

Perancangan Sistem Kontrol PID Untuk Pengendali Sumbu *Azimuth Turret* Pada *Turret-gun* Kaliber 20mm

Danu Wisnu, Arif Wahjudi, dan Hendro Nurhadi

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: arif_w@me.its.ac.id

Abstrak—Pertahanan negara merupakan segala bentuk daya dan upaya oleh warga negara, dengan tujuan untuk melindungi dan menjaga kedaulatan negara. Salah satu faktor pendukung pertahanan negara di bidang teknologi adalah sistem *turret-gun*. Dimensi *turret-gun* disesuaikan dengan kebutuhan penggunaan. Semakin besar kaliber peluru maka semakin besar dimensi dan berat *turret-gun*, akibatnya *turret-gun* akan semakin sulit dikendalikan. Oleh karena itu diperlukan perancangan sistem kontrol khususnya kontrol PID yang sesuai. Langkah pertama dalam perancangan sistem kontrol adalah menentukan model matematis dari sistem *turret-gun*. Berikutnya adalah merancang sistem kontrol yang sesuai dengan menggunakan kontrol PID. Selanjutnya diakhiri dengan pengujian kestabilan dari sistem yang telah dikontrol tersebut. Hasil yang didapat berupa nilai *gain* proporsional, integral dan derivatif dari metode *tuning* yang dipakai untuk merancang kontrol PID dari sistem *turret-gun*. Nilai *gain* proporsional dan derivatif untuk mendapatkan respon yang memenuhi kriteria perancangan masing-masing sebesar 925,47 dan 173,83.

Kata Kunci—PID controller, root-locus, sistem kontrol, *turret-gun*, Ziegler-Nichols

I. PENDAHULUAN

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.

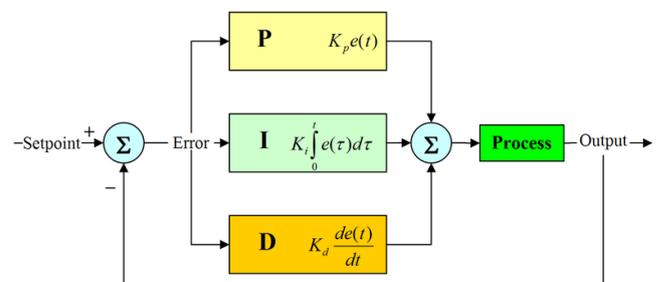
Salah satu metode pengendalian yang telah digunakan adalah pengendali PID. Pengendali ini umum digunakan di dalam dunia industri karena sudah diperkenalkan terlebih dahulu. Penelitian terdahulu membandingkan PID dengan metode *Acceleration Force Control* (AFC) dan *Resolve*

Motion Control (RAC) [4]. Kemudian selanjutnya dikembangkan dengan menggabungkan RAC dengan AFC yang menggunakan PID [5]. 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*.

II. PROPORTIONAL, INTEGRAL, DERIVATIVE CONTROLLER

Kontrol *Proportional, Integral, Derivative* (PID) adalah sistem pengendali yang umum digunakan di industri maupun militer [1]-[3]. Sekitar 90% dari peralatan industri menggunakan pengendali PID karena mudah digunakan dan paling sederhana.

Gambar 1 menunjukkan blok diagram kontrol PID yang umum digunakan di industri. Kontrol *Proportional* (P), *Integral* (I), dan *Derivatif* (D) dapat digunakan bersamaan secara paralel ataupun digunakan terpisah dengan tidak menggunakan salah satu komponen P, I atau D.



Gambar 1. Blok Diagram kontrol PID

Persamaan nilai keluaran dari kontrol PID, dirumuskan sebagai:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

Persamaan (1) menjelaskan bahwa nilai keluaran $u(t)$, merupakan jumlah dari *gain proportional* (K_p), *gain integral* (K_i), dan *gain derivative* (K_d) yang masing-masing dipengaruhi oleh *error* (e) dalam selang waktu (t) tertentu.

A. Proportional Control

Kontrol proporsional memiliki *output* yang sebanding atau proporsional dengan besar sinyal kesalahan (selisih antara nilai yang diinginkan dengan nilai aktualnya, *error*). Setiap perubahan pada sinyal *input* menyebabkan sistem langsung mengeluarkan sinyal keluar sebesar konstanta pengalinya. Persamaan kontrol proporsional dirumuskan sebagai [1]:

$$u(t) = K_p e(t) \tag{2}$$

K_p merupakan *gain* proporsional, e adalah *error*, dan u merupakan nilai keluaran relatif terhadap waktu (t).

B. Integral Control

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. Persamaan kontrol integral dirumuskan sebagai [1]:

$$u(t) = K_I \int_0^t e(t) dt \tag{3}$$

K_I merupakan *gain* integral, e adalah *error*, dan u merupakan nilai keluaran relatif terhadap waktu (t).

C. Derivative Control

Besar *output* dari pengontrol derivatif memiliki sifat seperti operasi diferensial pada umumnya. Pengontrol derivatif menggunakan kecepatan perubahan sinyal kesalahan sebagai parameter pengontrol. Apabila tidak ada perubahan sinyal *error*, maka *output* dari kontrol derivatif tidak akan berubah. Persamaan kontrol derivatif dirumuskan sebagai [1]:

$$u(t) = K_D \frac{d}{dt} e(t) \tag{4}$$

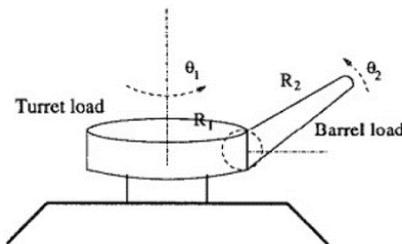
K_D merupakan *gain* derivatif, e adalah *error*, dan u merupakan nilai keluaran relatif terhadap waktu (t).

III. MODEL SISTEM

Sistem *turret-gun* dapat dimodelkan berdasarkan persamaan gerak dinamis sebagai berikut [4], [6]:

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \tag{5}$$

Parameter τ adalah torsi, $D(\theta)$ merupakan inersia sistem, $C(\theta, \dot{\theta})$ adalah vektor koriolis dan gaya sentrifugal, dan $G(\theta)$ merupakan gaya gravitasi yang bekerja pada sistem. Gambar 2 merupakan penyederhanaan dari *turret-gun*.



Gambar 2. Sistem *turret-gun* [4][6]

Rujukan [4] dan [6] menjelaskan hubungan antara torsi yang dibutuhkan sistem gerak sumbu *azimuth turret* terhadap *input* berupa posisi sudut *turret* θ_1 , kecepatan putar *turret* ($\dot{\theta}_1$) dan percepatan sudut *turret* ($\ddot{\theta}_1$) serta posisi *gun* (θ_2) dan kecepatan putar *gun* ($\dot{\theta}_2$) sebagai:

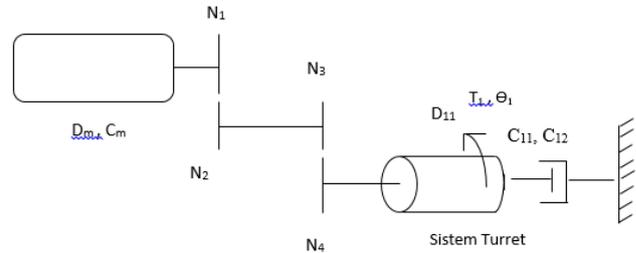
$$\ddot{\theta}_1 = \frac{\tau_1 - C_{11}\dot{\theta}_1 - C_{12}\dot{\theta}_2}{D_{11}} \tag{6}$$

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

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

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

Sistem *turret* terhubung dengan *servomotor* DC melalui transmisi yang berfungsi untuk mereduksi putaran yang keluar dari motor. Ilustrasi rangkaian motor, transmisi dan *turret* ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi rangkaian motor, transmisi dan *turret*

Sementara itu hubungan antara torsi motor penggerak (T_{motor}), transmisi (N) dan torsi dari sistem *turret* (T_{turret}) dirumuskan sebagai:

$$T_{motor} \times N = T_{turret} \tag{7}$$

Rujukan [2] menjelaskan hubungan antara torsi yang dihasilkan motor penggerak dengan tegangan listrik yang diberikan (E_a) sebagai:

$$T_m(t) = \frac{K_t(E_a(t) - K_b\dot{\theta}_1(t))}{R_a} \tag{8}$$

Persamaan (8) menjelaskan hubungan antara parameter konstanta torsi motor (K_t), konstanta tegangan (K_b) dan *armature resistance* (R_a) dalam waktu tertentu.

Persamaan (6) dan (8) dimasukkan kedalam persamaan (7), menghasilkan hubungan antara tegangan listrik yang diberikan ke motor terhadap torsi yang diterima oleh sistem sebagai:

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{K_t E_a N - (N K_t K_b + R_a C_{11}) \dot{\theta}_1 - R_a C_{12} \dot{\theta}_2}{R_a D_{11}} \tag{9}$$

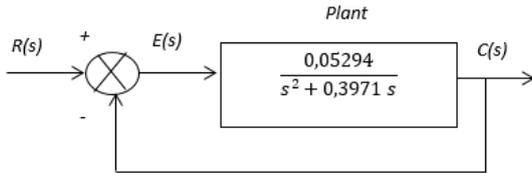
IV. SIMULASI KONTROL TURRET SUMBU AZIMUTH

Bab ini menjelaskan metode *tuning* yang digunakan dan hasil simulasinya. Metode *tuning* yang digunakan adalah metode *root-locus* dan metode *Ziegler-Nichols*. Parameter sistem *turret* adalah 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

Kriteria perancangan sistem kontrol yang ingin diraih dalam penelitian ini adalah % *overshoot* maksimal 20% dan *settling time* dibawah 2 detik. Parameter *damping ratio* (ζ) diperoleh sebesar 0,456.

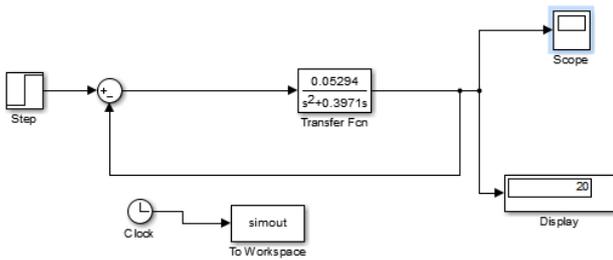
Fungsi transfer dari sistem gerak sumbu *azimuth* yang telah diberikan *feedback* ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Blok diagram sistem gerak sumbu *azimuth*

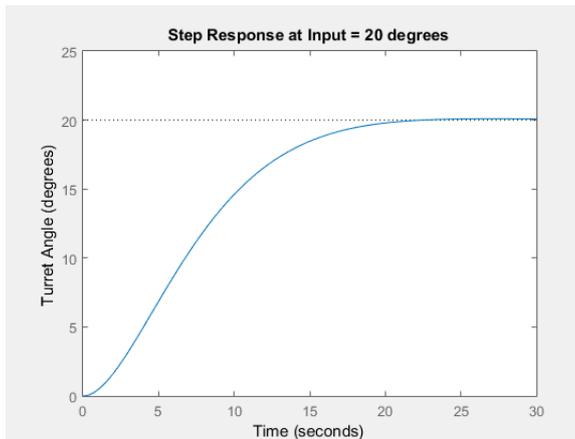
A. *Uncompensated System*

Gambar 5 menunjukkan blok sistem yang belum diberikan kompensator. *Input* yang diberikan merupakan posisi sudut dari *turret*.



Gambar 5. Blok diagram sistem dengan *input* 20 derajat

Pengujian awal dilakukan pada *input* sudut sebesar 20 derajat, dengan hasil seperti pada gambar 6.

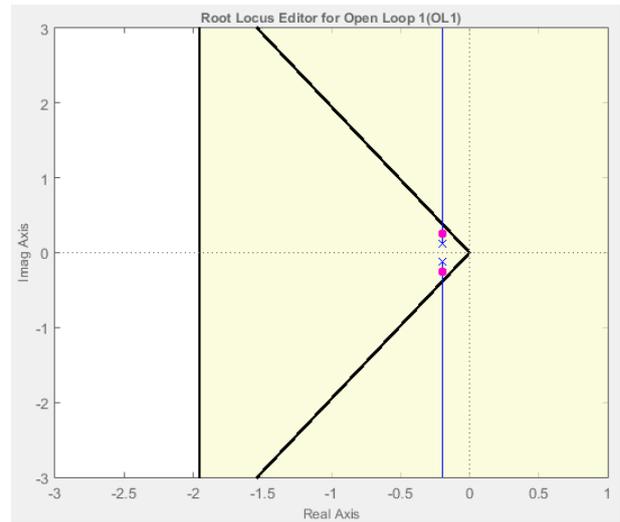


Gambar 6. Grafik respon sistem dengan *input* 20 derajat

Berdasarkan gambar 6, dapat dilihat bahwa sistem *turret* tidak memiliki *steady-state error* namun memiliki *settling time* diatas 20 detik.

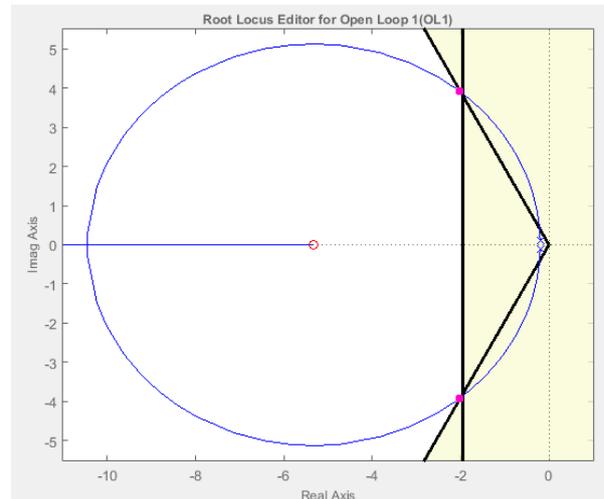
B. *Metode Root-locus*

Metode *root-locus* merupakan metode analisa grafis untuk menentukan besar *gain compensator* yang diperlukan agar respon sistem dapat memenuhi kriteria perancangan. *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*. Sketsa *root-locus* sistem gerak sumbu *azimuth* ditunjukkan pada gambar 7.



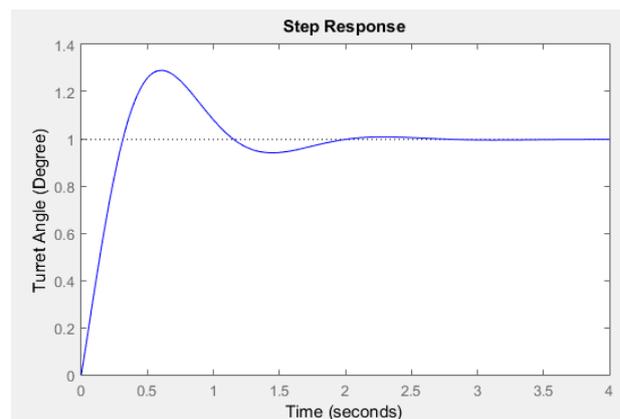
Gambar 7. Sketsa *root-locus* yang belum dikompensasi.

Sistem ini memiliki *pole* pada $(-0,1986 \pm j0,1163)$ dan *dominant pole* pada $(-0,1986 \pm j0,387)$. *Dominant pole* yang baru diperlukan agar dapat memenuhi kriteria perancangan. Sketsa *root-locus* dengan *dominant pole* yang baru pada koordinat $(-2 \pm j3,9035)$ ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Sketsa *root-locus* yang sudah dikompensasi

Dari gambar 8 dapat dilihat bahwa adanya tambahan *zero* pada koordinat $(-5,324,0)$ menyebabkan perubahan lintasan *pole* ketika diberikan *gain*, sehingga mampu mencapai *dominant pole* yang diinginkan. Grafik respon sistem yang telah diberikan *gain compensator* sebanyak 68,67 ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Grafik respon sistem yang sudah dikompensasi

Gambar 9 menunjukkan grafik respon sistem memiliki %overshoot sebesar 29,9, dengan settling time selama 1,84 detik.

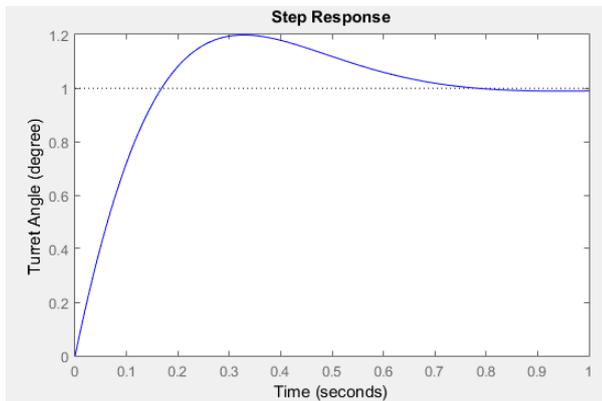
Tabel 1 merupakan perbandingan parameter antara sistem yang belum dikompensasi dengan sistem yang telah diberikan gain compensator.

Tabel 1
Respon sistem azimuth turret-gun metode root-locus

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

- * ω_n – Frekuensi natural
- * T_s – Settling time
- * T_p – Peak time
- * ζ – Damping ratio

Grafik pada gambar 9 masih menunjukkan %overshoot yang masih diatas kriteria perancangan. Apabila gain compensator diperbesar menjadi 173,83, grafik respon akan menunjukkan hasil seperti pada gambar 10.



Gambar 10. Grafik respon dengan gain compensator 173,83

Perbesaran gain compensator menjadi 173,83 menyebabkan grafik respon menunjukkan %overshoot sebesar 19,9% dan settling time selama 0,697 detik. Nilai gain proportional K_p dan gain derivatif diperoleh sebesar masing-masing 925,47 dan 173,83.

C. Metode Ziegler-Nichols

Metode tuning Ziegler-Nichols merupakan salah satu metode perhitungan untuk mencari nilai gain K_p , K_i dan K_d berdasarkan grafik awal respon sistem [1]. Nilai K_i dan K_d dapat ditentukan setelah nilai time integral (T_i) dan time derivative (T_d) diketahui dari perumusan pada tabel 2.

Tabel 2
Aturan tuning Ziegler-Nichols berdasarkan Delay Time dan Time Constant [1]

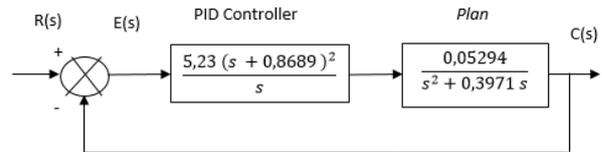
| Jenis Kontroler | K_p | T_i | T_d |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------|
| P | $\frac{T}{L}$ | e | 0 |
| PI | $0,9 \frac{T}{L}$ | $\frac{L}{0,3}$ | 0 |

| PID | $1,2 \frac{T}{L}$ | $2 L$ | $0,5 L$ |
|-----|-------------------|-------|---------|
|-----|-------------------|-------|---------|

Nilai T_i dan T_d selanjutnya dimasukkan kedalam persamaan 10 yang merupakan persamaan gain compensator dari metode tuning Ziegler-Nichols:

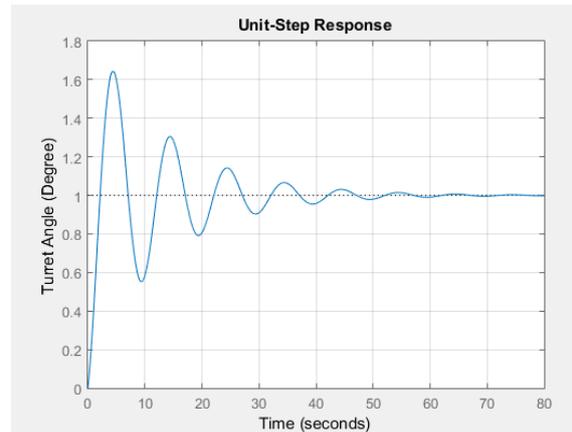
$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{is}} + T_{ds} \right) \tag{10}$$

Selanjutnya blok diagram sistem yang baru dapat dibentuk seperti pada gambar 11.



Gambar 11. Blok diagram sistem dengan kontrol PID metode Ziegler-Nichols

Grafik respon sistem yang telah ditambahkan kontrol PID dengan metode tuning Ziegler-Nichols ditunjukkan pada gambar 12.



Gambar 12. Grafik respon sistem dengan kontrol PID tuning Ziegler-Nichols

Tabel 3 merupakan perbandingan parameter antara sistem yang belum dikompensasi dengan sistem yang telah diberikan kontrol PID.

Tabel 3
Respon sistem azimuth turret-gun metode tuning Ziegler-Nichols

| | Uncompensated | PID Compensated |
|------------------------|---------------|-----------------|
| | K_p | 1 |
| K_i | 0 | 5,23 |
| K_d | 0 | 20,92 |
| ζ | 0,863 | 0,138 |
| ω_n | 0,23 | 0,579 |
| %OS | 0 | 64,5% |
| T_s | 18,7 | 49,9 |
| T_p | 11,8 | 4,42 |
| Steady state Error (%) | 0 | 0 |

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan grafik respon yang diperoleh dari gambar 9 dan 11, terdapat perbedaan yang signifikan antara hasil tuning dari kedua metode. Metode root-locus menghasilkan respon sistem yang memiliki settling time 1,74 detik, namun masih memiliki %overshoot diatas 20%. Sementara itu metode Ziegler-Nichols menghasilkan respon sistem dengan

% overshoot 64,5% dan settling time 49,9 detik. Kedua metode sama-sama tidak memiliki *steady-state error*.

Hasil yang memenuhi kriteria perancangan diperoleh dengan menggunakan metode *root-locus*. Gain compensator K diperbesar hingga 173,83 dan diperoleh data berupa grafik respon yang memiliki % overshoot 19,9% dan settling time 0,697 detik

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ogata, K., "*Modern Control Engineering*", 5th Edition, Prentice Hall, New Jersey (2010).
- [2] Nise, Norman S., "*Control System Engineering*", 6th Edition, John Wiley & Sons. Inc (2011),
- [3] Johnson, Michael A. dan Moradi, M.H., "*PID Control: New Identification and Design Methods*", Springer, London (2005).
- [4] Nasyir, M. T., Nurhadi, H., Pramujati, B., dan Pitowarno, E."Design and Realization of an Automatic Turret Gun", IES (2014).
- [5] Nasyir, M. T., "*Aplikasi Active Force Control pada Turret-gun pada Kendaraan Tempur Darat*", Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya (2014).
- [6] Musonnifah, S., "*Resolve Acceleration Control (RAC) dan Active Force Control (AFC) pada Sistem Turret-gun Kaliber 20 Milimeter*", Jurusan Matematika FMIPA-ITS, Surabaya (2016).