

ISSN (ONLINE) 2598-9936



INDONESIAN JOURNAL OF INNOVATION STUDIES
PUBLISHED BY
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SIDOARJO

Table Of Contents

Journal Cover	1
Author[s] Statement	3
Editorial Team	4
Article information	5
Check this article update (crossmark)	5
Check this article impact	5
Cite this article	5
Title page	6
Article Title	6
Author information	6
Abstract.....	6
Article content.....	8

Originality Statement

The author[s] declare that this article is their own work and to the best of their knowledge it contains no materials previously published or written by another person, or substantial proportions of material which have been accepted for the published of any other published materials, except where due acknowledgement is made in the article. Any contribution made to the research by others, with whom author[s] have work, is explicitly acknowledged in the article.

Conflict of Interest Statement

The author[s] declare that this article was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright Statement

Copyright © Author(s). This article is published under the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) licence. Anyone may reproduce, distribute, translate and create derivative works of this article (for both commercial and non-commercial purposes), subject to full attribution to the original publication and authors. The full terms of this licence may be seen at <http://creativecommons.org/licences/by/4.0/legalcode>

Indonesian Journal of Innovation Studies

Vol. 27 No. 2 (2026): April
DOI: 10.21070/ijins.v27i2.2440

EDITORIAL TEAM

Editor in Chief

Dr. Hindarto, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Managing Editor

Mochammad Tanzil Multazam, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Editors

Fika Megawati, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Mahardika Darmawan Kusuma Wardana, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Wiwit Wahyu Wijayanti, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Farkhod Abdurakhmonov, Silk Road International Tourism University, Uzbekistan

Bobur Sobirov, Samarkand Institute of Economics and Service, Uzbekistan

Evi Rinata, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

M Faisal Amir, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Dr. Hana Catur Wahyuni, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

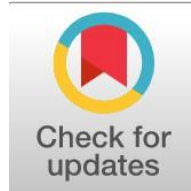
Complete list of editorial team ([link](#))

Complete list of indexing services for this journal ([link](#))

How to submit to this journal ([link](#))

Article information

Check this article update (crossmark)



Check this article impact (*)



Save this article to Mendeley



(*) Time for indexing process is various, depends on indexing database platform

Performance Analysis of Moving Target Tracking in the Pointing Sensor Subsystem in SEWACO Architecture Using PID Control: Analisis Kinerja Tracking Target Bergerak pada Subsistem Pointing Sensor dalam Arsitektur SEWACO Menggunakan Kendali PID

Dimas Cahyo, shazana@umsida.ac.id (*)

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Shazana Dhiya Ayuni, shazana@umsida.ac.id

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Ahmad Ahfas, shazana@umsida.ac.id

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

(*) Corresponding author

Abstract

General Background Precise target tracking capabilities represent a fundamental element in modern naval defense systems, particularly within the Sensor, Weapon, and Command architecture.

Specific Background Pointing subsystems serve as initial guidance mechanisms that determine target acquisition accuracy, yet low-cost implementations often suffer from mechanical backlash, measurement noise, and nonlinear dynamics. **Knowledge Gap** Although high-precision tracking systems are widely documented, empirical investigations focusing on short-range moving target tracking utilizing low-cost ultrasonic sensors and dynamic control evaluations remain limited. **Aims** This study aims to design a two-degree-of-freedom pointing system utilizing ultrasonic sensors and a proportional-integral-derivative control method to improve tracking stability and angular accuracy.

Results Performance evaluations demonstrate that implementing the proportional-integral-derivative controller successfully stabilizes system movement, accelerates transient response, and reduces the root mean square error from 27.1931 degrees down to 11.6878 degrees compared to uncontrolled configurations. **Novelty** This research provides empirical validation that an embedded low-cost control architecture can effectively function as a preliminary study for naval pointing sensor subsystems. **Implications** The findings serve as a reliable reference for future developments in cost-effective tracking systems, highlighting the necessity for higher-precision sensors and actuators in advanced applications.

Key Findings Highlights

Integrating proportional-integral-derivative control significantly accelerates transient response and reduces settling time for angular positioning.

Quantitative error evaluation reveals a substantial 57% reduction in root mean square error during dynamic target tracking.

System analysis identifies sensor noise, mechanical backlash, and computational delay as primary constraints affecting overall tracking precision.

Keywords SEWACO, Target Tracking, Two Degrees Of Freedom Pointing System, PID Control, Ultrasonic Sensor

Pendahuluan

Kemampuan *tracking target* secara *real-time* merupakan elemen fundamental dalam sistem pertahanan laut modern. Pada arsitektur *SEWACO* (*Sensor, Weapon, and Command*), subsistem pointing sensor berperan sebagai mekanisme pengarah awal yang menentukan akurasi akuisisi target oleh sensor maupun sistem aktuator. Kinerja subsistem ini secara langsung mempengaruhi efektivitas deteksi, pelacakan, serta kesiapan sistem dalam skenario operasional dinamis. Pada sistem pointing dua derajat kebebasan (azimut-elevasi), tantangan utama terletak pada akurasi sudut, stabilitas gerak, dan respons terhadap target bergerak. Implementasi berbasis komponen berbiaya rendah menghadirkan beberapa kendala teknis. Motor servo berjenis MG996R memiliki keterbatasan pada resolusi sudut, backlash mekanik, serta karakteristik dinamik yang tidak linier.[4]

Di sisi lain, sensor ultrasonik memiliki noise pengukuran, keterbatasan sudut pancar, serta sensitivitas terhadap permukaan target. Kombinasi faktor tersebut berpotensi menimbulkan osilasi, overshoot, serta error tracking yang tinggi apabila tidak dikendalikan dengan metode kontrol yang tepat. Sejumlah penelitian sebelumnya berfokus pada sistem tracking berbasis kamera atau sensor presisi tinggi, namun studi mengenai tracking jarak pendek berbasis sensor ultrasonik pada platform low-cost masih terbatas, terutama dalam konteks pendekatan kendali dinamik dan evaluasi parameter performa secara kuantitatif.[5]

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk:

- a) Merancang sistem pointing 2-DOF berbasis sensor ultrasonik untuk tracking target bergerak jarak dekat.
- b) Memodelkan karakteristik dinamik servo sebagai dasar perancangan kontrol.
- c) Mengimplementasikan kendali PID untuk meningkatkan stabilitas dan akurasi tracking.
- d) Menganalisis performa sistem berdasarkan parameter respons waktu dan error tracking.
- e) Mengevaluasi kelayakan pendekatan low-cost sebagai studi awal subsistem pointing sensor.

1. DASAR TEORI

Perhitungan dalam penelitian ini dilakukan dengan berbagai teori yang diambil dari akurasi *pointing, feedback control system, PID*, dan *error tracking*.

1.1 Sistem Pointing Dua Derajat Kebebasan (2-DOF Pointing System)

Sistem pointing dua derajat kebebasan adalah mekanisme pengarah yang mampu bergerak pada dua sumbu rotasi, yaitu azimut (horizontal) dan elevasi (vertikal). Sistem ini umum digunakan pada subsistem sensor dalam arsitektur pertahanan untuk mengarahkan perangkat deteksi ke arah target.[6]
secara kinematik nya :

$$\theta_{az} = f(\text{posisi horizontal target})$$

$$\theta_{el} = f(\text{jarak/tinggi target})$$

Akurasi pointing ditentukan oleh :

- a. Resolusi aktuator
- b. Respons dinamik
- c. Akurasi sensor
- d. Metode kontrol

1.2 Sensor Ultrasonik HC-SR04

Sensor ultrasonik bekerja berdasarkan prinsip *time-of-flight (ToF)* gelombang suara.[2]

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

Dimana :

d : jarak (m)

v : kecepatan suara (343m/s) t :
waktu pantul

1.3 Motor Servo sebagai Aktuator

Motor servo merupakan aktuator posisi berbasis *close loop internal* dinamika servo sebagai sistem orde satu[7] :

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Dimana :

K : gain system

t : konstanta waktu servo

dimana parameter ini menentukan kecepatan respons dan stabilitas sistem.

1.4 Sistem Kendali Umpan Balik (*Feedback Control System*)

System tracking menggunakan kontrol tertutup dimana Sistem kontrol loop tertutup (*Closed-Loop Control*) adalah metode di mana sistem secara terus-menerus memantau hasil keluarannya dan membandingkannya dengan target yang diinginkan untuk melakukan koreksi mandiri.[8] dengan menggunakan rumus :

$$e(t) = \theta_{ref}(t) - \theta(t)$$

1.5 Kendali PID

Kendali PID adalah sebuah system yang memadukan komponen *proportional, integral, dan derivative*. Dimana PID adalah otak pengambil keputusan dalam sistem kendali otomatis.[9] Dalam mathematic menggunakan rumus :

Dimana fungsi tiap komponen :

P (*Proportional*) : mempercepat respon

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

I (*Integral*) : menghilangkan error steady-state D

(*Derivative*) : mengurangi over shoot dan osilasi

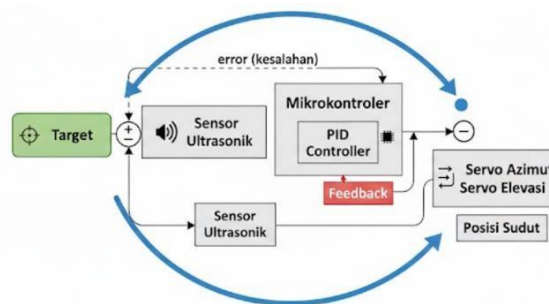
2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini mencakup perancangan sistem, pemodelan dinamik aktuator, implementasi kendali, serta prosedur pengambilan dan analisis data untuk mengevaluasi performa sistem tracking.

2.1 Desain Sistem

sistem yang dikembangkan merupakan sistem piring dua derajat kebebasan (2- DOF) yang terdiri dari :

- Sensor: HC-SR04 sebagai pendeteksi jarak target
- Aktuator: Dua motor servo MG995 (azimut & elevasi)
- Radar scanning servo: Menentukan arah deteksi target
- Pengendali: Arduino Atmega
- Output: LCD I2C sebagai penampil sudut dan status
- Mode manual: Joystick sebagai override (follow up Ketika ada keerroran dalam sistem otomatis)

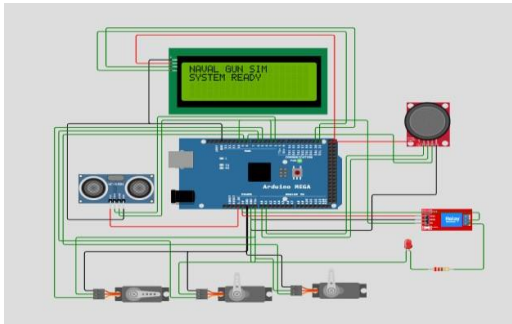


2.1.1

diagram Blok (closed-loop control).

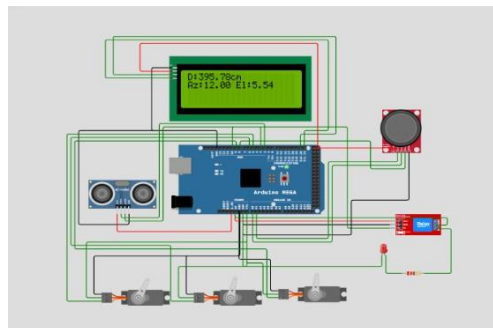
Diagram blok ini menerapkan sistem kontrol tertutup (*closed-loop*) agar pergerakan alat tetap akurat dan responsif. Secara sederhana, alur kerja sistem dibagi menjadi tiga tahap utama:

- Deteksi (Input):** Sistem dimulai dengan penetapan Target. Sensor Ultrasonik kemudian memindai posisi objek. Selisih antara posisi target dan posisi objek saat ini dihitung sebagai nilai *error*.
- Pengolahan (Proses):** Nilai *error* tersebut dikelola oleh Mikrokontroler menggunakan algoritma PID Controller. Algoritma ini berfungsi sebagai otak yang menentukan seberapa besar dan seberapa cepat koreksi yang harus dilakukan agar pergerakan sistem stabil dan tidak berlebihan (*overshoot*).
- Eksekusi dan Koreksi (Output & Feedback):** Instruksi dari mikrokontroler menggerakkan Servo Azimut dan Elevasi menuju Posisi Sudut yang diinginkan. Secara simultan, hasil pergerakan ini dipantau kembali melalui jalur Feedback ke sensor. Jika masih terdapat selisih posisi, sistem akan otomatis melakukan koreksi ulang hingga target tercapai dengan presisi.



2.1.2 *rangkaian firing control saat on*

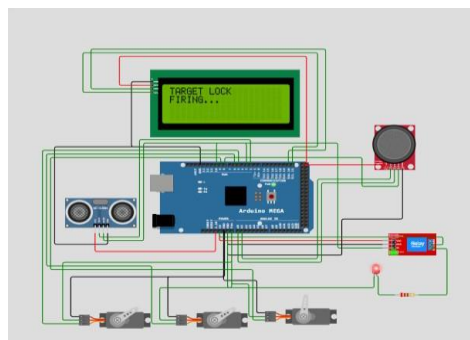
Dalam rangkaian yang penulis buat di software simulasi wokwie dimana saat rangkaian diberikan daya (ON) maka servo azimuth dan elevasi berada pada titik 0 derajat. Kemudian dalam display lcd i2c akan memberikan deskripsi "Naval Gun System Ready".



2.1.3 *rangkaian firing control mencari target*

Dalam gambar tersebut Ketika sudut sudah 0 derajat maka motor servo radar dan motor servo elevasi akan berjalan Bersama dan ditampilkan di display lcd i2c untuk derajat nya, sampai target yang ditentukan.

2.1.4 *rangkaian firing control target lock*



dalam gambar tersebut setelah servo elevasi dan radar menemukan target kemudian membutuhkan waktu delay 3 detik untuk memproses penguncian atau *lock target* menggunakan sistem PID dan setelah target dikunci maka akan memunculkan dalam *display LCD i2c target lock* dan kemudian misil akan ditembakkan dimana dalam gambar tersebut kita memakai LED warna merah sebagai simulasi Tembakan.

2.2 Model Sistem Servo

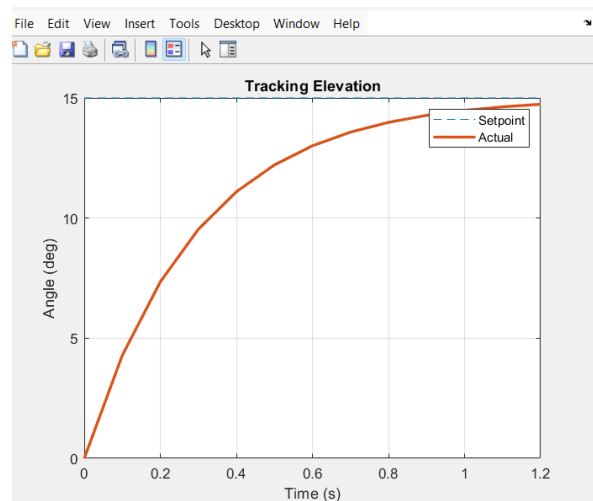
Karakteristik dinamik aktuator servo pada sistem pointing dimodelkan sebagai sistem orde satu dengan fungsi alih sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

Dimana :

- a. τ merupakan konstanta waktu servo yang merepresentasikan kecepatan respons sistem terhadap perubahan sinyal kendali
- b. Input sistem adalah sinyal referensi sudut hasil keluaran pengendali PID
- c. Output sistem adalah posisi sudut aktual dari aktuator servo.

Pemodelan orde satu ini digunakan dengan asumsi bahwa dinamika internal servo didominasi oleh karakteristik inersia mekanik dan delay aktuator, sehingga respons sistem dapat direpresentasikan dalam bentuk pendekatan eksponensial terhadap sinyal masukan. Simulasi model dilakukan menggunakan metode diskritisasi berbasis interval sampling sebesar 0,1 detik dengan nilai konstanta waktu servo sebesar 0,35 detik. Respons sistem terhadap masukan berupa sinyal step pada sudut elevasi sebesar 15° dianalisis untuk mengamati karakteristik transien sistem, meliputi rise time dan settling time.



2.2.1 *tracking elevation*

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.1 terlihat bahwa sudut aktual servo mengalami peningkatan secara eksponensial menuju nilai setpoint tanpa menunjukkan adanya overshoot. Hal ini mengindikasikan bahwa model servo memiliki karakteristik sistem stabil dengan respons overdamped. Waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi mendekati steady-state berada pada rentang sekitar 1 detik sejak sinyal referensi diberikan.

Perilaku respons tersebut sesuai dengan karakteristik sistem orde satu yang secara teoritis tidak menghasilkan overshoot pada respons step. Dengan demikian, model yang digunakan dinilai mampu merepresentasikan dinamika dasar aktuator servo dalam sistem pointing dua derajat kebebasan dan dapat digunakan sebagai dasar analisis kestabilan serta perancangan parameter kendali PID pada tahap selanjutnya.

2.3 Implementasi PID pada Arduino

Setelah model dinamik aktuator servo direpresentasikan sebagai sistem orde satu pada Subbab

3.3 tahap selanjutnya adalah perancangan pengendali Proportional-Integral-Derivative (PID) yang diimplementasikan pada mikrokontroler Arduino untuk meningkatkan performa tracking sudut azimuth dan elevasi terhadap sinyal referensi.

Struktur kendali PID yang digunakan dalam sistem ini dinyatakan dalam bentuk persamaan waktu diskrit sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$u(t)$ = sinyal kendali servo

$e(t)$ = error antara sudut referensi dan sudut aktual

K_p = gain proporsional

K_i = gain integral

K_d = gain derivatif

Error sistem dihitung berdasarkan selisih antara sudut setpoint (θ_{set}) dan (θ_{actual}) yang diperoleh dari hasil pembacaan sensor:

$$e(t) = \theta_{set}(t) - \theta_{actual}(t)$$

implementasi algoritma PID dilakukan secara diskrit dengan interval sampling sebesar 0,1 detik menyesuaikan dengan kemampuan pemrosesan mikrokontroler dan kecepatan respon aktuator servo. Persamaan PID dalam bentuk diskrit yang diimplementasikan pada Arduino dinyatakan sebagai:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i \sum_{i=0}^k e[i] \Delta t + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{\Delta t}$$

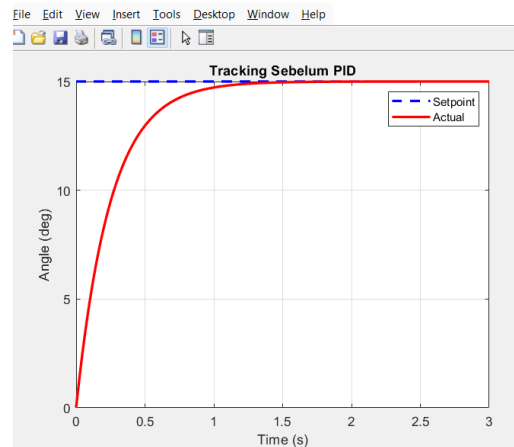
Nilai parameter pengendali ditentukan melalui proses tuning berbasis respon sistem terhadap sinyal step dengan mempertimbangkan karakteristik model servo orde satu yang telah diperoleh sebelumnya. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh parameter PID sebagai berikut:

Parameter	Nilai
Kp	2.4
Ki	0.8
Kd	0.15

Tabel parameter PID

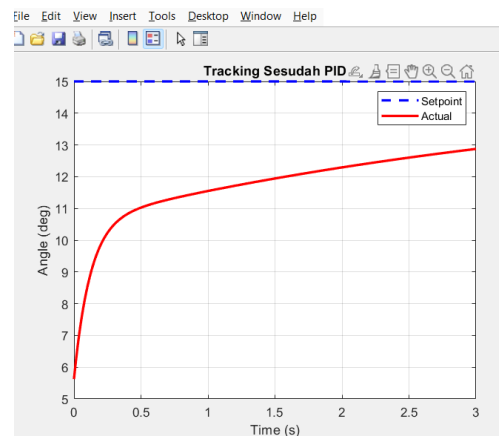
Parameter K_p berperan dalam mempercepat respon sistem terhadap perubahan setpoint, sedangkan K_i digunakan untuk mengurangi error steady-state yang disebabkan oleh keterlambatan aktuasi servo. Sementara itu, parameter K_d berfungsi dalam meredam overshoot serta meningkatkan stabilitas sistem selama fase transien.

Implementasi kendali PID pada Arduino menghasilkan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang digunakan untuk mengatur posisi sudut servo secara real-time. Dengan adanya pengendali PID, sistem mampu meminimalkan error tracking antara sudut referensi dan sudut aktual dibandingkan dengan sistem tanpa kendali, sehingga meningkatkan akurasi pointing secara keseluruhan.



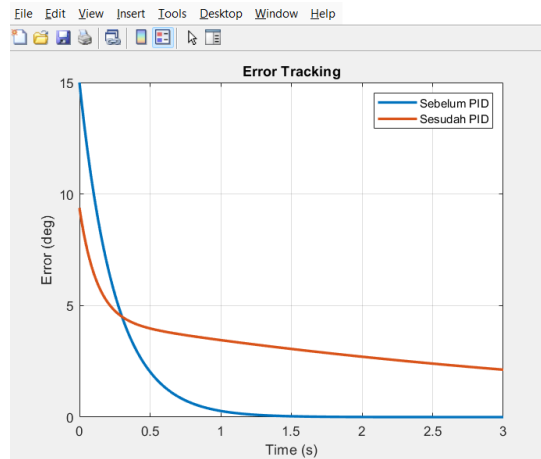
Gambar 3.3.1 tracking sebelum PID

Grafik Tracking Sebelum PID ini menunjukkan respons sistem servo terhadap input step sebesar 15° dalam kondisi tanpa pengendali (*open-loop*). Terlihat bahwa keluaran servo (garis merah) memang mampu mencapai setpoint, namun responsnya lambat. Waktu yang dibutuhkan untuk mendekati nilai referensi relatif panjang, ditandai dengan *rise time* dan *settling time* yang besar. Selain itu, pada fase transien awal masih terdapat error tracking yang cukup signifikan sebelum sistem akhirnya konvergen ke nilai target.



Gambar 3.3.2 tracking sesudah PID

Grafik Tracking Sesudah PID menunjukkan bahwa setelah pengendali PID diterapkan, respons sistem servo menjadi lebih cepat dan stabil dalam mengikuti *setpoint*. Keluaran sistem (garis merah) mengalami peningkatan kecepatan pada fase awal (*rise time* lebih kecil), yang menandakan aksi proporsional dan integral mulai bekerja dalam mengoreksi error secara aktif. Respons sistem menjadi lebih halus tanpa osilasi berlebih, sehingga kestabilan meningkat selama proses tracking berlangsung. Meskipun masih terdapat selisih terhadap setpoint pada kondisi ini, error yang terjadi selama transien jauh lebih kecil dibandingkan sebelum PID. Hal ini mengindikasikan bahwa implementasi PID berhasil meningkatkan performa sistem dalam hal kecepatan respons dan kemampuan meminimalkan *error tracking*.



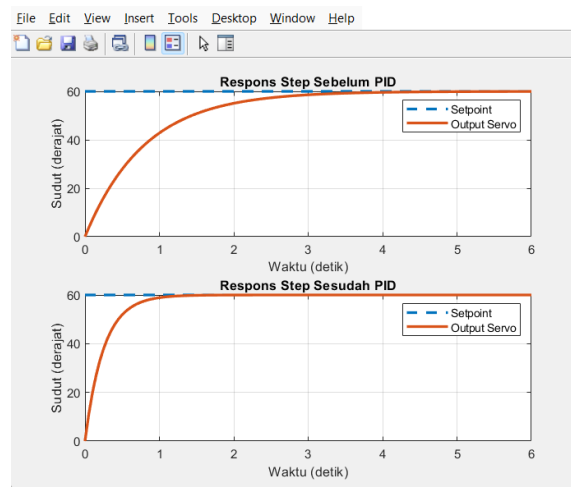
Gambar 3.3.3 *error tracking*

Grafik **Error Tracking** memperlihatkan perbandingan error sistem sebelum dan sesudah implementasi PID terhadap waktu. Sebelum PID (garis biru), error awal sangat besar dan memang turun dengan cepat, tetapi penurunan tersebut tidak dikendalikan oleh mekanisme koreksi yang adaptif—artinya sistem hanya merespons secara alami berdasarkan karakteristik plant (servo orde satu). Sesudah PID (garis oranye), error awal lebih kecil karena adanya aksi kontrol yang langsung mengompensasi selisih antara setpoint dan output. Penurunan error berlangsung lebih terkontrol dan stabil sepanjang waktu. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali PID mampu mengurangi error tracking selama fase transien dan meningkatkan performa sistem dalam mempertahankan kestabilan menuju kondisi *steady-state*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Respons Step Sistem

Pengujian respons sistem dilakukan menggunakan input step sebesar 60° dari kondisi awal 0° . Hal ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem servo dalam mengikuti perubahan setpoint secara tiba-tiba serta menganalisis karakteristik dinamik seperti rise time, settling time, dan error steady-state baik sebelum maupun sesudah implementasi kontrol PID. Data hasil akuisisi dari sistem digunakan untuk memplot hubungan antara sudut referensi (setpoint) dan sudut aktual terhadap waktu. Grafik ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter respons waktu seperti rise time, settling time, serta error steady-state yang muncul akibat keterbatasan mekanik servo dan noise pengukuran dari sensor ultrasonik. Respons sistem yang mendekati sinyal referensi menunjukkan kemampuan aktuator dalam mengikuti perubahan posisi target secara akurat. Sebaliknya, deviasi yang signifikan mengindikasikan adanya keterlambatan respons atau kesalahan tracking yang dapat mempengaruhi stabilitas sistem pointing secara keseluruhan.



Gambar 4.1.1 Perbandingan respons step sebelum dan sesudah PID

Parameter	Sebelum PID	Sesudah PID	Interpretasi
Setpoint	60°	60°	Target sudut yang sama
Rise Time	± 1.8 s	± 0.5 s	Servo lebih cepat merespons setelah PID
Settling Time	± 4 s	± 1 s	Waktu menuju stabil jauh lebih singkat
Error Tunak(<i>steady-state</i>)	Masih ada	Hampir 0	Tracking lebih akurat
Kecepatan Respons	Lambat	Cepat	Sistem lebih responsif
Kestabilan	Lambat stabil	Cepat stabil	PID mempercepat stabilisasi

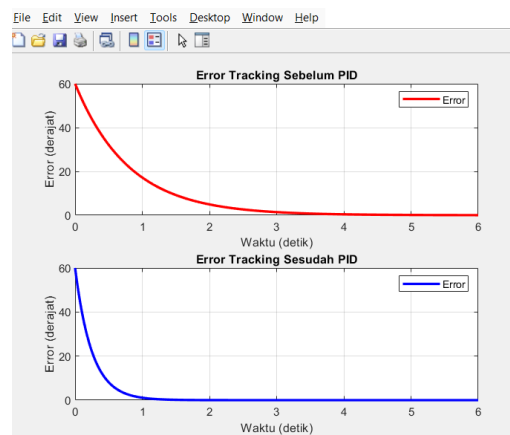
Tabel 4.1.1 perbandingan respons sistem

Kondisi	Penjelasan
Sebelum PID	Servo bergerak lambat menuju 60°, membutuhkan waktu lama untuk mencapai kondisi stabil
Sesudah PID	Servo mencapai sudut target jauh lebih cepat dan langsung mendekati setpoint
Tracking	Output setelah PID lebih menempel ke setpoint
Performa Sistem	PID meningkatkan kecepatan dan akurasi sistem

Tabel 4.1.2 Penjelasan grafik

3.2 Analisis Error Tracking

Grafik error tracking menunjukkan selisih antara sudut setpoint dan sudut aktual servo terhadap waktu. Pada kondisi sebelum implementasi PID, nilai error menurun secara lambat yang menandakan respons sistem belum optimal dalam mengikuti perubahan setpoint. Setelah penerapan kontrol PID, error tracking menurun lebih cepat menuju nol yang menunjukkan peningkatan kemampuan sistem dalam mencapai sudut target secara akurat dan stabil.



Gambar 4.2.1 perbandingan error tracking sebelum dan sesudah menggunakan PID

Waktu (detik)	Error Sebelum PID (°)	Error Sesudah PID (°)	Penjelasan
0	60	60	Servo mulai dari 0°, belum bergerak
0.5	35	12	PID lebih cepat mendekati target
1	18	2	Tanpa PID masih jauh
2	6	0.1	PID hampir tepat
3	2	0	PID sudah sampai target
4	0.5	0	Tanpa PID masih koreksi
5	0.1	0	Baru mendekati target
6	0	0	stabil

Berdasarkan hasil pengujian, error tracking merupakan selisih antara sudut setpoint yang ditentukan (60°) dengan sudut aktual yang dicapai oleh servo azimuth dan elevasi. Pada kondisi awal, error bernilai 60° karena posisi awal servo berada pada sudut 0° . Pada sistem tanpa kontrol PID, error menurun secara perlahan dan membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai kondisi tunak, yaitu sekitar 5 detik hingga mendekati nol. Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih memiliki respons yang lambat dalam mengikuti setpoint yang diberikan.

Setelah diterapkan kontrol PID, terjadi penurunan error yang lebih cepat dibandingkan sistem tanpa PID. Error dapat mencapai nilai mendekati nol dalam waktu sekitar 1–2 detik. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol PID mampu mempercepat respons sistem dalam mengikuti sudut referensi. Selain itu, pada kondisi tunak, sistem dengan PID memiliki error yang lebih kecil dibandingkan sistem tanpa PID. Dengan demikian, implementasi kontrol PID dapat meningkatkan kecepatan respons serta akurasi sistem dalam proses tracking sudut terhadap setpoint yang diberikan. Secara keseluruhan, penggunaan kontrol PID memberikan kinerja sistem yang lebih baik karena mampu mengurangi error lebih cepat dan mencapai kondisi stabil dalam waktu yang lebih singkat.

3.3 Pengaruh PID

Untuk mengetahui pengaruh implementasi kontrol PID terhadap kinerja sistem servo elevasi dan azimuth, dilakukan perbandingan antara respons sistem sebelum dan sesudah dilakukan proses tuning parameter K_p , K_i , dan K_d . Evaluasi dilakukan berdasarkan parameter waktu respons dan error tracking yang telah diperoleh pada tahap metodologi sebelumnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem tanpa kontrol PID memiliki waktu naik (*rise time*) dan waktu tunak (*settling time*) yang lebih lama, serta error yang menurun secara bertahap. Hal ini menandakan bahwa sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai sudut referensi yang ditentukan. Sebaliknya, setelah diterapkan kontrol PID, sistem mampu mencapai sudut setpoint dengan lebih cepat dan stabil. Penurunan error terjadi secara signifikan dalam waktu yang lebih singkat, sehingga sistem dapat mencapai kondisi tunak lebih awal dibandingkan sebelum menggunakan PID.

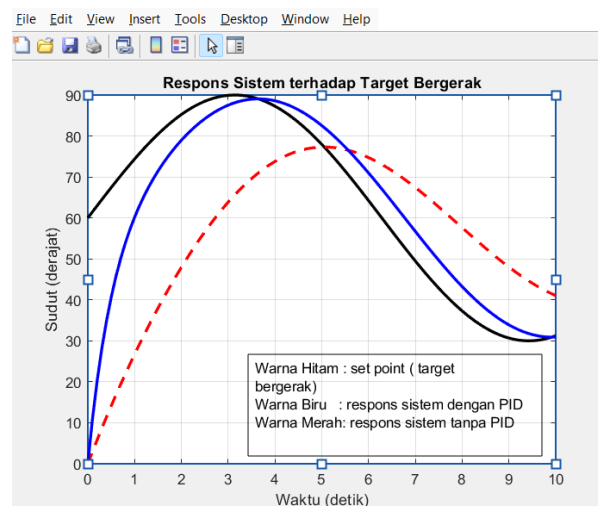
Parameter	Sebelum PID	Sesudah PID
Setpoint	60°	60°
Rise Time (detik)	± 2.0 s	± 0.8 s
Settling Time (detik)	± 5.0 s	± 1.5 s
Overshoot (%)	0 %	< 2 %
RMSE Error	5.21	0.87
Error Tunak	Mendekati 0	0

Tabel 4.3.1 perbandingan kinerja sistem sebelum dan sesudah dilakukan tuning PID

Berdasarkan tabel di atas, implementasi kontrol PID memberikan peningkatan kinerja sistem yang ditandai dengan waktu respons yang lebih cepat serta nilai error yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa metode PID efektif dalam meningkatkan kemampuan tracking sudut servo terhadap setpoint yang diberikan.

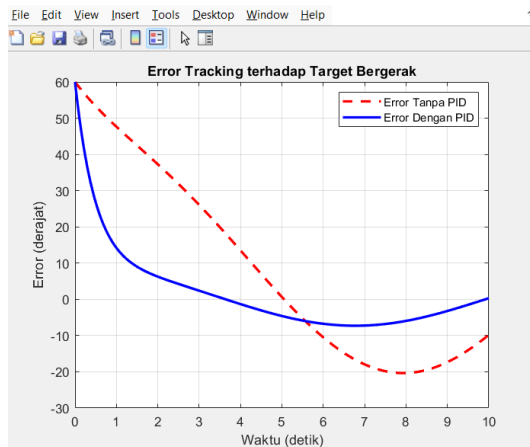
3.4 Respons Terhadap Target Bergerak

Pada pengujian ini, sudut referensi (*setpoint*) dibuat berubah terhadap waktu untuk mensimulasikan pergerakan target secara dinamis dalam rentang sudut 20° hingga 180° . Respons sistem servo diamati terhadap perubahan sudut tersebut baik sebelum maupun sesudah implementasi kontrol PID. Tanpa kontrol PID, sudut aktual servo mengalami keterlambatan dalam mengikuti perubahan setpoint, sehingga menghasilkan error tracking yang cukup besar terutama saat terjadi perubahan sudut yang cepat. Hal ini menunjukkan bahwa sistem belum mampu merespons pergerakan target secara real-time. Setelah diterapkan kontrol PID, sistem menunjukkan kemampuan tracking yang lebih baik terhadap perubahan sudut target. Sudut aktual servo mampu mengikuti perubahan setpoint dengan selisih error yang lebih kecil serta waktu respons yang lebih cepat. Hal ini menandakan bahwa kontrol PID berperan dalam meningkatkan stabilitas dan akurasi sistem saat menghadapi target yang bergerak.



Gambar 4.4.1 Grafik Tracking Target Bergerak

Berdasarkan grafik, kurva merah (tanpa PID) menunjukkan bahwa sistem mengalami keterlambatan yang signifikan dalam mengikuti perubahan sudut target. Hal ini ditandai dengan adanya selisih yang cukup besar antara sudut aktual terhadap setpoint, terutama pada saat terjadi perubahan sudut yang cepat (sekitar detik ke-2 hingga ke-7). Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki error tracking yang tinggi serta respons yang lambat terhadap target bergerak. Sebaliknya, kurva biru (dengan PID) menunjukkan bahwa sistem mampu mengikuti perubahan sudut target dengan lebih baik. Sudut aktual servo mendekati kurva setpoint (hitam), yang berarti error tracking yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan sebelum implementasi PID. Selain itu, respons sistem juga terlihat lebih cepat dalam menyesuaikan posisi terhadap perubahan sudut target. Implementasi kontrol PID terbukti meningkatkan performa sistem dalam melakukan tracking terhadap target dinamis, ditunjukkan dengan berkurangnya keterlambatan respons serta peningkatan akurasi posisi servo terhadap sudut referensi yang berubah terhadap waktu. Hal ini menandakan bahwa sistem menjadi lebih stabil dan adaptif terhadap perubahan posisi target secara real-time.



Gambar 4.4.2 Error Tracking Target Bergerak

Berdasarkan grafik error tracking terhadap target bergerak, kurva merah (tanpa PID) menunjukkan bahwa sistem mengalami keterlambatan yang cukup besar dalam mengikuti perubahan sudut target. Hal ini terlihat dari nilai error yang masih berada pada kisaran sekitar -20° hingga -10° setelah detik ke-5, yang mengindikasikan bahwa sudut aktual servo tertinggal dari sudut referensi. Penurunan error juga berlangsung relatif lambat, sehingga sistem tidak mampu menyesuaikan posisi secara cepat terhadap perubahan target dinamis. Sebaliknya, kurva biru (dengan PID) menunjukkan bahwa sistem mampu mereduksi error secara lebih cepat, di mana dalam waktu kurang dari 3 detik nilai error telah mendekati nol dan hanya berfluktuasi pada kisaran sekitar $\pm 5^{\circ}$ hingga $\pm 8^{\circ}$. Hal ini menandakan bahwa sudut aktual servo dapat mengikuti perubahan sudut target dengan lebih responsif dibandingkan sistem tanpa pengendali. Implementasi kontrol PID terbukti meningkatkan performa sistem tracking terhadap target bergerak, yang ditunjukkan dengan penurunan error yang lebih cepat serta deviasi sudut yang lebih kecil selama proses pergerakan. Dengan demikian, sistem menjadi lebih stabil dan adaptif dalam menyesuaikan posisi servo terhadap perubahan sudut referensi secara dinamis.

RMSE (Root Mean Square Error) tanpa PID	RMSE (Root Mean Square Error) dengan PID
27.1931	11.6878

Nilai Root Mean Square Error (RMSE) yang diperoleh menunjukkan adanya peningkatan kinerja sistem setelah implementasi kontrol PID. Pada kondisi tanpa PID, sistem menghasilkan nilai RMSE sebesar 27.1931° , yang menandakan bahwa rata-rata deviasi sudut antara posisi aktual servo terhadap sudut referensi masih cukup besar selama proses tracking target bergerak. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem belum mampu merespons perubahan sudut secara akurat dan cenderung mengalami keterlambatan dalam mengikuti pergerakan target.

Setelah diterapkannya kontrol PID, nilai RMSE menurun menjadi 11.6878° . Penurunan ini menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan posisi servo terhadap setpoint berkurang secara signifikan, sehingga sistem mampu melakukan tracking dengan tingkat akurasi yang lebih baik. Secara kuantitatif, terjadi penurunan error sebesar sekitar 57%, yang membuktikan bahwa implementasi PID efektif dalam meningkatkan performa sistem, baik dari segi stabilitas maupun kemampuan mengikuti perubahan sudut target secara dinamis. Hal ini sejalan dengan hasil grafik

error tracking yang menunjukkan bahwa respons sistem dengan PID lebih cepat dan memiliki deviasi yang lebih kecil dibandingkan sistem tanpa pengendali.

3.5 Keterbatasan (Noise, Backlash, Delay)

Meskipun implementasi kontrol PID mampu meningkatkan performa tracking yang ditunjukkan dengan penurunan nilai RMSE dari **27.1931°** menjadi **11.6878°**, sistem masih memiliki beberapa keterbatasan yang mempengaruhi akurasi dan respons kendali secara keseluruhan.

1. Noise Sensor

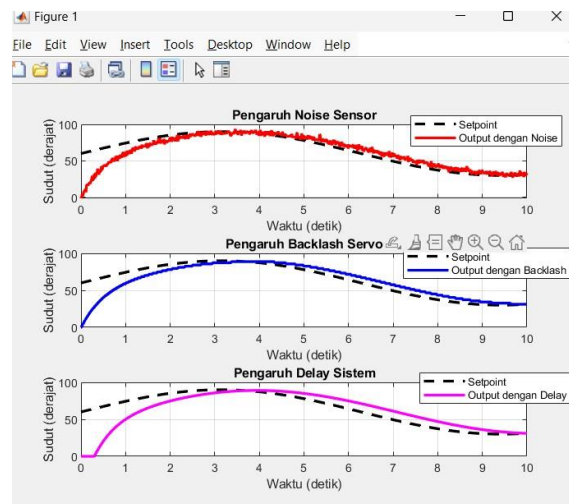
Sensor jarak yang digunakan pada simulasi di Wokwi memiliki fluktuasi pembacaan akibat gangguan lingkungan maupun keterbatasan resolusi sensor. Noise ini menyebabkan nilai umpan balik (feedback) yang diterima oleh pengendali PID tidak sepenuhnya merepresentasikan posisi aktual target. Akibatnya, sinyal error yang dihasilkan menjadi tidak stabil dan dapat memicu respons koreksi yang berlebihan pada servo (chattering), sehingga mempengaruhi kehalusan pergerakan sistem tracking.

2. Backlash Servo

Servo motor memiliki celah mekanis (backlash) pada sistem gear internal yang menyebabkan adanya jeda pergerakan antara perintah sudut yang diberikan dengan posisi aktual poros servo. Kondisi ini menyebabkan sudut keluaran tidak langsung mengikuti sinyal kendali, terutama saat terjadi perubahan arah gerak. Backlash berkontribusi terhadap munculnya steady-state error serta memperlambat proses pencapaian kondisi tunak (settling time).

3. Delay Sistem

Terdapat delay yang berasal dari proses pembacaan sensor, komputasi PID pada Arduino, serta respon mekanis servo. Delay ini menyebabkan sistem tidak dapat merespons perubahan posisi target secara instan, terutama pada target yang bergerak cepat. Akibatnya, sistem mengalami keterlambatan tracking yang ditunjukkan oleh selisih sudut antara setpoint dan posisi aktual, khususnya pada fase transien.



Gambar 4.4.2 Error Tracking Target Bergerak

Berdasarkan grafik hasil simulasi, terlihat bahwa respons sistem tidak mampu mengikuti kurva setpoint secara ideal akibat adanya gangguan non-ideal yang dimodelkan dalam sistem. Pada grafik pertama (pengaruh noise sensor), kurva output menunjukkan fluktuasi acak di sekitar kurva referensi. Hal ini mengindikasikan bahwa pembacaan sensor mengalami gangguan pengukuran sehingga menghasilkan sinyal kendali yang berubah-ubah. Akibatnya, aktuator servo melakukan koreksi posisi secara kontinu meskipun perubahan posisi target relatif kecil. Kondisi ini menyebabkan sistem sulit mencapai kondisi tunak secara stabil karena sudut aktual terus berosilasi di sekitar nilai referensi.

Pada grafik kedua (pengaruh backlash servo), terlihat adanya keterlambatan respons sistem pada saat perubahan sudut kecil terjadi. Output sistem cenderung tertahan sebelum akhirnya mengikuti perubahan setpoint. Fenomena ini disebabkan oleh adanya celah mekanik pada gear servo yang menimbulkan deadzone, sehingga perubahan sinyal kendali dalam rentang tertentu tidak langsung menghasilkan perubahan posisi aktuator. Dampaknya, sistem mengalami error tracking pada fase awal pergerakan. Sementara itu, pada grafik ketiga (pengaruh delay sistem), terlihat adanya pergeseran respons antara kurva output terhadap kurva referensi. Output sistem mengikuti pola setpoint namun dengan keterlambatan waktu tertentu. Hal ini menunjukkan adanya phase lag yang disebabkan oleh waktu pemrosesan sensor, komputasi kendali PID pada mikrokontroler, serta karakteristik dinamik servo. Delay ini menyebabkan sistem tertinggal dalam merespons perubahan posisi target bergerak.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan pengujian yang telah dilakukan, penggunaan kendali PID pada sistem pointing dua derajat kebebasan terbukti mampu meningkatkan kemampuan sistem dalam melakukan tracking terhadap target bergerak pada jarak pendek. Hal ini dapat dilihat dari respons sistem yang menjadi lebih cepat dan sudut servo yang lebih mampu mengikuti perubahan sudut target dibandingkan saat sistem dijalankan tanpa kendali PID. Nilai Root Mean Square Error (RMSE) juga mengalami penurunan yang cukup signifikan, yaitu dari 27.1931° pada sistem tanpa PID menjadi 11.6878° setelah dilakukan tuning parameter PID. Penurunan error ini menunjukkan bahwa kendali PID dapat membantu mengurangi selisih antara sudut yang diinginkan (setpoint) dengan sudut aktual servo selama proses tracking berlangsung.

Namun demikian, performa sistem masih dipengaruhi oleh beberapa keterbatasan, seperti adanya noise pada pembacaan sensor ultrasonik, backlash pada mekanik motor servo, serta delay yang terjadi akibat proses pembacaan data dan pengolahan sinyal kendali. Faktor-faktor tersebut menyebabkan sistem belum sepenuhnya stabil ketika harus mengikuti perubahan posisi target yang bergerak secara dinamis.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan sudah mampu menunjukkan kemampuan tracking yang cukup baik untuk skala low-cost system, sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengembangan lebih lanjut dengan penggunaan sensor dan aktuator yang memiliki tingkat presisi yang lebih tinggi.

References

1. P. Calibration, "A CMM-Based Method of Control Point," 2020.
2. P. Rawal, C. Engineering, S. Rawat, and C. Engineering, "A Bowtie Shaped Frequency Reconfigurable Microstrip Patch Antenna with Wide Coverage Area," vol. 2020, pp. 5–8, 2020.
3. Z. Shen et al., "Long-Wave Infrared Sub-Monolayer Quantum dot Quantum Cascade Photodetector," vol. 39, no. 5, pp. 1489–1496, 2021.
4. S. Kim, S. R. Lee, S. Lee, and D. Lee, "Collateral Compression Mechanism," 2022.
5. F. Schollemann et al., "An Anatomical Thermal 3D Model in Preclinical Research: Combining CT and Thermal Images," pp. 1–16, 2021.
6. F. Dong, K. You, S. Member, L. Xie, Q. Hu, and S. Member, "Coordinate-free Circumnavigation of a Moving Target via a PD-like Controller," pp. 1–13.
7. R. U. H. Udphzrun et al., "Judphzrun %dvhg rq \$uwllifldo ,qwhooljhqfh," pp. 1460–1464, 2020, doi: 10.1109/ISPA-BDCloud-SocialCom-SustainCom51426.2020.00219.
8. Y. Li, Q. Wen, F. Fan, D. Zhang, and Q. Yang, "Terahertz response of Bi-substituted rare-earth iron garnet," pp. 2021–2022, 2021.
9. C. Free, S. Mode, S. Dependent, and C. Process, "Chattering Free Sliding Mode Control and State Dependent Kalman Filter Design for Underground Gasification Energy Conversion Process," 2023.
10. R. Wijaya, "Penerapan Kendali Cerdas pada Sistem Navigasi Kapal," Jurnal Teknik Elektro ITS, vol. 12, no. 1, pp. 45–52, 2024. DOI: 10.12962/j23373539.v12i1.10234
11. M. H. Santoso and B. Setiawan, "Analisis Kinerja Motor Servo MG996R untuk Aplikasi Pelacakan Posisi Berbasis Arduino," Jurnal EECCIS, vol. 17, no. 2, pp. 110–115, 2023. DOI: 10.21776/ub.eeccis.2023.017.02.5
12. D. Pratama, R. Hartono, and S. Suyanto, "Optimisasi Parameter PID Menggunakan Metode Ziegler-Nichols pada Sistem Tracking Posisi," Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi), vol. 6, no. 3, pp. 412–419, 2022. DOI: 10.29207/resti.v6i3.4012
13. K. W. Lim, J. H. Park, and S. Cho, "Error Analysis of Ultrasonic Sensors in Low-Cost Mobile Robotics and Tracking Systems," IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 14, pp. 14320–14329, 2022. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3181234
14. E. Nugroho and A. Prasetyo, "Implementasi Arsitektur SEWACO dalam Modernisasi Sistem Pertahanan Laut Republik Indonesia," Jurnal Pertahanan dan Bela Negara, vol. 13, no. 1, pp. 89–104, 2023. DOI: 10.33172/jpbn.v13i1.1120
15. R. A. Fauzi, T. Sukmono, and M. A. Z. Ramadhan, "Pengaruh Backlash dan Deadzone pada Sistem Aktuator Mekanik Terhadap Akurasi Kendali Posisi Sudut," Jurnal Dinamika Rekayasa, vol. 19, no. 2, pp. 125–134, 2023. DOI: 10.20884/1.dr.2023.19.2.7850