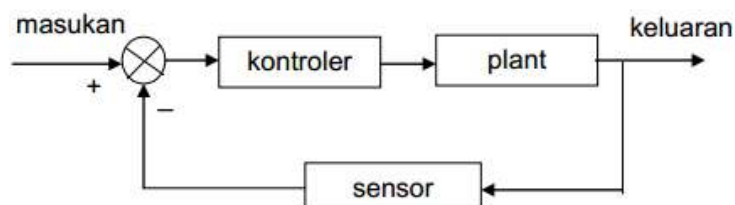
B. Persyaratan umum sistem kontrol

Setiap sistem kontrol harus stabil, ini merupakan persyaratan utama. Disamping kestabilan mutlak, suatu sistem kontrol harus mempunyai kestabilan relatif yang layak. Jadi kecepatan respons harus cukup cepat dan menunjukkan peredaman yang layak. Suatu sistem kontrol juga harus mampu memperkecil kesalahan sampai nol atau sampai pada suatu harga yang ditoleransi. Setiap sistem kontrol yang berguna harus memenuhi persyaratan ini.

Persyaratan kestabilan relatif yang layak dan ketelitian keadaan tunak (*steady state*) cenderung tidak dapat dipenuhi secara bersama-sama. Oleh karena itu dalam mendesain sistem kontrol, perlu melakukan kompromi yang paling efektif di antara dua persyaratan ini.

C. Kontrol *loop* tertutup dan kontrol *loop* terbuka

Sistem kontrol *loop* tertutup (*close loop control sistem*). Sistem kontrol *loop* tertutup adalah sistem kontrol yang sinyal keluarannya mempunyai pengaruh langsung pada aksi pengontrolan (Jati, 2016). Jadi, sistem kontrol *loop* tertutup adalah sistem kontrol berumpan balik. Sinyal kesalahan penggerak yang merupakan selisih antara sinyal masukan dan sinyal umpan - balik, diumpangkan ke *kontroler* untuk memperkecil kesalahan dan membuat agar keluaran sistem mendekati harga yang diinginkan. Dengan kata lain, istilah “*loop* tertutup” berarti menggunakan aksi.



Gambar 2.20. Sistem Kontrol *Loop* Tertutup (Jati, 2016)

Sistem kontrol *loop* terbuka (*open loop control sistem*). Sistem kontrol *loop* terbuka adalah sistem kontrol yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi pengontrolan (Jati, 2016). Jadi, pada sistem *loop* terbuka, keluaran tidak diukur atau disimpan balik untuk dibandingkan dengan masukan.

Pada setiap sistem kontrol *loop* terbuka keluaran tidak dibandingkan dengan masukan acuan, terdapat suatu kondisi operasi yang tetap. Jadi, ketelitian sistem bergantung pada kalibrasi. Dengan adanya gangguan, sistem kontrol *loop* terbuka tidak dapat bekerja seperti yang diinginkan. Kontrol *loop* terbuka dapat digunakan dalam praktek hanya jika hubungan antara masukan dan keluaran diketahui dan jika terdapat gangguan internal maupun eksternal. Jelaslah bahwa sistem semacam ini bukan sistem kontrol berumpan balik.

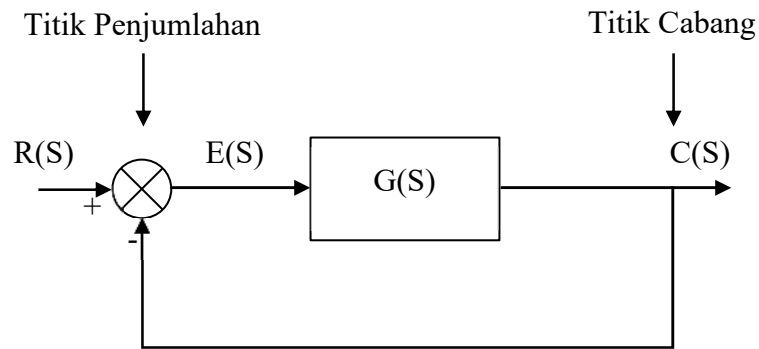


Gambar 2.21. Sistem Kontrol *Loop* Terbuka (Jati, 2016)

Suatu kelebihan dari sistem kontrol *loop* tertutup adalah penggunaan umpan - balik yang membuat respons sistem kurang peka terhadap gangguan eksternal dan perubahan internal pada parameter sistem. Jadi mungkin dapat digunakan komponen-komponen yang relatif kurang teliti dan murah untuk mendapatkan pengontrolan "*plant*" yang teliti, dan hal ini tidak diperoleh pada sistem *loop* terbuka.

Dari segi kestabilan, sistem kontrol *loop* terbuka lebih mudah dibuat karena kestabilan bukan merupakan persoalan utama. Sebaliknya, kestabilan selalu merupakan persoalan utama pada sistem *loop* tertutup karena cenderung terjadi kesalahan akibat koreksi berlebih.

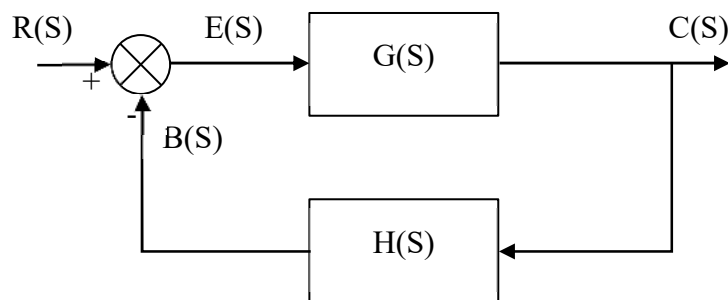
Pemodelan sistem AVR, dimana pemodelan merupakan fungsi alih yang didasari sistem kontrol *loop* tertutup / *close loop transfer function* (CLTF) dan *loop* terbuka / *open loop transfer function* (OLTF). Gambar 2.22 menunjukkan suatu contoh diagram blok sistem *loop* tertutup:



Gambar 2.22. Diagram Blok Sistem *Loop* Tertutup

Setiap sistem kontrol linear dapat dinyatakan dengan suatu diagram blok yang terdiri dari beberapa blok, titik penjumlahan, dan titik cabang. Titik cabang adalah titik tempat sinyal keluaran blok secara bersamaan menuju ke blok atau titik penjumlahan.

Jika keluaran diumpanbalikkan ke titik penjumlahan untuk dibandingkan dengan masukan, maka perlu mengubah bentuk sinyal keluaran agar sama dengan sinyal masukan. Perubahan ini dilakukan oleh elemen umpan balik yang mempunyai fungsi alih $H(S)$. Penting lainnya dari elemen umpan balik adalah untuk memodifikasi keluaran sebelum dibandingkan dengan masukan. Pada contoh ini, sinyal umpan balik diumpankan ke titik penjumlahan untuk dibandingkan dengan sinyal masukan adalah $B(S) = H(S)C(S)$, seperti Gambar 2.23:



Gambar 2.23. Sistem *Loop* Tertutup

Perbandingan antara sinyal umpan balik $B(S)$ dengan sinyal kesalahan penggerak $E(S)$ disebut fungsi alih *loop* terbuka. Jadi:

$$\text{Fungsi alih loop terbuka} = \frac{B(S)}{E(S)} = G(S)H(S) \quad (2.24)$$

Perbandingan antara keluaran $C(S)$ dengan sinyal penggerak $E(S)$ disebut fungsi alih umpan maju, sehingga:

$$\text{Fungsi alih umpan maju} = \frac{C(S)}{E(S)} = G(S) \quad (2.25)$$

Jika fungsi alih elemen umpan balik adalah satu, maka fungsi alih *loop* terbuka dan fungsi alih umpan maju adalah sama. Untuk sistem pada Gambar 2.23, Keluaran $C(S)$ dan masukan $R(S)$ direlasikan sebagai berikut:

$$C(S) = G(S)E(S) \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} E(S) &= R(S) - B(S) \\ &= R(S) - H(S)C(S) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Eliminasi $B(S)$ dari persamaan-persamaan ini memberikan:

$$C(S) = G(S)[R(S) - H(S)C(S)]$$

atau

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{G(S)}{1+G(S)H(S)} \quad (2.28)$$

atau biasa disebut CLTF.

Fungsi alih yang merelasikan $C(S)$ dengan $R(S)$ disebut fungsi alih *loop* tertutup, dan fungsi alih ini merelasikan dinamika sistem *loop* tertutup dengan elemen umpan maju dan elemen umpan balik. Dari persamaan di atas diperoleh:

$$C(S) = \frac{G(S)}{1+G(S)H(S)} R(S) \quad (2.29)$$

Jadi jelaslah bahwa keluaran sistem *loop* tertutup bergantung pada fungsi alih *loop* tertutup dan sifat dari masukan. Dengan begitu dapat membuat pemodelan, analisa, dan pengendalian dari suatu sistem.

D. Kriteria Routh-Hurwitz

Kestabilan suatu sistem juga bisa diperoleh dengan menggunakan kriteria Routh-Hurwitz. Kriteria ini digunakan untuk mempermudah mencari kestabilan sistem pada sistem yang berorde tinggi. Dengan kata lain, sistem mempunyai banyak akar dalam persamaan karakteristiknya sehingga relatif sulit untuk menentukan akar-akarnya. Kesulitan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan kriteria Routh-Hurwitz. Pada kriteria Routh-Hurwitz ini juga menggunakan

persamaan karakteristik sistem, yang selanjutnya digunakan metode Routh-Hurwitz untuk menentukan kestabilan sistem (Yudaningtyas, 2017).

Langkah pertama yang dilakukan untuk menentukan kestabilan sistem adalah dengan menggunakan kriteria Routh-Hurwitz adalah dengan menyesuaikan persamaan karakteristik sistem dengan bentuk umum persamaan karakteristik. Bentuk umum persamaan karakteristik sistem adalah:

$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n = 0 \quad (2.30)$$

Langkah kedua adalah melakukan tabulasi atau menyusun koefisien persamaan karakteristiknya menjadi 2 baris, yaitu pangkat tertinggi persamaan karakteristik s^n dan persamaan karakteristik s^{n-1} .

$$\begin{array}{cccccccc} s^n & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & . & . & . \\ s^{n-1} & a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & . & . & . \end{array} \quad (2.31)$$

Semua koefisien diasumsikan berharga real dan positif.

Selanjutnya, dilakukan penambahan tabulasi baris-baris koefisien sampai s^0 , seperti terlihat dalam tabulasi berikut:

$$\begin{array}{cccccccc} s^n & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & . & . & . \\ s^{n-1} & a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & . & . & . \\ s^{n-2} & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & . & . & . \\ s^{n-3} & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & . & . & . \\ s^{n-4} & d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ s^2 & e_1 & e_2 & . & . & . & . & . \\ s^1 & f_1 & . & . & . & . & . & . \\ s^0 & g_1 & . & . & . & . & . & . \end{array} \quad (2.32)$$

Koefisien – koefisien b_1, b_2, b_3 dihitung sebagai berikut:

$$b_1 = \frac{a_1a_2 - a_0a_3}{a_1} \quad (2.33)$$

$$b_2 = \frac{a_1a_4 - a_0a_5}{a_1} \quad (2.34)$$

$$b_3 = \frac{a_1a_6 - a_0a_7}{a_1} \quad (2.35)$$

.....

Perhitungan koefisien b dilanjutkan sampai semua harga b yang diperoleh kemudian sampai dengan nol. Pola yang sama dari perkalian silang koefisien - koefisien dua baris di atasnya digunakan dalam menghitung koefisien - koefisien c, d, e dan seterusnya.

$$c_1 = \frac{b_1 a_3 - a_1 b_2}{b_1} \tag{2.36}$$

$$c_2 = \frac{b_1 a_5 - a_1 b_3}{b_1} \tag{2.37}$$

$$c_3 = \frac{b_1 a_7 - a_1 b_4}{b_1} \tag{2.38}$$

.....

$$d_1 = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{c_1} \tag{2.39}$$

$$d_2 = \frac{c_1 b_3 - b_1 c_3}{c_1} \tag{2.40}$$

.....

Pada kriteria kestabilan dengan menggunakan Routh-Hurwitz, baris pertama tabulasi adalah s^n dan baris terakhirnya adalah s^0 . Jumlah baris adalah sebanyak $n + 1$ (dimana n adalah orde persamaan karakteristik). Kriteria untuk menentukan kestabilan menurut Routh-Hurwitz adalah sebagai berikut (Yudaningtyas, 2017):

BAB I Dengan memeriksa apakah semua bagian atau koefisien pada kolom pertama ($a_1, b_1, c_1, d_1, \dots$) mempunyai tanda yang sama. Karena diasumsikan berharga real dan positif, maka koefisien-koefisien tersebut semuanya harus berharga positif. Hal tersebut menunjukkan tidak ada akar pada bidang s sebelah kanan sehingga sistem merupakan sistem yang stabil.

BAB II Jika terdapat perubahan tanda sebanyak x, maka akan terdapat akar sebanyak x pada bidang s sebelah kanan, sehingga sistem merupakan sistem yang tidak stabil.

E. Kendali PID

PID merupakan teknik kontrol yang banyak digunakan dalam proses industri. Berdasarkan *survey*, dijumpai kenyataan bahwa 97% industri yang bergerak dalam bidang proses (seperti industri kimia, pulp, makanan, minyak dan

gas) menggunakan PID sebagai komponen utama dalam pengontrolannya (Jati, 2016). Terdapat beberapa pertimbangan mengapa kontrol PID banyak digunakan, diantaranya adalah kesederhanaan dan minim biaya. Dewasa ini PID sering dijumpai bukan hanya dalam bentuk modul kontrol sederhana seperti *temperature controller*, *pressure controller* dan sebagainya, tetapi sudah berkembang dalam bentuk modul yang lebih kompleks yang dapat berfungsi untuk mengontrol beberapa variabel sekaligus (*Distributed Control System*), bahkan dalam bentuk modul independen seperti sistem PLC.

Pengendali PID sebenarnya terdiri dari tiga jenis pengendali yang saling dikombinasikan yaitu pengendali P (*Proportional*), pengendali I (*Integral*), dan pengendali D (*Derivative*). Masing-masing memiliki parameter tertentu yang harus disetting untuk dapat beroperasi dengan baik yang disebut dengan konstanta (Gunadin, 2008).

1. Pengendali *Proportional*

Pengendali *Proportional* memiliki keluaran yang sebanding dengan besarnya sinyal kesalahan / *error*. Secara sederhana dapat dikatakan bahwa keluaran pengendali *Proportional* merupakan perkalian antara konstanta *proportional* (K_p) dengan sinyal masukannya. Perubahan pada sinyal masukannya menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya.

Secara eksperimen, penggunaan pengendali *Proportional* harus memperhatikan beberapa ketentuan. Jika nilai K_p kecil, pengendali *Proportional* hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat. Jika nilai K_p dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan mantapnya. Namun jika nilai K_p diperbesar hingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil atau respon sistem akan berosilasi.

2. Pengendali *Integral*

Pengendali *Integral* berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol. Jika sinyal kesalahan tidak mengalami

perubahan maka keluaran akan tetap seperti sebelum terjadi perubahan masukan

Secara eksperimen, penggunaan pengendali *Integral* memiliki beberapa karakteristik. Keluaran pengendali membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga cenderung memperlambat respon. Jika sinyal kesalahan nol maka keluaran pengendali akan bertahan pada nilai sebelumnya. Jika sinyal kesalahan tidak bernilai nol maka keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai konstanta *integral* (K_i). K_i yang bernilai besar akan mempercepat hilangnya *offset*, tetapi akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran pengendali.

3. Pengendali *Derivative*

Perubahan yang mendadak pada masukan dari pengendali *Derivative* akan mengakibatkan perubahan yang sangat cepat dan besar. Secara eksperimen, penggunaan pengendali *Derivative* memiliki beberapa karakteristik. Pengendali ini tidak akan menghasilkan keluaran apabila tidak ada perubahan pada masukannya (berupa sinyal kesalahan). Jika sinyal kesalahan berubah terhadap waktu maka keluaran yang dihasilkan pengendali tergantung pada nilai konstanta *derivative* (K_d) dan laju perubahan sinyal kesalahan. Pengendali *Derivative* mempunyai suatu karakter untuk mendahului, sehingga pengendali ini dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum kesalahan bertambah besar, sehingga dipakai untuk mempercepat respon awal suatu sistem, meskipun tidak memperkecil kesalahan pada keadaan tunaknya.

Dapat dikatakan bahwa masing-masing pengendali P, I, dan D memiliki kelebihan dan kekurangan. Sehingga jika digabungkan ketiganya secara paralel menjadi pengendali *Proportional plus Integral plus Derivative* atau biasa disebut pengendali PID maka akan saling menutupi. Elemen-elemen pengendali P, I, dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar (Gunadin, 2008). Tuning *kontroler* merupakan proses pemilihan parameter *kontroler* sehingga diperoleh performansi yang baik (Jati, 2016).