

Desain Sistem Pengendali Posisi Sumbu *Azimuth* Pada *Turret Gun* Dengan *PI Controller* Metode *Root-Locus*

Yuma Kurniawan Wiguna

S1 Teknik Elektro, Falkutas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail : yuma.17050874036@mhs.unesa.ac.id

Puput Winarti Rusimamto, Bambang Suprianto, M. Syariffuddin Zuhrie

S1 Teknik Elektro, Falkutas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail : puputwanarti@unesa.ac.id, bambangsuprianto@unesa.ac.id, zuhrie@unesa.ac.id

Abstrak

Turret Gun merupakan salah satu sistem senjata proyektil yang telah digunakan pada beberapa perangkat dan kendaraan tempur seperti tank dengan menggerakkan arah senapan dari tank sesuai target atau gangguan yang telah ditentukan. *Turret Gun* mempunyai 2 sistem sumbu gerak yaitu, elevasi dan azimuth. Salah satu aspek yang dikembangkan dari penelitian ini adalah ketepatan dan kecepatan untuk mencapai posisi target dari arah senapan tank, karena apabila semakin besar ukuran dari turret gun maka akan semakin sulit untuk dikendalikan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang sistem kendali *PI (Propotional Integral)* dengan metode *Root-Locus* untuk mengatur posisisi sumbu *azimuth* dari *turret gun*. Dengan implementasi nilai $K_p = 10,695$ dan $K_i = 38,739$ pada *setpoint* 60° data dari hasil penelitian diperoleh nilai *rise time* (T_r) sebesar 0,0317 detik, nilai *settling time* (T_s) sebesar 0,3308 detik, nilai *maximum overshoot* (MO) sebesar 4,51 %, dan nilai *error steady state* (*Ess*) sebesar 0%.

Kata Kunci: *Azimuth*, Integral, Propotional, *Root Locus*, *Turret Gun*.

Abstract

Turret Gun is a projectile weapon system used in various combat devices and vehicles such as tanks by moving the direction according to a predetermined target or disturbance. the turret gun has 2 axis systems of motion between the elevation and azimuth axes. One of the aspects developed in this research is the accuracy and speed to reach the target position because the larger the turret gun size, the more difficult it is to control. The purpose of this research is to design a *PI (Proportional Integral)* control system with the *Root-Locus* method to adjust the position of the azimuth axis of the turret gun. With the implementation of the value of $K_p = 10.695$ and $K_i = 38.739$ with *setpoint* at 60° , the data from the simulation obtained the rise time (t_r) value at 0.0317 seconds, the settling time (t_s) value at 0.3308 seconds, the maximum overshoot (MO) value 4,51%, and the steady state (*Ess*) error value 0%.

Keywords: Azimuth, Integral, Propotional, *Root Locus*, *Turret Gun*.

PENDAHULUAN

Dalam suatu Negara pertahanan merupakan upaya dalam melindungi kedaulatan Negara. Pertahanan dalam sebuah Negara dapat di dukung dengan kecanggihan sarana dan prasarana, maka diciptakan-lah senjata sebagai alat pertahanan. Senjata yang telah digunakan dalam mempertahankan negara saat ini sudah mengalami pengembangan yang sangat pesat. Oleh karena itu, sudah terdapat beberapa negara-negara besar yang telah mmengembangkan berbagai sistem persenjataan sebagai produk industri pertahanan negara dengan menerapkan aplikasi teknologi yang canggih. Salah satu dari penerapan dari teknologi tersebut ada pada sistem *Turret-Gun*. (Wisnu dkk., 2016).

Turret-Gun merupakan sistem persenjataan proyektil yang telah diterapkan di berbagai perangkat tempur dan kendaraan tempur seperti tank yang menggerakkan arah senapan dari tank menuju yang telah ditentukan. *Turret-Gun* dapat dikendalikan dari jarak jauh dari dalam

stasiun kontrol dengan menggunakan perangkat *joystick* dan memanfaatkan pemantauan kamera, sehingga pengontrol akan merasa aman. Aspek penting yang dapat mempengaruhi kinerja dari *turret-Gun* yaitu tingkat akurasi serta kecepatan dari *Turret-Gun* untuk mencapai suatu posisi sudut yang telah ditetapkan. (Tamara, 2018). *Turret-Gun* mempunyai 2 sistem sumbu gerak antara laim sudut elevasi dan *azimuth*. Yang pertama adalah sudut *azimuth*, sudut *azimuth* adalah sudut yang terbentuk oleh garis yang menuju utara mata angin dan garis yang menuju ke suatu target yang searah dengan jarum jam. Sumbu *azimuth* secara horizontal mempunyai gerakkan rotasi sebesar 360° . Yang kedua adalah sudut elevasi, sudut elevasi merupakan sudut yang berada di garis dari permukaan bumi dan garis dengan arah vertikal, di mana sudut 0° dimulai dari permukaan bumi. (Kunto dkk., 2016).

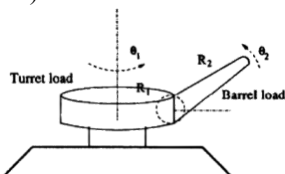
Pada penelitian akan merancang sistem kendali *PI* (*Propotional Integral*) untuk mengendalikan posisi sudut sumbu *azimuth* dari *turret-gun* yang digerakkan motor DC. Salah satu pengembangan dari penelitian ini adalah peningkatan ketepatan dan kecepatan untuk mencapai posisi sudut dari senapan tank, karena apabila ukuran *turret-gun* semakin besar maka akan semakin sulit posisi sudut dari senapan tank untuk dikendalikan. Tujuan dari pelaksanaan penelitian ini adalah untuk membuat suatu sistem pengendalian sumbu *azimuth* pada *turret-gun* menggunakan sistem kendali *PI* dengan metode *Root-Locus* dan untuk mengetahui respon sistem dinamik dari pengendali *PI* metode *Root-Locus* berbasis *software MATLAB*.

KAJIAN TEORI

Turret Gun

Turret-Gun merupakan sistem persenjataan proyektil yang telah diterapkan di berbagai kendaraan tempur dan pesenjataan tempur seperti kendaraan tempur tank yang menggerakkan arah senapan dari tank menuju target yang telah ditentukan. *Turret-Gun* mempunyai pergerakan memutar ke arah sumbu elevasi yang menggerakkan senjata naik dan turun dengan besar sudut yang telah ditentukan, dan pergerakan ke arah sumbu *azimuth* yang mempunyai gerakan memutar dari badan senjata. Sumbu *Azimuth* yang menggerakkan gerak memutar dari badan *turret* senilai 360° ke arah horizontalnya, dan sumbu elevasi menggerakkan gerak dari senapan senjata senilai 70° ke arah vertikalnya. (Putra, 2020).

Gerakkan *Turret-Gun* yang melalui sumbu elevasi dan sumbu *azimuth* dari *turret-gun* dipengaruhi komponen dinamika dan komponen kinematika. Komponen kinematika *Turret-Gun* adalah sistem pergerakan posisi *Turret-Gun* berbasis transformasi koordinat tanpa memperdulikan pengaruh dari massa dan gaya-gaya yang mempengaruhi sistem *Turret-Gun*. Lalu komponen dinamika dari *Turret-Gun* adalah komponen yang dapat dipengaruhi oleh massa dan gaya. Kenaikan nilai massa dari sistem akan berbanding lurus terhadap kenaikan nilai torsi dan inersia. Torsi keseluruhan dari *Turret-Gun* juga dipengaruhi oleh besarnya gaya gravitasi terhadap nilai massa dari sistem, khususnya mempengaruhi gerak terhadap sumbu elevasi dari senjata. (Wisnu dkk., 2016).



Gambar 1. Desain dari *Turret-Gun* (Sumber: Tamara dkk, 2018)

Turret merupakan perangkat yang mempunyai pergerakan memutar terhadap sumbu *azimuth* mempunyai nilai sebesar 360°, sedangkan senapan (*Gun*) adalah perangkat yang mempunyai arah gerak terhadap sumbu elevasi dengan gerak memutar senilai 70°. Kedua

perangkat tersebut mempunyai parameter, yaitu massa, radius dan posisi angular. Dengan persamaan *Euler-Lagrange*, dengan nilai *L* adalah jumlah total dari energi kinetik sistem dikurangi dengan jumlah total dari energi potensial sistem. (Putra, 2020). Persamaan gerak dinamika dari desain *turret-gun* di atas adalah

$$EK_{total} = EK_{turret} + EK_{gun} = \frac{1}{2}I(\dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2}I(\dot{\theta}_2)^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}m_1R_1^2 + m_2R_1^2 + m_2R_1R_2\cos(\theta_2) + \frac{1}{3}m_2R_2^2\cos^2(\theta_2)\right)(\dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{3}m_2R_2^2(\dot{\theta}_2)^2 \quad (1)$$

$$EP_{total} = \frac{1}{2}m_2gR_2 \sin(\theta_2) \quad (2)$$

Dari persamaan (1) dan (2),

$$L = EK_{total} - EP_{total} = \left(\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}m_1R_1^2 + m_2R_1^2 + m_2R_1R_2\cos(\theta_2) + \frac{1}{3}m_2R_2^2\cos^2(\theta_2)\right)(\dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{3}m_2R_2^2(\dot{\theta}_2)^2\right) - \left(\frac{1}{2}m_2gR_2 \sin(\theta_2)\right) \quad (3)$$

Keterangan :

- θ_1 = posisi turret terhadap sudut azimuth (°)
- θ_2 = posisi gun terhadap sudut elevasi (°)
- m_1 = massa dari *turret* (kg)
- m_2 = massa senapan *turret* (kg)
- R_1 = panjang jari-jari *turret* (m)
- R_2 = panjang senapan *turret* (m)
- g = gaya gravitasi (m/s²)
- EK_{turret} = energi kinetik dari badan *turret* (J)
- EK_{gun} = energi kinetik dari senapan *turret* (J)
- EK_{total} = energi kinetik total dari *turret-gun* (J)
- EP_{total} = energi potensial dari *turret-gun* (J)
- L = selisih energi kinetik dan energi potensial total dari *turret-gun* (J)

Persamaan dari gerak dinamik dari sistem *turret-gun* bisa didapatkan dengan melakukan substitusikannya ke dalam persamaan *Euler-Lagrange* :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = \tau \quad (4)$$

Maka diperoleh,

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = \tau_1 = \left(\frac{1}{2}m_1R_1^2 + m_2R_1^2 + m_2R_1R_2\cos(\theta_2) + \frac{1}{3}m_2R_2^2\cos^2(\theta_2)\right)\ddot{\theta}_1 + (-m_2R_1R_2\cos(\theta_2)\dot{\theta}_2 - \frac{1}{3}m_2R_2^2\sin(2\theta_2)\dot{\theta}_2)\dot{\theta}_1 \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = \tau_2 = \left(\frac{1}{3}m_2R_2^2\right)\ddot{\theta}_2 - \frac{1}{2}(-m_2R_1R_2\sin(\theta_2) - \frac{1}{3}m_2R_2^2\sin(2\theta_2))\dot{\theta}_1 + \frac{1}{2}m_2R_2g\cos(\theta_2) \quad (6)$$

Persamaan (5) dan persamaan (6) merupakan persamaan dinamik dari sistem *turret-gun*, Persamaan (5) dan persamaan (6) dapat ditulis dalam bentuk matriks,

$$\tau = D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta)\dot{\theta} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Keterangan :

- τ = Torsi dari Sistem
- $D(\theta)$ = Matriks Momen Inersia
- $C(\theta)$ = Vektor dari gaya koriolis dan sentrifugal
- τ_1 = Torsi dari sistem *azimuth*
- τ_2 = Torsi dari sistem *elevasi*
- D_{11} = Momen Inersia dari *turret*
- C_{11} = Konstanta damping dari sistem
- C_{12} = Efek koriolin dari senapan *gun* terhadap *turret*
- $\ddot{\theta}_1$ = Percepatan dari sistem sumbu *azimuth*
- $\ddot{\theta}_2$ = Percepatan dari sistem sumbu *elevasi*
- $\dot{\theta}_1$ = Kecepatan dari sistem sumbu *azimuth*
- $\dot{\theta}_2$ = Kecepatan dari sistem sumbu *elevasi*

Di mana:

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

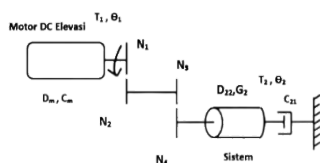
$$D_{22} = \frac{1}{3}m_2R_2^2$$

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

$$C_{21} = (\frac{1}{2}m_2R_1R_2 \sin(\theta_2)) + (-\frac{1}{3}m_2R_2^2 \sin(2\theta_2)\dot{\theta}_1) \dot{\theta}_2^2$$

Motor DC

Motor *DC* (*Direct Current*) merupakan perangkat elektromekanik yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi gerak. Motor *DC* adalah salah satu jenis komponen motor penggerak dengan memanfaatkan tegangan searah sebagai sumber listriknya. Motor *DC* mempunyai dua bagian penting, bagian yang pertama adalah bagian motor yang tidak bergerak (stator) dan yang kedua bagian yang dapat bergerak (rotor). Bagian stator dari motor adalah bagian badan motor yang terdapat kutub magnet dan rotor adalah bagian motor yang terdapat jangkar lilitan. Apabila kedua terminal motor *DC* diberikan beda tegangan, maka motor akan bergerak memutar ke satu arah. Lalu apabila kutub polaritas dari sumber listrik dibalik maka arah gerak putaran dari motor akan berlawanan arah dari putaran motor sebelumnya. Polaritas dari sumber listrik yang diberikan antara kedua terminal akan mempengaruhi arah putaran dari motor, sedangkan besar nilai dari tegangan pada listrik akan mempengaruhi besarnya kecepatan motor.



Gambar 2. Rangkaian dari motor DC, sistem *turret-gun* dan transmisi
(Sumber: Wisnu dkk., 2016)

Sistem *turret-gun* menggunakan transmisi komponen servo motor DC digunakan untuk mereduksi putaran dari motor. Ilustrasi rangkain dari motor DC, sistem *turret-gun* dan transmisi ditunjukkan pada Gambar 2. Transmisi roda gigi akan mempengaruhi torsi keluaran motor dari oleh sistem *turret-gun*. Hubungan antara torsi motor (T_1), rasio roda gigi (N) dan torsi dari sistem *azimuth turret-gun* (T_2). Besar torsi yang dibutuhkan dari sistem *azimuth turret-gun* (T_2) ditentukan dengan persamaan (9),

$$T_1 = D_{11}\ddot{\theta}_1 + C_{11}\dot{\theta}_1 + C_{12}\dot{\theta}_2 \quad (9)$$

$$T_2 = T_1 N \quad (10)$$

Selanjutnya adalah menentukan pengaruh dari tegangan masukan yang terima oleh motor terhadap torsi dari sistem. Hubungan antara *armature current* $I_a(t)$, *armature voltage* $E_a(t)$, dan *back electromotive force* $V_b(t)$ didapat dalam persamaan motor DC

$$R_a I_a + L_a \dot{I}_a + V_b(t) = E_a \quad (11)$$

Di mana *back electromotive force* $V_b(t)$ dan *armature current* $I_a(t)$ dapat dituliskan dalam persamaan,

$$V_b(t) = K_b \dot{\theta}_1(t) \quad (12)$$

$$I_a(t) = \frac{1}{K_t} T_1(t) \quad (13)$$

K_t merupakan konstanta torsi motor DC dan K_b merupakan *back Electromotive Force* (EMF). Untuk *transfer fungsi* motor dapat diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan (12) dan persamaan (13) ke dalam persamaan (11) maka diperoleh,

$$E_a(t) = \frac{R_a + L_a}{K_t} T_1(t) + K_b \dot{\theta}_1(t) \quad (14)$$

$$T_1(t) = \frac{(E_a(t) - K_b \dot{\theta}_1(t)) K_t}{R_a} \quad (15)$$

Nilai induktansi *armature* (L_a) dari Motor DC diabaikan karena mempunyai nilai yang sangat kecil. Kemudian substitusikan persamaan (9) dan persamaan (15) kedalam persamaan (10), sehingga diperoleh,

$$E_a(t) = \frac{R_a(D_{11}\ddot{\theta}_1 + C_{11}\dot{\theta}_1 + C_{12}\dot{\theta}_2) + K_b K_t \dot{\theta}_1(t)}{K_t N} \quad (16)$$

Persamaan (16) adalah persamaan dari sistem dengan keadaan nonlinear. Agar persamaan tersebut bisa dilinearisasi, maka persamaan (16) harus diubah menjadi bentuk $\ddot{\theta}_1$,

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{E_a(t) K_t N - K_b N K_t \dot{\theta}_1(t) - C_{11} R_a \dot{\theta}_1 - C_{12} R_a \dot{\theta}_2}{R_a D_{11}} \quad (17)$$

Sistem sumbu elevasi di asumsikan diam (tidak bergerak) maka nilai dari $\dot{\theta}_2 = 0$ dan substitusikan nilai D_{11} , C_{11} dan C_{12} kedalam persamaan (17) diperoleh

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{E_a K_t N - (K_b N K_t - R_a m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 - \frac{1}{3} R_a m_2 R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_1}{R_a (\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2))} \quad (18)$$

Persamaan (18) merupakan persamaan dalam bentuk non-linier. Persamaan (18) dapat dilinearisasi dengan menggunakan metode *Jacobian*, sehingga menghasilkan matriks persamaan:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_b N K_t}{R_a(\frac{1}{2}m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3}m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2))} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{E_a K_t N}{R_a(\frac{1}{2}m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3}m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2))} \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$C = (1 \quad 0) \quad (21)$$

$$D = (0) \quad (22)$$

Matriks A, B, C dan D dapat di gunakan untuk mencari persamaan keadaan dan keluaran dengan rumus

$$x(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (23)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (24)$$

Dari nilai matriks diatas juga dapat digunakan untuk menentukan fungsi transfer dari suatu sistem dengan persamaan,

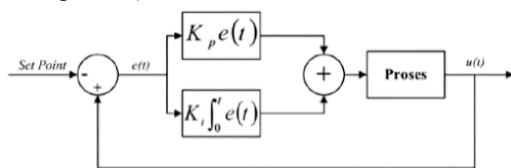
$$H(s) = C(sI - A)^{-1} B \quad (25)$$

Keterangan :

- T_1 = torsi dari motor DC
- T_2 = torsi dari sistem *azimuth turret-gun*
- N = Perbandingan Gear / Rasio Transmisi
- $E_a(t)$ = *armature voltage* / tegangan listrik motor (V)
- R_a = Resistansi Motor (Ω)
- I_a = arus listrik motor (A)
- L_a = Induktansi Motor (H)
- K_t = Torsi motor DC
- K_b = Tegangan Konstan ($V/Krpm$)
- $x(t)$ = *input*
- $y(t)$ = *output*
- $H(s)$ = tranfer fungsi dari sistem

Sistem Kendali *Propositional-Integral* (PI)

Sistem kendali PI merupakan gabungan dari pengendalian proposional dan pengendalian integral. Penggunaan pengendalian proposional berfungsi untuk menurunkan waktu naik (*rise time* t_r), serta mengurangi nilai *error steady state* (E_{ss}). Sedangkan penggunaan pengendali integral berfungsi untuk menurunkan waktu naik (*rise time* t_r), menaikkan nilai *overshoot* dan waktu turun, serta menghilangkan nilai *error steady state* (E_{ss}). (Sihombing, 2020)



Gambar 3. Diagram Blok pengendali PI (Sumber: Priambodo, 2017)

Dominan waktu : $u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt$

Dominan Laplace: $U(s) = (K_p + \frac{K_i}{s}) E(s)$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \left(\frac{K_p(s + K_i/K_p)}{s} \right) \quad (26)$$

Keterangan :

- $U(s)$ = Nilai keluaran dari sistem
- $E(s)$ = Sinyal *error* dari sistem
- K_p = Nilai konstanta kendali proposional
- K_i = Nilai konstanta kendali integral

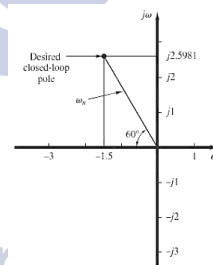
Dalam menentukan sistem kendali PI yang diperlukan adalah mencari parameter dari P dan I. Pengaruh dari perubahan parameter PI terhadap sistem dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Respon sistem pengendali PI terhadap perubahan parameter

Respon Sistem	Waktu Naik	<i>Overshoot</i>	Waktu Turun	<i>Error Steady State</i>
K_p	Meningkat	Meningkat	Perubahan Kecil	Menurun
K_i	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang

Metode *Tuning Root-Locus*

Metode PI *tuning Root-locus* merupakan salah satu metode *tuning* kontrol untuk menentukan nilai parameter PI yang diperoleh dari sketsa *root-locus*. Metode ini dapat digunakan untuk mencari besar nilai *gain* yang akan didapatkan dari spesifikasi respon transien dari sistem. Respon transien dapat berupa nilai *%overshoot*, *peak time* dan *settling time*, diwujudkan dalam bentuk *Desire closed-loop Poles*. (Sihombing, 2020).



Gambar 4. Kedudukan Akar Root-Locus (Sumber: Sihombing, 2020)

Pengendali PI dinyatakan dengan fungsi alih pada persamaan (25). Parameter PI dapat diperoleh dengan menggunakan metode *Root-Locus*. Prosedur perolehan parameter PI dengan menggunakan metode *Root-Locus* adalah sebagai berikut (Sihombing, 2020) :

1. Dalam menentukan nilai konstanta K_p dan K_i dengan metode *root-locus* adalah mencari nilai rasio redaman (ζ) dan *settling time* t_s
2. Nilai rasio redaman (ζ) dan *settling time* t_s yang telah ditentukan digunakan untuk mencari *desired closed-loop poles*,

$$S_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (27)$$

Dengan

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta t_s} \quad (28)$$

ω_n adalah frekuensi redaman alami (*natural frequency*).

3. Hal yang perlu diperhatikan ketika menggunakan kontroler PI metode *root-locus* adalah syarat sudut dan syarat besaran. Fungsi alih dari sistem *close-loop* adalah

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (29)$$

Karakteristik dari persamaan sistem *close-loop* diperoleh dengan menyamakan penyebut ruas kanan persamaan (29) sama dengan nol,

$$G(s)H(s) = -1 \quad (30)$$

- a) Syarat sudut

$$G(s)H(s) = -180^\circ$$

Fungsi Transfer dari kontroler

$$G_c(s) = K \frac{(s+a)(s+b)}{s} \quad (31)$$

Persamaan fungsi transfer (31) digunakan untuk menentukan nilai parameter K_p , K_i dan K_d

- b) Syarat Besaran

$$|G(s)H(s)| = 1 \quad (32)$$

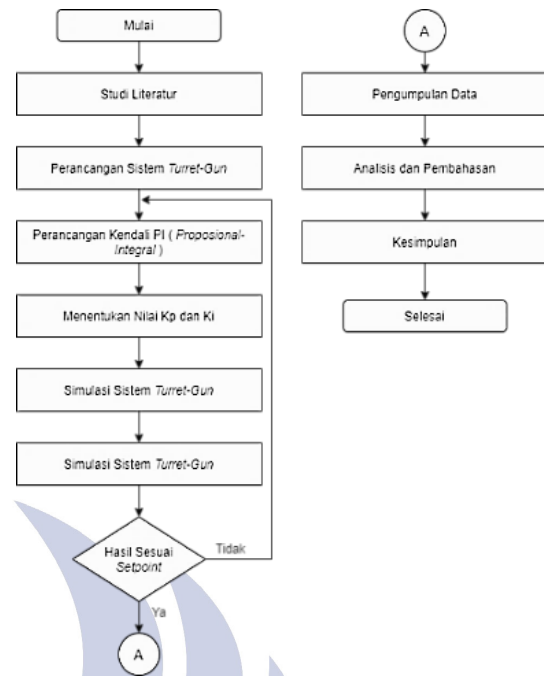
METODE

Pendekatan Penelitian

Dalam penelitian ini akan dilakukan pendekatan penelitian kuantitatif di mana menggunakan pola berpikir deduktif (rasional-empiris) yang menggunakan perhitungan angka atau kuantifikasi data. Pengumpulan data didapat melalui studi literatur dari penelitian-penelitian sebelumnya dan mempelajari materi-materi yang berkaitan dengan penilitan tugas akhir ini. Sumber yang digunakan adalah jurnal, *text book*, *forum*, penelitian sebelumnya dan beberapa *website* terpercaya.

Rancangan Penelitian

Berikut ini merupakan diagram alir untuk pelaksanaan penelitian kali ini.



Gambar 5. Diagram Alir Rancangan Penelitian

Berdasarkan pada diagram alir pada Gambar 5, penyusunan penelitian dimulai dengan mengumpulkan bahan literatur dan informasi berkaitan dengan topik penelitian yang ditentukan. Selanjutnya mempelajari dan memahami literatur yang telah dikumpulkan dan digunakan sebagai kajian teori dalam penelitian ini. Lalu merancang diagram blok sistem *turret-gun* di *simulink* pada perangkat lunak Matlab 2018a. Setelah itu menentukan nilai dari konstanta K_p dan K_i dengan metode *root-locus* yang digunakan dalam sistem kendali *PI* dan mensimulasikannya ke sistem *turret-gun* yang telah dibuat di *simulink* pada perangkat lunak Matlab 2018a. Jika simulasi yang dilakukan mendapatkan hasil yang kurang maksimal, maka dilakukan perbaikan pada dalam menentukan nilai konstanta K_p dan K_i . Akan tetapi jika hasil simulasi menunjukkan hasil yang baik, maka dilakukan pengambilan data, dan analisis terhadap hasil simulasi. Bagian terakhir adalah menarik kesimpulan diambil dari hasil analisa data dan diperiksa apakah sesuai dengan tujuan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan Dinamik *Plant* Sistem *Turret-Gun*

Perancangan dari *plant* yang akan digunakan untuk mendapat fungsi transfer, sehingga respon dinamik dari sistem dapat diketahui. Identifikasi *plant* dapat ditentukan dengan mengetahui nilai parameter secara fisik dari *plant*. Parameter fisik bisa didapatkan dari *datasheet* komponen yang akan digunakan dalam sistem dan pengukuran komponen yang digunakan didalam sistem. Parameter fisik dari sistem *turret-gun* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi sistem *turret-gun*

Parameter	Simbol	Nilai
Torsi Motor (Nm/A)	K_t	0,0134
Tegangan Konstan ($V/Krpm$)	K_b	2,117
Rasio Gigi	N	1 :2,5
Resistansi Motor (Ω)	R_a	1,9
Tegangan Motor (V)	E_a	12
Massa <i>turret</i> (Kg)	m_1	0,025
Massa <i>gun</i> (Kg)	m_2	0,01
Jari-jari <i>turret</i> (m)	R_1	0,06
Jari-jari <i>gun</i> (m)	R_2	0,22

Berdasarkan nilai parameter Tabel 2 disubstitusi kedalam persamaan matriks (19), matriks (20), matriks (21) dan matriks (22) maka dapat diperoleh nilai,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -15,9541 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 90,4345 \end{pmatrix}$$

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

$$D = (0)$$

Variable State A,B,C dan D diubah dalam bentuk *state space* dengan persamaan (23) dan persamaan (24), maka

$$x(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -15,9541 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 90,4345 \end{bmatrix} u(t)$$

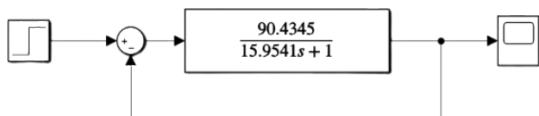
$$y(t) = [1 \quad 0]x(t) + [0]u(t)$$

Sehingga *transfer function* dari sistem *turret-gun* dapat diperoleh dengan persamaan (25),

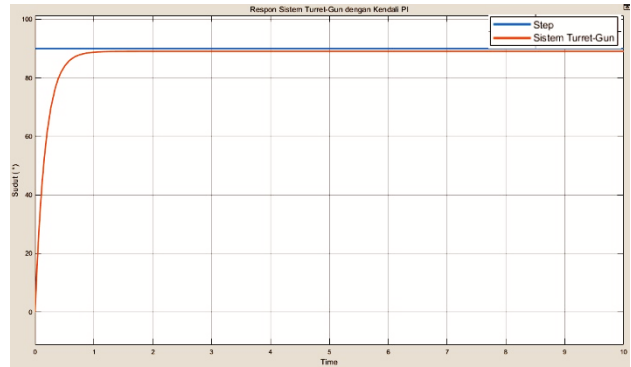
$$H(s) = \frac{90,4345}{15,9541s+1}$$

Untuk mengetahui respon sistem *turret-gun* terhadap kendali PI yang telah dibuat, dilakukan simulasi dengan menggunakan Simulink pada Matlab 2018a. Bentuk pengujian yang dilakukan pada sistem kendali posisi sudut *Azimuth Turret-Gun* dengan sistem kendali PI yaitu pengujian sistem *Turret-Gun* tanpa kendali, pengujian menggunakan kendali sistem PI dengan beberapa sudut (*Setpoint*), Pengujian dengan perubahan sudut (*Setpoint*), Pengujian dengan diberikan beberapa gangguan.

Berdasarkan simulasi terhadap rangkaian simulink sistem *Turret-Gun* tanpa kendali yang telah dilakukan. Didapatkan hasil simulasi sistem *Turret-Gun* tanpa menggunakan kendali dapat dilihat pada Gambar 8.



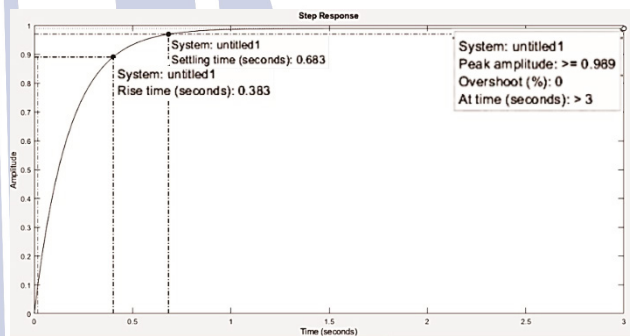
Gambar 6. Diagram Blok Sistem *Turret-Gun* tanpa kendali



Gambar 7. Grafik Respon Sistem *Turret-Gun* Tanpa Kontroler

Pada Gambar 7. dapat disimpulkan bahwa respon sistem *Turret-Gun* tidak dapat mencapai nilai *setpoint* yang diberikan. Maka dari itu diperlukan sistem kendali yang dapat memperbaiki respon dari sistem *Turret-Gun*.

Menentukan Parameter PI

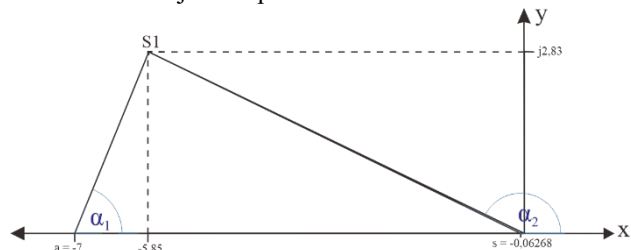


Gambar 8. Grafik Respon Sistem *Turret-Gun* dari simulasi

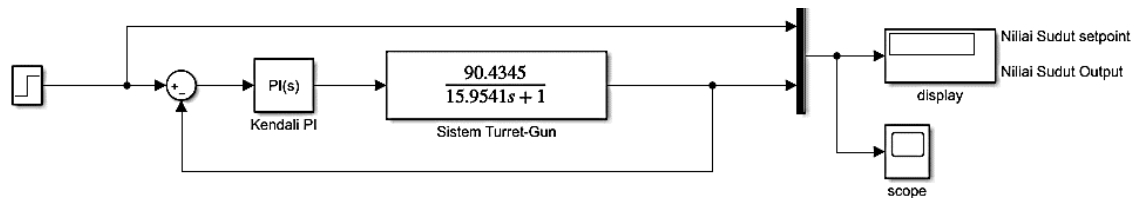
Dari grafik Gambar 8 didapatkan nilai *rise time* = 0,383 s dan nilai *settling time* = 0,683 s. dengan persamaan fungsi alih (35) dapat diketahui nilai akar $s = -0,06268$.

Dari spesifikasi tanggapan sistem didapatkan *settling time* (t_s) = 0,683 s dan rasio redaman (ζ) = 0,9.

Dengan (t_s) = 0,683 s dan (ζ) = 0,9 menggunakan persamaan (27) dan persamaan (28) maka sistem akan mempunyai *pole* $\omega_n = 6,50$ dan $S_{1,2} = -5,85 \pm j2,83$. Titik S merupakan titik yang harus dilalui oleh akar-akar dari sistem kendali. Letak *pole* dan *zero* dari kendali PI ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Letak kedudukan akar Kendali PI menggunakan *Root-Locus*



Gambar 100. Rangkaian *Turret-Gun* dengan Kendali PI

- a) Syarat sudut $G(s)H(s) = -180^\circ$
 S adalah titik yang harus dilewati oleh nilai akar-akar dari pengendali untuk mendapatkan tanggapan sistem yang sesuai. Selanjutnya menentukan nilai awal letak zero (a) dan mencari letak zero (b).

$$\sum \text{sudut zero } a + \sum \text{sudut } b = -180.$$

Sudut α dapat dicari dengan rumus trigonometri

$$\alpha = 180^\circ - \arctan \frac{\text{panjang sisi depan}}{\text{panjang sisi samping}} \quad (33)$$

Misal asumsikan nilai awal letak zero 'a' pada titik -7.

Sudut α_1 adalah sudut yang diapit antara garis titik a-S₁ dengan garis sumbu X, dengan panjang sisi depan 2,83 dan panjang sisi samping 1,15 dengan persamaan (33) diperoleh nilai $\alpha_1 = -67,885^\circ$.

Sudut α_2 adalah sudut yang diapit antara garis titik s dan titik S₁ dengan garis sumbu X yang menghadap garis sumbu Y dengan persamaan (33) diperoleh nilai $\alpha_2 = -153,937^\circ$.

Sudut α_3 adalah sudut yang diapit antara garis titik S₁ dan titik 0 dengan garis sumbu X yang menghadap garis sumbu Y dengan persamaan (33) diperoleh nilai $\alpha_3 = -154,184^\circ$.

Sehingga nilai dari $\alpha_{total} = -67,885^\circ$. Agar $G(s)H(s) = -180^\circ$ maka perlu ditambahkan sudut sebesar 196° , sehingga dari penambahan sudut tersebut koordinat letak zero b adalah -7,507.

Maka transfer fungsi dari kontroler dengan menggunakan persamaan (31) dapat diperoleh :

$$G_c(s) = K \frac{(s+7)(s+7,507)}{s}$$

- b) Syarat Besar $|G(s)H(s)| = 1$
 Dengan menggunakan transfer fungsi $G_c(s)$ dan $H(s)$ yang diperoleh, disubstitusikan ke dalam persamaan (32) sehingga diperoleh nilai $K = 0,7372$.

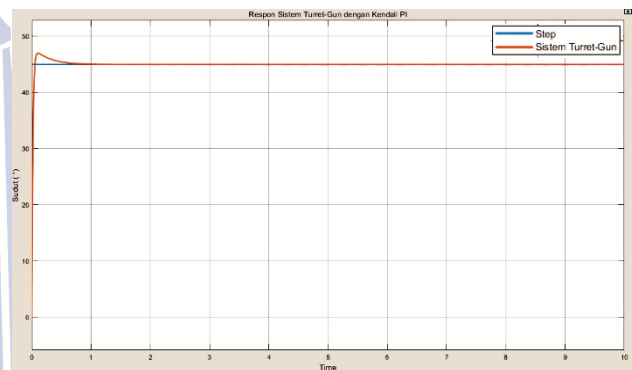
Didapatkan tranfer fungsi dari kontroler adalah

$$G_c(s) = 0,7372 \frac{(s+7)(s+7,507)}{s}$$

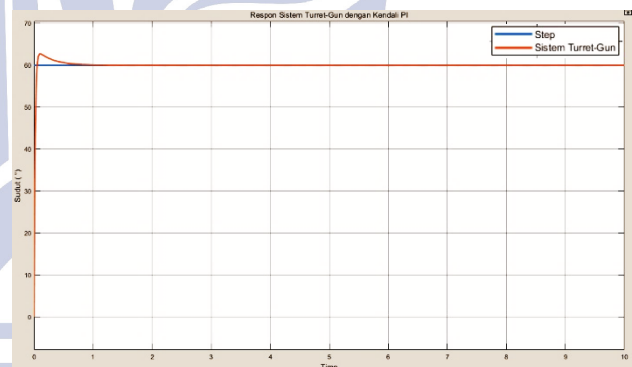
Dari persamaan $G_c(s)$ di atas, maka diperoleh nilai $K_p = 10,695$ dan $K_i = 38,739$.

Pengujian dengan Sudut Tetap

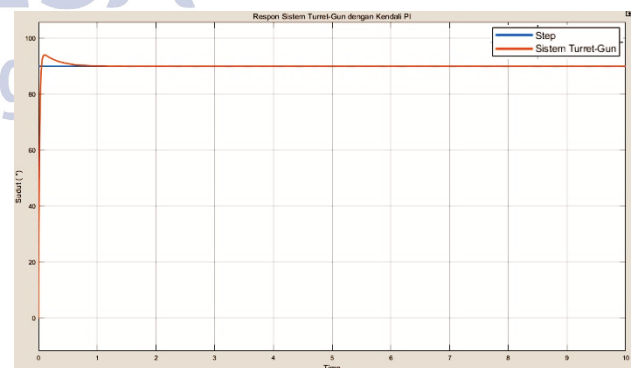
Untuk mengetahui hasil respon sistem kendali PI pada *Turret-Gun* yang telah dibuat, dilakukan simulasi dengan sistem *loop* tertutup menggunakan rangkaian simulink pada perangkat lunak Matlab. Sistem *turret-gun* yang digunakan pada artikel ini dapat dilihat pada Gambar 10 dan hasil respon pengujian dari sistem dapat dilihat pada Gambar 11, Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 11. Respon sistem pada sudut 45°



Gambar 112. Respon sistem pada sudut 60°



Gambar 12. Respon sistem pada sudut 90°

Dari pengujian sistem yang telah dilakukan pada sudut 45° , 60° , dan 90° derajat, didapatkan respon dinamik dari sistem pada Gambar 11, Gambar 12 dan Gambar 13. Dengan analisa respon sistem seperti pada

Tabel 3,

Tabel 3. Analisa Respon dari Sistem *Turret-Gun*

Respon Dinamik	45°	60°	90°
Tr (s)	0,0327	0,0317	0,0327
Ts (s)	0,3285	0,3308	0,3289
Mo (%)	4,49	4,51	4,49
Ess (%)	0,0011	0,0011	0,0011

Keterangan:

- T_r = rise time
- T_s = settling time
- Mo = Maximum Overshoot
- E_{ss} = error steady state

Dilihat dari Gambar 7. respon turret gun tanpa kendali PI, *Turret-Gun* tidak dapat mencapai nilai *setpoint* yang diberikan. Pada gambar 11 dengan nilai *setpoint* yang sama, respon *transien* yang didapatkan dari sistem *turret-gun* menggunakan kendali PI bisa mencapai *setpoint* namun masih memiliki *overshoot* sebelum mencapai *setpoint* yang ditentukan. Perbandingan respon *transien* antara sistem *turret-gun* tanpa menggunakan kendali dan dengan sisten *turret-gun* kendali PI dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan respon dari sistem *turret-gun* tanpa kendali dengan sistem *turret-gun* kendali PI

Respon Dinamik	Tanpa Kendali	Dengan Kendali PI
Tr (s)	0,3941	0,0327
Ts (s)	0,7129	0,3285
Mo (%)	0	4,49
Ess (%)	0	0,0011

Perbandingan Hasil Dengan Penelitian Sebelumnya

Untuk mengetahui tingkat keberhasilan penelitian ini, akan dilakukan perbandingan hasil respon sistem *turret-gun* terhadap penelitian sebelumnya. Penelitian-penelitian tersebut antara lain, Nur Afikhah menggunakan kendali *Fuzzy Logic Controller* yang dilakukan pada tahun 2019 dan Moh. Rizal Ashari menggunakan Kendali PID Metode *Chien Hrones Reswick* (CHR) yang dilakukan pada tahun 2019. Hasil perbandingan dapat dilihat pada tabel.

Tabel 5. Perbandingan Hasil dengan Penelitian Sebelumnya pada Sudut 45°

Respon Dinamik	Dengan Kendali PID CHR	Dengan Kendali PI <i>Root-Locus</i>
Tr (s)	2,944	0,0327
Ts (s)	1,281	0,3289
Mo (%)	4,4	4,49
Ess (%)	0	0,0011

Tabel 6. Perbandingan Hasil dengan Penelitian Sebelumnya pada Sudut 90°

Respon Dinamik	<i>Fuzzy Logic Controller</i>	Dengan Kendali PI <i>Root-Locus</i>
Tr (s)	0,898	0,0327
Ts (s)	1,227	0,3289
Mo (%)	2,2	4,49
Ess (%)	0	0,0011

Berdasarkan data pada Tabel 5 dan Tabel 6, dapat diketahui bahwa sistem kendali PI *Root-Locus* yang dibuat pada penelitian ini dapat memperbaiki respon dari penelitian-penelitian sebelumnya. Hal itu dapat dilihat pada sudut 45°, kendali PI *Root-Locus* memiliki nilai Tr yang kecil, dan memiliki nilai Ts lebih kecil dibanding penelitian sebelumnya. Pada perbandingan hasil sudut 90°, kendali PI *Root-Locus* memiliki *Locus* memiliki nilai Tr yang kecil, dan memiliki nilai Ts lebih kecil dibanding penelitian sebelumnya.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan data simulasi yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa sistem *Turret-Gun* menggunakan kendali PI dengan metode *Root-Locus* yang telah dirancang dapat mengendalikan posisi sudut sistem dengan baik. Dengan implementasi nilai $K_p = 10,695$ dan $K_i = 38,739$ data hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 3, respon sistem didapat pada *setpoint* 60° dengan nilai *rise time* (tr) sebesar 0,0317 detik, nilai *settling time* (ts) sebesar 0,3308 detik, nilai *maximum overshoot* (mo) sebesar 4,51 %, dan nilai *error steady state* (ess) sebesar 0%. Dapat diketahui juga sistem *Turret-Gun* kendali PI dengan metode *Root-Locus* yang telah dirancang ,mampu mengatasi perubahan *setpoint* dan gangguan yang ada. Selain itu kendali kendali PI dengan metode *Root-Locus* yang telah dirancang, pada penelitian ini memiliki hasil simulasi yang lebih baik dibandingkan beberapa penelitian terdahulu.

Saran

Berdasarkan percobaan yang telah dilaksanakan, ada beberapa saran yang diajukan oleh penulis, untuk dapat mengembangkan sistem kendali posisi sudut azimut pada sistem *Turret-Gun* selanjutnya. Untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan kendali ANFIS, sistem kendali PID-ANFIS, PSO-ANFIS, LQR dan lain-lain untuk menghasilkan respon sistem yang lebih cepat juga stabil.

DAFTAR PUSTAKA

Afikhah, Nur. 2019. *Sistem Pengendalian Posisi Sumbu Azimuth Pada Turret Gun Menggunakan Fuzzy Logic Controller Berbasis Arduino Mega 2560*. Universitas Negeri Surabaya. Jurnal Teknik Elektro. Volume 09 Nomer 02 Tahun 2019. Hal 259-267.

Ashari, Moh. Rizal. 2019. *Perancangan Sistem Kontrol Posisi Sumbu Azimuth Turret Gun Menggunakan Kendali Pid Berbasis Arduino Mega 2560*. Universitas Negeri Surabaya. Jurnal Teknik Elektro. Volume 08 Nomor 03 Tahun 2019. Hal 541-548.

Kunto. Dimas, Wahjudi. Arif, dan Nurhadi. Hendro. 2016. *Perancangan Sistem Kontrol PID Untuk Pengendalian Sumbu Elevasi Gun Pada Turret-Gun Kaliber 20mm*. Jurnal Teknik ITS Vol. 5, No 2.

Ogata, Katsuhiko. 2010. *Modern Control Engineering Fifth Edition*. New Jersey (US): Pearson Education Inc.

Priambodo, Ardy. 2017. *Perancangan Sistem Kontrol PD untuk Stabilitas Terbang UAV Quadcopter*. Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi. Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada.

Putra, Ashar Wahidil. 2020. *Perancangan Kendali LQR-PD Untuk Pengendalian Sumbu Elevasi Gun Pada Turret-Gun Kaliber 20 Milimeter*. Pekanbaru: Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.

Wicaksono, R. Herlambang Tryan. 2019. *Perancangan Sistem Kontrol Posisi Sumbu Elevasi Gun Pada Turret gun Menggunakan Kontroler PID Berbasis Arduino Mega*. Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang.

Sihombing, Budi. 2020. *Pengaturan Kecepatan Motor Brushless Dc Dengan Pid Menggunakan Metode Root Locus*. Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara.

Tamara. Mohamad Nasyir, Pramuji. Bambang, Nurhadi. Hendro, dan Pitowo. Endra. 2018. *Simulasi dan Eksperimen Kontrol Automatic Turret Gun*. Jurnal ELTEK, Vol. 16, No 1.

Wahyunggoro. Oyas, Khairiyati. Lukluk, Subardono. Alif, dan Suwastono. Addin. 2005. *Optimasi Pengendali PI Sebagai Pengendali Kecepatan Motor DC Menggunakan Metode Root-Locus Berbasis Mikrokontroler AT89C51*. Universitas Gajah Mada. Jurnal Teknik Elektro. Media Teknik No. 4 Tahun XXVII Edisi November 2005.

Wisnu. Danu, Wahjudi. Arif, dan Nurhadi. Hendro. 2016. *Perancangan Sistem Kontrol PID Untuk Pengendalian Sumbu Azimuth Turret Pada Turret-Gun Kaliber 20mm*. Jurnal Teknik ITS Vol. 5, No 2.