

Perancangan Sistem Kontrol PID untuk Pengendali Sumbu Elevasi *Turret-gun* Kaliber 20 Milimeter

Dimas Kunto, Arif Wahjudi, dan Hendro Nurhadi

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

arif_w@me.its.ac.id

Abstrak—Pertahanan negara pada hakikatnya adalah segala upaya pertahanan yang bersifat semesta yang didasarkan pada kesadaran atas hak dan kewajiban warga negara serta keyakinan pada kekuatan sendiri dengan tujuan untuk menjaga dan melindungi kedaulatan negara, keutuhan wilayah NKRI dan keselamatan segenap bangsa. Salah satu alat pendukung pertahanan yaitu senjata laras panjang, *Turret-gun*. *Turret-gun* memiliki dua sumbu pergerakan rotasi, yaitu sumbu gerak *azimuth* dan *elevasi*. Adapun parameter-parameter yang perlu dipertimbangkan dalam sistem kontrol *Turret-gun* yaitu dimensi *Turret-gun* dan ukuran peluru. Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam merancang pengendali PID *Turret-gun* kaliber 20 mm ini diawali dengan studi literatur serta studi lapangan mengenai mekanisme dan parameter-parameter yang terdapat pada *Turret-gun*. Setelah itu dilakukan perancangan transmisi dan sistem kontrol *Turret-gun* untuk dievaluasi grafik responnya. Hasil evaluasi tersebut selanjutnya akan digunakan sebagai acuan untuk merancang pengendali PID yang sesuai. Selanjutnya pengendali PID yang telah dirancang lalu disimulasikan, sehingga menghasilkan grafik respon yang sesuai dengan kriteria yang dibutuhkan. Hasil yang telah didapatkan dari penelitian ini adalah konstanta PID yang direkomendasikan untuk K_p , K_I , dan K_D secara berturut-turut adalah sebesar 23061.024, 37820.07 dan 3515.4 yang menghasilkan *transient response* dengan nilai *overshoot* sebesar 19.9 % , *steady state error* sebesar 0 % serta *settling time* sebesar 0.935 detik. Hasil analisa kestabilan untuk sistem kontrol dengan konstanta PID tersebut menunjukkan bahwa sistem kontrol telah stabil, baik menggunakan metode *Root Locus* maupun metode *Routh-Hurwitz*.

Kata Kunci—Elevasi, PID, *Root Locus*, *Turret-gun*, *Ziegler-Nichols*

I. PENDAHULUAN

PERTAHANAN negara dapat didukung dengan kecanggihan sarana dan prasarana. Salah satu contoh alat utama sistem pertahanan (Alutsista) yang telah didukung oleh sarana dan prasarana yang canggih *Turret-gun*. *Turret-gun* adalah sistem senjata laras panjang yang dapat bergerak untuk mengenai target dengan pergerakan arah dan sudut sesuai dengan target, yang dioperasikan menggunakan *remote control*. Alasan utama diciptakan *turret-gun* otomatis adalah untuk melindungi operator *turret-gun* dari ancaman dan bahaya musuh saat berperang. Besar kecilnya dimensi dari senapan bergantung pada ukuran (kaliber) peluru.

Sistem *turret-gun* mempunyai 2 sumbu gerak, yaitu sumbu *azimuth* dan sumbu *elevasi*. Sumbu *azimuth* meliputi gerak

rotasi *turret* sebesar 360° terhadap horizontalnya, sedangkan sumbu *elevasi* meliputi gerak rotasi laras senjata 70° terhadap vertikalnya. Dalam penelitian ini yang menjadi fokus utama adalah perancangan kendali pada gerak *elevasi* laras senjata. Hal yang turut dipertimbangkan dalam perancangan kendali gerak *elevasi turret-gun* ini salah satunya adalah ukuran peluru, karena ukuran peluru menjadi faktor yang mempengaruhi dimensi dan inersia dari laras senapan. Inersia yang besar membuat sistem sulit bergerak dengan akurat dan presisi, sehingga dibutuhkan pengendali yang sesuai untuk menyelesaikan masalah tersebut.

Salah satu metode yang telah digunakan dalam bidang kontrol adalah pengendali PID. Penelitian sebelumnya oleh [3] membandingkan PID dengan metode yang lain seperti *Resolve Motion Control* (RAC) dan *Acceleration Force Control* (AFC). Kemudian [3] juga mengembangkan lagi metodenya dengan menggabungkan RAC dengan AFC yang menggunakan PID dengan perkiraan matriks inersia pada metode AFC menggunakan metode *Crude Approximation* (CA), namun pengaturan parameter PID masih kurang optimal. Penelitian yang dilakukan oleh [3] adalah perancangan kendali RAC, AFC dan PID pada *Turret-gun* kaliber 12 milimeter. Sehingga penelitian kali ini ingin menerapkan metode pengendali PID pada sistem gerak *elevasi turret-gun* kaliber 20 milimeter secara optimal.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Studi Literatur dan Lapangan

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, literatur dan jurnal ilmiah yang berkaitan dengan penelitian. Selain itu juga dilakukan studi literatur mengenai teori-teori metode kontrol PID yang akan digunakan serta analisa kestabilan sistem dengan menggunakan *software* MATLAB.

Studi lapangan dilakukan dengan cara mengumpulkan data-data mengenai *turret-gun* yang akan dikendalikan, dengan cara mengamati dan mengambil data berupa model 3D dari *Turret-gun* dan spesifikasi serta dimensinya di PT.PINDAD.

B. Perumusan Masalah

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

C. Perancangan Transmisi Gerak Sumbu Elevasi

Pada tahap ini, perancangan transmisi gerak *turret-gun* untuk sumbu elevasi dilakukan sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan nantinya. Pemilihan spesifikasi dan pembuatan setiap komponen transmisi dengan mempertimbangkan ketersediaan di pasaran agar proses pembuatannya lebih mudah.

D. Perancangan Sistem Kontrol Gerak Sumbu Elevasi

Tahap ini adalah proses dimana perancangan model matematis sistem dan kontrol untuk gerak sumbu elevasi dilakukan. Perancangan kontrol menggunakan metode kontrol PID berdasarkan masukan berupa posisi dan menggunakan data dari motor, transmisi dan sistem *turret* keseluruhan hingga mendapatkan keluaran awal.

E. Pengujian Kestabilan Sistem pada Gerak Sumbu Elevasi

Pada tahap ini, pengujian kestabilan dari rancangan kontrol yang telah didapatkan di awal 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.

F. 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.

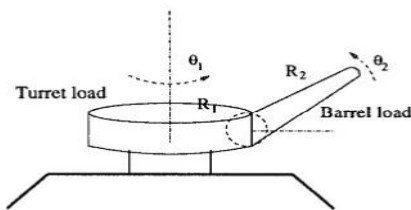
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Model Turret-gun

Rujukan [4] memodelkan *turret-gun* secara matematis berdasarkan persamaan dasar untuk gerak dinamis (*dynamic equation*) sebagai berikut:

$$D\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + G = \tau \tag{1}$$

Dimana *D* adalah momen inersia, *C* adalah efek gaya coriolis dan sentrifugal, sedangkan *G* pengaruh gravitasi. Gambar 1 menunjukkan penyederhanaan dari bentuk *turret-gun*.



Gambar 1. Sistem *Turret-gun* [3]

Gambar 1 menunjukkan bahwa sistem *turret-gun* terdiri dari *turret* yang memiliki sumbu pergerakan rotasi secara *azimuth*, dan *gun* yang memiliki sumbu pergerakan rotasi secara *elevasi*.

Beberapa persamaan dinamis yang dapat dirumuskan dari Gambar 1 antara lain:

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

$$D_{22} = \frac{1}{3}m_2R_2^2 \tag{3}$$

$$C_{11} = -m_2R_1R_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 \tag{4}$$

$$C_{12} = -\frac{1}{3}m_2R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_1 \tag{5}$$

$$C_{21} = -\frac{1}{2}(-m_2R_1R_2 \sin(\theta_2) - \frac{1}{3}m_2R_2^2 \sin(2\theta_2)) \dot{\theta}_1 \tag{6}$$

$$G_{21} = \frac{1}{2}m_2gR_2 \cos\theta_2 \tag{7}$$

$$C_{22} = G_{11} = 0 \tag{8}$$

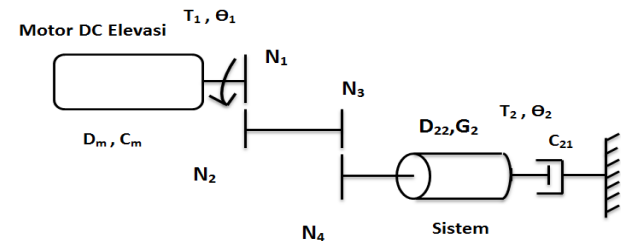
Dengan mengacu pada (1), maka dapat kita bentuk menjadi 9) dan (10) yang menyatakan hubungan percepatan sudut ($\ddot{\theta}$) dan torsi (τ) untuk tiap komponen *turret* dan *gun*.

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{\tau_1 - C_{11}}{D_{11}} \tag{9}$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{\tau_2 - C_{21} - G}{D_{22}} \tag{10}$$

B. Model Matematis Sistem kontrol Elevasi Turret Gun

Sistem *turret-gun* pada penelitian ini tersusun dari motor DC yang dihubungkan melalui sistem transmisi ke *body* dari *turret-gun*.



Gambar 2. *Free Body Diagram* Sistem Elevasi *Turret-gun*

Masing-masing parameter *turret gun* sistem elevasi ditentukan sebagai berikut:

- Massa *gun*, $m_2 = 110 \text{ kg}$
- Panjang *gun*, $R_2 = 2,76 \text{ m}$
- Transmisi 1, $N_1 = 16$
- Transmisi 2, $N_2 = 64$
- Transmisi 3, $N_3 = 1$
- Transmisi 4, $N_4 = 12,48$
- Momen inersia motor DC, $D_m = 0,01 \text{ Kg/m}^2$
- *Voltage constant* motor DC, $K_b = 85 \text{ V/Krpm}$
- *Torque constant* motor DC, $K_t = 0,82 \text{ Nm/A}$
- *Armature resistance*, $R_a = 0,61 \text{ ohm}$
- Gravitasi, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

Gambar 2 menunjukkan sistem tersebut memiliki 2 parameter untuk inersia (*D*) dan *damping* (*C*) dari masing-masing bagian *turret-gun* dan motor DC, Sehingga dibutuhkan penyederhanaan dari 2 parameter tersebut untuk menghasilkan konstanta ekuivalen yang meliputi keseluruhan sistem, yaitu D_{eq} dan C_{eq} , yang dirumuskan pada (11) dan (12). Sedangkan pengaruh gravitasi ekuivalen (G_{eq}) besarnya sama dengan pengaruh gravitasi yang dialami *gun* (G_2) sehingga dapat dirumuskan seperti (13).

$$D_{eq} = D_m \left(\frac{N_2 N_4}{N_1 N_3} \right)^2 + D_{22} \tag{11}$$

$$C_{eq} = C_m \left(\frac{N_2 N_4}{N_1 N_3} \right)^2 + C_{21} \quad (12)$$

$$G_{eq} = G_2 \quad (13)$$

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,

$$R_a I_a(t) + L_a \dot{I}_a(t) + V_b(t) = E_a(t) \quad (14)$$

Dimana *back electromotive force* dan *armature current* adalah,

$$V_b(t) = K_b \dot{\theta}_2(t) \quad (15)$$

$$I_a(t) = \frac{1}{K_t} T(t) \quad (16)$$

K_t adalah konstanta torsi dari motor DC (*motor torque constant*). Untuk mendapatkan *transfer function* dari motor, maka (15) dan (16) disubstitusikan ke dalam (14), menghasilkan:

$$\frac{(R_a + L_a)T(t)}{K_t} + K_b \dot{\theta}_2(t) = E_a(t) \quad (17)$$

Persamaan yang menghubungkan antara torsi dan perubahan sudut dirumuskan sebagaimana pada (10),

$$T_2 = D_{eq} \ddot{\theta}_2 + C_{eq} \dot{\theta}_1 + G_{eq} \quad (18)$$

dengan nilai $\dot{\theta}_1$ adalah sama dengan nol karena sistem *azimuth* diasumsikan tidak bergerak (diam), maka

$$T_2(t) = D_{eq} \ddot{\theta}_2(t) + G_{eq}(t) \quad (19)$$

Apabila (19) disubstitusikan ke (17),

$$\frac{(R_a + L_a)(D_{eq} \ddot{\theta}_2 + G_{eq})}{K_t} + K_b \dot{\theta}_2 = E_a(t) \quad (20)$$

Dengan induktansi *armature* (L_a) diabaikan karena memiliki harga yang sangat kecil untuk motor DC, maka (20) menjadi:

$$\frac{R_a}{K_t} D_{eq} \ddot{\theta}_2 + K_b \dot{\theta}_2 + \frac{G_{eq}}{K_t} R_a = E_a(t) \quad (21)$$

$$\frac{R_a}{K_t} D_{eq} \ddot{\theta}_2 + K_b \dot{\theta}_2 + \frac{\frac{1}{2} m_2 g R_2 \cos \theta_2}{K_t} R_a = E_a(t) \quad (22)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{E_a K_t - K_b \dot{\theta}_2 K_t - \frac{1}{2} m_2 g R_2 \cos \theta_2 R_a}{R_a D_{eq}} \quad (23)$$

Persamaan (22) merupakan persamaan sistem dengan kondisi nonlinear. Persamaan ini selanjutnya dilinearisasikan dengan metode linearisasi *Jacobian*. Maka ditentukan,

Misal $\theta_2 = x_1$
 $\dot{x}_1 = x_2$ (24)

$$\dot{x}_2 = \frac{E_a K_t - K_b K_t x_2 - \frac{1}{2} m_2 g R_2 R_a \cos x_1}{R_a D_{eq}} \quad (25)$$

Persamaan (24) dan (25) merupakan persamaan diferensial nonlinear yang akan dilinearisasi di sekitar titik kesetimbangan yang dirumuskan sebagai berikut:

$$f_1(x_1, x_2) = x_2 = 0 \quad (26)$$

$$f_2(x_1, x_2) = \frac{E_a K_t - K_b K_t x_2 - \frac{1}{2} m_2 g R_2 R_a \cos x_1}{R_a D_{eq}} = 0 \quad (27)$$

Pada saat kondisi setimbang, *gun* diasumsikan dalam keadaan diam atau memiliki kecepatan $(x_2) = 0$, Sedangkan untuk $x_1 = \arccos \frac{2E_a K_t}{m_2 g R_2 R_a}$. Maka, *gun* akan setimbang di posisi manapun pada batas range antara $\theta_2 \in \left[-10, \frac{\pi}{3}\right]$, sehingga nilai $\arccos \theta_2 \in \left[\frac{1}{2}, 1\right]$. Titik kesetimbangan posisi *gun* dimisalkan adalah α_2 .

$$J(\bar{x}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} \quad (28)$$

Persamaan (28) adalah persamaan untuk matriks *Jacobian*, dimana \bar{x} adalah titik kesetimbangan dari sistem. Linearisasi di sekitar titik kesetimbangan menjadi sebagai berikut:

$$J(\bar{x}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\frac{1}{2} m_2 g R_2 R_a \sin \alpha_2}{R_a D_{eq}} & -\frac{K_b K_t}{R_a D_{eq}} \end{pmatrix} = A \quad (29)$$

Persamaan (29) merupakan matriks A untuk persamaan model *state space* $\dot{x} = Ax + Bu$ dan $y = Cx + Du$. Matriks B, C dan D ditentukan dengan cara yang sama sehingga didapatkan matriks sebagai berikut:

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K_t}{R_a D_{eq}} \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$C = (1 \ 0) \quad (31)$$

$$D = (0) \quad (32)$$

Titik keseimbangan ditentukan pada $\theta_2 = \alpha_2 = 30^\circ$, maka apabila masing-masing parameter sistem dimasukkan akan menghasilkan matriks dan model *state space* sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2,467 & -0,379 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0,004459 \end{bmatrix} E_a(t) \quad (33)$$

$$[y] = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Persamaan *state space* tersebut kemudian dirubah kedalam bentuk *transfer function* serta diperiksa *controllability* dan *observeability* melalui program desain kontrol, didapatkan bahwa sistem telah dapat dikontrol (*controllable*) dan dapat teramati (*observable*) seperti pada Gambar 3 dan respon *transient* awal sistem seperti pada Gambar 4.

```

Transfer function:
0.004459
-----
s^2 + 0.379 s + 2.467

Controllable Matrix is Qc =
0 0.0045
0.0045 -0.0017

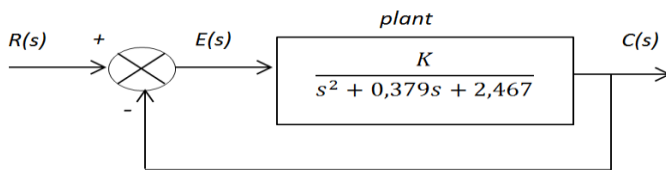
Given System is Controllable.
Observable Matrix is Qb =
1 0
0 1

Given System is Observable.
    
```

Gambar 3. Hasil Transfer Function

C. Desain PID dengan Metode Root Locus

Kriteria desain utama yang ditentukan untuk sistem controller antara lain adalah memiliki overshoot (OS) tidak lebih dari 20 %, dan settling time (T_s) tidak lebih dari 2 detik serta tidak memiliki steady state error. Blok diagram untuk sistem kontrol turret-gun diilustrasikan pada gambar 4.



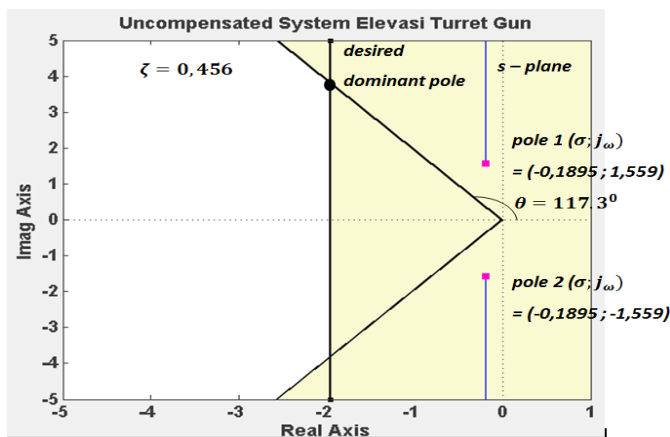
Gambar 4. Uncompensated Feedback Control System untuk Elevasi Turret-gun

Damping ratio (ζ) untuk overshoot sebesar 20 % didapatkan sebagai berikut,

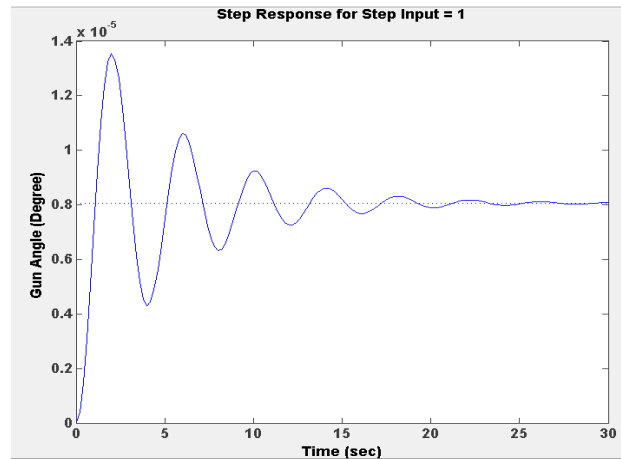
$$\zeta = \frac{-\ln(\frac{OS}{100})}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\frac{OS}{100})}} = \frac{-\ln(\frac{20}{100})}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\frac{20}{100})}} = 0,456 \quad (33)$$

Sudut yang dibentuk oleh garis overshoot (θ) dihitung melalui (34), dimana bagian sudut tersebut terlihat pada Gambar 5.

$$\theta = 180^\circ - \cos^{-1} \zeta = 117,3^\circ \quad (34)$$



Gambar 5. Root Locus untuk Uncompensated System Elevasi Turret-gun



Gambar 6. Grafik Respon Transient Uncompensated System Elevasi Turret-gun untuk Step Input = 1

Gambar 6 menunjukkan grafik respon transient uncompensated system elevasi turret-gun yang memiliki karakteristik sistem jauh dari kriteria desain yang diinginkan, sehingga diperlukan adanya penambahan compensator yang mengacu terhadap desired dominant pole.

Koordinat dari desired dominant pole untuk sumbu imajiner (imaginary axis) dan sumbu real (real axis) didapatkan sebagai berikut:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (35)$$

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta T_s} = \frac{4}{0,456(2)} = 4,386 \quad (36)$$

$$\omega_d = 4,386 \sqrt{1 - 0,456^2} = 3,9035 \quad (37)$$

$$\sigma = -\zeta \omega_n = -(0,456)(4,386) = -2 \quad (38)$$

Besar sudut dan koordinat dari PD compensator (real zero) terhadap titik desired dominant pole didapatkan dengan terlebih dahulu menghitung sudut masing-masing pole terhadap titik desired dominant pole.

$$\theta_1 = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{2,3445}{1,8105} \right) = 127,676^\circ \quad (39)$$

$$\theta_2 = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{5,4625}{1,8105} \right) = 108,337^\circ \quad (40)$$

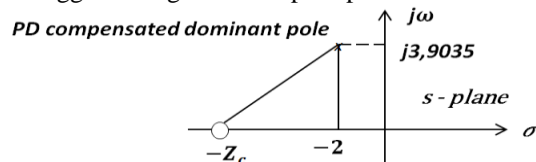
Maka sudut compensator zero (θ_z),

$$\theta_z - (\theta_1 + \theta_2) = (2k + 1)180^\circ ; k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (41)$$

$$k = 0 \quad (42)$$

$$\theta_z - (127,676^\circ + 108,337^\circ) = (2(0) + 1)180^\circ \quad (43)$$

Koordinat untuk compensator zero ($-Z_c$) dicari dengan menggunakan geometri seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Geometri Perhitungan dari PD Compensator Zero

Apabila dimisalkan letak kordinat untuk *compensator zero* adalah $-Z_c$, maka,

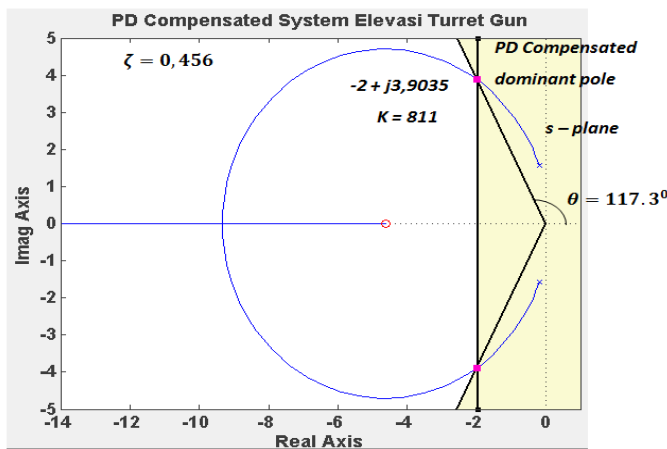
$$\frac{3,9035}{Z_c - 2} = \tan 56,013^\circ \tag{44}$$

$$Z_c = 4,6318 \tag{45}$$

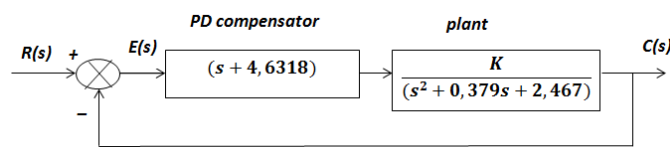
Maka persamaan *compensator* untuk PD Controller menjadi,

$$G_{PD}(s) = (s + 4,6318) \tag{46}$$

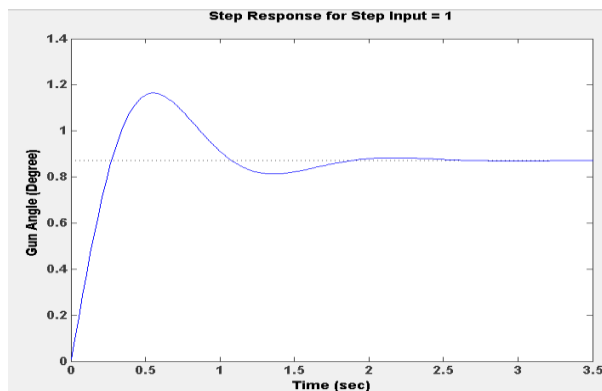
dengan *Root Locus* dan blok diagram serta respon *transient* untuk PD *Compensated system* dengan *gain* yang diperbesar sampai titik PD *dominant pole* seperti pada Gambar 8, 9 dan 10.



Gambar 8. *Root Locus* untuk PD *Compensated System* Elevasi Turret-gun



Gambar 9. Blok Diagram untuk PD *Compensated System* Elevasi Turret-gun



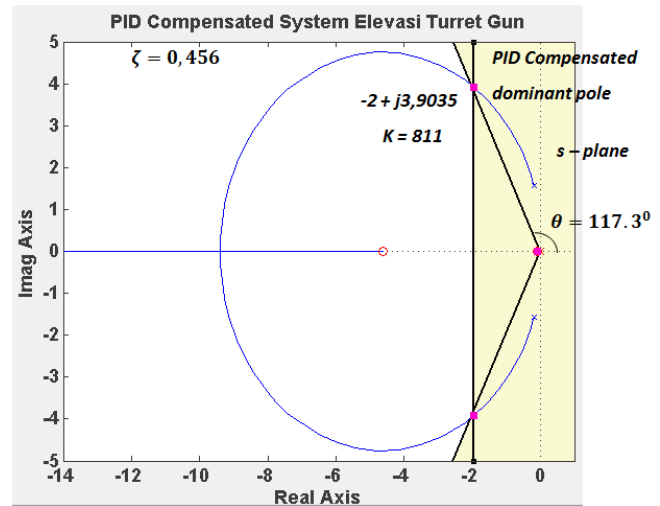
Gambar 10. Grafik Respon *Transient* PD *Compensated System* Elevasi Turret-gun untuk Step Input = 1

Dominant Poles	-	$-2 \pm j3,9035$
K	0,004459	811
ζ	0,126	0,456
ω_n	1,61	4,386
%OS	68,2	33,6
T_s	20,4	1,73
T_p	2	0,551
Zero	-	$-4,6318$
Steady State Error (%)	99,9	12,8

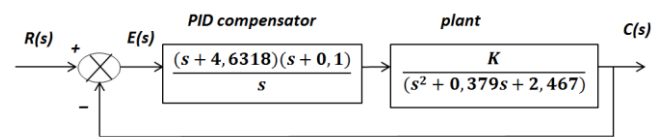
Tabel 1 menunjukkan bahwa sistem elevasi *turret-gun* masih memiliki *steady state error* sebesar 12,8 %. Rujukan [2] menjelaskan *kontroller* PI yang berfungsi untuk menghilangkan *steady state error*, diaplikasikan dengan menambahkan *pole* pada posisi *origin* serta *zero* pada sumbu real dengan sembarang posisi yang mendekati posisi *origin*, sehingga letak posisi *pole* dan *zero* baru yang ideal ditentukan dalam persamaan *PI compensator* sebagai berikut:

$$G_{PI}(s) = \frac{s + 0,1}{s} \tag{47}$$

Sehingga menghasilkan *Root Locus* dan blok diagram serta respon *transient* untuk PID *Compensated system* dengan *gain* yang diperbesar sampai titik PID *dominant pole* seperti pada Gambar 11, 12 dan 13.



Gambar 11. *Root Locus* untuk PID *Compensated System* Elevasi Turret-gun

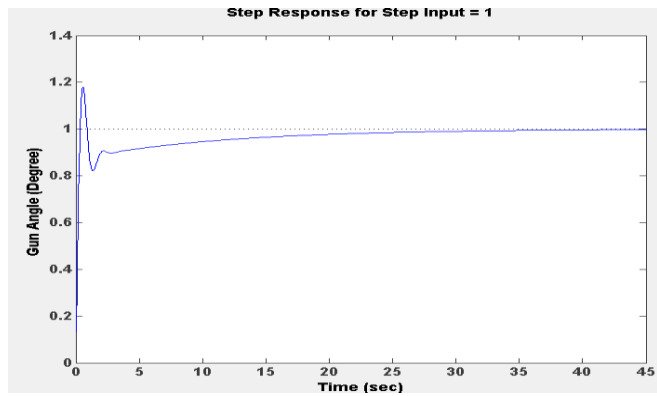


Gambar 12. Blok Diagram PID *Compensated System* Elevasi Turret-gun

Tabel 1.

Karakteristik Sistem untuk *Uncompensated* dan PD *Compensated* pada Metode *Root Locus*

	<i>Uncompensated</i>	PD <i>Compensated</i>
Plant and Compensator	$\frac{K}{s^2 + 0,379s + 2,467}$	$\frac{K(s + 4,6318)}{s^2 + 0,379s + 2,467}$



Gambar 13. Grafik Respon Transient PID Compensated System Elevasi Turret-gun untuk Step Input =1

Tabel 2

Karakteristik Sistem untuk PD Compensated dan PID Compensated pada Metode Root Locus

	PD Compensated	PID Compensated
Plant and Compensator	$\frac{K(s + 4,6318)}{s^2 + 0,379s + 2,467}$	$\frac{K(s + 4,6318)(s + 0,1)}{s(s^2 + 0,379s + 2,467)}$
Dominant Poles	$-2 \pm j3,9035$	$-2 \pm j3,9035$
K	811	811
ζ	0,456	0,456
ω_n	4,386	4,386
%OS	33,6	17,9
T_s	1,73	21,4
T_p	0,551	0,564
Zero	-4,6318	-4,6318; -0,1
Steady State Error (%)	12,8	0

Adapun konstanta K_P , K_I , dan K_D didapatkan sebagai berikut:

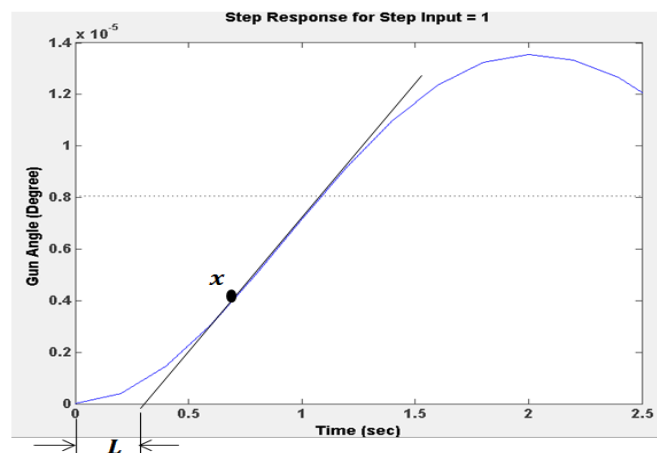
$$K_P = 4132,045 \quad (48)$$

$$K_I = 375,638 \quad (49)$$

$$K_D = 811 \quad (50)$$

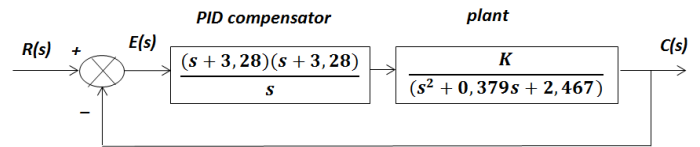
D.Desain PID dengan Metode Ziegler-Nichols

Desain PID dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols untuk step response (metode pertama) pada [1] diawali dengan menentukan delay time (L) seperti pada Gambar 14.

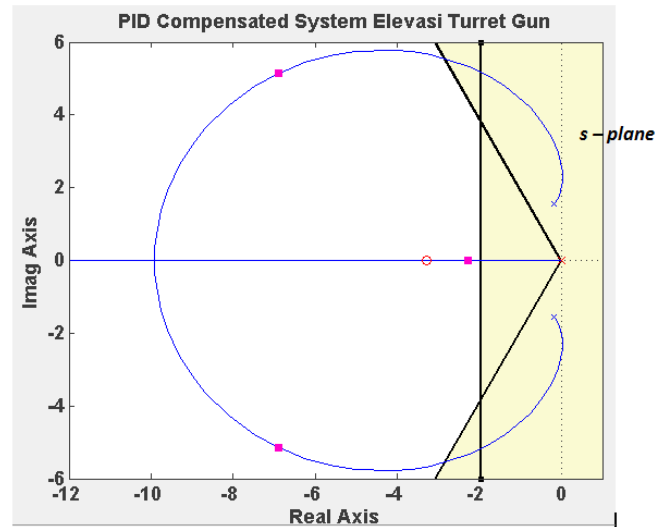


Gambar 14. Penentuan Delay Time (L)

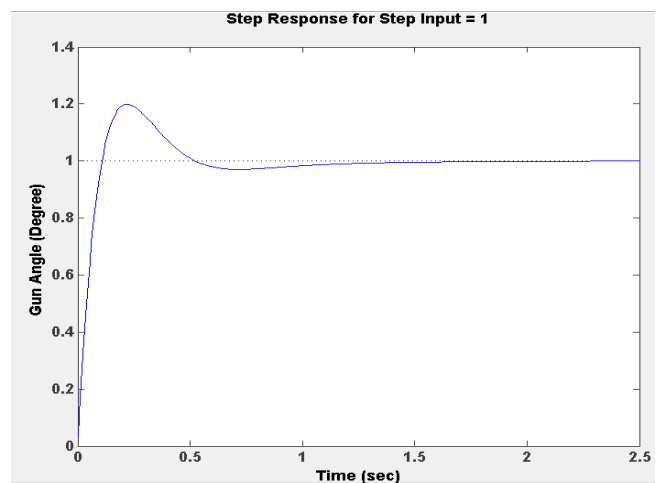
Nilai Delay time (L) didapatkan sebesar 0,3048 melalui program desain kontrol, maka letak koordinat 2 real zero compensator berada pada $\sigma_z = -\frac{1}{L} = -3,28$. Compensator tersebut akan menghasilkan blok diagram dan Root Locus serta respon transient untuk PID Compensated system dengan gain sebesar 3515,4 seperti pada Gambar 15, 16 dan 17.



Gambar 15. Blok Diagram PID Compensated System Elevasi Turret-gun



Gambar 16. Root Locus untuk PID Compensated System Elevasi Turret-gun



Gambar 17. Grafik Respon Transient PID Compensated System Elevasi Turret-gun untuk Step Input =1

Tabel 2

Karakteristik Sistem untuk Uncompensated dan PID Compensated pada Metode Ziegler-Nichols

	Uncompensated	PID Compensated
Plant and Compensator	$\frac{K}{s^2 + 0,379s + 2,467}$	$\frac{K(s + 3,28)(s + 3,28)}{s(s^2 + 0,379s + 2,467)}$
K	0,004459	3515,4
ζ	0,126	0,801
ω_n	1,61	8,59
%OS	68,2	19,9

T_s	20.4	0,935
T_p	2	0,221
Zero	-	-3,28, -3,28
Steady state error (%)	99.9	0

Adapun konstanta K_p , K_I , dan K_D didapatkan sebagai berikut:

$$K_p = 23061,024 \quad (51)$$

$$K_I = 37820,07 \quad (52)$$

$$K_D = 3515,4 \quad (53)$$

E. Analisa Kestabilan

Metode yang digunakan untuk menganalisa kestabilan sistem elevasi *turret-gun* untuk metode desain PID *Root Locus* dan *Ziegler-Nichols*, antara lain melalui interpretasi *Root Locus* dan metode *Routh-Hurwitz*. Interpretasi *Root Locus* pada gambar 13 dan 17 menunjukkan bahwa sistem *turret-gun* telah stabil dikarenakan *pole* sistem tidak ada yang berada pada daerah *right-half plane*. Sedangkan apabila dianalisa melalui metode *Routh-Hurwitz*, kedua sistem telah stabil karena menghasilkan *routh table* dengan koefisien yang tidak memiliki perubahan tanda.

Tabel 3
Routh Table untuk Metode Desain PID dengan *Root Locus*

s^3	1	4134,512
s^2	811,379	375,638
s^1	4134	0
s^0	375,6	0

Tabel 4
Routh Table untuk Metode Desain PID dengan *Ziegler Nichols*

s^3	1	23063,707
s^2	3515,779	37820,07
s^1	23053	0
s^0	37820	0

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan metode *Root Locus* yang menghasilkan konstanta K_p, K_I dan K_D berturut-turut sebesar 4132.045, 375.638 dan 811 mempunyai *transient response* yang belum memenuhi kriteria desain, sedangkan desain PID dengan metode *Ziegler-Nichols* yang menghasilkan konstanta K_p, K_I dan K_D berturut-turut sebesar 23061.024, 37820.07 dan 3515.4 telah menghasilkan *transient response* yang telah memenuhi kriteria desain. Apabila ditinjau dari kestabilannya, kedua metode telah menghasilkan sistem kontrol elevasi *turret gun* yang stabil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis D.K mengucapkan terima kasih kepada PT.PINDAD (Persero) yang telah memfasilitasi penulis dalam melakukan studi lapangan. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat dan kebaikan bagi banyak pihak.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Ogata, K., (2010), *Modern Control Engineering* Fifth Edition, Pearson Education, New Jersey.

[2] Norman, S. N., (2011), *Control Systems Engineering* Sixth Edition, John Wiley and Sons, California State Polytechnic University, Pomona.

[3] Nasyir, M. T. (2014), “Aplikasi Active Force Control pada *Turret-gun* pada Kendaraan Tempur Darat”, Thesis: Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

[4] Mushonnifah, S. (2016), “Resolve Acceleration Control (RAC) dan Active Force Control (AFC) pada Sistem *Turret-gun* Kaliber 20 Milimeter”, Thesis: Jurusan Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, belum dipublikasikan.