



TUGAS AKHIR - TM141585

PERANCANGAN SISTEM KONTROL PID UNTUK PENGENDALI SUMBU AZIMUTH TURRET PADA TURRET-GUN KALIBER 20MM

DANU WISNU WARDHANA
NRP. 2110100102

Dosen Pembimbing
Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D
Hendro Nurhadi, Dipl.Ing., Ph.D

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



TUGAS AKHIR - TM 141585

**PERANCANGAN SISTEM KONTROL PID UNTUK
PENGENDALI SUMBU AZIMUTH TURRET PADA
TURRET-GUN KALIBER 20MM**

**DANU WISNU WARDHANA
NRP 2110 100 102**

**Dosen Pembimbing
Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D.
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknik Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016**



FINAL PROJECT - TM 141585

DESIGNING OF PID CONTROL SYSTEM FOR TURRETS AZIMUTH AXIS CONTROL OF 20 MM TURRET-GUN

DANU WISNU WARDHANA
NRP 2110 100 102

Academic Supervisor
Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D.
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.

DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN SISTEM KONTROL PID UNTUK PENGENDALI SUMBU AZIMUTH TURRET PADA TURRET-GUN KALIBER 20MM

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Mesin Pada Bidang Studi Manufaktur
Program Studi S-1
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

DANU WISNU WARDHANA
NRP : 2110 100 102

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Arif Wahyudi, ST., MT., Ph.D
(NIP. 19730322 2001121001)
2. Hendro Nurhadi, Dipl.Ing., Ph.D
(NIP 19751120 2002121002)
3. Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng.,Ph.D
(NIP. 19691203 1994031001)
4. Dinny Harnany, ST, MSc
(NIP. 21002014 05001)



(Pembimbing 1)

(Pembimbing 2)

(Penguji 1)

(Penguji 2)

**PERANCANGAN SISTEM KONTROL PID UNTUK
PENGENDALI SUMBU AZIMUTH TURRET PADA
TURRET-GUN KALIBER 20MM**

Nama Mahasiswa : Danu Wisnu Wardhana
NRP : 2110 100 102
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Arif Wahyudi ST., MT., Ph.D
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D

Abstrak

Pertahanan negara merupakan segala bentuk daya dan upaya oleh warga negara yang tinggal di suatu negara, yang bertujuan untuk melindungi dan menjaga kedaulatan negara dari segala bentuk ancaman, baik dari luar maupun dari dalam. Salah satu faktor pendukung pertahanan negara dari bidang teknologi adalah sistem Turret-Gun. Dimensi Turret-Gun yang digunakan tergantung dari kebutuhan pemakaian. Semakin besar kaliber peluru, maka semakin besar dimensi dan berat Turret-Gun. Akibatnya akan semakin sulit dikendalikan. Untuk itu perancangan sistem kontrol khususnya kontrol PID yang sesuai diperlukan.

Langkah- langkah penelitian yang dilakukan adalah merancang sistem kontrol PID. Untuk merancang sistem kontrol diperlukan data rancangan transmisi yang akan digunakan. Setelah itu merancang sistem kontrol gerak sumbu azimuth. Selanjutnya diakhiri dengan pengujian kestabilan dari sistem tersebut.

Hasil yang didapatkan adalah nilai gain proportional (K_p) sebesar 925,47 dan gain derivatif (K_d) sebesar 173,83. Respons yang dihasilkan memiliki %Overshoot sebesar 19,9%, settling time selama 0,697 detik serta steady-state error sebesar 0.

Kata kunci: turret-gun, kontrol pid, sumbu azimuth, senjata, root-locus, ziegler-nichols

DESIGNING OF PID CONTROL SYSTEM FOR TURRETS AZIMUTH AXIS CONTROL OF 20 MM TURRET-GUN

Name : Danu Wisnu Wardhana
NRP : 2110 100 102
Departement : Mechanical Engineering
Advisor : Arif Wahyudi ST., MT., Ph.D
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D

Abstract

National defense is all forms of power and an attempt by the citizens who live in a country , which aims to protect and safeguard the sovereignty of the state of all forms of threats , both from outside and from within .

One way to support the national defense in terms of technology development is turret-gun system. Depending on the application needs, there are variations of turret-gun dimension. The larger the bullet caliber, it will have greater dimension and weight.

As a result, the turret-gun will be more difficult to control. For that purpose, it is required to design an appropriate PID control system.

The steps of the research is to design a PID control system. To design the control ssystem, it is required to have the data transmission design first. Then the azimuth axis motion control system is designed. Finally, the control system's stability is tested.

The results obtained are proportional gain value (K_p) of 925.47 and a derivative gain (K_d) of 173.83. The resulting response has value of 19.9 % overshoot, settling time for 0.697 seconds, and steady-state error of 0.

Keywords: turret-gun, pid controller, azimuth axis, gun, root-locus, ziegler-nichols

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah swt yang telah memberikan kekuatan dan limpahan rahmat –Nya bagi penulis sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Tugas akhir ini merupakan persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Atas bantuan berbagai pihak dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada :

- Kedua orang tua, Bapak Ir. Rahmat Basuki. dan Ibu Ir. Sri Enny Triwidiastuti, MT., serta kakak tercinta Sara Kusumawardhani, ST., atas segala dukungan dan motivasi yang telah diberikan.
- Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D. dan Hendro Nurhadi, Dipl.Ing., Ph.D, selaku dosen pembimbing dalam penulisan tugas akhir ini.
- Ir. Bambang Pramujati, Msc.Eng., Ph.D., dan Dinny Harnany, ST., MSc. selaku dosen penguji Tugas Akhir.
- Ir. Sudiyono Kromodihardjo, Msc., Ph.D, sebagai dosen wali selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Mesin ITS
- Mbak Siti Musonnifah bantuan dan ilmu yang diberikan selama penulisan akhir ini.
- PT. Pindad (Persero), khususnya bapak Rastra dan bapak Aldi, yang telah memfasilitasi penulis dalam melakukan studi lapangan.
- *Best partner* Dimas Kunto Ariwibowo dan rekan-rekan seperjuangan Tugas Akhir : Naufal, Pepeng, Chontry, Wardah.
- Kekasih tercinta Liana Puspita Cahyaningrum atas dukungan dan motivasi untuk penulis.
- Warga Lab. Perancangan dan Pengembangan Produk.

- Teman-teman SMRM khususnya angkatan M53.
- Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu dalam kesempatan ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, saran dan kritik terhadap penulis sangatlah diperlukan. Semoga Tugas Akhir ini dapat berguna bagi semua pihak yang membutuhkan.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Turret Gun.....	5
2.1.1 Model Turret Gun.....	6
2.2 Transmisi Turret.....	8
2.2.1 Roda gigi	8
2.2.2 Rasio Roda Gigi	9
2.3 Linearisasi	9
2.3.1 Linear dan Nonlinear.....	9
2.3.2 Linearisasi	10
2.4 Fungsi Transfer	11
2.5 State Space.....	12
2.6 Keterkontrolan dan Keteramatan	12
2.6.1 Keterkontrolan.....	13
2.6.2 Keteramatan	13
2.7 Respon Sistem.....	13
2.7.1 Transient Response (Respons Peralihan)	14

2.7.2	Karakteristik Respons Waktu (Time Response).....	15
2.7.3	Spesifikasi Respon Transien	15
2.7.4	Steady-state Error.....	17
2.8	PID (Proportional-Integral-Derivative) Controller	17
2.8.1	Kontrol Proporsional.....	19
2.8.2	Kontrol Integral.....	20
2.8.3	Kontrol Derivatif.....	21
2.9	Metode Tuning.....	22
2.9.1	Metode Root-Locus.....	22
2.9.2	Metode Ziegler-Nichols	23
2.10	Analisa Kestabilan	27
2.10.1	Kriteria Routh-Hurwitz	28
2.10.2	Metode Root Locus	29
BAB III	METODE PENELITIAN	33
3.1	Langkah-langkah Penelitian.....	33
3.1.1	Studi Literatur	33
3.1.2	Studi Lapangan.....	33
3.1.3	Perumusan Masalah.....	33
3.1.4	Pengambilan Data Transmisi Gerak Sumbu Azimuth	34
3.1.5	Penentuan Model.....	34
3.1.6	Perancangan Kontrol Sistem Gerak Sumbu Azimuth	34
3.1.7	Pengujian Kestabilan Sistem pada Gerak Sumbu Azimuth.....	34
3.1.8	Kesimpulan dan Saran.....	34
3.2	Diagram Alir Penelitian	35
3.3	Blok Diagram Sistem.....	37
BAB IV	SISTEM TRANSMISI DAN PEMODELAN TURRET-GUN	39
4.1	Model Sistem	39
4.1.1	Uji Keterkontrolan dan Keteramatan	41

4.1.2 Respon awal sistem	42
BAB V PERANCANGAN SISTEM KONTROL	47
5.1 Perancangan Sistem Kontrol	47
5.1.1 Kriteria perancangan	47
4.3 Metode Root Locus	47
4.4 Metode Ziegler-Nichols	54
4.5 Perbandingan antara Metode Root Locus dan Ziegler-Nichols	57
BAB VI ANALISA KESTABILAN DAN SIMULASI	59
6.1 Kriteria Routh-Hurwitz	59
6.2 Metode Root-Locus	61
BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN	63
7.1 Kesimpulan	63
7.2 Saran	63

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A CODING MATLAB

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem Turret dan Gun	6
Gambar 2.2	Roda gigi spur dan helikal	8
Gambar 2.3	Grafik linear dan non linear	10
Gambar 2.4	Blok Diagram	12
Gambar 2.5	Grafik sinyal <i>transient response</i>	14
Gambar 2.6	Kurva % overshoot versus damping ratio	16
Gambar 2.7	Blok diagram kontrol PID	18
Gambar 2.8	Blok diagram kontrol proporsional dalam domain $u(t)$ dan $U(s)$	20
Gambar 2.9	Blok diagram pengontrol integral	20
Gambar 2.10	Blok diagram pengontrol derivatif	22
Gambar 2.11	<i>Interest point</i> sebagai <i>pole</i> baru yang diinginkan	23
Gambar 2.12	Respons unit-step dari plant dan kurva respons bentuk S	24
Gambar 2.13	Sistem <i>closed-loop</i> dengan kontrol proporsional dari plant dan kurva respons bentuk sinusoidal	26
Gambar 2.14	Blok diagram metode <i>Routh-Hurwitz</i>	28
Gambar 2.15	Akar-akar bernilai negatif real	30
Gambar 2.16	Akar-akar bernilai imajiner	30
Gambar 2.17	Akar-akar bernilai negatif <i>real</i> dan imajiner	31
Gambar 2.18	Akar-akar bernilai negatif <i>real</i> kembar	31
Gambar 2.19	Akar-akar bernilai positif <i>real</i> kembar	32
Gambar 2.20	Akar-akar bernilai positif <i>real</i> imajiner	32
Gambar 4.1	Free Body Diagram Sistem Azimuth	39
Gambar 4.2	Hasil uji keterkontrolan dan keterampilan	44
Gambar 4.3	Blok diagram program simulink	45
Gambar 4.4	Respons awal dengan <i>input</i> 20 derajat	45
Gambar 5.1	<i>Feedback control system</i> untuk sumbu azimuth turret	48
Gambar 5.2	Root locus untuk sistem sumbu azimuth turret	49
Gambar 5.3	Respon sistem saat step input = 1 derajat	50
Gambar 5.4	Geometri perhitungan PD <i>compensator zero</i>	51

Gambar 5.5	<i>Blok diagram untuk PD compensated system azimuth turret-gun</i>	52
Gambar 5.6	Sketsa root locus untuk PD compensated system azimuth turret-gun	52
Gambar 5.7	Grafik respon metode root locus	53
Gambar 5.8	Grafik respons optimal	54
Gambar 5.9	Penentuan <i>Delay Time</i> dan <i>Time Constant</i>	55
Gambar 5.10	Blok diagram sistem dengan kontrol PID metode 1 Ziegler-Nichols	56
Gambar 5.11	Step respons sistem dengan tuning PID Ziegler-Nichols	56
Gambar 5.12	Grafik respons metode Ziegler-Nichols	57
Gambar 5.13	Grafik respons metode Root-Locus.....	58
Gambar 6.1	Sistem gerak sumbu azimuth turret tanpa feedback.....	59
Gambar 6.2	Blok diagram sederhana sistem azimuth dengan PD compensator.....	59
Gambar 6.3	Hasil uji kriteria Routh-Hurwitz pada sistem dengan feedback	60
Gambar 6.4	Tabel <i>Routh-Hurwitz</i> untuk kontrol PID metode tuning Ziegler-Nichols.....	60
Gambar 6.5	Sketsa root locus untuk metode tuning root locus	61
Gambar 6.6	Sketsa root locus untuk metode tuning Ziegler-Nichols.....	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	<i>Karakteristik</i> gain dari pengontrol Proportional, Integral, dan Derivative serta pengaruhnya terhadap sistem	19
Tabel 2.2	Aturan <i>Tuning</i> Ziegler-Nichols berdasarkan <i>Delay Time</i> dan <i>Time Constant</i>	25
Tabel 2.3	Aturan tuning Ziegler-Nichols berdasarkan <i>Gain</i> dan Periode kritikal.....	26
Tabel 2.4	Routh Table	28
Tabel 2.5	Metode perhitungan <i>Routh Table</i>	29
Tabel 5.1	Respon Sistem Azimuth Turret-Gun Metode Root-Locus.....	53
Tabel 5.2	Respon Sistem Azimuth Turret-Gun metode Ziegler-Nichols.....	57

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertahanan negara pada dasarnya merupakan segala bentuk daya dan upaya oleh seluruh warga negara yang tinggal di negara tersebut, yang bertujuan untuk melindungi dan menjaga kedaulatan negara dari segala bentuk ancaman yang datang baik dari luar maupun dari dalam. Setiap warga negara Indonesia berhak dan wajib untuk ikut serta dalam usaha bela negara, seperti yang tercantum di dalam Undang-Undang Dasar 1945 pasal 30 ayat 1. Sementara itu komponen utama usaha pertahanan dan keamanan negara diatur dalam pasal 30 ayat 2, dimana TNI dan Polri sebagai kekuatan utama, serta rakyat Indonesia sebagai kekuatan pendukung.

Salah satu faktor pendukung usaha pertahanan negara adalah dari segi sarana dan prasarana, seperti teknologi persenjataan maupun kualitas SDM yang mumpuni. Salah satu teknologi persenjataan yang ada yaitu *Turret-Gun*. *Turret-Gun* adalah sistem senapan yang dapat bergerak untuk menembak target dengan pergerakan arah dan sudut yang mengikuti pergerakan target. *Turret-Gun* otomatis karena dikendalikan dari jarak jauh menggunakan *remote control*, sehingga operator dapat mengoperasikan dengan aman.

Besar kecilnya *Turret-Gun* yang digunakan tergantung pada kebutuhan pemakaian. Semakin besar kaliber peluru, maka semakin besar pula ukuran target yang dapat ditembak. Namun akibatnya, dimensi dan berat *Turret-Gun* akan lebih besar. Hal ini menyebabkan *Turret-Gun* menjadi sulit dikendalikan dan juga lebih lambat dalam bergerak karena inersia yang bekerja di dalam sistem *Turret-Gun* itu sendiri. Oleh karena itu, metode pengendali yang baik dibutuhkan untuk mengatasi hal tersebut.

Salah satu metode pengendalian yang telah digunakan adalah pengendali PID. Pengendali ini umum digunakan di dalam dunia industri karena sudah diperkenalkan terlebih dahulu. Penelitian

terdahulu membandingkan PID dengan metode *Acceleration Force Control* (AFC) dan *Resolve Motion Control* (RAC) (Nasyir dkk, 2014). Kemudian selanjutnya dikembangkan dengan menggabungkan RAC dengan AFC yang menggunakan PID. Akan tetapi, penelitian tersebut digunakan pada *Remote Control Weapon System* (RCWS) kaliber 12,7 mm, sehingga pada penelitian kali ini akan diterapkan pada kaliber 20 milimeter dengan sumbu Azimuth.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana penerapan dan analisa hasil simulasi metode kontrol PID pada *Turret* kaliber 20 milimeter sumbu Azimuth.

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

- a. Simulasi menggunakan software Matlab dan Simulink.
- b. Skenario penembakan dilakukan pada kondisi *Turret* terpasang pada kendaraan yang tetap (posisi diam).
- c. Pengendalian pergerakan *Turret* sumbu Azimuth dibatasi pada kontrol *input* voltase pada motor, untuk mendapatkan nilai posisi angular dari bagian turret.
- d. Target tembak terletak pada jarak 2,5 kilometer di daratan.
- e. Linearisasi sistem dilakukan pada kondisi *gun* yang setimbang dan diam pada sudut $(\theta_2) = 0^\circ$.
- f. Motor penggerak merupakan servomotor DC merk ESA 2L1 dan transmisi yang digunakan dianggap sebagai *lossless gear*.
- g. Kriteria perancangan adalah *%Overshoot* dibawah 20%, dan *settling time* 2 detik, dengan prioritas utama adalah *settling time*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah menerapkan dan menganalisa hasil simulasi metode kontrol PID pada *Turret* kaliber 20 milimeter sumbu Azimuth.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain:

- a. Diperoleh pengetahuan mengenai system kendali PID pada *Turret-Gun* otomatis kaliber 20 mm sumbu Azimuth.
- b. Dapat dijadikan bahan rujukan dalam penentuan kebijakan pada pengendalian *Turret-Gun* otomatis kaliber 20 mm maupun di atasnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Turret-gun

Turret-gun merupakan dudukan senjata yang dapat membuat senjata diarahkan ke target dengan bebas sekaligus melindungi mekanisme senjata dan kru secara bersamaan. *Turret* termasuk dudukan yang berotasi. Dudukan ini dapat ditempatkan di atas gedung maupun kendaraan bergerak, seperti pesawat ataupun kendaraan militer.

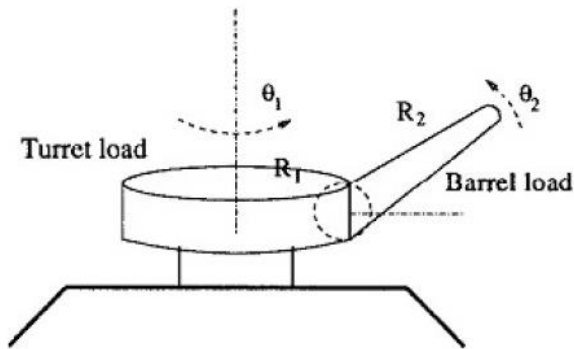
Pada umumnya pergerakan *Turret-Gun* terdiri dari gerak rotasi dengan sumbu elevasi untuk menaikkan dan menurunkan senjata dengan sudut tertentu, dan sumbu azimuth untuk memutar senjata. Gerak rotasi terhadap sumbu elevasi dan azimuth pada *turret-gun* terdiri atas komponen kinematika dan dinamika.

Kinematika pada *turret-gun* merupakan pergerakan (lintasan) posisi sistem mekanik yang berbasis transformasi koordinat tanpa memperhitungkan massa atau gaya-gaya yang bekerja pada sistem mekanik. Sedangkan komponen dinamika pada *turret-gun* terdiri atas komponen massa dan gaya yang mempengaruhi *turret-gun*. Kenaikan massa sistem sebanding dengan kenaikan torsi dan inersia. Semakin besar massa sistem, maka torsi dan inersia sistem semakin besar. Inersia tersebut merupakan faktor penting dalam pengendalian *Turret-Gun* agar mampu mencapai posisi yang diinginkan dengan cepat. Selain itu pengaruh gaya gravitasi terhadap massa turut mempengaruhi torsi keseluruhan dari *turret-gun*, khususnya terhadap gerak elevasi senjata.

Beberapa penelitian mengenai kontrol *Turret-Gun* telah dilakukan. Salah satunya menggunakan solusi iterasi berdasarkan metode trapezoidal dan Newton untuk mengkompensasi faktor Backlash (Ling, 1999). *Backlash* mengakibatkan kinerja yang buruk pada sistem. Selanjutnya penelitian dikembangkan pada kendali robot yang memiliki karakter sistem yang mirip dengan kendali *Turret-Gun*. Beberapa metode seperti Resolve Motion Rate

Control (RMRC) yang mengendalikan posisi, kecepatan dan percepatan robot (Fu dkk, 1987). Berikutnya RMRC dikembangkan dengan parameter gaya menjadi Active Force Control (AFC) (Johnson, 1971). Penelitian lain menggunakan metode AFC dan Resolve Acceleration Control (RAC) dan membandingkannya dengan metode kontrol PD pada sistem Remote Controlled Weapon System (RCWS) kaliber 12,7 mm [5].

2.1.1 Model Turret-Gun



Gambar 2.1 Sistem *Turret* dan *Gun*. [6][8]

Gambar 2.1 mengilustrasikan sistem *Turret* dan *Gun*. *Turret* adalah komponen yang memiliki pergerakan sumbu azimuth memutar sebesar 360° , sedangkan *Gun* adalah komponen yang memiliki pergerakan sumbu elevasi memutar sebesar 70° . Kedua komponen tersebut memiliki parameter yang sama, yaitu radius, massa dan posisi angular. Persamaan gerak dinamikanya adalah sebagai berikut [6][8]:

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \quad (2.1)$$

Dengan:

τ = Torsi sistem

$D(\theta)$ = Matriks Inersia

$C(\theta, \dot{\theta})$ = Vektor gaya koriolis dan sentrifugal

$G(\theta)$ = Gaya gravitasi

Keterangan untuk parameter $D(\theta)$, $C(\theta, \dot{\theta})$, dan $G(\theta)$ adalah sebagai berikut:

$$D(\theta) = \begin{pmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{pmatrix}, C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{21} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Dimana:

$$G(\theta) = (0, \frac{1}{2}m_2gR_2 \cos(\theta_2))^T \quad (2.3)$$

$$D_{11} = \frac{1}{2}m_1R_1^2 + m_2R_1^2 + m_2R_1R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3}m_2R_2^2 \cos^2(\theta_2) \quad (2.4)$$

$$D_{22} = \frac{1}{3}m_2R_2^2 \quad (2.5)$$

$$C_{11} = (-m_2R_1R_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_1 + (-\frac{1}{3}m_2R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_1) \dot{\theta}_2 \quad (2.6)$$

$$C_{21} = (\frac{1}{2}m_2R_1R_2 \sin(\theta_2) + \frac{1}{6}m_2R_2^2 \sin(\theta_2)) \dot{\theta}_1^2 \quad (2.7)$$

Dengan:

Θ_1 = Sudut Azimuth

Θ_2 = Sudut Elevasi

m_1 = Massa *Turret*

m_2 = Massa *Gun*

R_1 = Jari-jari *Turret*

R_2 = Jari-jari *Gun*

G = Gaya gravitasi yang dialami sistem

Sistem dinamik tersebut diturunkan dari persamaan Euler-Lagrange dengan L merupakan energi kinetik total pada sistem dikurangi dengan energi potensial total yang terdapat pada sistem *turret-gun*, dituliskan sebagai:

$$L = EK_{tot} - EP_{tot} \quad (2.8)$$

Turret dianggap berupa silinder kaku dan pejal, yang memiliki sumbu putar pada pusat lingkaran, dan *gun* dianggap sebagai silinder *rigid* dan pejal yang diputar di ujung silinder sebagai sumbu putarnya. Sistem dinamik tersebut merupakan jumlah dari torsi yang terdapat pada sistem *turret-gun*. Persamaan tersebut kemudian menjadi:

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{\tau_1 - C_{11}\dot{\theta}_1 - C_{12}\dot{\theta}_2}{D_{11}} \quad (2.9)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{\tau_2 - C_{21}\dot{\theta}_1 - G}{D_{22}} \quad (2.10)$$

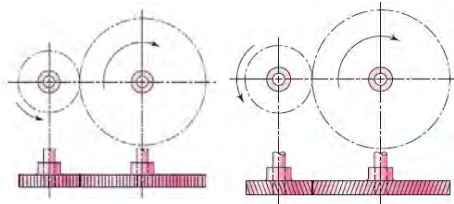
Persamaan (2.9) dan (2.10) menunjukkan bahwa perubahan kecepatan pada *turret* berbanding lurus dengan torsi yang dialami pada *turret* dikurangi dengan efek gaya koriolis, dan sentripetal pada *turret* yang telah dibagi inersia *turret*. Hal yang sama juga berlaku pada komponen *gun*, namun komponen *gun* juga dipengaruhi oleh gaya gravitasi, sehingga perubahan kecepatan pada *gun* berbanding lurus dengan torsi yang dialami pada *gun* dikurangi dengan efek gaya koriolis dan sentrifugal, serta gaya gravitasi yang terdapat pada *gun* dan dibagi dengan properti inersia dari komponen *gun*.

2.2. Transmisi Turret

Pergerakan *turret* pada sumbu azimuth dikendalikan dengan cara mengatur putaran motor. Putaran tersebut menghasilkan torsi yang disalurkan oleh transmisi girboks untuk memutar *turret* sesuai posisi yang diinginkan. Transmisi *turret* menggunakan roda gigi sebagai penyalur daya dari motor menuju *turret*.

2.2.1. Roda gigi

Roda gigi merupakan komponen yang sering digunakan dalam berbagai macam mesin. Fungsi utama roda gigi adalah untuk meyalurkan daya dari poros satu ke poros lainnya. Beberapa bentuk roda gigi antara lain spur, helikal, roda gigi cacing dan *bevel*[3].



Gambar 2.2 a. Roda gigi spur; b. Roda gigi helikal. [3]

Gambar 2.2 merupakan contoh roda gigi spur dan helikal yang umum digunakan pada transmisi roda gigi. Roda gigi spur digunakan untuk menyalurkan daya antar poros-poros yang saling paralel. Bentuk roda gigi spur adalah yang paling sederhana diantara bentuk roda gigi lainnya. Sementara itu roda gigi helikal digunakan untuk menyalurkan daya antar poros-poros yang saling paralel maupun tidak paralel. Kelebihan utama dari roda gigi helikal adalah suara yang ditimbulkan lebih sedikit, sehingga cocok untuk aplikasi transmisi yang membutuhkan tingkat kebisingan yang rendah.

2.2.2. Rasio roda gigi

Dalam perancangan transmisi yang menggunakan roda gigi, salah satu faktor utama dalam kriteria perancangan adalah rasio roda gigi. Rasio ini merupakan perbandingan antara diameter roda gigi pinion dengan gear. Rasio ini juga turut mempengaruhi besar torsi dan kecepatan putaran yang bekerja pada suatu roda gigi. Semakin besar rasio roda gigi, maka perubahan torsi dan kecepatan putar pada masing-masing roda gigi juga semakin besar. Rasio roda gigi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$r_v = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{N_{t1}}{N_{t2}} = \frac{d_1}{d_2} \quad (2.11)$$

Dengan:

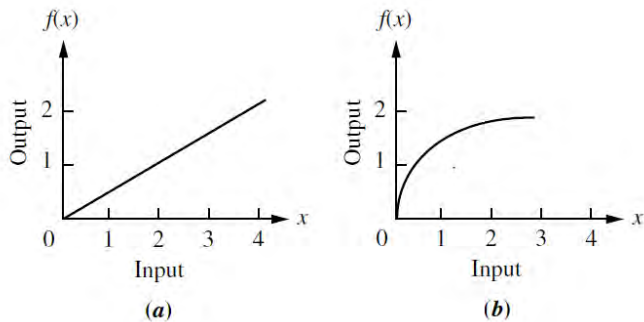
R_v	= Rasio kecepatan
ω	= kecepatan angular, rad/s
n	= kecepatan angular, rpm
N_t	= jumlah gigi
d	= diameter pitch circle, mm

2.3. Linearisasi

2.3.1. Linear dan nonlinear

Suatu sistem dapat dikatakan linear apabila memiliki sifat *superposition* dan *homogeneity* [2]. Sifat *superposition* menjelaskan bahwa respons *output* keseluruhan dari sistem terhadap jumlah nilai *input* merupakan jumlah dari setiap respons *output* terhadap setiap *input* individu. Sebagai contoh, apabila

input $R_1(t)$ menghasilkan *output* $C_1(t)$ dan $R_2(t)$ menghasilkan $C_2(t)$, maka *input* $R_1(t) + R_2(t)$ menghasilkan $C_1(t) + C_2(t)$. Sifat *homogeneity* menjelaskan respons sistem terhadap perkalian skalar dari *input*. Artinya, setiap perkalian skalar dari *input* akan menghasilkan nilai respons yang dikalikan dengan perkalian skalar yang sama. Contohnya apabila *input* $R_1(t)$ menghasilkan $C_1(t)$, maka $AR_1(t)$ menghasilkan $AC_1(t)$.



Gambar 2.3 **a.** grafik linear; **b.** grafik nonlinear [2]

Gambar 2.3 menunjukkan grafik persamaan linear dan nonlinear. Grafik linear membentuk *trendline* berupa garis lurus pada setiap nilai *input* dan nilai *output* yang dihasilkan. Sementara itu grafik nonlinear tidak membentuk *trendline* yang sama karena perbedaan nilai *input* akan menghasilkan *output* yang berbeda pula.

2.3.2. Linearisasi

Pada dasarnya sistem gerak *turret* merupakan sistem yang linear, karena digerakkan oleh motor DC. Namun dalam model matematis, parameter *gun* ikut mempengaruhi gerak *turret*. Akibatnya sistem gerak tersebut menjadi nonlinear, sehingga diperlukan linearisasi pada model tersebut sebelum fungsi transfernya dapat ditentukan.

Tahap pertama adalah mengidentifikasi komponen nonlinear dan menuliskan persamaan differensial nonlinearnya. Selanjutnya persamaan tersebut dilinearisasi pada kondisi

kesetimbangan saat sinyal *input* adalah nol. Persamaan Taylor [2] dapat digunakan untuk melinearisasikan persamaan nonlinear:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{df}{dx} \Big|_{x=x_0} \frac{(x-x_0)}{1!} + \frac{d^2f}{dx^2} \Big|_{x=x_0} \frac{(x-x_0)^2}{2!} + \dots \quad (2.12)$$

x merupakan nilai *input* yang dicari dan x_0 adalah nilai *input* saat waktunya nol.

2.4. Fungsi Transfer

Sebuah sistem dalam bentuk persamaan diferensial sulit dimodelkan ke dalam blok diagram. Karena itu sistem ini harus ditransformasikan kedalam bentuk Laplace, sehingga *input*, *output* dan sistem dapat dimodelkan secara terpisah. Transformasi laplace dapat didefinisikan sebagai:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_{0-}^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2.13)$$

Selanjutnya untuk mencari nilai $f(t)$ jika diketahui nilai $F(s)$ dari suatu sistem, dapat menggunakan invers transformasi laplace, menjadi:

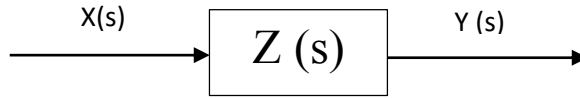
$$\mathcal{L}^{-1}[F(s)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s)e^{st} ds = f(t)u(t) \quad (2.14)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} u(t) &= 1 & t > 0 \\ u(t) &= 0 & t < 0 \end{aligned}$$

Fungsi transfer dari suatu sistem dapat ditentukan setelah persamaan sistem dalam bentuk $f(t)$ diubah dengan transformasi laplace menjadi bentuk $F(S)$. Fungsi transfer linier dengan parameter konstan didefinisikan sebagai perbandingan antara Transformasi laplace *output* (fungsi respons) terhadap transformasi laplace *input* (fungsi *input*) dengan asumsi bahwa seluruh kondisi awal adalah nol [1]. Fungsi transfer ini dapat mengekspresikan relasi *output* dan *input* suatu sistem tetapi tidak dapat memberikan informasi mengenai struktur fisik dari sistem itu sendiri.

Misalkan $X(s)$ adalah transformasi laplace *input*, dan $Y(s)$ adalah transformasi laplace *output*, maka fungsi transfer $Z(s)$ dapat dinyatakan sebagai $Z(s) = \frac{X(s)}{Y(s)}$, dengan blok diagram ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Blok Diagram

2.5. State Space

Suatu sistem kendali yang memiliki banyak *input* dan *output*, dapat dimodelkan dengan menggunakan *state-space*. Persamaan *state-space* memiliki parameter berupa *input*, *output*, dan *state*, serta dirumuskan sebagai berikut [2]:

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \quad (2.15)$$

$$y = \mathbf{C}x + \mathbf{D}u \quad (2.16)$$

Dengan:

- x = vektor keadaan (*state*)
- \dot{x} = penurunan derivatif dari vektor keadaan terhadap waktu t
- y = vektor *output* (*output*)
- \mathbf{A} = matriks sistem
- \mathbf{B} = matriks *input*
- \mathbf{C} = matriks *output*
- \mathbf{D} = matriks *feedforward*

2.6. Keterkontrolan dan Keteramatan

Suatu sistem dapat dikendalikan apabila rank matriks dimensi sistem tersebut memenuhi 2 syarat berikut; keterkontrolan dan keteramatan. Rank matriks menunjukkan jumlah basis matriks yang independen satu sama lain [6]. Rank matriks ditinjau dari basis kolom dan baris. Semakin besar jumlah rank, maka semakin banyak basis matriks yang independen. Rank matriks dapat bernilai nol apabila determinannya adalah nol, artinya seluruh basis matriks baik kolom maupun baris memiliki ketergantungan satu sama lain.

2.6.1. Keterkontrolan

Jika *input* u pada sistem dapat membawa setiap keadaan sistem x dari keadaan awal $x_0(t)$ ke keadaan yang diinginkan $x(t)$, maka sistem tersebut dapat dikontrol [2]. Syarat keterkontrolan adalah apabila rank n dari orde sistem adalah sama dengan rank dari matriks keterkontrolan, yang merupakan:

$$C_M = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] \quad (2.17)$$

2.6.2. Keteramatan

Jika vektor keadaan awal dari sistem $x_0(t)$ dapat ditemukan dari $u(t)$ dan $y(t)$ yang diukur pada interval waktu dari t_0 hingga t , maka sistem tersebut dapat diamati. Syarat keteramatan adalah apabila rank n dari orde sistem adalah sama dengan rank dari matriks keteramatan, yaitu:

$$O_M = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.7. Respon Sistem

Respons atau tanggapan sistem merupakan perubahan perilaku *output* akibat perubahan dari sinyal *input*. Respons sistem membentuk kurva dan dapat dijadikan dasar untuk menganalisa karakteristik dari sistem tersebut. Kurva dari sistem dapat terbentuk setelah sistem diberikan sinyal *input*. Sinyal *input* yang diberikan untuk mengetahui karakter sistem disebut *signal test*. Ada 4 macam *signal test* yang umum digunakan, yaitu:

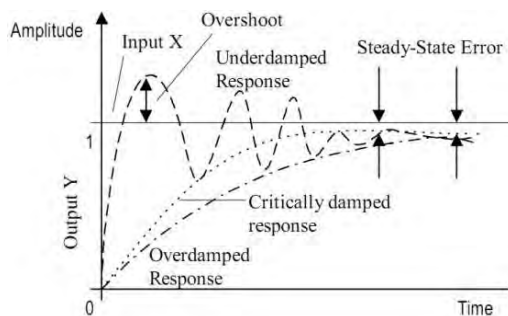
- *Impulse*. Merupakan sinyal yang bernilai tak terbatas saat $t = 0$, dan nol saat t bernilai lain. Digunakan untuk memodelkan respons transien.
- *Step*. Menggambarkan perintah konstan, seperti posisi, kecepatan atau percepatan. Umumnya *input* perintah *step* memiliki bentuk yang sama dengan *output*. Digunakan untuk memodelkan *transient* dan *steady-state response*.

- *Ramp*. Menggambarkan peningkatan perintah secara linear. Respons *output* dari *input* sinyal *ramp* memberikan tambahan informasi mengenai *steady-state error*.
- Sinusoidal. Merupakan sinyal *input* dengan bentuk sinusoidal. Umum digunakan untuk memodelkan respons transien serta *steady-state error*.

2.7.1. Transient Respons (Respons Peralihan)

Berdasarkan karakteristik damping, bentuk sinyal transient respond dapat dibagi menjadi tiga, yaitu:

- *Underdamped response*, dimana respon *output* membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai keadaan *steady-state*, karena banyaknya osilasi yang dibentuk oleh respon *output*. Besar *damping ratio* selalu < 1 .
- *Overdamped response*, dimana respon *output* tidak mengalami osilasi, namun membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai keadaan *steady-state*. Besar *damping ratio* selalu > 1 .
- *Critically damped response*, yaitu kondisi ideal dari respon *output* dimana tidak terjadi osilasi dan respon mampu mencapai kondisi *steady-state* dengan waktu yang lebih cepat. Besar *damping ratio* adalah $= 1$.



Gambar 2.5 Grafik sinyal *transient response*. [2]

2.7.2. Karakteristik respon waktu (*Time response*)

Karakteristik respon waktu merupakan karakteristik respon dimana spesifikasi performansinya berdasarkan pada pengamatan bentuk respon *output* sistem terhadap perubahan waktu. Ada dua tahapan pengamatan, yaitu:

- Spesifikasi respon *transient*

Merupakan pengamatan spesifikasi respon sistem pada saat terjadi perubahan sinyal *input* maupun gangguan hingga respon memasuki keadaan *steady-state*. Parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas respon transient ini antara lain *rise time*, *peak time*, *settling time* dan *%Overshoot*.

- Spesifikasi respon *steady-state*

Merupakan pengamatan spesifikasi respon sistem pada saat respon memasuki keadaan *steady-state* hingga waktu tak terbatas $t = \infty$. Parameter untuk mengukur kualitas respon *steady-state* ini adalah *% steady-state error*.

2.7.3. Spesifikasi respon transient

Parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas respon *transient* pada sistem orde dua antara lain:

- *Natural Frequency*

Natural frequency (ω_n) merupakan frekuensi osilasi dari suatu sistem tanpa peredam. Besar frekuensi natural dari suatu sistem orde dua dapat diketahui dari fungsi transfer sistem tersebut.

$$\text{Transfer Function} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.19)$$

- *%Overshoot dan Damping ratio*

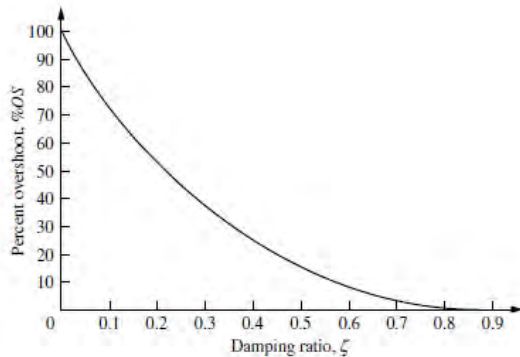
Percent Overshoot yaitu persentase dari kurva respons *output* yang melewati nilai *steady-state* pada waktu kurva respon mencapai puncak, terhadap nilai *steady-state*. Persentase *overshoot* merupakan fungsi dari besar *damping ratio* pada sistem.

$$\%OS = e^{-\left(\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} \times 100\% \quad (2.20)$$

Parameter ζ adalah *damping ratio*. Nilai ζ dapat dicari apabila diketahui %*Overshoot* dengan menggunakan invers dari persamaan (2.20) menjadi:

$$\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{\%OS}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{\%OS}{100}\right)}} \quad (2.21)$$

Gambar 2.6 menunjukkan pengaruh persentase *Overshoot* terhadap *damping ratio* dari sistem. Semakin tinggi persentase *Overshoot*, maka semakin rendah nilai *damping ratio*. Sebaliknya semakin besar nilai *damping ratio*, maka persentase *Overshoot* juga semakin kecil.



Gambar 2.6 Kurva % *Overshoot* versus *damping ratio*. [2]

- *Rise time* (T_r)

Yaitu waktu yang dibutuhkan respon untuk menuju ke 90% nilai akhir dari 10% nilai akhir respon.

- *Settling time* (T_s)

Yaitu waktu yang dibutuhkan oleh respon untuk mencapai dan mempertahankan untuk tetap pada nilai 98% dari nilai *steady-state*.

$$Settling Time T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (2.22)$$

- *Peak time (T_p)*

Yaitu waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai puncak pertama atau maksimum. Faktor frekuensi natural respons ω_n berperan dalam menentukan lamanya *peak time*.

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.23)$$

2.7.4. *Steady-state error*

Steady-state error dapat diartikan sebagai perbedaan antara *input* dengan *output* saat diberikan tes *input* sampai $t = \infty$. Tes *input* yang diberikan dapat berupa *step*, *ramp* maupun parabola. *Steady-state error* dalam *domain* waktu t dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2.24)$$

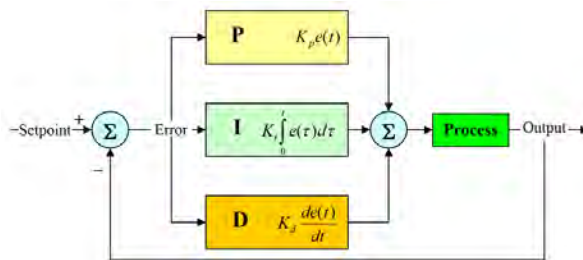
Dengan:

- $e(t)$ = fungsi *error*, berubah terhadap waktu
- $r(t)$ = fungsi *input*
- $c(t)$ = fungsi *output*, berubah terhadap waktu
- t = waktu

Steady-state error terjadi pada saat kondisi tunak (*steady-state*), artinya *error* tersebut terjadi pada waktu yang menuju tak hingga dan dalam keadaan nilai *output* sudah tidak berubah terhadap waktu.

2.8. PID (Proportional-Integral-Derivatif) Controller

Di dalam dunia industri maupun militer, peran sistem kontrol sangat berpengaruh ke dalam kinerja suatu sistem. Sistem kontrol yang umum digunakan adalah sistem kontrol Proportional, Integral, dan Derivatif. Sistem kontrol ini dapat berjalan secara bersamaan maupun berjalan terpisah. Masing-masing sistem kontrol ini memiliki keunggulan tertentu, dimana, kontrol proporsional unggul dalam *rise time* yang cepat, kontrol integral unggul dalam memperkecil kesalahan (*error*), serta kontrol derivatif mempunyai keunggulan untuk memperkecil *error* atau mengurangi *overshoot/undershoot*.



Gambar 2.7 Blok diagram kontrol PID. [2]

Gambar 2.7 merupakan blok diagram kontrol PID yang umum digunakan di industri. Kontrol Proporsional (P), Integral (I), dan Derivatif (D) dapat digunakan bersamaan secara paralel ataupun digunakan terpisah dengan tidak menggunakan salah satu komponen P, I atau D. Parameter pengontrol Proporsional Integral Derivatif (PID) selalu berdasarkan tinjauan terhadap karakteristik dari sistem yang diatur (*plant*). Dengan demikian, parameter PID dapat dicari setelah perilaku *plant* diketahui, serumit apapun *plant* tersebut.

Persamaan matematis dari kontrol PID adalah sebagai berikut, dimana $u(t)$ merupakan nilai *output*:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.25)$$

Dengan:

- K_p : Proportional *Gain*
- K_i : Integral *Gain*
- K_d : Derivatif *Gain*
- e : *error* (Setpoint – Parameter Value)
- t : waktu (second)
- τ : variabel dari integrasi ; dengan nilai antara 0 hingga kondisi sekarang τ

Karakteristik pengontrol PID sangat dipengaruhi oleh besar dari ketiga parameter P, I, dan D. Efek dari setiap pengontrol proporsional, integral dan derivatif pada sistem lup tertutup disimpulkan dalam tabel berikut:

Tabel 2.1 Karakteristik *gain* dari pengontrol Proportional, Integral dan Derivatif dan pengaruhnya terhadap sistem [1].

<i>Closed-Loop Response</i>	<i>Rise time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Settling time</i>	<i>SS Error</i>
Kp	<i>Decrease</i>	<i>Increase</i>	<i>Small Change</i>	<i>Decrease</i>
Ki	<i>Decrease</i>	<i>Increase</i>	<i>Increase</i>	<i>Eliminate</i>
Kd	<i>Small Change</i>	<i>Decrease</i>	<i>Decrease</i>	<i>Small Change</i>

2.8.1. Kontrol Proporsional

Kontrol proporsional memiliki *output* yang sebanding atau proporsional dengan besar sinyal kesalahan (selisih antara nilai yang diinginkan dengan nilai aktualnya). Setiap perubahan pada sinyal *input* menyebabkan sistem langsung mengeluarkan sinyal keluar sebesar konstanta pengalinya. Persamaan matematisnya sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.26)$$

K_p menunjukkan konstanta proporsional dan e menunjukkan besaran *error* pada saat nilai t tertentu.

Gambar 2.8 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara besaran kesalahan dengan besaran keluar pengontrol proporsional, dimana besaran kesalahan (*error*) merupakan selisih antara besaran setting dengan besaran aktualnya. Selisih ini mempengaruhi pengontrol K_p , untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat tercapainya harga setting) atau negatif (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan).



Gambar 2.8 Blok diagram kontrol proporsional dalam *domain* $u(t)$ dan $U(s)$. [2]

Penerapan pengontrol proporsional pada suatu sistem harus memperhatikan karakteristik dari kontrol tersebut. Hasil yang diperoleh dari eksperimen menunjukkan bahwa jika nilai K_p kecil, maka pengontrol proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, akibatnya respon dari sistem akan menjadi lambat. Apabila nilai K_p dinaikan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai setpoint dan keadaan stabil. Namun, jika nilai K_p terlalu besar, akan berdampak pada kinerja sistem yang tidak stabil, dengan respon sistem yang berosilasi.

2.8.2. Kontrol Integral

Pengontrol integral berfungsi untuk menghilangkan *steady-state error* menjadi nol. Jika sebuah *plant* tidak mempunyai unsur integrator ($1/s$), pengontrol proporsional tidak mampu menjamin *output* sistem akan tepat sesuai respon yang diinginkan, sehingga dibutuhkan pengontrol integral.

Pengontrol integral memiliki karakteristik layaknya integral. Nilai *output* sangat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai dari sinyal kesalahan. Jika sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, *output* akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan *input*.



Gambar 2.9 Blok diagram pengontrol Integral. [2]

Gambar 2.9 merupakan blok diagram dari pengontrol integral dalam *domain* waktu (t) dan *domain* Laplace (s). Besar nilai dari *output* u (t) berubah dengan laju proporsional terhadap sinyal kesalahan, dengan perumusan:

$$u(t) = K_I \int_0^t e(t) dt \quad (2.27)$$

Dengan K_I adalah konstanta yang dapat disesuaikan. Fungsi transfer dari pengontrol integral yaitu:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} \quad (2.28)$$

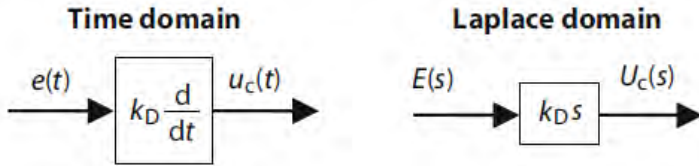
Pengontrol integral memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut. Pertama, *output* pengontrol membutuhkan jeda waktu tertentu, yang berakibat pada melambatnya respon *output*. Kedua, ketika sinyal kesalahan bernilai nol, *output* pengontrol akan tetap pada nilai sebelumnya. Jika sinyal kesalahan tidak bernilai nol, *output* akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai konstanta K_I . Ketiga, konstanta K_I yang bernilai besar akan mempercepat hilangnya offset, namun semakin besar nilai K_I , akan berakibat pada peningkatan osilasi dari sinyal *output* kontrol.

2.8.3. Kontrol Derivatif

Besar *output* dari pengontrol derivatif memiliki sifat seperti operasi diferensial pada umumnya. Pengontrol derivatif menggunakan kecepatan perubahan sinyal kesalahan sebagai parameter pengontrol. Perumusan matematis kontrol derivatif adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.29)$$

Dengan K_D merupakan konstanta derivatif, dan e (t) merupakan besaran diferensial *error* terhadap waktu respons. Gambar 2.10 menunjukkan blok diagram dari kontrol derivatif.



Gambar 2.10 Blok diagram pengontrol Derivatif. [2]

Karakteristik dari pengontrol derivatif antara lain, tidak dapat menghasilkan *output* apabila tidak ada perubahan berupa sinyal kesalahan pada *input*. Jika sinyal kesalahan merupakan fungsi waktu, maka *output* yang dihasilkan pengontrol bergantung pada nilai T_d dan laju perubahan sinyal kesalahan.

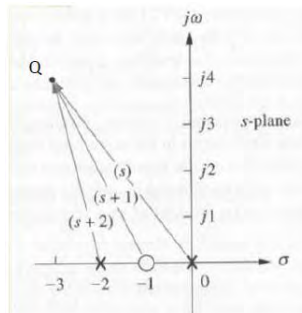
Karakter lain dari pengontrol derivatif adalah mendahului. Artinya pengontrol ini dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum *error* menjadi sangat besar. Jadi, pengontrol derivatif dapat mengantisipasi *error*, memberikan aksi yang bersifat korektif, dan meningkatkan kestabilan sistem.

Berdasarkan karakteristik pengontrol tersebut, pengontrol derivatif umumnya digunakan untuk mempercepat respon awal dari suatu sistem, namun tidak memperkecil kesalahan pada keadaan stabil. Kinerja pengontrol derivatif hanya efektif pada lingkup sempit (lingkup peralihan), oleh sebab itu pengontrol derivatif tidak pernah digunakan secara independen tanpa ada pengontrol lain dalam sistem.

2.9. Metode *Tuning*

2.9.1. Metode *Root-locus*

Metode *Root-locus* merupakan metode *tuning* kontrol PID yang menggunakan sketsa *root-locus* suatu sistem untuk menentukan besar *gain* yang dibutuhkan berdasarkan spesifikasi respon transien yang diinginkan. Spesifikasi respon transien umumnya berupa *%Overshoot* dan *settling time*, diwujudkan ke dalam bentuk *interest point* (Q).



Gambar 2.11 Interest point sebagai *pole* baru yang diinginkan. [2]

Interest point adalah koordinat *pole* baru yang diinginkan sebagai titik pertemuan antara garis *settling time* dengan *%Overshoot*. Titik ini menunjukkan berapa *gain* minimum yang dibutuhkan untuk dapat memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Titik ini dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan besar sudut dan koordinat *zero* tambahan yang dibutuhkan jika diketahui koordinat *pole* dari sistem. Hubungan antara sudut *pole* sistem (θ_p) terhadap *zero* (θ_{zc}) tambahan adalah sebagai berikut:

$$\theta_{zc} - \sum \theta_p \cong (2k + 1)180^\circ ; k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.30)$$

Zero tambahan digunakan sebagai *compensator* dalam pengontrol PD pada sistem. Hubungan antara *compensator* dengan setiap konstanta PD adalah sebagai berikut:

$$G_{PID}(s) = K_1 + K_2s = K_2\left(s + \frac{K_1}{K_2}\right) \quad (2.31)$$

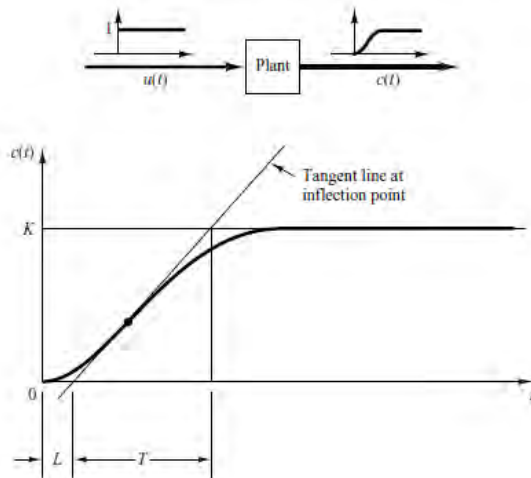
Parameter K_2 adalah K derivatif, dan K_1/K_2 merupakan K proporsional.

2.9.2. Metode Ziegler-Nichols

Salah satu metode *tuning* kontrol PID yang umum digunakan adalah metode Ziegler-Nichols [1]. Ziegler dan Nichols mengajukan aturan untuk menentukan nilai *proportional gain* (K_p), *integral time* (T_i) dan *derivative time* (T_d) berdasarkan karakteristik respon transien dari sistem. Terdapat 2 metode *tuning*

Ziegler-Nichols berdasarkan trend awal dari grafik respon transien sistem.

Cara pertama apabila grafik respon awal sistem membentuk trend menyerupai huruf S. Langkah pertama adalah menentukan nilai *delay time* (L) dan *time constant* (T). Kedua nilai tersebut diperoleh dengan menggambar garis tangen pada titik infleksi pada kurva yang berbentuk S dan menentukan perpotongan antara garis tangen tersebut dengan garis sumbu waktu dan garis *output* K , seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Respons unit-step dari *plant* dan kurva respons bentuk S. [1]

Setelah nilai L dan T ditemukan, Ziegler-Nichols mengajukan perumusan seperti pada tabel 2.2 untuk mendapatkan nilai K_p , T_i dan T_d .

Tabel 2.2 Aturan *tuning* Ziegler-Nichols berdasarkan *Delay Time* dan *Time Constant*. [1]

Jenis Pengendali	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	e	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2 L$	$0,5 L$

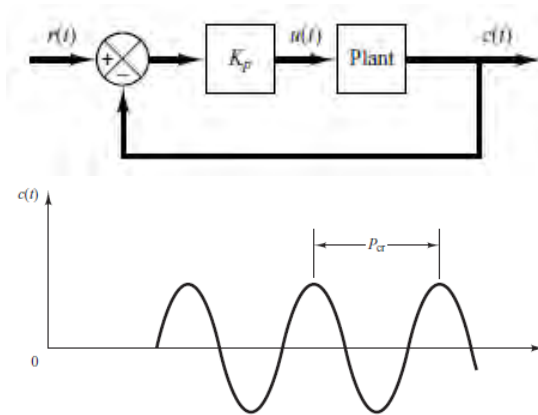
Persamaan 2.32 merupakan persamaan *gain compensator* untuk kontrol PID yang diambil dari tabel 2.2:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$G_c(s) = 1,2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0,5Ls \right)$$

$$G_c(s) = 0,6T \frac{\left(s + \frac{1}{L}\right)^2}{s} \quad (2.32)$$

Cara kedua apabila grafik respon awal sistem membentuk trend sinusoidal seperti gambar 2.13. Pertama *gain* Ki dan Kd diatur menjadi nol agar nilai *time integral* Ti dan *time derivative* Td menjadi e dan 0. Selanjutnya nilai Kp dinaikkan dari 0 hingga mencapai nilai kritikal Kcr dimana *output* pertama kali menunjukkan osilasi berkelanjutan. Nilai Kcr dan periode kritikal Pcr ditentukan secara eksperimen.



Gambar 2.13 Sistem *closed-loop* dengan kontrol proporsional dari *plant* dan kurva respons bentuk sinusoidal. [1]

Berikutnya nilai K_p , T_i , dan T_d dapat ditentukan dengan formulasi pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Aturan *tuning* Ziegler-Nichols berdasarkan *Gain* dan Periode kritis. [1]

Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

Jika suatu sistem memiliki model matematika yang sudah diketahui (fungsi transfer), maka metode Root-Locus dapat digunakan untuk menentukan nilai K_{cr} , dan frekuensi kritis ω_{cr} , dimana $2\pi/\omega_{cr} = P_{cr}$. Nilai ini dapat ditemukan dari titik persimpangan antara cabang root-locus dengan sumbu $j\omega$.

Persamaan 2.33 merupakan persamaan *gain compensator* untuk kontrol PID yang diambil dari tabel 2.3:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$G_c(s) = 0,6 K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0,5 P_{cr} s} \right) + 0,125 P_{cr} s$$

$$G_c(s) = 0,075 K_{cr} P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s} \quad (2.33)$$

2.10. Analisa Kestabilan

Pada umumnya suatu sistem memiliki respons total yang terdiri dari *natural response* dan *forced response*[2]. *Natural response* menjelaskan cara dari sistem untuk mendapatkan atau mendisipasi energi sementara itu *forced response* merupakan respons yang bergantung kepada nilai *input*. Pada sistem linear, dapat dirumuskan sebagai:

$$c(t) = c_{forced}(t) + c_{natural}(t) \quad (2.34)$$

Berdasarkan rumusan diatas, definisi dari stabil, tidak stabil dan stabil marginal dapat dijelaskan sebagai berikut [2]:

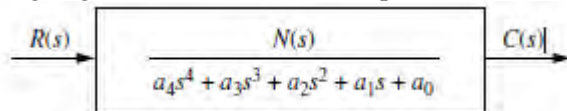
- Sistem linear dikatakan *stabil* apabila respons naturalnya mendekati nol sampai waktu mendekati tak terbatas.
- Sistem linear dikatakan *tidak stabil* apabila respon naturalnya berkembang tanpa batas sampai waktu mendekati tanpa batas.
- Sistem linear dikatakan *stabil marginal* apabila respon naturalnya konstan atau berosilasi sampai waktu mendekati tanpa batas.

Sistem kontrol harus dirancang agar stabil, yang artinya respon natural sistem harus mendekati nol ketika $t = \infty$, atau berosilasi. Pada beberapa sistem, respon transien pada plot waktu-respons berhubungan langsung dengan respon naturalnya. Apabila respon natural sistem semakin mendekati nol saat $t = \infty$, respon transiennya turut menghilang dan hanya meninggalkan *forced response*. Jika sistem stabil, karakteristik *steady-state error* dan respons transien dapat dirancang dengan baik.

Metode analisa kestabilan yang digunakan dalam sistem kendali *Turret-Gun* sumbu Azimuth yaitu Kriteria Routh-Hurwitz dan *root-locus*.

2.10.1. Kriteria Routh-Hurwitz

Salah satu metode analisa kestabilan yang sering digunakan adalah Kriteria Routh-Hurwitz [2]. Kriteria Routh-Hurwitz menggunakan jumlah *pole* yang terdapat pada bidang kiri dan kanan dari sumbu imajiner ($j\omega$). Jumlah *pole* tersebut dapat ditunjukkan oleh perubahan tanda negatif menjadi positif atau pada tabel routh-hurwitz. Perubahan tanda tersebut menunjukkan jumlah *pole* di bidang kanan yang dapat menyebabkan ketidakstabilan. Metode ini membutuhkan dua langkah. Pertama adalah membuat tabel data bernama Routh table, lalu menginterpretasikan tabel tersebut untuk mendapatkan jumlah *pole* pada bidang bagian kiri dan kanan, serta pada sumbu imajiner.



Gambar 2.14 Blok diagram metode *Routh-Hurwitz*.

Gambar 2.14 dapat digunakan untuk menjelaskan prosedur metode Kriteria Routh-Hurwitz. Hanya denominator yang digunakan, karena kriteria ini menggunakan *pole*. Dimulai dengan memberikan label dari s dengan pangkat tertinggi hingga s^0 pada denominator. Selanjutnya disusun ke dalam bentuk tabel berikut:

Tabel 2.4 *Routh Table*

s^4	a_4	a_2	a_0
s^3	a_3	a_1	0
s^2			
s^1			
s^0			

Aturan untuk *input* berikutnya sebagai berikut. Setiap *input* merupakan determinan negatif dari *input* dua baris sebelumnya yang dibagi dengan *input* dari kolom pertama tepat diatas baris

yang dihitung. Tabel akan lengkap jika seluruh baris sudah memiliki nilai hingga baris ke s^0 .

Tabel 2.5 Metode Perhitungan *Routh Table*

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

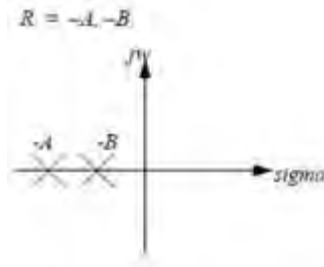
Langkah berikutnya adalah menerjemahkan tabel tersebut. Syarat Kriteria Routh-Hurwitz ini adalah jika seluruh koefisien pada kolom pertama deret tabel Routh bernilai positif dan tidak terdapat perubahan tanda koefisien bernilai positif ke negatif maupun sebaliknya. Jika terdapat satu atau lebih koefisien yang bernilai negatif, maka sistem tersebut tidak stabil. Jumlah perubahan tanda koefisien pada deret pertama sebanding dengan jumlah akar positif dari persamaan matematis sistem.

2.10.2. Root-Locus

Metode Root Locus, ditemukan oleh W.R. Evans (1948) [2], merupakan suatu metode yang dapat digunakan untuk merancang dan menganalisa pengaruh dari loop *gain* terhadap kestabilan dan respon transient dari suatu sistem, dengan mengetahui kedudukan akar-akar matematis dari suatu sistem. Metode ini dapat digunakan untuk menentukan besar nilai penguatan agar suatu sistem menjadi stabil, namun tidak mempengaruhi kestabilan sistem secara langsung.

Hubungan antara kestabilan sistem dan kedudukan akar-akar *pole* dari sistem dapat dilihat pada keterangan berikut:

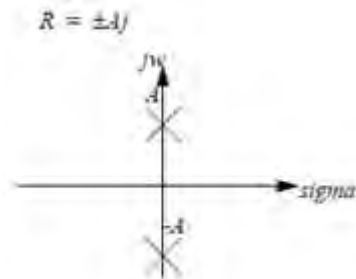
- **Negatif real**



Gambar 2.15 Akar-akar bernilai negatif *real*.

Sistem dikatakan stabil apabila akar-akar *pole* bernilai negatif *real*.

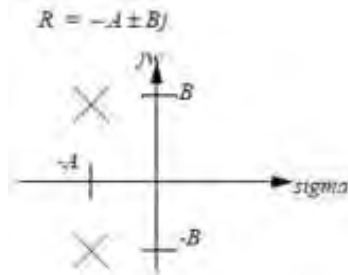
- **Imajiner ($real = 0$)**



Gambar 2.16 Akar-akar bernilai imajiner.

Apabila akar-akar *pole* merupakan bilangan imajiner, maka kurva nilai *output* akan membentuk kurva sinusoidal, akibatnya sistem menjadi *marginally stable*.

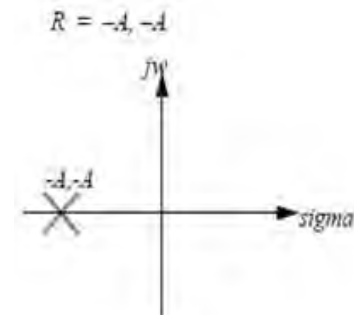
- **Negatif *real* dan imajiner**



Gambar 2.17 Akar-akar bernilai negatif *real* dan imajiner.

Jika akar-akar sistem bernilai negatif *real* dan imajiner, maka sinyal *output* akan berosilasi yang semakin mengecil menuju nol sehingga sistem dapat menjadi stabil.

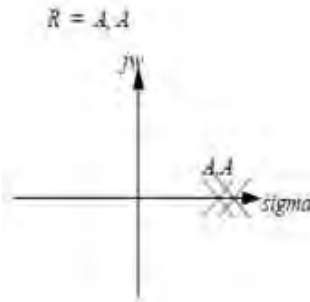
- **Negatif *real* kembar**



Gambar 2.18 Akar-akar bernilai negatif *real* Kembar.

Sistem yang memiliki akar-akar penyelesaian jenis ini memiliki sinyal keluaran yang semakin lama akan menjadi stabil.

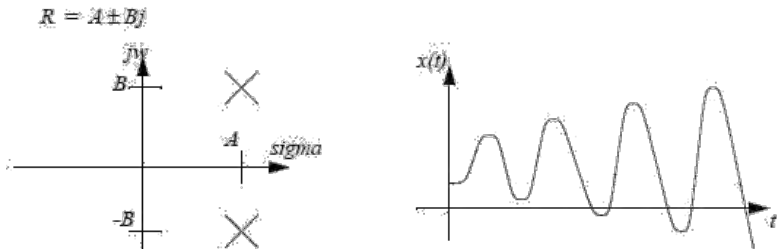
- **Positif *real* kembar**



Gambar 2.19 Akar-akar bernilai positif *real* kembar

Apabila akar-akar *pole* merupakan bilangan positif *real*, kurva dari nilai *output* akan berosilasi dan semakin membesar seiring dengan bertambahnya waktu, yang mengakibatkan sistem tidak stabil.

- **Positif *real* imajiner**



Gambar 2.20 Akar-akar Bernilai Positif *Real* Komplek

Dengan akar-akar *pole* bernilai positif *real* dan imajiner, kurva nilai *output* membentuk osilasi yang semakin besar, sehingga sistem tersebut tidak dapat mencapai kestabilan.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Langkah-Langkah Penelitian

Penelitian sistem kontrol gerak *Turret-Gun* sumbu Azimuth dilakukan berdasarkan tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. Studi literatur dan lapangan.
2. Perumusan masalah.
3. Pengambilan data transmisi gerak sumbu azimuth.
4. Perancangan kontrol PID sistem gerak sumbu azimuth.
5. Pengujian kestabilan sistem pada gerak sumbu azimuth.
6. Kesimpulan dan saran.

3.1.1. Studi Literatur

Pada tahap ini, studi literatur dilakukan mengenai bentuk *Turret-Gun* yang sudah ada dan sistem kontrol gerak yang menyerupai sistem *Turret-Gun* dari buku referensi, literature dan jurnal ilmiah yang berkaitan dengan penelitian. Selain itu juga dilakukan studi literature mengenai teori-teori metode kontrol PID yang akan digunakan serta analisa kestabilan sistem dengan menggunakan *software* MATLAB.

3.1.2. Studi Lapangan

Pada tahap ini, pengumpulan data dilakukan mengenai *Turret-Gun* yang akan dikendalikan. Studi Lapangan ini dilakukan dengan cara mengamati dan mengambil data berupa model 3D dari *Turret-Gun* dan spesifikasi serta dimensinya di PT.Pindad.

3.1.3. Perumusan Masalah

Pada tahap ini, perumusan masalah dilakukan yang akan dipecahkan pada tugas akhir Perancangan Sistem Kontrol Gerak *Turret-Gun* Sumbu Azimuth dengan Metode Kontrol PID.

3.1.4. *Pengambilan Data Transmisi Gerak Sumbu Azimuth*

Pada tahap ini, dilakukan pengambilan data transmisi gerak *Turret* untuk sumbu azimuth yang akan digunakan dalam penelitian. Data tersebut akan digunakan dalam perancangan sistem kontrol yang akan dibuat.

3.1.5. *Penentuan Model*

Pada tahap ini, penentuan model dilakukan berdasarkan parameter bentuk dan dimensi. Model yang telah ditentukan divalidasi dengan uji keterkontrolan dan keteramatan.

3.1.6. *Perancangan Kontrol Sistem Gerak Sumbu Azimuth*

Pada tahap ini, perancangan kontrol untuk gerak sumbu Azimuth dilakukan berdasarkan model matematis dari sistem Azimuth keseluruhan yang telah diamati grafik *step* respons awalnya. Selanjutnya penentuan metode kontrol apa yang akan digunakan berdasarkan grafik *step* respons tersebut. Perancangan kontrol menggunakan metode kontrol PID berdasarkan masukan berupa posisi dan menggunakan data dari motor, transmisi dan sistem *Turret* keseluruhan hingga mendapatkan keluaran awal.

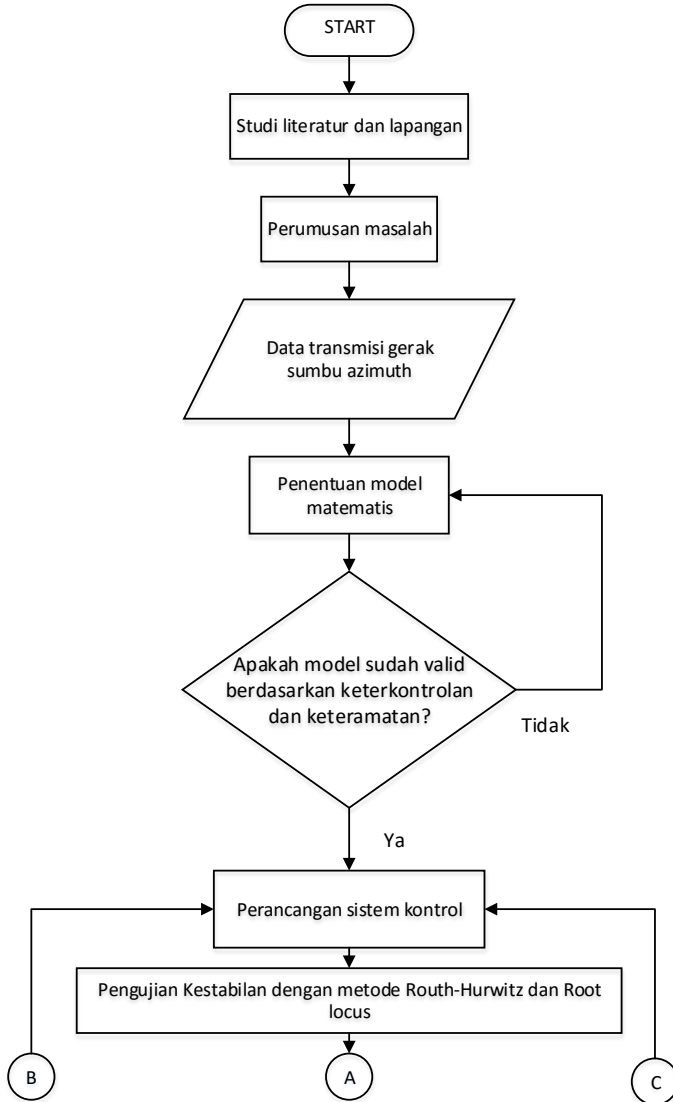
3.1.7. *Pengujian Kestabilan Sistem pada Gerak Sumbu Azimuth*

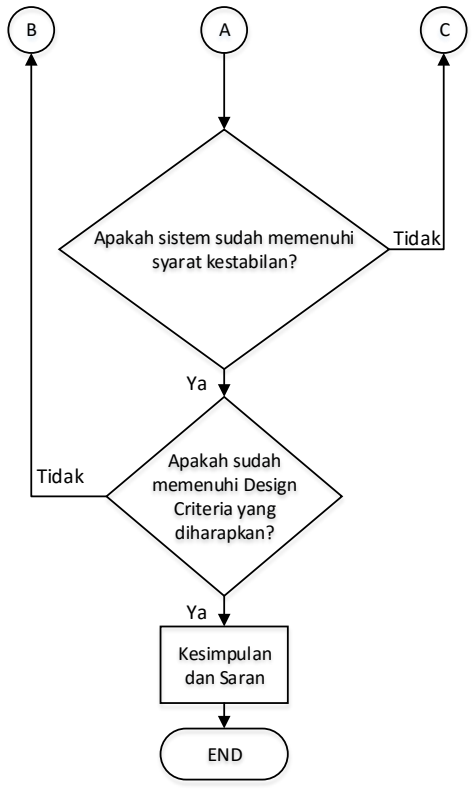
Pada tahap ini, pengujian kestabilan dari rancangan kontrol yang telah diperoleh dilakukan dengan menggunakan metode-metode yang telah ditentukan. Apabila sistem tidak stabil sesuai kriteria kestabilan masing-masing metode, maka perlu ditambahkan *feedback* yang berfungsi untuk menambahkan *gain* yang dibutuhkan untuk mencapai kestabilan yang diinginkan.

3.1.8. *Kesimpulan dan Saran*

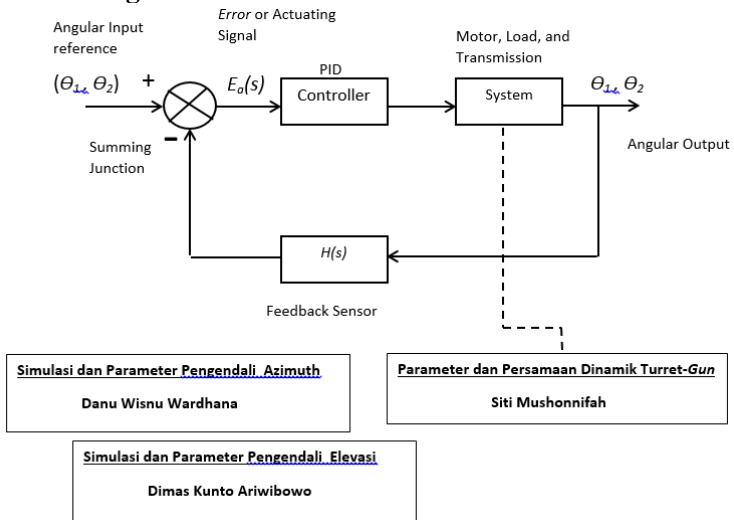
Pada tahap ini, pengambilan kesimpulan dilakukan dari setiap analisa yang dilakukan dari awal sampai akhir proses perancangan sistem kontrol. Dari hasil kesimpulan yang didapat akan dibuat saran yang akan mendukung untuk perancangan sistem kontrol *Turret-Gun* dengan kaliber yang lebih besar.

3.2. Diagram Alir Penelitian





3.3 Blok Diagram Sistem



Blok diagram digunakan untuk memetakan proses pada sistem dari *input* hingga menjadi output yang diharapkan. Blok diagram pada sistem kontrol turret-*gun* tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

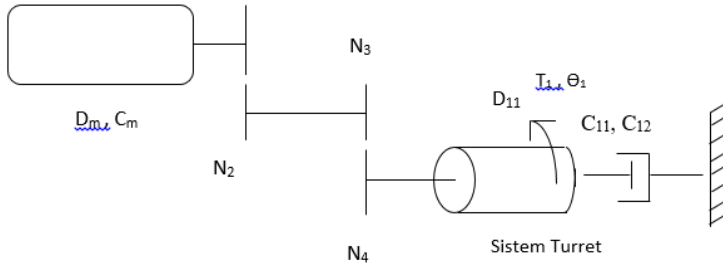
- *Input* pada sistem berupa sudut inklinasi dan rotasi yang diharapkan. Batas jarak inklinasi 70^0 dan jarak rotasi 360^0 . *Input* dimasukkan ke dalam sistem kontrol melalui perangkat lunak atau *software*.
- Motor sebagai aktuator yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi besaran mekanik. Pada sistem ini, aktuator berupa motor listrik DC yang menghasilkan gerak rotasi.
- Parameter pada sistem kontrol terbagi menjadi beberapa komponen, yaitu motor, transmisi, turret *gun* dan persamaan dinamik turret-*gun*. Parameter motor dan transmisi dirancang oleh Danu Wisnu Wardhana dan Dimas Kunto Ariwibowo, sedangkan untuk parameter dan persamaan dinamik turret-*gun* merupakan hasil analisa dari Siti Mushonnifah.

- *Feedback sensor* yang digunakan pada sistem kontrol ini berupa sensor putaran (*angular distance*) yang berfungsi sebagai *error detector*. Jika jarak tersebut telah sesuai dengan data *input*, maka sistem akan mengirim sinyal berhenti ke motor. Sensor yang digunakan adalah berupa potentiometer atau *encoder*. *Output* yang dihasilkan dari sistem kontrol adalah jarak angular dari pergerakan *turret-gun* untuk sumbu azimuth dan elevasi sesuai dengan *input* posisi pada perangkat lunak.

BAB IV SISTEM TRANSMISI DAN PEMODELAN TURRET-GUN

4.1. Model sistem

Motor DC Azimuth dan Transmisi



Gambar 4.1 Free body diagram sistem azimuth [2].

Pada pemodelan sistem kendali sumbu azimuth turret-gun dengan menggunakan servomotor DC sebagai penggerak utamanya, pertama harus diketahui terlebih dahulu hubungan antara torsi yang keluar dari motor dengan torsi yang masuk kedalam sistem. Torsi yang akan masuk kedalam sistem merupakan torsi keluaran motor yang telah dipengaruhi oleh transmisi roda gigi:

$$T_{motor} \times n = T_{sistem} \quad (4.1)$$

n merupakan rasio roda gigi keseluruhan pada transmisi penggerak yang dianggap sebagai model transmisi *lossless gear*, sehingga hanya memperhatikan faktor rasio roda gigi. Besar torsi yang dibutuhkan sistem adalah sebagai berikut:

$$T_{sistem} = D_{11}\ddot{\theta}_1 + C_{11}\dot{\theta}_1 + C_{12}\dot{\theta}_2 \quad (4.2)$$

Dengan:

- D_{11} = Inersia sistem turret
- C_{11} = Konstanta damping sistem turret
- C_{12} = Efek koriolis gun terhadap turret
- T_{sistem} = Torsi sistem azimuth
- $\dot{\theta}_1$ = Perubahan kecepatan sistem azimuth
- $\dot{\theta}_2$ = Perubahan kecepatan sistem elevasi

$\ddot{\theta}_1$ = Perubahan percepatan sistem azimuth

Selanjutnya adalah mendefinisikan pengaruh dari tegangan yang masuk kedalam motor dengan torsi yang ditimbulkan akibat tegangan tersebut. Hubungan antara *armature current*, $i_a(t)$, *armature voltage*, $e_a(t)$, dan *back electromotive force*, $v_b(t)$, dituliskan pada persamaan motor DC sebagai berikut,

$$R_a I_a(t) + L_a \dot{I}_a(t) + V_b(t) = E_a(t) \quad (4.3)$$

Dimana back electromotive force dirumuskan sebagai:

$$V_b(t) = K_b \dot{\theta}_1(t) \quad (4.4)$$

Torsi yang dihasilkan oleh motor adalah sebanding dengan arus nya, sesuai dengan persamaan:

$$T_m(t) = K_t I_a(t) \quad (4.5)$$

$$I_a(t) = \frac{1}{K_t} T_m(t) \quad (4.6)$$

K_t adalah konstanta torsi dari motor DC (motor torque constant). Untuk mendapatkan transfer function dari motor, maka persamaan (4.4) dan (4.6) disubstitusikan ke dalam persamaan (4.3), menghasilkan:

$$\frac{(R_a + L_a) T_m(t)}{K_t} + K_b \dot{\theta}_1(t) = E_a(t) \quad (4.7)$$

Ruas kiri dan kanan pada persamaan (4.7) dipindahkan, selanjutnya diperoleh hubungan antara torsi keluaran motor $T_m(t)$ dengan tegangan masukan $E_a(t)$, yaitu:

$$T_m(t) = \frac{K_t(E_a(t) - K_b \dot{\theta}_1(t))}{R_a} \quad (4.8)$$

Setelah masing-masing persamaan torsi telah diketahui, persamaan (4.2) dan (4.8) dimasukkan kedalam persamaan (4.1) untuk mendapatkan hubungan antara tegangan yang masuk ke motor dengan torsi yang masuk kedalam sistem:

$$\frac{T_{motor} \times N}{K_t(E_a(t) - K_b \dot{\theta}_1(t))} = T_{sistem} \quad (4.9)$$

$$E_a = \frac{R_a(D_{11}\ddot{\theta}_1 + C_{11}\dot{\theta}_1 + C_{12}\dot{\theta}_2) + NK_t K_b}{NK_t} \quad (4.10)$$

Dengan:

$$D_{11} = \frac{1}{2}m_1R_1^2 + m_2R_1^2 + m_2R_1R_2\cos(\theta_2) + \frac{1}{3}m_2R_2^2\cos^2(\theta_2)$$

$$C_{11} = (-m_2R_1R_2\sin(\theta_2)\dot{\theta}_2)$$

$$C_{12} = -\frac{1}{3}m_2R_2^2\sin(2\theta_2)\dot{\theta}_1$$

Persamaan (4.10) merupakan persamaan sistem dengan kondisi nonlinear. Agar sistem tersebut dapat dilinearisasi, persamaan (4.10) harus diubah kedalam bentuk $\ddot{\theta}_1$ terlebih dahulu. Parameter D_{11} , C_{11} dan C_{12} dimasukkan ke dalam persamaan (4.10) serta ruas kiri dan kanan dipindahkan, diperoleh bentuk $\ddot{\theta}_1$ sebagai berikut:

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{K_t E_a N - (NK_t K_b + R_a C_{11})\dot{\theta}_1 - R_a C_{12}\dot{\theta}_2}{R_a D_{11}}$$

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{K_t E_a N - [(R_a m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2)) + R_a \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \sin(2\theta_2)]\dot{\theta}_2 - NK_t K_b}{R_a (\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2))} \dot{\theta}_1 \quad (4.11)$$

Persamaan (4.11) merupakan persamaan bentuk non-linear. Persamaan ini harus dilinearisasi terlebih dahulu sebelum dilakukan uji keterkontrolan dan keteramatan. Metode linearisasi yang digunakan adalah metode *Jacobian*.

Misal:

$$x_1 = \theta_1$$

$$x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\theta}_1$$

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4.12)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{K_t E_a N - [(R_a m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2)) + R_a \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \sin(2\theta_2)]\dot{\theta}_2 - NK_t K_b}{R_a (\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2))} x_2 \quad (4.13)$$

Persamaan (4.11) dan (4.12) merupakan persamaan diferensial non-linear yang akan diubah menjadi persamaan linear dengan menggunakan metode *Jacobian* pada sekitar titik kesetimbangannya. Titik setimbang merupakan pendekatan pada saat kondisi sistem sudah tidak berubah lagi, yang dirumuskan sebagai:

$$f_1(x_1, x_2) = x_2 = 0$$

$$f_2(x_1, x_2) = \frac{K_t E_a N - \left[(R_a m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2)) + R_a \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \sin(2\theta_2) \right] \dot{\theta}_2 - N K_t K_b}{R_a \left(\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) \right) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2)} \dot{\theta}_1 = 0$$

Dilihat dari sistem turret, x_1 dan x_2 masing-masing menunjukkan posisi dan kecepatan turret. Dimanapun posisi turret, turret akan setimbang karena $x_2 = 0$ atau pada saat turret tidak bergerak.

$$J(\bar{x}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Persamaan (4.14) merupakan persamaan untuk matriks *Jacobian*, dimana \bar{x} adalah titik kesetimbangan dari sistem. Linearisasi di sekitar titik kesetimbangan menjadi sebagai berikut:

$$J(\bar{x}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{N K_t K_b}{R_a \left(\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) \right) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2)} \end{pmatrix} = A \quad (4.15)$$

Persamaan (4.15) merupakan matriks A untuk model *state-space* $\dot{x} = Ax + Bu$ dan $y = Cx + Du$. Cara yang sama digunakan untuk menentukan matriks B, C dan D sehingga diperoleh matriks berikut:

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K_t E_a N}{R_a \left(\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) \right) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2)} \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

$$C = (1 \quad 0) \quad (4.17)$$

$$D = (0) \quad (4.18)$$

Masing-masing parameter turret-*gun* sumbu azimuth ditentukan sebagai berikut:

- Massa turret, $m_1 = 1500$ kg
- Massa *gun*, $m_2 = 110$ kg
- Radius turret, $R_1 = 0,5$ m
- Panjang *gun*, $R_2 = 2,76$ m
- Rasio transmisi, $N = 1/200$
- Voltage constant motor DC, $K_b = 7,5$ V/Krpm
- Torque constant motor DC, $K_t = 0,072$ Nm/A
- Armature resistance, $R_a = 0,45$ ohm

Diasumsikan posisi *gun* diam ($\dot{\theta}_2 = 0^\circ$) pada posisi $\theta_2 = 0^\circ$. Parameter turret-*gun* selanjutnya dimasukkan ke dalam matriks A, B, C, dan D menghasilkan matriks dan model *state-space* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0,39707 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0,05294 \end{bmatrix} E_a(t) \quad (4.18)$$

$$[y] = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

4.1.1. Uji Keterkontrolan dan Keteramatan

Untuk mengetahui apakah suatu model sistem dapat dikontrol atau tidak, perlu diketahui sifat *controllability* dan *observability* dari sistem tersebut. Apabila sistem itu tidak memenuhi salah satu sifat tersebut, maka sistem tidak bisa dikendalikan. Uji keterkontrolan dilakukan pada kondisi setimbang dengan matriks A, B dan C sebagai berikut:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0,39707 \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,05294 \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

$$C = (1 \quad 0) \quad (4.22)$$

Persamaan *state-space* dari matrix A, B dan C selanjutnya dibentuk kedalam fungsi transfer serta diperiksa keterkontrolan dan keteramatannya. Matriks A memiliki dimensi 2x2, sehingga orde matriksnya adalah 2. Hasil uji keterkontrolan dan keteramatan ditunjukkan pada gambar 4.2.

```

T =
    0.05294
-----
s^2 + 0.3971 s

Continuous-time transfer function.

Controllable Matrix is Qc =
    0    0.0529
    0.0529  -0.0210

Given System is Controllable.
Observable Matrix is Qb =
    1    0
    0    1

Given System is Observable.

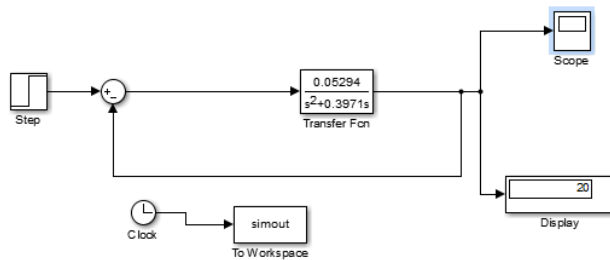
```

Gambar 4.2 Hasil uji keterkontrolan dan keteramatan

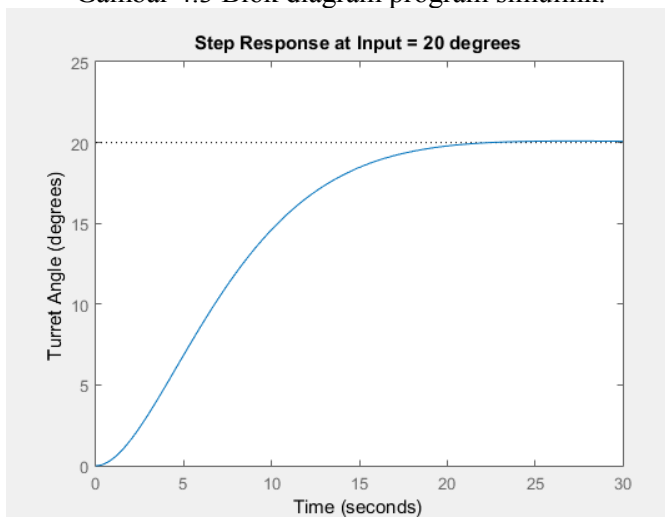
Matriks $Qc = \begin{bmatrix} 0 & 0.0529 \\ 0.0529 & -0.0210 \end{bmatrix}$ memiliki rank kolom 2, dan rank baris 2, sehingga rank Qc adalah 2. Sementara matriks $Qb = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ memiliki rank kolom 2 dan baris 2, maka rank Qb juga 2. Sistem ini dapat dikontrol dan diamati karena rank Qc dan Qb sama dengan orde matriks A .

4.1.2. Respon Awal Sistem

Persamaan fungsi transfer yang dibentuk dengan menggunakan Matlab pada gambar 4.2 selanjutnya dikonversikan ke dalam blok diagram simulink. Selanjutnya respon awal diperoleh dengan memasukkan *input step* sebesar 20 derajat. Blok diagram simulink dan respons awal masing-masing ditunjukkan kedalam gambar 4.3 dan 4.4:



Gambar 4.3 Blok diagram program simulink.



Gambar 4.4 Respons awal dengan *input* 20 derajat.

Dari gambar 4.4 diketahui bahwa sistem tidak memiliki *steady-state error*, namun *settling timenya* diatas 20 detik. Untuk itu diperlukan pengontrol PID untuk mempersingkat *settling time* sesuai dengan kriteria perancangan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V PERANCANGAN SISTEM KONTROL

5.1. Perancangan Sistem Kontrol

5.1.1. Kriteria Perancangan

Dalam suatu proses perancangan suatu sistem kontrol, kriteria perancangan suatu sistem kontrol harus ditentukan terlebih dahulu. Kriteria tersebut ditentukan berdasarkan kebutuhan penggunaan dari sistem tersebut. Pada perancangan sistem kontrol turret sumbu azimuth dengan kontrol PID ini, kriteria yang dibutuhkan adalah %*Overshoot* tidak melebihi 20%, dan *settling time* harus dibawah 2 detik. Berdasarkan kriteria tersebut dapat ditentukan nilai *damping ratio* (ζ) dan frekuensi natural (ω_n) sistem tersebut dengan perumusan sebagai berikut:

$$\zeta = \frac{-\ln(\%OS / 100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\%OS / 100)}} = \frac{-\ln(20 / 100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(20 / 100)}} = 0,456 \quad (5.1)$$

$$Ts = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (5.2)$$

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta Ts} = \frac{4}{0,456 \times 2} = 4,386 \text{ rad/s} \quad (5.3)$$

Dalam penggambaran sketsa *root-locus*, garis *damping ratio* berperan sebagai parameter penting untuk menentukan *compensated pole*. Besar nilai sudut dari garis *damping ratio* yang telah diketahui dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

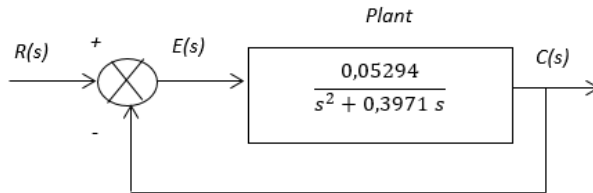
$$\theta = \cos^{-1} \zeta = 62,7^\circ \quad (5.4)$$

5.2. Metode *Root-locus*

Salah satu metode perancangan kontrol PID adalah dengan menggunakan metode *Root-locus*. *Root-locus* merupakan metode yang memanfaatkan perubahan kedudukan dari setiap akar matematis pada sistem untuk setiap perubahan yang diberikan oleh penguat (*gain*). Perubahan tersebut lalu diwujudkan dalam sebuah sketsa *root-locus*. Hal ini memungkinkan perancang untuk menentukan nilai *gain* sesuai dengan kriteria perancangan untuk mendapatkan respon transien yang diharapkan.

Kontrol yang akan digunakan dalam perancangan metode Root-Locus adalah kontrol PD (*proportional-derivatif*). Kontrol ini dipilih karena karakter respon awal sistem yang tidak memiliki *steady-state error*.

Metode perancangan kontrol PD ini terdiri dari beberapa tahap. Pertama adalah menentukan kriteria perancangan yang diinginkan. Berikutnya yaitu menentukan letak posisi *zero compensator* untuk PD *compensator*. Selanjutnya menghitung nilai K_P dan K_D . Nilai K_I dihitung setelah parameter K_P dan K_D diperoleh dengan cara menambahkan *pole* baru pada posisi *origin* dan *zero* baru pada posisi mendekati *origin*.



Gambar 5.1 *Feedback control system* untuk sumbu azimuth turret.

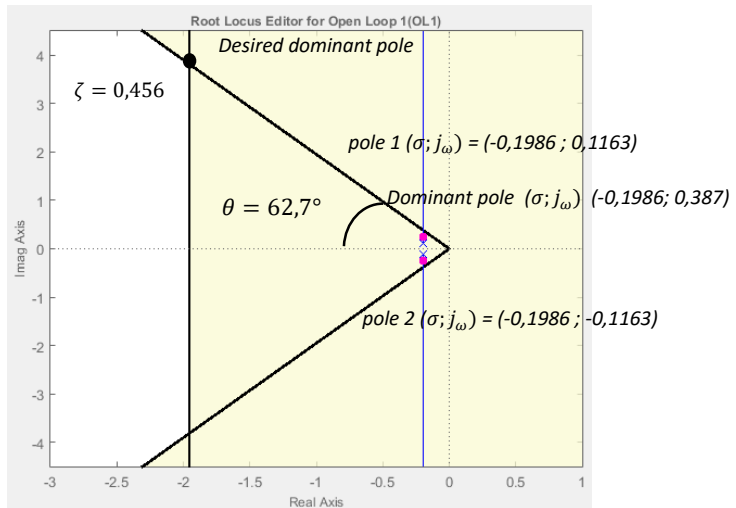
Gambar 5.1 merupakan blok diagram dari sistem kontrol gerak turret sumbu azimuth yang telah diberikan *feedback*. Dari blok diagram tersebut dibuat persamaan fungsi transfer seperti pada persamaan (5.4).

$$\text{Transfer Function} \frac{0,05294}{s^2 + 0,3971 s + 0,05294} \quad (5.5)$$

Dari denominator pada persamaan 5.5 dapat diketahui posisi *pole* awal sistem yang merupakan akar-akar persamaan denominator:

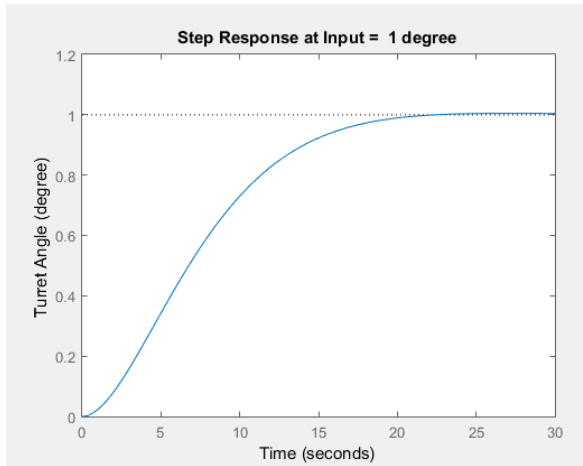
$$\text{akar pole 1} = -0,1986 + 0,1163i \quad (5.6)$$

$$\text{akar pole 2} = -0,1986 - 0,1163i \quad (5.7)$$



Gambar 5.2 Root-locus untuk sistem sumbu azimuth turret.

Gambar 5.2 merupakan sketsa *root-locus*, dimana garis miring menunjukkan *damping ratio* dengan *overshoot* sebanyak 20% dan garis vertikal menunjukkan garis *settling time* selama 2 detik. Daerah berwarna putih merupakan daerah yang memiliki respon *transient* sesuai dengan kriteria perancangan, sementara daerah berwarna coklat merupakan daerah yang tidak memenuhi kriteria. *Dominant pole* dari sistem yang belum terkompensasi tidak memenuhi kriteria perancangan, sehingga diperlukan *dominant pole* baru yang memenuhi kriteria. Gambar 5.2 menunjukkan bahwa berapapun besar *gain* yang diberikan kepada sistem, tetap tidak akan memenuhi kriteria, karena itu diperlukan adanya penambahan titik *zero* pada sumbu *realnya*.



Gambar 5.3 Respon sistem saat *step input* = 1 derajat.

Gambar 5.3 adalah grafik respon sistem ketika diberikan *input* sebanyak 1 derajat. Dapat dilihat bahwa untuk mencapai 1 derajat, sistem membutuhkan waktu minimal 20 detik. Waktu tersebut tidak cukup cepat untuk mencapai kriteria perancangan yang diinginkan.

Letak koordinat dari *desired dominant pole* pada sumbu imajiner (j_d) dan sumbu *real* (σ_d) ditunjukkan pada persamaan (5.8) dan (5.9).

$$j_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} = 4,386 \sqrt{1 - 0,456^2} = 3,9035 \quad (5.8)$$

$$\sigma_d = -\zeta \omega_n = -(0,456)(4,386) = -2 \quad (5.9)$$

Persamaan (5.6) dan (5.7) merupakan akar dari denominator fungsi transfer sistem yang belum dikompensasi. Dari persamaan tersebut dapat diambil data berupa koordinat *pole* sistem:

$$\sigma_1 = -0.1986 \quad ; \quad j_1 = 0.1163 \quad (5.10)$$

$$\sigma_2 = -0.1986 \quad ; \quad j_2 = -0.1163 \quad (5.11)$$

Sudut pole 1 (θ_1) dan pole 2 (θ_2) terhadap titik *desired dominant pole* dapat dihitung dengan menggunakan hubungan trigonometri sebagai berikut:

Untuk θ_1 :

$$\theta_1 = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{N}{p} \right) \quad (5.12)$$

$$N = j_d - j_1 = 3,7872 ; P = \sigma_1 - \sigma_d = 1,8014 \quad (5.13)$$

$$\theta_1 = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{3,7872}{1,8014} \right) = 115,438^\circ \quad (5.14)$$

Untuk θ_2 :

$$\theta_2 = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{O}{R} \right) \quad (5.15)$$

$$O = j_d - j_2 = 4,0198 ; R = \sigma_d - \sigma_2 = 1,8014 \quad (5.16)$$

$$\theta_2 = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{4,0198}{1,8014} \right) = 114,138^\circ \quad (5.17)$$

Sudut *compensator zero* (θ_z) yang baru dihitung dengan persamaan berikut:

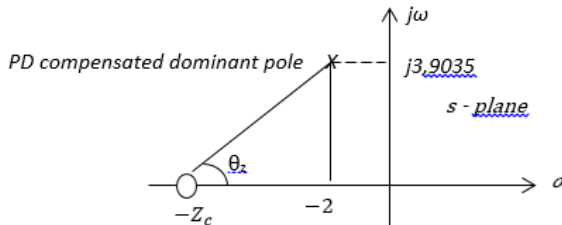
$$\theta_z - \theta_1 - \theta_2 = (2k + 1)180^\circ; k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.18)$$

Ambil nilai $k = 0$, maka,

$$\theta_z - 115,438^\circ - 114,138^\circ = (2(0) + 1)180^\circ$$

$$\theta_z = 229,576^\circ + 180^\circ = 409,576^\circ \text{ (kuadran I)}$$

$$\theta_z = 409,576^\circ - 360^\circ = 49,576^\circ \quad (5.19)$$



Gambar 5.4 Geometri perhitungan PD *compensator zero*

Dari θ_z yang telah dihitung, posisi koordinat *zero* baru dapat dihitung dengan menggunakan hubungan trigonometri yang ditunjukkan pada gambar 4.8. Apabila dimisalkan $-Z_c$ merupakan letak koordinat untuk *compensator zero*, maka :

$$\tan \theta_z = \frac{j_d}{Z_c} \quad (5.20)$$

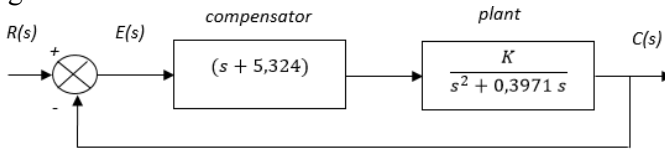
$$\tan 49,576^\circ = \frac{3,9035}{Z_c - 2}$$

$$Z_c = 5,324 \quad (5.21)$$

Persamaan *compensator* untuk kontrol PD menjadi:

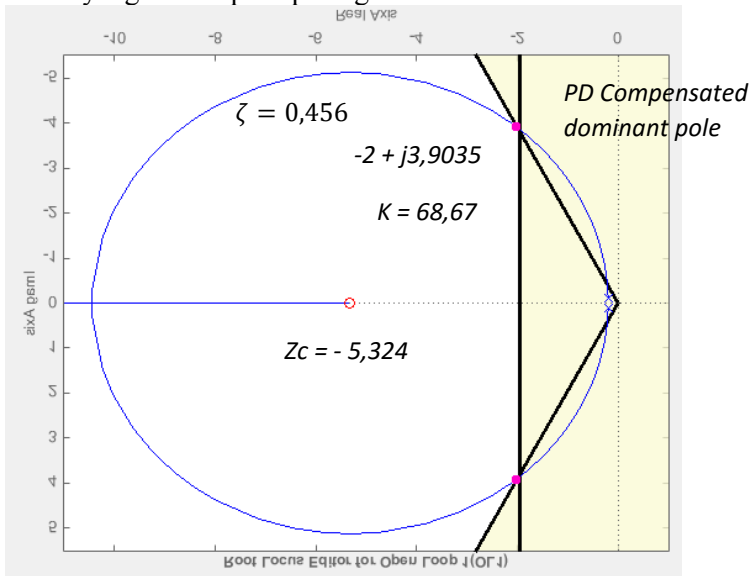
$$G_{PD(s)} = (s + 5,324) \quad (5.22)$$

Blok diagram baru dengan *PD compensated system*, ditunjukkan pada gambar 5.5.



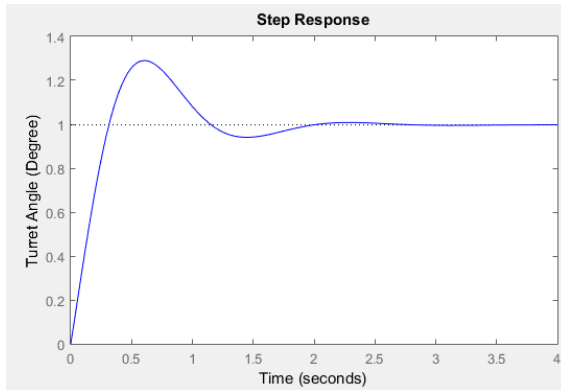
Gambar 5.5 Blok diagram untuk *PD compensated system* azimuth turret gun.

Titik σ_z baru tersebut kemudian dimasukkan ke dalam sket *root-locus* sistem melalui Matlab sehingga menghasilkan sketsa *root-locus* yang baru seperti pada gambar 5.6.



Gambar 5.6 Sketsa *root-locus* untuk *PD compensated system* azimuth turret-gun.

Gambar 5.6 merupakan sketsa *root-locus* sistem yang telah diberikan *zero compensator*. Berikutnya *gain* diperbesar hingga mencapai *dominant pole* sebagai titik batas dari kriteria perancangan yang harus dipenuhi. Grafik respon baru diperoleh seperti pada gambar 5.7.



Gambar 5.7 Grafik respon metode *root-locus*.

Gambar 5.7 merupakan grafik respon sistem setelah diberikan *gain* kompensator dengan metode *root-locus*. Hasil respon sistem ditunjukkan pada tabel 5.1.

Tabel 5.1 Respon Sistem Azimuth Turret-Gun Metode Root-Locus.

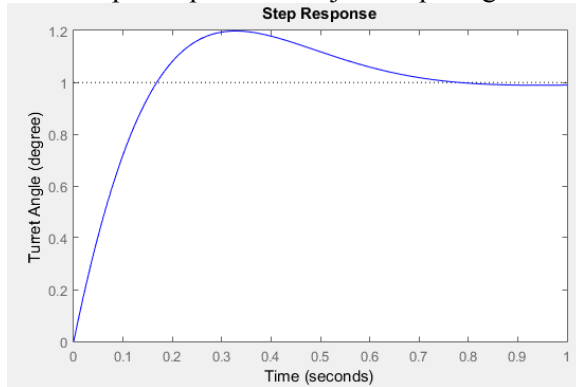
	Uncompensated	PD Compensated
<i>Plant and Compensator</i>	$\frac{K}{s^2 + 0,3971s + 0,05294}$	$\frac{K(s + 5,324)}{s^2 + 0,3971s + 0,05294}$
<i>Dominant Poles</i>	$-0,199 \pm j0,387$	$-2 \pm j3,9035$
<i>K</i>	0,05294	68,67
ζ	0,863	0,456
ω_n	0,23	4,386
<i>%OS</i>	0	29,9%
<i>T_s</i>	18,7	1,74
<i>T_p</i>	11,8	0,571
<i>Zero</i>	-	-5,324
<i>Steady State Error (%)</i>	0	0

Nilai K_p dan K_d ditentukan berdasarkan implementasi antara *ideal-derivative compensator* dan kontrol proporsional-derivatif dengan transfer fungsi kontrol PD pada persamaan 5.23:

$$G_c(s) = K_s s + K_1 = K_2 \left(s + \frac{K_1}{K_2} \right) \quad (5.23)$$

Nilai $\frac{K_1}{K_2}$ yang merupakan K_p , sama dengan negatif dari *compensator zero*. Sementara itu K_2 adalah nilai *gain compensator K*, sehingga dapat dianggap sebagai K_d . Berdasarkan hubungan tersebut dapat diketahui nilai K_p dan K_d masing-masing sebesar 365,599 dan 68,67.

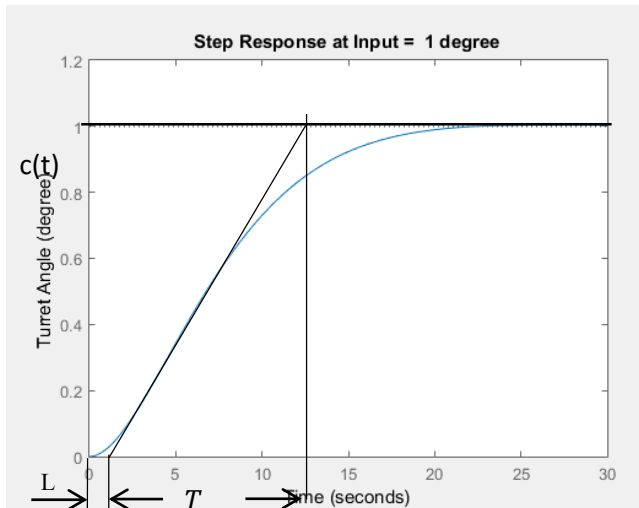
Hasil optimal yang memenuhi kedua kriteria perancangan diperoleh pada *gain K* sebesar 173,83, dengan %overshoot sebesar 19,9% dan settling time 0,697 detik. Berdasarkan persamaan 4.44, nilai K_p dan K_d diperoleh masing-masing sebesar 925,47 dan 173,83. Grafik respons optimal ditunjukkan pada gambar 5.8.



Gambar 5.8 Grafik respons optimal

5.3. Metode Ziegler-Nichols

Metode *tuning* Ziegler-Nichols adalah salah satu metode *tuning* kontrol PID yang digunakan secara luas di industri. Metode ini menggunakan parameter *delay time* (L) dan *time constant* (T) untuk menentukan nilai K_p , T_i dan T_d .



Gambar 5.9 Penentuan *delay time* dan *time constant*

Delay time $L = 1,15$ s dan *time constant* $T = 11,53$ s diperoleh dengan menggunakan perbandingan skala. Persamaan kontroler PID untuk metode *Ziegler-Nichols* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} G_{PID}(s) &= K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) & (5.24) \\ &= 1,2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2L s} + 0,5L s \right) \end{aligned}$$

$$G_{PID}(s) = 0,6T \frac{\left(s + \frac{1}{L}\right)^2}{s} \quad (5.25)$$

Dari persamaan 5.25, diketahui bahwa kontrol PID memiliki *pole* pada titik origin dan dua titik *zero* pada $s = -\frac{1}{L}$.

$$\sigma_{z_1, z_2} = -\frac{1}{L} = -\frac{1}{1,15} = -0,869 \quad (5.25)$$

Berdasarkan perumusan pada tabel 2.2 untuk kontrol PID, nilai K_p , T_i dan T_d dapat ditentukan sebagai berikut:

$$K_p = 1,2 \frac{T}{L} = 1,2 \frac{11,53}{1,15} = 12,03 \quad (5.26)$$

$$T_i = 2L = 2 \times 1,15 = 2,3 \quad (5.27)$$

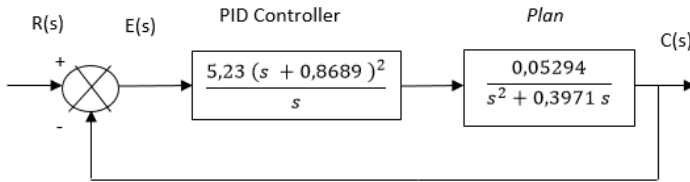
$$T_d = 0,5L = 0,5 \times 1,15 = 0,575 \quad (5.28)$$

Persamaan (5.26), (5.27) dan (5.28) kedalam persamaan 5.24, sehingga fungsi transfer kontrol PID menjadi:

$$G_{PID}(s) = 12,03 \left(1 + \frac{1}{2,3s} + 0,575s \right)$$

$$G_{PID}(s) = \frac{5,23 (s + 0,8689)^2}{s} \quad (5.29)$$

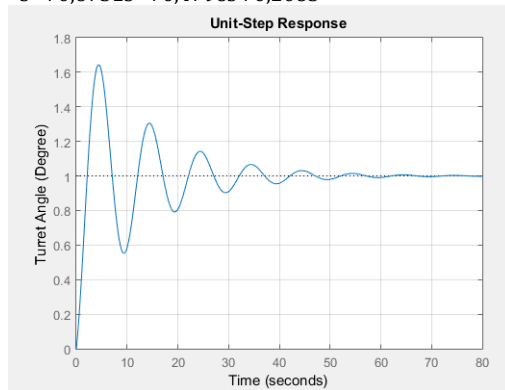
Blok diagram sistem azimuth dengan kontrol PID yang diberikan, ditunjukkan pada gambar 5.10.



Gambar 5.10 Blok diagram sistem dengan kontrol PID metode 1 Ziegler-Nichols

Sementara bentuk ekuivalen *closed-loop* ($C(s)/R(s)$) menjadi:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0,276s^2 + 0,4796s + 0,2083}{s^3 + 0,6731s^2 + 0,4796s + 0,2083} \quad (5.30)$$



Gambar 5.11 Step respons sistem dengan *tuning* PID Ziegler-Nichols

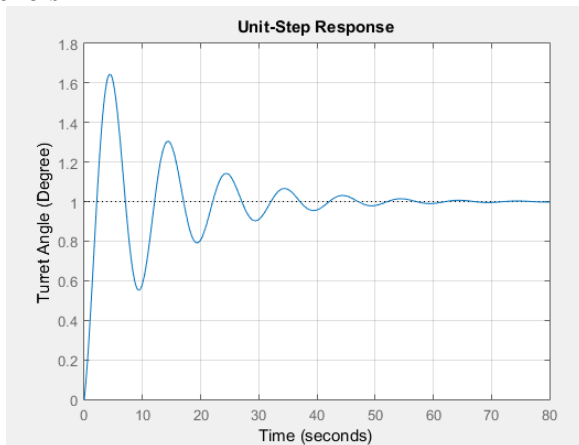
Gambar 5.11 menunjukkan respons sistem dengan metode *tuning* Ziegler-Nichols. Dapat dilihat bahwa %*Overshoot* mencapai 64,5% dan *settling time* selama 49,9 detik. Metode *tuning* ini justru menghasilkan respons sistem yang lebih buruk

dari respon awal dengan *%Overshoot* tidak ada dan *settling time* hanya 20 detik. Tabel 5.2 menunjukkan parameter yang diperoleh dengan metode *tuning* Ziegler-Nichols.

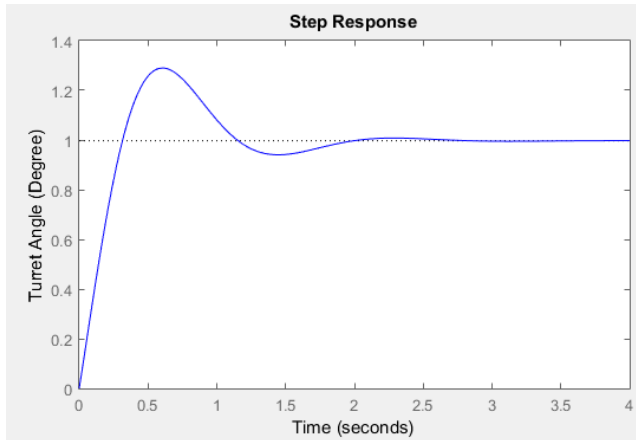
Tabel 5.2 Respon Sistem Azimuth Turret-Gun metode Ziegler-Nichols

	<i>Uncompensated</i>	<i>PID Compensated</i>
K_p	1	12,03
K_i	0	5,23
K_d	0	20,92
ζ	0,863	0,138
ω_n	0,23	0,579
<i>%OS</i>	0	64,5%
T_s	18,7	49,9
T_p	11,8	4,42
Steady State Error (%)	0	0

5.4. Perbandingan antara Metode *Root-locus* dan Ziegler-Nichols



Gambar 5.12 Grafik respons metode Ziegler-Nichols.



Gambar 5.13 Grafik respons metode Root-Locus.

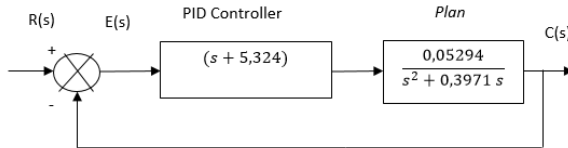
Gambar 5.12 dan 5.13 menunjukkan grafik respons sistem dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols dan Root-Locus. Dapat dilihat bahwa metode Root-Locus menunjukkan respons yang lebih baik terhadap metode Ziegler-Nichols. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *settling time* metode Root-Locus selama 1,74 detik dan %OS sebanyak 29,9%, berbeda dengan metode Ziegler-Nichols yang menghasilkan *settling time* selama 49,9 detik dan %*Overshoot* sebanyak 64,5%.

Berdasarkan kriteria desain dan batasan masalah penelitian, metode Root-Locus menghasilkan respons yang sesuai kriteria desain. *Settling time* sudah memenuhi persyaratan dibawah 2 detik meskipun %*Overshoot* bernilai 29,9%, sehingga metode ini dapat digunakan untuk perancangan sistem kontrol gerak turret sumbu azimuth.

BAB VI ANALISA KESTABILAN DAN SIMULASI

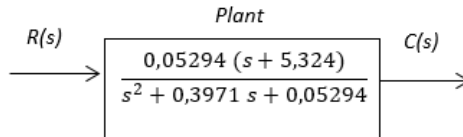
6.1. Kriteria Routh-Hurwitz

Kriteria Routh-Hurwitz merupakan salah satu metode pengujian kestabilan sistem kontrol yang memperhatikan jumlah *pole* dalam suatu sistem. Jumlah *pole* dapat diketahui berdasarkan koefisien penyebut (*denominator*) fungsi transfer sistem. Ada tidaknya *pole* pada daerah sebelah kanan sumbu imajiner menentukan stabil atau tidaknya suatu sistem.



Gambar 6.1 Sistem gerak sumbu azimuth turret dengan *PD compensator*.

Gambar 6.1 merupakan model blok diagram dari sistem azimuth yang menggunakan metode *root-locus* untuk menentukan *gain* dari kontrol PD. Blok diagram tersebut lalu diubah menjadi bentuk blok diagram sederhana.



Gambar 6.2 Blok diagram sederhana sistem azimuth dengan *PD compensator*

Setelah blok diagram diubah ke dalam bentuk paling sederhana seperti pada gambar 6.1, selanjutnya fungsi transfer sistem disusun kedalam tabel Routh-Hurwitz seperti pada gambar 6.2.

Routh-Hurwitz Table:

a =

1.0000	0.0529
0.3971	0
0.0529	0

Gambar 6.3 Hasil uji kriteria routh-hurwitz pada sistem tanpa *feedback*

Dari gambar 6.3 dapat dilihat bahwa tidak ada perubahan tanda positif menjadi negatif dan sebaliknya pada kolom paling kiri. Hal ini menunjukkan bahwa semua *pole* berada pada daerah bagian kiri pada sumbu imajiner. Apabila semua *pole* berada pada daerah kiri sumbu imajiner, sistem tersebut stabil.

Sementara untuk pengujian Routh-Hurwitz untuk metode *tuning* Ziegler-Nichols, persamaan 5.30 digunakan untuk membuat tabel routh-hurwitz.

Routh-Hurwitz Table:

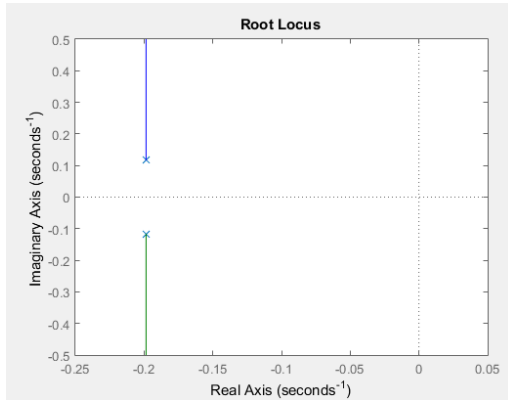
a =

1.0000	66.3980
66.7951	0
66.3980	0

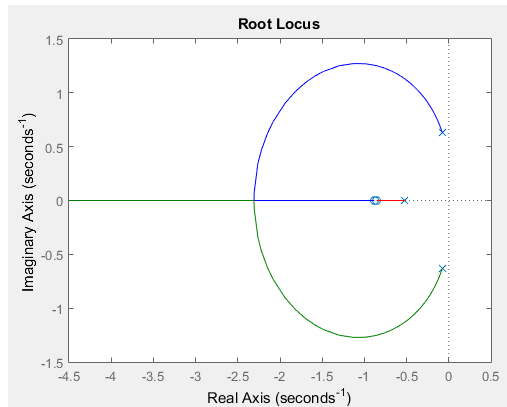
Gambar 6.4 Tabel Routh-Hurwitz untuk kontrol PID metode *tuning* Ziegler-Nichols

Gambar 6.4 menunjukkan bahwa hasil *tuning* dengan metode Ziegler-Nichols. Pada kolom pertama tidak ada perubahan tanda positif menjadi negatif atau sebaliknya. Hal ini menunjukkan bahwa semua *pole* berada pada daerah bagian kiri pada sumbu imajiner. Apabila semua *pole* berada pada daerah kiri sumbu imajiner, sistem tersebut stabil.

6.2. Metode *Root-locus*



Gambar 6.5 Sketsa *root-locus* untuk metode *tuning root-locus*



Gambar 6.6 Sketsa *root-locus* untuk metode *tuning Ziegler-Nichols*

Gambar 6.5 dan 6.6 merupakan sketsa *root-locus* untuk metode *tuning root-locus* dan *Ziegler-Nichols*. Kedua sketsa tersebut menampilkan akar-akar *pole* yang bernilai negatif dan kompleks. Artinya pada saat sistem diberikan *step input*, responsnya menunjukkan osilasi yang semakin lama akan semakin mengecil sehingga akhirnya menjadi stabil.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari pembahasan dalam tugas akhir perancangan sistem kontrol gerak turret-*gun* sumbu azimuth ini adalah sebagai berikut:

Berdasarkan kriteria perancangan, respons yang dihasilkan dengan metode *tuning root-locus* dapat dipilih karena memenuhi syarat utama yakni *settling time* dibawah 2 detik. Respons optimal yang memenuhi kedua kriteria perancangan diperoleh dengan nilai gain proporsional sebesar 925,47 dan gain derivatif sebesar 173,83. Respons yang dihasilkan memiliki *%Overshoot* sebesar 19,9%, *settling time* selama 0,697 detik serta *steady-state error* sebesar 0.

7.2. Saran

Disarankan melakukan metode *tuning* selain Root-Locus dan Ziegler-Nichols untuk pengembangan sistem kontrol gerak turret sumbu azimuth lebih lanjut.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Skrip Matlab:

1. Mengubah State-space menjadi Fungsi Transfer

```
A = [0 1;0 -0.397074882];
B = [0; 0.052943318];
C = [1 0];
D = 0;

[num,den] = ss2tf(A,B,C,D);
T = tf(num,den);
T
```

2. Uji Keterkontrolan dan keteramatan

```
A = [0 1;0 -0.397074882];
B = [0; 0.052943318];
C = [1 0];
D = 0;

% Check Controllability and Observability of
% a 2nd order System
% Given -----
-----
MatrixA = [A];
MatrixB = [B];
MatrixC = [C];
MatrixD = [D];
% Objective -----
-----
% 1) To Find Controllable Matrix Qc, its
rank and check controllability
% 2) To Find Observable Matrix Qb, its rank
and check observability
%-----
-----
```

```

% Controllable Matrix -----
-----
Qc = ctrb(MatrixA,MatrixB);
rankQc = rank(Qc);
disp('Controllable Matrix is Qc = ');
disp(Qc);
if(rankQc == ndims(MatrixA))
disp('Given System is Controllable. ');
else
disp('Given System is Uncontrollable');
end
% Observable Matrix -----
-----
Qb = obsv(MatrixA, MatrixC);
rankQb = rank(Qb);
disp('Observable Matrix is Qb = ');
disp(Qb);
if(rankQb == ndims(MatrixA))
disp('Given System is Observable. ');
else
disp('Given System is Unobservable');
end

```

3. Step Response Ziegler Nichols

```

numerator=[0.276 0.4796 0.2083];
denominator = [1 0.6731 0.4796 0.2083];
step(numerator,denominator)
grid
title('Unit-Step Response')

```

4. Uji Stabilitas Routh-Hurwitz

```

clc;
disp('          ')

```

```

D=input('Input coefficients of characteristic
equation,i.e:[an an-1 an-2 ... a0]= ');
l=length (D);

disp('
')
disp('-----
-')
disp('Roots of characteristic equation is:')
roots(D)

%%=====Program
Begin=====

% -----Begin of Bulding array-
-----
if mod(l,2)==0
    m=zeros(l,l/2);
    [cols,rows]=size(m);
    for i=1:rows
        m(1,i)=D(1,(2*i)-1);
        m(2,i)=D(1,(2*i));
    end
else
    m=zeros(l,(l+1)/2);
    [cols,rows]=size(m);
    for i=1:rows
        m(1,i)=D(1,(2*i)-1);
    end
    for i=1:((l-1)/2)
        m(2,i)=D(1,(2*i));
    end
end

end

for j=3:cols

    if m(j-1,1)==0
        m(j-1,1)=0.001;
    end
end

```

```

        for i=1:rows-1
            m(j,i)=(-1/m(j-1,1))*det([m(j-2,1)
m(j-2,i+1);m(j-1,1) m(j-1,i+1)]);
        end
    end

disp('-----The Routh-Hurwitz array is:----
----'),m
% -----End of Bulding array---
-----

% Checking for sign change
Temp=sign(m);a=0;
for j=1:cols
    a=a+Temp(j,1);
end
if a==cols
    disp('          ----> System is Stable <--
---')
else
    disp('          ----> System is Unstable
<-----')
end
end

```

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ogata, K., (2010), "***Modern Control Engineering***", 5th Edition, Prentice Hall, New Jersey.
- [2] Nise, N.S., (2011), "***Control System Engineering***", 6th Edition, John Wiley & Sons. Inc,
- [3] Johnson, M.A. dan Moradi, M.H., (2005), "***PID Control: New Identification and Design Methods***", Springer, London.
- [4] Subiono, (2013), "***Sistem Linear dan Kontrol Optimal***", Jurusan Matematika FMIPA-ITS, Surabaya.
- [5] Singh, A., Kumawat, V., dan Kumar, B., (2013), "***PID Controller of Speed and Torque of ServoMotor Using MATLAB***", IJRITCC, pp 726-729.
- [6] Nasyir, M. T., Nurhadi, H., Pramujati, B., dan Pitowarno, E. (2014), "***Design and Realization of An Automatic Turret Gun***", IES.
- [7] Nasyir, M. T., (2014), "***Aplikasi Active Force Control pada Turret-Gun pada Kendaraan Tempur Darat***", Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.
- [8] Musonnifah , S., (2016), "***Resolve Acceleration Control (RAC) dan Active Force Control (AFC) pada Sistem Turret-Gun Kaliber 20 Milimeter***", Jurusan Matematika FMIPA-ITS, Surabaya.

BIODATA PENULIS



Danu Wisnu Wardhana, lahir di kota Bandung 24 Februari 1993 merupakan anak ke dua dari dua bersaudara pasangan Bapak Ir. Rahmat Basuki dan Ibu Ir. Sri Enny Triwidiastuti, MT., serta adik dari Sara Kusuma Wardhani, ST. Penulis mengenyam pendidikan di SD Dharma Karya UT, kemudian melanjutkan studi selama 1,5 tahun di SMP Al-Azhar BSD lalu pindah ke SMPN 85 Jakarta, lalu melanjutkan studi di SMAN 34 Jakarta. Pada saat menulis biodata ini penulis sedang menuntaskan laporan tugas akhir sebagai mahasiswa S1 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember di Surabaya.

Selama Kuliah, banyak hal yang dilakukan penulis antara lain menjadi asisten praktikum di laboratorium Perancangan dan Pengembangan Produk, menjadi panitia dalam berbagai kegiatan, serta menjabat sebagai Kepala Divisi Persewaan dan Perawatan di organisasi Mesin Music Club periode 2012/2013. Penulis dapat dihubungi melalui email: danu.wisnum53@gmail.com