



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**RANCANG BANGUN KENDALI *MOBILE* IKIBOT DALAM  
MENGHINDARI RINTANGAN SECARA *REAL-TIME***

**Sub Judul :**

**EVALUASI KINERJA NAVIGASI DAN STABILITAS SISTEM  
PADA IMPLEMENTASI KENDALI PID DAN MPC**

**SKRIPSI**

**SORAYA PUTRI AULIA**

**2203431011**

**POLITEKNIK  
NEGERI  
JAKARTA**

**PROGRAM STUDI INSTRUMENTASI DAN KONTROL**

**INDUSTRI**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**

**POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

**2026**



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



# **RANCANG BANGUN KENDALI *MOBILE* IKIBOT DALAM MENGHINDARI RINTANGAN SECARA *REAL-TIME***

**Sub Judul :**

## **EVALUASI KINERJA NAVIGASI DAN STABILITAS SISTEM PADA IMPLEMENTASI KENDALI PID DAN MPC**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Sarjana Terapan**

**SORAYA PUTRI AULIA**

**2203431011**

**PROGRAM STUDI INSTRUMENTASI DAN KONTROL  
INDUSTRI**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

**2026**



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

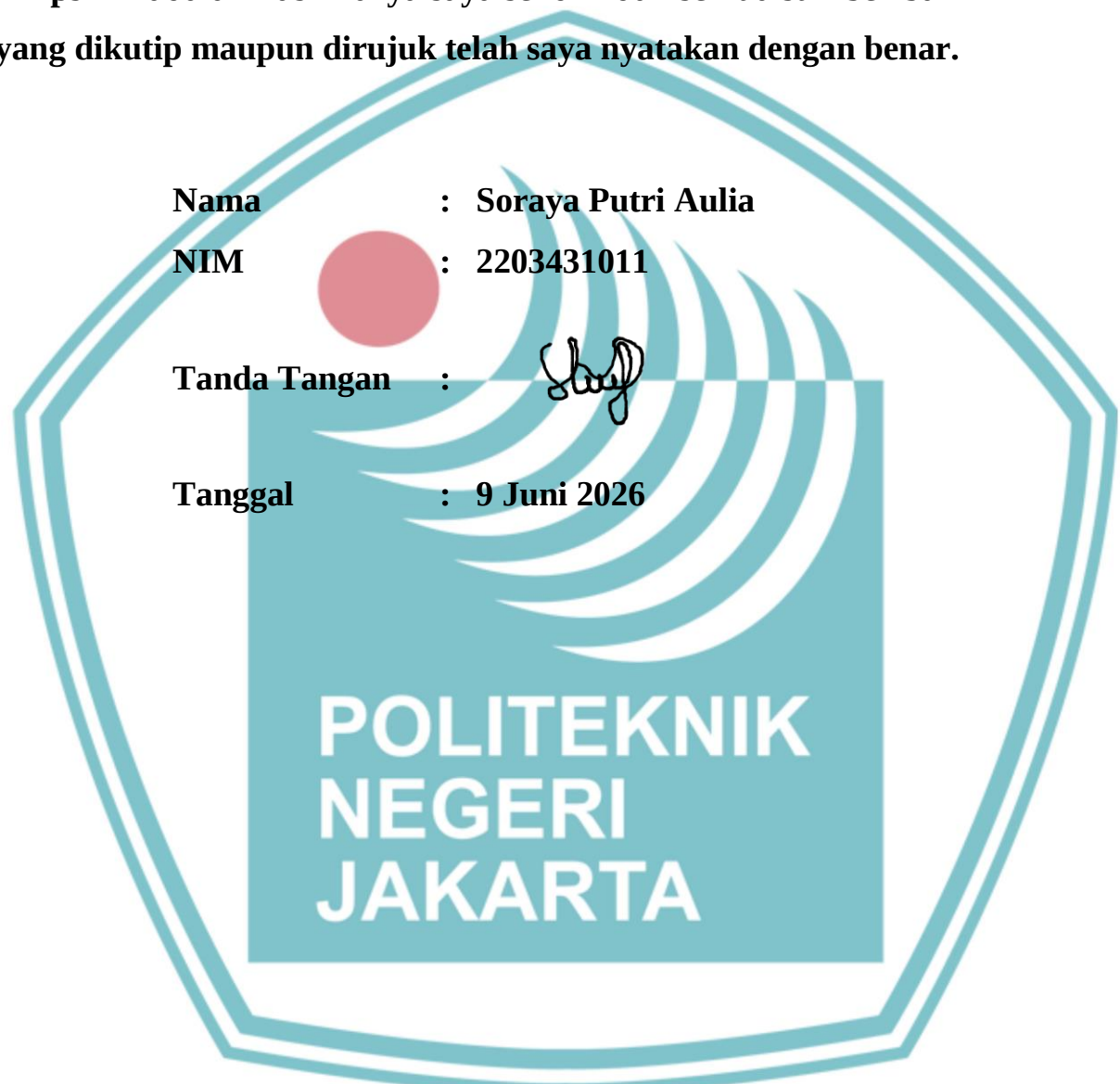
Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Soraya Putri Aulia

NIM : 2203431011

Tanda Tangan : 

Tanggal : 9 Juni 2026



POLITEKNIK  
NEGERI  
JAKARTA



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**LEMBAR PENGESAHAN  
SKRIPSI**

Skripsi Diajukan oleh :  
Nama : Soraya Putri Aulia  
NIM : 2203411011  
Program Studi : Instrumentasi Dan Kontrol Industri  
Judul Tugas Akhir : Evaluasi Kinerja Navigasi dan Stabilitas Sistem  
pada Implementasi Kendali PID dan MPC

Telah diuji oleh tim penguji dalam Sidang Tugas Akhir pada 19 Juni 2026 dan dinyatakan **LULUS**.

Pembimbing : Harivanto, S.Pd., M.T.  
NIP. 199101282020121608

Depok, 19 Juni 2026

Disahkan oleh

Ketua Jurusan Teknik Elektro



Dr. Murie Dwiyanti, S.T., M.T.

NIP. 197803112003122002



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**KATA PENGANTAR**

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala limpahan Rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul **“Evaluasi Kinerja Navigasi dan Stabilitas Sistem pada Implementasi Kendali PID dan MPC”** dengan baik. Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan dan memperoleh gelar Sarjana Terapan.

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan ini tidak akan dapat terselesaikan tanpa dukungan, arahan, dan bantuan dari berbagai pihak, baik selama masa perkuliahan maupun dalam proses penyelesaian laporan skripsi. Oleh karena itu, penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Dr. Murie Dwiyanti, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro;
2. Sulis Setiowati, S.Pd., M.Eng. selaku Kepala Program Studi Instrumentasi dan Kontrol Industri;
3. Hariyanto, S.Pd., M.T. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta masukan selama proses penyusunan skripsi ini;
4. Muhammad Raihan Rifqo, Ardandi dan Yosef Dwi Krisnata, selaku rekan satu tim yang bekerja sama serta membantu dalam penyelesaian skripsi ini;
5. Mamah, Ayah, dan Adik tercinta, atas segala doa, dukungan moral, serta dorongan moril yang senantiasa menjadi kekuatan bagi penulis selama ini;
6. Fadilla Vikry Akbar, selaku kekasih penulis yang senantiasa mendukung, menemani, dan memberikan ruang aman bagi penulis;
7. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan laporan skripsi ini;

Demikian, penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga laporan skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak.

Depok, 9 Juni 2026

Soraya Putri Aulia



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## Evaluasi Kinerja Navigasi dan Stabilitas Sistem pada Implementasi Kendali PID dan MPC

### Abstrak

Perkembangan robot mobile menuntut sistem navigasi yang mampu bergerak secara akurat, stabil, dan efisien pada lingkungan nyata. Kinerja navigasi robot dipengaruhi oleh metode kendali yang digunakan, terutama dalam kemampuan mengikuti lintasan dan menghindari rintangan secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja navigasi serta kestabilan sistem pada implementasi kendali Proportional-Integral-Derivative (PID) dan Model Predictive Control (MPC) pada robot mobile IKIBOT berbasis differential drive. Sistem dikembangkan menggunakan Raspberry Pi 4 Model B berbasis Robot Operating System (ROS) Noetic, Teensy 4.0, sensor LiDAR YDLIDAR X3, MPU6050, encoder, dan sensor arus ACS712. Pengujian dilakukan pada tiga skenario, yaitu full map tiga waypoint, full map, dan full map tiga waypoint dengan obstacle. Parameter evaluasi meliputi trajectory tracking, Root Mean Square Error (RMSE), kecepatan linear, kecepatan sudut, konsumsi daya, waktu navigasi, serta kinerja komputasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa MPC menghasilkan nilai RMSE yang lebih rendah dibandingkan PID pada seluruh skenario pengujian, yaitu 0,485 m, 0,563 m, dan 0,492 m, sedangkan PID menghasilkan RMSE sebesar 0,598 m, 0,600 m, dan 0,624 m. Selain itu, MPC menghasilkan pergerakan yang lebih stabil, waktu navigasi yang lebih singkat, dan konsumsi daya yang lebih rendah dibandingkan PID. Dari aspek kinerja komputasi, MPC memerlukan penggunaan CPU dan RAM yang lebih besar, namun kedua metode tetap dapat dijalankan secara real-time pada Raspberry Pi 4 Model B. Berdasarkan seluruh parameter evaluasi yang digunakan, MPC menunjukkan kinerja navigasi, kestabilan sistem, dan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan PID pada robot mobile IKIBOT berbasis differential drive.

**Kata kunci:** differential drive, MPC, mobile robot, navigasi robot, PID, ROS, RMSE



## Evaluation of Navigation Performance and System Stability in the Implementation of PID and MPC Control

### Abstract

The development of mobile robots requires navigation systems capable of operating accurately, stably, and efficiently in real-world environments. Navigation performance is highly influenced by the control method used, particularly in trajectory tracking and real-time obstacle avoidance. This study aims to evaluate and compare the navigation performance and system stability of Proportional-Integral-Derivative (PID) and Model Predictive Control (MPC) implemented on the IKIBOT differential-drive mobile robot. The system was developed using a Raspberry Pi 4 Model B running Robot Operating System (ROS) Noetic, Teensy 4.0, YDLIDAR X3 LiDAR, MPU6050, wheel encoders, and an ACS712 current sensor. Experiments were conducted under three scenarios: full map with three waypoints, full map, and full map with three waypoints and obstacles. The evaluation parameters included trajectory tracking, Root Mean Square Error (RMSE), linear velocity, angular velocity, power consumption, navigation time, and computational performance. The experimental results show that MPC achieved lower RMSE values than PID in all test scenarios, with RMSE values of 0.485 m, 0.563 m, and 0.492 m, while PID produced RMSE values of 0.598 m, 0.600 m, and 0.624 m, respectively. In addition, MPC provided more stable motion, shorter navigation time, and lower power consumption than PID. In terms of computational performance, MPC required higher CPU and RAM usage; however, both control methods were able to operate in real time on the Raspberry Pi 4 Model B. Based on all evaluated parameters, MPC demonstrated superior navigation performance, system stability, and energy efficiency compared to PID for the IKIBOT differential-drive mobile robot.

**Keywords:** differential drive, MPC, mobile robot, robot navigation, PID, ROS, RMSE.

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**DAFTAR ISI**

|                                                          |      |
|----------------------------------------------------------|------|
| HALAMAN SAMPUL.....                                      | i    |
| HALAMAN JUDUL.....                                       | ii   |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....                    | iii  |
| LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI .....                          | iv   |
| KATA PENGANTAR.....                                      | v    |
| <i>Abstrak</i> .....                                     | vi   |
| <i>Abstract</i> .....                                    | vii  |
| DAFTAR ISI.....                                          | viii |
| DAFTAR GAMBAR.....                                       | xiii |
| DAFTAR TABEL .....                                       | xv   |
| DAFTAR LAMPIRAN .....                                    | xvi  |
| BAB I PENDAHULUAN.....                                   | 1    |
| 1.1 Latar Belakang.....                                  | 1    |
| 1.2 Perumusan Masalah.....                               | 3    |
| 1.3 Tujuan.....                                          | 4    |
| 1.4 Batasan Masalah.....                                 | 4    |
| 1.5 Luaran.....                                          | 5    |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....                             | 6    |
| 2.1 <i>State Of the Art</i> .....                        | 6    |
| 2.2 Robot Mobile.....                                    | 8    |
| 2.2.1 Definisi Robot Mobile .....                        | 8    |
| 2.2.2 Robot Mobile <i>Differential Drive</i> .....       | 9    |
| 2.3 Metode kendali .....                                 | 11   |
| 2.3.1 Kendali PID .....                                  | 11   |
| 2.3.2 Kendali <i>Model Predictive Control</i> (MPC)..... | 12   |
| 2.4 Sistem Navigasi Robot Mobile.....                    | 14   |



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.1 <i>Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)</i> .....            | 14        |
| 2.4.2 <i>Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL)</i> .....                | 14        |
| 2.4.3 <i>Path Planning</i> .....                                           | 15        |
| 2.4.4 <i>Dynamic Window Approach (DWA)</i> .....                           | 15        |
| 2.5 Evaluasi Kinerja dan Stabilitas Sistem .....                           | 16        |
| 2.5.1 <i>Trajectory Tracking</i> .....                                     | 16        |
| 2.5.2 Kecepatan Linear dan Kecepatan Angular .....                         | 17        |
| 2.5.3 <i>Tracking Error</i> dan <i>Root Mean Square Error (RMSE)</i> ..... | 18        |
| 2.5.4 Konsumsi Daya Robot .....                                            | 19        |
| 2.6 Perangkat Lunak .....                                                  | 19        |
| 2.6.1 Ubuntu 20.04 LTS .....                                               | 19        |
| 2.6.2 Pemrograman Python.....                                              | 20        |
| 2.6.3 Rviz.....                                                            | 20        |
| 2.6.4 <i>Robot Operating System (ROS)</i> .....                            | 21        |
| 2.7 Komponen .....                                                         | 22        |
| 2.7.1 Raspberry Pi 4 B .....                                               | 22        |
| 2.7.2 YDLIDAR X3.....                                                      | 23        |
| 2.7.3 Teensy 4.0.....                                                      | 24        |
| 2.7.4 Baterai LiPo 3S.....                                                 | 25        |
| 2.7.5 IMU MPU6050 .....                                                    | 26        |
| 2.7.6 Motor DC <i>Encoder</i> .....                                        | 26        |
| 2.7.7 L298N .....                                                          | 27        |
| 2.7.8 Sensor Arus ACS712 30A .....                                         | 28        |
| <b>BAB III PERANCANGAN DAN REALISASI .....</b>                             | <b>30</b> |
| 3.1 Perancangan Sistem.....                                                | 30        |
| 3.1.1 Deskripsi Alat .....                                                 | 31        |
| 3.1.2 Cara Kerja Alat .....                                                | 34        |
| 3.1.3 Spesifikasi Alat.....                                                | 37        |
| 3.1.4 Perancangan <i>Schematic</i> .....                                   | 40        |
| 3.1.5 Diagram Blok Sistem.....                                             | 43        |
| 3.1.5.1 Diagram Blok Alat .....                                            | 43        |



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.5.2 Diagram Blok Sub-Sistem .....                                                                          | 45        |
| 3.1.6 Perancangan Mobile Robot IKIBOT .....                                                                    | 47        |
| 3.1.7 Cara Kerja Alat Sub-Sistem Evaluasi Kinerja Navigasi dan Stabilitas Sistem pada Kendali PID dan MPC..... | 48        |
| 3.2 Realisasi Sistem.....                                                                                      | 49        |
| 3.2.1 Realisasi Pembuatan Sistem Embeded .....                                                                 | 49        |
| 3.2.2 Skematik Rangkaian Alat .....                                                                            | 50        |
| 3.2.3 Realisasi Sistem Robot Mobile IKIBOT .....                                                               | 51        |
| 3.2.3.1 Spesifikasi Robot Mobile IKIBOT .....                                                                  | 55        |
| 3.2.4 Realisasi Sistem ROS dan Navigasi .....                                                                  | 56        |
| 3.2.4.1 Inisialisasi dan <i>Bringup</i> Robot.....                                                             | 57        |
| 3.2.4.2 Realisasi SLAM dan Lokalisasi .....                                                                    | 58        |
| 3.2.4.3 Realisasi Sistem Navigasi .....                                                                        | 60        |
| 3.2.5 Validasi <i>Offset</i> Sensor Arus ACS712 .....                                                          | 61        |
| 3.2.6 Implementasi Akuisisi dan Pengolahan Data .....                                                          | 63        |
| 3.2.6.1 Akuisisi Data Pengujian.....                                                                           | 63        |
| 3.2.6.2 Parameter Evaluasi Penelitian.....                                                                     | 65        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>                                                                       | <b>66</b> |
| 4.1 Pengujian Sensor .....                                                                                     | 66        |
| 4.1.1 Pengujian Sistem Odometri .....                                                                          | 66        |
| 4.1.1.1 Deskripsi Pengujian .....                                                                              | 66        |
| 4.1.1.2 Peralatan Pengujian.....                                                                               | 67        |
| 4.1.1.3 Prosedur Pengujian.....                                                                                | 67        |
| 4.1.1.4 Hasil Pengujian Odometri .....                                                                         | 68        |
| 4.1.1.5 Analisis Pengujian Sistem Odometri .....                                                               | 70        |
| 4.1.2 Pengujian Sensor Arus ACS712 .....                                                                       | 70        |
| 4.1.2.1 Deskripsi Pengujian .....                                                                              | 70        |
| 4.1.2.2 Peralatan Pengujian.....                                                                               | 71        |
| 4.1.2.3 Prosedur Pengujian.....                                                                                | 71        |
| 4.1.2.4 Hasil Pengujian Sensor ACS712.....                                                                     | 72        |
| 4.1.2.5 Analisis Pengujian Sensor ACS712 .....                                                                 | 72        |
| 4.2 Pengujian Kinerja Komputasi pada Kontroler PID dan MPC.....                                                | 73        |



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.1 Deskripsi Pengujian .....                                                                  | 73 |
| 4.2.2 Peralatan Pengujian.....                                                                   | 73 |
| 4.2.3 Prosedur Pengujian .....                                                                   | 74 |
| 4.2.4 Hasil Pengujian Kinerja Komputasi .....                                                    | 74 |
| 4.2.5 Analisis Hasil Pengujian Kinerja Komputasi .....                                           | 75 |
| 4.3 Pengujian Kinerja Navigasi dan Stabilitas PID dan MPC .....                                  | 75 |
| 4.3.1 Deskripsi Pengujian .....                                                                  | 76 |
| 4.3.2 Peralatan Pengujian.....                                                                   | 76 |
| 4.3.3 Prosedur Pengujian .....                                                                   | 77 |
| 4.3.4 Hasil Pengujian Perbandingan PID dan MPC pada Full Map Tiga Waypoint .....                 | 78 |
| 4.3.4.1 Trajectory Tracking .....                                                                | 79 |
| 4.3.4.2 Tracking Error .....                                                                     | 80 |
| 4.3.4.3 Kecepatan Linear dan Kecepatan Angular.....                                              | 81 |
| 4.3.4.4 Konsumsi Daya Robot .....                                                                | 83 |
| 4.3.5 Hasil Pengujian Perbandingan PID dan MPC pada Full Map .....                               | 83 |
| 4.3.5.1 Trajectory Tracking .....                                                                | 84 |
| 4.3.5.2 Tracking Error .....                                                                     | 85 |
| 4.3.5.3 Kecepatan Linear dan Kecepatan Angular.....                                              | 86 |
| 4.3.5.4 Konsumsi Daya .....                                                                      | 88 |
| 4.3.6 Hasil Pengujian Perbandingan PID dan MPC pada Full Map Tiga Waypoint dengan Obstacle ..... | 88 |
| 4.3.6.1 Trajectory Tracking .....                                                                | 89 |
| 4.3.6.2 Tracking Error .....                                                                     | 90 |
| 4.3.6.3 Kecepatan Linear dan Angular.....                                                        | 91 |
| 4.3.6.4 Konsumsi Daya .....                                                                      | 93 |
| 4.4 Analisis Data Hasil Pengujian .....                                                          | 93 |
| 4.4.1 Analisis Data Pengujian Perbandingan PID dan MPC Full Map Tiga Waypoint .....              | 93 |
| 4.4.2 Analisis Data Pengujian Perbandingan PID dan MPC Full Map .....                            | 95 |
| 4.4.3 Analisis Data Pengujian Perbandingan PID dan MPC Full Map Tiga Titik dengan Obstacle ..... | 96 |
| 4.4.4 Ringkasan Hasil Perbandingan Kinerja PID dan MPC .....                                     | 97 |



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| <b>BAB V PENUTUP.....</b>  | <b>101</b> |
| 5.1 Kesimpulan.....        | 101        |
| 5.2 Saran.....             | 102        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA.....</b> | <b>103</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>       | <b>106</b> |





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**DAFTAR GAMBAR**

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2. 1 Model Kinematika Robot Mobile Differential Drive Non-Holonomik .....     | 10 |
| Gambar 2. 2 Diagram Blok Sistem Kendali Close Loop .....                             | 12 |
| Gambar 2. 3 Ubuntu .....                                                             | 19 |
| Gambar 2. 4 Pemrograman Python .....                                                 | 20 |
| Gambar 2. 5 Rviz .....                                                               | 20 |
| Gambar 2. 6 Komunikasi antar Node pada ROS .....                                     | 22 |
| Gambar 2. 7 Raspberry Pi 4 .....                                                     | 23 |
| Gambar 2. 8 YDLIDAR X3 .....                                                         | 24 |
| Gambar 2. 9 Teensy 4.0 .....                                                         | 25 |
| Gambar 2. 10 Baterai LiPo 3s .....                                                   | 25 |
| Gambar 2. 11 MPU 6050 .....                                                          | 26 |
| Gambar 2. 12 Motor DC Encoder .....                                                  | 27 |
| Gambar 2. 13 IC L298N .....                                                          | 28 |
| Gambar 2. 14 Sensor Arus ACS712 30A .....                                            | 29 |
| Gambar 3. 1 Diagram Penelitian .....                                                 | 31 |
| Gambar 3. 2 Struktur Transformasi Koordinat pada ROS .....                           | 34 |
| Gambar 3. 3 Struktur Komunikasi Node pada Sistem Navigasi Berbasis DWA Planner ..... | 36 |
| Gambar 3. 4 Perancangan Schematic .....                                              | 41 |
| Gambar 3. 5 Layout PCB pada software EasyEDA .....                                   | 43 |
| Gambar 3. 6 Diagram Blok Sistem .....                                                | 44 |
| Gambar 3. 7 Block Diagram Sub-sistem .....                                           | 45 |
| Gambar 3. 8 Perancangan Desain Mobile Robot .....                                    | 47 |
| Gambar 3. 9 Diagram Alir Cara Kerja Sub-sistem .....                                 | 48 |
| Gambar 3. 10 Spesifikasi Perangkat Keras .....                                       | 49 |
| Gambar 3. 11 Skematik Rangkaian Power .....                                          | 50 |
| Gambar 3. 12 Skematik Rangkaian Proses .....                                         | 51 |
| Gambar 3. 13 Tampak Depan .....                                                      | 51 |
| Gambar 3. 14 Realisasi Robot Layer 1 .....                                           | 52 |
| Gambar 3. 15 Realisasi Robot Layer 2 .....                                           | 53 |
| Gambar 3. 16 Realisasi Robot Layer 3 (bawah) .....                                   | 53 |
| Gambar 3. 17 Realisasi Robot Layer 3 (atas) .....                                    | 54 |
| Gambar 3. 18 Peta Lingkungan Pengujian Robot Mobile IKIBOT .....                     | 55 |
| Gambar 3. 19 Inisialisasi ROS Master .....                                           | 57 |
| Gambar 3. 20 Hasil Bringup Robot Mobile IKIBOT .....                                 | 57 |
| Gambar 3. 21 Node SLAM Gmapping .....                                                | 58 |
| Gambar 3. 22 Hasil Pemetaan Lingkungan Menggunakan SLAM .....                        | 58 |
| Gambar 3. 23 Node Rviz .....                                                         | 59 |
| Gambar 3. 24 Visualisasi Rviz .....                                                  | 59 |
| Gambar 3. 25 Arsitektur Node Sistem Navigasi PID .....                               | 60 |
| Gambar 3. 26 Arsitektur Node Sistem Navigasi MPC .....                               | 61 |
| Gambar 3. 27 Program Hasil Pencarian Nilai Offset .....                              | 62 |



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 3. 28 Topik ROS yang Direkam Selama Pengujian .....              | 64 |
| Gambar 4. 1 Trajectory Full Map Tiga Titik .....                        | 79 |
| Gambar 4. 2 Tracking Error Full Map Tiga Titik .....                    | 80 |
| Gambar 4. 3 Kecepatan Linear Full Map Tiga Titik.....                   | 81 |
| Gambar 4. 4 Grafik Kecepatan Angular Full Map Tiga Titik .....          | 82 |
| Gambar 4. 5 Grafik Rata Rata Konsumsi Daya Full Map Tiga Titik .....    | 83 |
| Gambar 4. 6 Grafik Trajectory Full Map .....                            | 84 |
| Gambar 4. 7 Grafik Tracking Error Full Map.....                         | 85 |
| Gambar 4. 8 Grafik Kecepatan Linear Full Map .....                      | 86 |
| Gambar 4. 9 Grafik Kecepatan Angular Full Map.....                      | 87 |
| Gambar 4. 10 Grafik Rata-Rata Konsumsi Daya Full Map .....              | 88 |
| Gambar 4. 11 Grafik Trajectory Full Map Tiga Titik Obstacle .....       | 89 |
| Gambar 4. 12 Tracking Error Full Map Tiga Titik Obstacle .....          | 90 |
| Gambar 4. 13 Grafik Kecepatan Linear Full Map Tiga Titik Obstacle ..... | 91 |
| Gambar 4. 14 Grafik Kecepatan Angular Full Map Tiga Titik Obstacle..... | 92 |
| Gambar 4. 15 Grafik Rata Rata Konsumsi Daya .....                       | 93 |





**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**DAFTAR TABEL**

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2. 1 Penelitian Karya Hariyanto .....                                                     | 6  |
| Tabel 2. 2 Penelitian Karya Sukeshan .....                                                      | 7  |
| Tabel 2. 3 Penelitian Karya Elena.....                                                          | 7  |
| Tabel 3. 1 Spesifikasi Mekanis Robot.....                                                       | 37 |
| Tabel 3. 2 Spesifikasi Perangkat Keras.....                                                     | 38 |
| Tabel 3. 3 Tabel Spesifikasi PCB .....                                                          | 40 |
| Tabel 3. 4 Spesifikasi Perangkat Keras Robot Layer 1.....                                       | 52 |
| Tabel 3. 5 Spesifikasi Perangkat Keras Robot Layer 2.....                                       | 53 |
| Tabel 3. 6 Spesifikasi Perangkat Keras Robot Layer 3 (bawah).....                               | 54 |
| Tabel 3. 7 Spesifikasi Perangkat Keras Robot Layer 3 (atas).....                                | 54 |
| Tabel 3. 8 Spesifikasi Robot IKIBOT .....                                                       | 55 |
| Tabel 3. 9 Topik ROS yang Direkam Selama Pengujian.....                                         | 64 |
| Tabel 3. 10 Hubungan Data dan Parameter Evaluasi.....                                           | 65 |
| Tabel 4. 1 Peralatan Pengujian odometri .....                                                   | 67 |
| Tabel 4. 2 Tabel hasil pengujian odometri.....                                                  | 68 |
| Tabel 4. 3 Peralatan Pengujian.....                                                             | 71 |
| Tabel 4. 4 Data hasil pengujian sensor arus .....                                               | 72 |
| Tabel 4. 5 Peralatan Pengujian.....                                                             | 74 |
| Tabel 4. 6 Hasil Pengujian .....                                                                | 74 |
| Tabel 4. 7 Tabel Alat dan Bahan.....                                                            | 77 |
| Tabel 4. 8 Rekapitulasi Hasil Evaluasi PID dan MPC Perbandingan Full Map Tiga Titik .....       | 78 |
| Tabel 4. 9 Hasil Rekapitulasi Hasil Evaluasi Perbandingan PID dan MPC Full Map .....            | 83 |
| Tabel 4. 10 Hasil Rekapitulasi Hasil PID dan MPC Perbandingan Full Map Tiga Titik Obstacle..... | 89 |
| Tabel 4. 11 Ringkasan Hasil Perbandingan Kinerja PID dan MPC.....                               | 98 |



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**DAFTAR LAMPIRAN**

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| Lampiran 1 Daftar Riwayat Hidup.....     | 106 |
| Lampiran 2 Program Teensy .....          | 107 |
| Lampiran 3 Dokumentasi Alat.....         | 115 |
| Lampiran 4 Program Python to CSV .....   | 116 |
| Lampiran 5 Program CSV to Analisis ..... | 118 |



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan sistem robotika bergerak (*mobile robot*) mengalami peningkatan yang pesat seiring berkembangnya teknologi otomatisasi. Penggunaan robot mobile semakin luas, mulai dari sektor logistik, kesehatan, hingga eksplorasi pada lingkungan berisiko tinggi (Mendhe, 2025). Dalam pengoperasiannya, robot harus mampu bernavigasi secara aman, akurat dan mampu menghindari rintangan secara *real-time*. Kemampuan navigasi menjadi salah satu aspek penting pada sistem robot yang mencakup proses lokalisasi, perencanaan lintasan (*path planning*), serta pengendalian gerak agar robot dapat mengikuti lintasan yang telah ditentukan (Fahmizal et al. 2024).

Kinerja sistem navigasi robot ditentukan oleh kemampuan mencapai tujuan dan dipengaruhi oleh kestabilan pergerakan selama proses navigasi berlangsung. Kestabilan sistem berpengaruh terhadap akurasi lintasan dan keamanan operasi robot. Pergerakan yang tidak stabil dapat menyebabkan osilasi, penyimpangan lintasan, serta meningkatkan risiko tabrakan dengan rintangan, khususnya pada lingkungan nyata yang bersifat dinamis dan tidak terstruktur (Mangapul et al. 2023).

Robot mobile dengan konfigurasi *differential drive*, pergerakan robot dihasilkan dari perbedaan kecepatan antara roda kiri dan roda kanan. Konfigurasi tersebut membuat sistem kendali berperan dalam menjaga keseimbangan gerak robot. Ketidaktepatan pengendalian kecepatan roda dapat mengakibatkan pergerakan yang tidak stabil, seperti getaran, *overshoot*, maupun perubahan arah yang tidak diinginkan. Diperlukan metode kendali yang mampu mengatur pergerakan robot secara presisi agar robot dapat mengikuti lintasan dengan baik (Zaky et al. 2017).

Metode *Proportional-Integral-Derivative* (PID) merupakan salah satu metode kendali yang banyak digunakan karena strukturnya sederhana dan mudah diimplementasikan. PID bekerja dengan memperbaiki selisih antara kondisi aktual dan kondisi yang diinginkan, sehingga sistem dapat memberikan respons yang



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

cepat (M. Amirul Ummah F.A.B, 2023). PID memiliki keterbatasan dalam menghadapi dinamika sistem yang kompleks, dan gangguan dari lingkungan. Kondisi tersebut dapat menyebabkan osilasi dan menurunkan kestabilan sistem navigasi robot, terutama pada lingkungan nyata yang memiliki banyak ketidakpastian (Fahmizal et al. 2024).

Sebagai alternatif, metode *Model Predictive Control* (MPC) bekerja berdasarkan model matematis untuk memprediksi kondisi sistem pada beberapa langkah waktu ke depan. MPC dapat menentukan aksi kendali secara lebih optimal dengan mempertimbangkan kondisi sistem dan lingkungan. Kemampuan prediksi tersebut memungkinkan robot dapat bergerak lebih halus dan stabil saat mengikuti lintasan (Ait Dahmad et al. 2025). Namun, MPC membutuhkan proses komputasi yang lebih kompleks serta model sistem yang akurat (Hariyanto et al. 2025).

Beberapa penelitian sebelumnya telah membandingkan performa kendali PID dan MPC pada sistem navigasi robot mobile. Salah satu penelitian oleh Hariyanto et al. (2025) menunjukkan bahwa metode MPC memiliki performa navigasi yang lebih baik dibandingkan PID dalam proses pelacakan lintasan robot. Namun, penelitian tersebut masih dilakukan dalam bentuk simulasi sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi nyata. Pada lingkungan nyata terdapat berbagai gangguan, seperti *noise* sensor, ketidakpastian aktuator, serta variasi kondisi permukaan lintasan yang dapat memengaruhi performa sistem kendali (Hariyanto et al. 2025). Oleh karena itu, penelitian ini dikembangkan dengan melakukan implementasi langsung pada robot mobile berbasis *differential drive* serta menambahkan parameter konsumsi daya robot sebagai bagian dari evaluasi performa kendali PID dan MPC

Robot mobile IKIBOT dirancang sebagai media penelitian menggunakan konfigurasi *differential drive* yang mengacu pada konsep TurtleBot3. Sistem robot menggunakan Raspberry Pi 4 Model B sebagai pusat pemrosesan berbasis *Robot Operating System* (ROS) dan Teensy 4.0 sebagai pengendali aktuator. Robot dilengkapi sensor LiDAR untuk navigasi, encoder motor untuk pembacaan odometri, sensor MPU6050 untuk membaca orientasi robot, sensor arus ACS712 untuk memperoleh data arus robot, dilengkapi PCB untuk mempermudah proses wiring dan integrasi antarperangkat pada sistem robot.



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Proses pengambilan data dilakukan dengan peremakan data menggunakan *rosbag* selama robot menjalankan lintasan pengujian, kemudian dikonversi ke format CSV dan diolah menggunakan program Python untuk menghasilkan grafik analisis performa sistem. Grafik tersebut digunakan untuk membandingkan performa kendali PID dan MPC berdasarkan parameter *trajectory*, *tracking error* dengan RMSE, kecepatan linear, kecepatan sudut, waktu tempuh, serta konsumsi daya robot.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini berfokus pada evaluasi kinerja navigasi dan kestabilan sistem pada implementasi kendali PID dan MPC pada robot mobile IKIBOT di lingkungan nyata. Evaluasi dilakukan melalui pengujian pada lintasan tanpa rintangan dan lintasan dengan rintangan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai perbandingan performa PID dan MPC dari aspek navigasi, kestabilan sistem, serta konsumsi daya, sehingga dapat menjadi acuan dalam pemilihan metode kendali yang lebih optimal untuk robot mobile berbasis *differential drive*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja navigasi robot mobile IKIBOT pada implementasi kendali PID dan MPC berdasarkan parameter *trajectory*, *Tracking error* dengan RMSE, kecepatan linear, kecepatan sudut, dan konsumsi daya robot?
2. Bagaimana kestabilan sistem navigasi robot pada implementasi kendali PID dan MPC saat pengujian *non-obstacle* dan *obstacle*?
3. Bagaimana perbandingan hasil evaluasi performa kendali PID dan MPC pada robot mobile berbasis *differential drive* di lingkungan nyata?



### 1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut maka diperoleh tujuan dari penelitian sebagai berikut:

1. Mengevaluasi kinerja navigasi robot mobile IKIBOT pada kendali PID dan MPC berdasarkan parameter *trajectory*, *Tracking error* dengan RMSE, kecepatan linear, kecepatan sudut, dan konsumsi daya.
2. Menganalisis kestabilan sistem navigasi robot pada implementasi kendali PID dan MPC saat pengujian *non-obstacle* dan *obstacle*.
3. Membandingkan performa kendali PID dan MPC pada robot mobile berbasis differential drive di lingkungan nyata.

### 1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, terdapat batasan masalah untuk membatasi ruang lingkup penelitian agar lebih terarah dan fokus. Adapun batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada robot mobile IKIBOT.
2. Metode kendali yang digunakan pada penelitian ini adalah *Proportional-Integral-Derivative* (PID) dan *Model Predictive Control* (MPC).
3. Parameter evaluasi sistem meliputi *trajectory*, *tracking error* dengan RMSE, kecepatan linear, kecepatan sudut, dan konsumsi daya robot.
4. Pengujian dilakukan pada lingkungan nyata dengan skenario full map tiga titik, full map dan full map tiga titik dengan *obstacle*.
5. Pengujian kinerja komputasi pada penggunaan *CPU usage* dan kapasitas RAM, pada pengambilan data dilakukan dengan skenario tertentu dan tidak di setiap percobaan.
6. Evaluasi konsumsi daya dihitung menggunakan pendekatan nilai tegangan 12 Volt yang dikalikan dengan data arus hasil pembacaan sensor ACS712.
7. Penelitian ini merupakan bagian dari tugas akhir yang dikerjakan secara berkelompok dengan pembagian sub-sistem. Penulis bertanggung jawab pada sub-sistem evaluasi kinerja navigasi dan stabilitas sistem melalui perbandingan implementasi kendali PID dan MPC, sedangkan perancangan dan optimasi masing-masing metode kendali secara mendalam dibahas pada laporan tugas akhir anggota tim lainnya.

#### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



## 1.5 Luaran

Luaran yang diharapkan dari penelitian ini untuk tugas akhir sebagai berikut:

1. Laporan skripsi.
2. Publikasi jurnal.
3. Rancang bangun mobile IKIBOT yang mampu melakukan navigasi dan menghindari rintangan secara real-time.
4. Sistem kendali berbasis PID dan MPC yang terimplementasi pada robot IKIBOT beserta hasil evaluasi kinerja navigasi dan stabilitas sistem.



### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, realisasi, dan pengujian sistem robot mobile IKIBOT berbasis *differential drive* dengan implementasi kendali PID dan MPC, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kinerja navigasi robot mobile IKIBOT pada implementasi kendali MPC menghasilkan akurasi yang lebih baik dibandingkan PID berdasarkan seluruh parameter evaluasi. Nilai RMSE MPC pada skenario full map tiga waypoint sebesar 0,485 m, full map sebesar 0,563 m, dan full map tiga waypoint dengan *obstacle* sebesar 0,492 m, sedangkan PID menghasilkan RMSE masing-masing sebesar 0,598 m, 0,600 m, dan 0,624 m. Dari sisi konsumsi daya, MPC secara konsisten menghasilkan konsumsi yang lebih rendah pada seluruh skenario dengan rata-rata selisih sebesar 2,11 W hingga 2,96 W dibandingkan PID. MPC juga menyelesaikan navigasi lebih cepat, dengan selisih waktu paling signifikan pada skenario full map yaitu 21,38 detik lebih singkat dibandingkan PID.
2. Kestabilan sistem navigasi robot pada implementasi kendali MPC lebih baik dibandingkan PID, baik pada kondisi tanpa *obstacle* maupun dengan *obstacle*. MPC menghasilkan fluktuasi kecepatan linear dan kecepatan angular yang lebih kecil serta perubahan arah yang lebih halus pada seluruh skenario pengujian. PID menunjukkan perubahan arah yang lebih agresif dengan rentang kecepatan angular yang lebih lebar, yang mengindikasikan respons sistem yang kurang stabil terutama saat robot melakukan langkah perpindahan *waypoint*. Kedua metode kendali berhasil mengarahkan robot mencapai seluruh titik tujuan yang ditentukan pada setiap skenario pengujian.
3. Perbandingan performa kendali PID dan MPC pada robot mobile berbasis *differential drive* di lingkungan nyata menunjukkan bahwa MPC unggul pada seluruh parameter evaluasi utama. MPC menghasilkan *RMSE tracking error* lebih rendah, konsumsi daya lebih kecil, waktu navigasi lebih singkat,



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

serta pergerakan yang lebih stabil dibandingkan PID. Keunggulan MPC paling signifikan terlihat pada skenario full map tiga waypoint dengan *obstacle* dengan selisih RMSE sebesar 0,132 m. Dari aspek komputasi, MPC memerlukan rata-rata CPU sebesar 7,51% dan RAM sebesar 55,9%, lebih tinggi dibandingkan PID yang hanya membutuhkan CPU 5,05% dan RAM 48,0%. Meskipun demikian, kebutuhan komputasi tersebut masih dapat dijalankan secara real-time pada Raspberry Pi 4 Model B, sehingga MPC layak diimplementasikan sebagai metode kendali navigasi pada robot mobile IKIBOT berbasis differential drive.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan berikut saran untuk pengembangan sistem robot mobile IKIBOT sebagai berikut:

1. Pengujian pada lingkungan yang lebih kompleks dan dinamis perlu dilakukan dengan menambahkan hambatan bergerak, variasi lintasan, dan jumlah waypoint yang lebih banyak agar evaluasi kinerja navigasi lebih ideal terhadap kondisi nyata.
2. Pengembangan sistem dapat dilakukan dengan menggunakan sensor yang memiliki tingkat akurasi dan keandalan yang lebih baik untuk meningkatkan kualitas data navigasi sehingga proses lokalisasi, pemetaan lingkungan, dan estimasi posisi robot dapat berjalan lebih optimal.
3. Penelitian selanjutnya dapat membandingkan metode kendali PID dan MPC dengan metode kendali lain, seperti *Fuzzy Logic Controller* (FLC), *Linear Quadratic Regulator* (LQR), *Sliding Mode Control* (SMC), maupun metode berbasis kecerdasan buatan untuk mengevaluasi peningkatan akurasi, stabilitas, efisiensi energi, dan performa navigasi robot mobile.

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**DAFTAR PUSTAKA**

- Agustian, A., Lisdiana, K., Suryana, A., & Nursalman, M. (2025). *Analisis Statistik Uji Normalitas dan Homogenitas Data Nilai Mata Pelajaran dengan Menggunakan Python*. 10(1), 51–56.
- Ait Dahmad, H., Ayad, H., García Cerezo, A., & Mousannif, H. (2025). Adaptive Model Predictive Control for 4WD-4WS Mobile Robot: A Multivariate Gaussian Mixture Model-Ant Colony Optimization for Robust Trajectory Tracking and Obstacle Avoidance. *Sensors*, 25(12). <https://doi.org/10.3390/s25123805>
- Aulia, P., & Dwi, Y. (2026). *Evaluasi Eksperimental Horizon Prediksi MPC pada Navigasi Otonom Robot TurtleBot3 Burger Experimental Evaluation of Prediction Horizon in MPC for Autonomous Navigation*. 8, 1–10.
- Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Reid, I., & Leonard, J. J. (2016). *Past , Present , and Future of Simultaneous Localization and Mapping : Toward the Robust-Perception Age*. 32(6), 1309–1332.
- Das, S. (n.d.). *Robot localization in a mapped environment using Adaptive Monte Carlo algorithm*. 1–9.
- Ekaputri, C. (2019). Perancangan Model Predictive Control (Mpc) Pada Sistem Pendulum Terbalik. *TEKTRIKA - Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Telekomunikasi, Kendali, Komputer, Elektrik, Dan Elektronika*, 1(2), 173–178. <https://doi.org/10.25124/tektrika.v1i2.1753>
- Fahmizal, F., Pratikno, M. S., Isnianto, H. N., Mayub, A., Maghfiroh, H., & Anugrah, P. (2024). Control and Navigation of Differential Drive Mobile Robot with PID and Hector SLAM: Simulation and Implementation. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer Dan Informatika*, 10(3), 594–607. <https://doi.org/10.26555/jiteki.v10i3.29428>
- Fu, Y., & Zhou, Q. (2023). *Analysis and application research of mobile robot navigation related technologies*. 0, 92–96. <https://doi.org/10.54254/2755->



**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2721/9/20230055

Hariyanto, Putri, Y. S., Ardandi, M. R. R., Krisnata, Y. D., & Aulia, S. P. (2025). Perbandingan Kinerja Kontrol MPC dan PID pada Navigasi Robot TurtleBot3 Menggunakan Simulasi Gazebo dan Rviz. *Seminar Nasional Inovasi Vokasi (SNIV)*, 4(1), 599–606.

Integrated, F., Current, H. L., & Ic, S. (2024). ACS712.

Iqromullah, R., & Suryana, E. (2023). *Security System Implementation And Monitoring Networks At Sma N 10 City Of Bengkulu Implementasi Sistem Keamanan Dan Monitoring Jaringan Pada Sma N 10 Kota Bengkulu*. 2(2), 153–168.

Kaladewa, Y., & Santoso, A. (2022). *IMPLEMENTASI SENSOR KEMIRINGAN SUDUT UNTUK ALAT BANTU ( GRAB ) GANTRY LUFFING CRANE ( GLC )*. 2, 62–69.

Lu, Y., & Da, C. (2025). *Global and local path planning of robots combining ACO and dynamic window algorithm*. 1–19.

M. Amirul Ummah F.A.B. (2023). Rancang Bangun Robot Penghindar Halangan Dengan Metode PID. *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Informatika*, 2(3), 212–222. <https://doi.org/10.55606/jtmei.v2i3.2352>

Mangapul, A. N., Wahyudi, W., & Afrisal, H. (2023). Pengendalian Differential Wheeled Mobile Robot Untuk Human Following. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 12(4), 159–164. <https://doi.org/10.14710/transient.v12i4.159-164>

Mendhe, V. (2025). Autonomous Navigation Mobile Robot using ROS, Raspberry Pi, RP Lidar, and Differential Drive Kinematics. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 09(06), 1–9. <https://doi.org/10.55041/ijssrem49852>

Niloy, A. K., Shama, A., Chakraborty, R. K., Tasneem, Z., Ahamed, H., & Moyeen, S. I. (2021). *Critical Design and Control Issues of Indoor Autonomous Mobile Robots : A Review*. 9.



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062557>

Pavlic, T., Kušec, K., Radoš, D., & Britvi, A. (2021). *applied sciences Cognitive Model of the Closed Environment of a Mobile Robot Based on Measurements.*

Rubio, F., Valero, F., & Llopis-albert, C. (2019). *A review of mobile robots : Concepts , methods , theoretical framework , and applications.* April, 1–22. <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>

Salam, M., Saragi, P., Pradeka, D., & Adiwilaga, A. (2026). *LiDAR and Visual Perception-Based Indoor Semantic Mapping: Comparative Study of GMapping and SLAM Toolbox.* 6(January), 395–403.

Sukeshan, S., & Anbarasi, M. P. (2025). *Analysis Of Pid And Mpc Driven Differential Drive Robot For Navigation.* 15(3), 480–487.

Tang, Y., Zakaria, M. A., & Younas, M. (2025). *Path Planning Trends for Autonomous Mobile Robot Navigation : A Review.*

Total, V., & Low, A. (2023). *Dual full-bridge driver.* October.

Villalba-Aguilera, E., Blesa, J., & Ponsa, P. (2025). *Model-Based Predictive Control for Position and Orientation Tracking in a Multilayer Architecture for a Three-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot.* *Robotics*, 14(6), 1–20. <https://doi.org/10.3390/robotics14060072>

Zaky, A. K., Setiawan, E., Studi, P., Komputer, T., Komputer, F. I., & Brawijaya, U. (2017). *Sistem Pengatur Kecepatan Motor Robot Beroda.* 1(1), 1–11.

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## LAMPIRAN

### Lampiran 1 Daftar Riwayat Hidup



Penulis bernama lengkap Soraya Putri Aulia, anak pertama dari dua bersaudara. Lahir di Jakarta, 11 November 2004. Latar belakang pendidikan formal penulis adalah sekolah dasar di SDN Tugu 11 Cimanggis lulus pada tahun 2016. Melanjutkan ke sekolah menengah pertama di MTs. Negeri 18 Jakarta lulus pada tahun 2019. Kemudian melanjutkan sekolah menengah di MA Negeri 14 Jakarta lulus pada tahun 2022. Lalu penulis melanjutkan studi ke jenjang perkuliahan Sarjana Terapan (S.Tr) di Politeknik Negeri Jakarta jurusan Teknik Elektro program studi Instrumentasi dan Kontrol Industri sejak tahun 2022.

Email: [sorayaaulia74@gmail.com](mailto:sorayaaulia74@gmail.com)

**POLITEKNIK  
NEGERI  
JAKARTA**



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## Lampiran 2 Program Teensy

```
// IKIBOT TEENSY 4.0 - FIRMWARE NAVIGASI & POWER MONITORING
// Versi: 4.3 (Final Skripsi Mode + Auto-Reboot Watchdog)

#include <ros.h>
#include <geometry_msgs/Twist.h>
#include <geometry_msgs/Vector3.h>
#include <nav_msgs/Odometry.h>
#include <sensor_msgs/Imu.h>
#include <std_msgs/Empty.h>
#include <tf/transform_broadcaster.h>
#include <Wire.h>
#include <Encoder.h>
#include <MPU6050.h>

// TRIPLE PORT SERIAL - Teensy 4.0
class NewHardware0 : public ArduinoHardware {
public:
    NewHardware0() : ArduinoHardware(&Serial, 115200) {}
};
ros::NodeHandle_<NewHardware0> nh_teleop;

class NewHardware1 : public ArduinoHardware {
public:
    NewHardware1() : ArduinoHardware() {}
    void init() { SerialUSB1.begin(115200); }
    int read() { return SerialUSB1.read(); }
    void write(uint8_t* d, int l) { for (int i = 0; i < l; i++)
SerialUSB1.write(d[i]); }
};
ros::NodeHandle_<NewHardware1> nh_odom;

class NewHardware2 : public ArduinoHardware {
public:
    NewHardware2() : ArduinoHardware() {}
    void init() { SerialUSB2.begin(115200); }
    int read() { return SerialUSB2.read(); }
    void write(uint8_t* d, int l) { for (int i = 0; i < l; i++)
SerialUSB2.write(d[i]); }
};
ros::NodeHandle_<NewHardware2> nh_imu;

// PIN DEFINITIONS & KONSTANTA KINEMATIKA//
#define ENC_L_A 2
#define ENC_L_B 3
#define ENC_R_A 4
#define ENC_R_B 5
#define IN1_L 8
#define IN2_L 11
```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
#define IN3_R      6
#define IN4_R      7
#define ENA        10
#define ENB        9
#define MPU_INT_PIN 12

const float WHEEL_DIAMETER = 0.07f;
const float WHEEL_BASE     = 0.225f;
const int   CPR             = 2059;
const float METERS_PER_TICK = (PI * WHEEL_DIAMETER) / CPR;

const int ARAH_KIRI = 1;
const int ARAH_KANAN = -1;
const int ARAH_MAJU = -1;

const int PWM_DEADBAND = 40;
const float MIN_ROT_VEL = 0.35f;
const float PELAMBAT_VAR_L = 0.90f;

// KONSTANTA POWER MONITORING
const int PIN_ACS = A0;
const float V_REF = 3.3f;
const float ADC_RES = 1023.0f;
const float V_BATTERY = 12.0f;
const float ACS_OFFSET = 1.258f;
const float SENSITIVITY = 0.033f;

float total_joules = 0.0f;
geometry_msgs::Vector3 power_msg;
ros::Publisher power_pub("power_consumption", &power_msg);

// VARIABEL STATE & PID
const unsigned long CMD_TIMEOUT_MS = 500;
const unsigned long CONTROL_PERIOD_MS = 50;
unsigned long last_control_time = 0;

Encoder encLeft(ENC_L_A, ENC_L_B);
Encoder encRight(ENC_R_A, ENC_R_B);

long oldLeft = 0, oldRight = 0;
float linear_x = 0.0f, angular_z = 0.0f;
double x_pos = 0.0, y_pos = 0.0, yaw = 0.0;
unsigned long last_cmd_time = 0;

float Kp = 260.0f, Ki = 15.0f, Kd = 0.5f;
float integral_L = 0.0f, integral_R = 0.0f;
float prev_error_L = 0.0f, prev_error_R = 0.0f;
const float INTEGRAL_MAX = 80.0f;

MPU6050 mpu;
```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
int16_t ax, ay, az, gx, gy, gz;
int16_t ax_offset = 0, ay_offset = 0, az_offset = 0;
int16_t gx_offset = 0, gy_offset = 0, gz_offset = 0;

const float ACCEL_SCALE = 9.80665f / 16384.0f;
const float GYRO_SCALE = (PI / 180.0f) / 131.0f;

nav_msgs::Odometry odom_msg;
ros::Publisher odom_pub("odom", &odom_msg);
sensor_msgs::Imu imu_msg;
ros::Publisher imu_pub("imu/data", &imu_msg);
tf::TransformBroadcaster broadcaster;

// WATCHDOG VARIABLES
bool was_connected = false;
unsigned long disconnect_timer = 0;

// HELPER FUNCTIONS
geometry_msgs::Quaternion quaternionFromYaw(double yaw_rad) {
    geometry_msgs::Quaternion q;
    q.x = 0.0; q.y = 0.0;
    q.z = sin(yaw_rad / 2.0); q.w = cos(yaw_rad / 2.0);
    return q;
}

float normalizeAngle(float angle) {
    while (angle > PI) angle -= 2.0f * PI;
    while (angle < -PI) angle += 2.0f * PI;
    return angle;
}

// ROS CALLBACKS
void cmdVelCallback(const geometry_msgs::Twist& msg) {
    linear_x = msg.linear.x;
    angular_z = msg.angular.z;
    last_cmd_time = millis();
}

ros::Subscriber<geometry_msgs::Twist> sub_cmd("cmd_vel",
cmdVelCallback);

void pidCallback(const geometry_msgs::Vector3& msg) {
    Kp = msg.x; Ki = msg.y; Kd = msg.z;
    integral_L = integral_R = 0.0f;
    prev_error_L = prev_error_R = 0.0f;
}

ros::Subscriber<geometry_msgs::Vector3> sub_pid("tune_pid",
pidCallback);

void pwmCallback(const std_msgs::Int16& pwm_msg) {
    int target_pwm = pwm_msg.data;
```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
// Pastikan logika kode Anda me-override PID saat topik ini menerima
data
  analogWrite(PIN_PWM_KIRI, target_pwm);
  analogWrite(PIN_PWM_KANAN, target_pwm);
}
ros::Subscriber<std_msgs::Int16> sub_pwm("cmd_pwm", &pwmCallback);

void resetOdomCallback(const std_msgs::Empty& msg) {
  x_pos = 0.0; y_pos = 0.0; yaw = 0.0;
  encLeft.write(0); encRight.write(0);
  oldLeft = 0; oldRight = 0;
}
ros::Subscriber<std_msgs::Empty> sub_reset("reset_odom",
resetOdomCallback);

// MOTOR DRIVER
void setMotor(int pL, int pR) {
  if (pL != 0 && abs(pL) < PWM_DEADBAND) pL = (pL > 0) ? PWM_DEADBAND :
-PWM_DEADBAND;
  if (pR != 0 && abs(pR) < PWM_DEADBAND) pR = (pR > 0) ? PWM_DEADBAND :
-PWM_DEADBAND;

  if (pL > 0) { digitalWrite(IN1_L, HIGH); digitalWrite(IN2_L,
LOW); }
  else if (pL < 0) { digitalWrite(IN1_L, LOW); digitalWrite(IN2_L,
HIGH); }
  else { digitalWrite(IN1_L, LOW); digitalWrite(IN2_L,
LOW); }

  if (pR > 0) { digitalWrite(IN3_R, HIGH); digitalWrite(IN4_R,
LOW); }
  else if (pR < 0) { digitalWrite(IN3_R, LOW); digitalWrite(IN4_R,
HIGH); }
  else { digitalWrite(IN3_R, LOW); digitalWrite(IN4_R,
LOW); }

  analogWrite(ENA, constrain(abs(pL), 0, 255));
  analogWrite(ENB, constrain(abs(pR), 0, 255));
}

// SETUP
void setup() {
  pinMode(IN1_L, OUTPUT); pinMode(IN2_L, OUTPUT);
  pinMode(IN3_R, OUTPUT); pinMode(IN4_R, OUTPUT);
  pinMode(ENA, OUTPUT); pinMode(ENB, OUTPUT);
  setMotor(0, 0);

  pinMode(PIN_ACS, INPUT);

  Wire.setSDA(18); Wire.setSCL(19);
```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
Wire.begin(); Wire.setClock(400000);

pinMode(MPU_INT_PIN, INPUT);
mpu.initialize();
mpu.setFullScaleAccelRange(MPU6050_ACCEL_FS_2);
mpu.setFullScaleGyroRange(MPU6050_GYRO_FS_250);

nh_teleop.initNode();
nh_teleop.subscribe(sub_cmd);
nh_teleop.subscribe(sub_pid);
nh_teleop.subscribe(sub_reset);

nh_odom.initNode();
broadcaster.init(reinterpret_cast<ros::NodeHandle*>(nh_odom));
nh_odom.advertise(odom_pub);
nh_odom.advertise(power_pub);

nh_imu.initNode();
nh_imu.advertise(imu_pub);

for (int i = 0; i < 36; i++) {
    odom_msg.pose.covariance[i] = 0.0; odom_msg.twist.covariance[i] =
0.0;
}
odom_msg.pose.covariance[0] = 0.001; odom_msg.pose.covariance[7] =
0.001; odom_msg.pose.covariance[35] = 0.010;
odom_msg.twist.covariance[0] = 0.001; odom_msg.twist.covariance[35] =
0.010;

for (int i = 0; i < 9; i++) {
    imu_msg.orientation_covariance[i] = 0.0;
imu_msg.angular_velocity_covariance[i] = 0.0;
imu_msg.linear_acceleration_covariance[i] = 0.0;
}
imu_msg.orientation_covariance[0] = -1;
imu_msg.angular_velocity_covariance[0] = 0.02;
imu_msg.angular_velocity_covariance[4] = 0.02;
imu_msg.angular_velocity_covariance[8] = 0.02;
imu_msg.linear_acceleration_covariance[0] = 0.04;
imu_msg.linear_acceleration_covariance[4] = 0.04;
imu_msg.linear_acceleration_covariance[8] = 0.04;

last_cmd_time      = millis();
last_control_time = millis();
}
// LOOP UTAMA
void loop() {
    nh_teleop.spinOnce();
    nh_odom.spinOnce();
    nh_imu.spinOnce();
```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
// AUTO-REBOOT WATCHDOG (PENGANTI CABUT-COLOK POWER)
// Cek apakah ada satupun koneksi serial yang terhubung ke PC
bool is_connected = nh_teleop.connected() || nh_odom.connected() ||
nh_imu.connected();

if (is_connected) {
    was_connected = true;
    disconnect_timer = 0;
} else if (was_connected) {
    // Jika koneksi terputus (karena Ctrl+C), mulai menghitung waktu
    if (disconnect_timer == 0) disconnect_timer = millis();

    // Jika terputus selama 3 detik penuh, paksa Teensy untuk Software
    Reset
    if (millis() - disconnect_timer > 3000) {
        // Perintah spesifik ARM Cortex-M untuk melakukan system reboot
        SCB_AIRCR = 0x05FA0004;
    }
}

unsigned long now = millis();
if (now - last_control_time < CONTROL_PERIOD_MS) return;

float dt = (now - last_control_time) / 1000.0f;
last_control_time = now;
if (dt <= 0.005f || dt > 0.5f) return;

if (now - last_cmd_time > CMD_TIMEOUT_MS) {
    linear_x = 0.0f;
    angular_z = 0.0f;
}
// KALKULASI PENGGUNAAN ENERGI
int raw_adc = analogRead(PIN_ACS);
float v_out = (raw_adc * V_REF) / ADC_RES;

float current_amps = ((v_out - ACS_OFFSET) / SENSITIVITY) * -1.0f;
if (abs(current_amps) < 0.2f) current_amps = 0.0f;

float power_watts = V_BATTERY * current_amps;
total_joules += power_watts * dt;

power_msg.x = current_amps;
power_msg.y = power_watts;
power_msg.z = total_joules;

if (nh_odom.connected()) power_pub.publish(&power_msg);

// ODOMETRI & KINEMATIKA
long newLeft = encLeft.read();
long newRight = -encRight.read();
```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

float dLeft  = (newLeft  - oldLeft) * METERS_PER_TICK;
float dRight = (newRight - oldRight) * METERS_PER_TICK;
oldLeft  = newLeft; oldRight = newRight;

float dCenter = (dLeft + dRight) / 2.0f;
float dTheta  = (dRight - dLeft) / WHEEL_BASE;

x_pos += dCenter * cos(yaw + dTheta / 2.0f);
y_pos += dCenter * sin(yaw + dTheta / 2.0f);
yaw    += dTheta; yaw = normalizeAngle(yaw);

float actual_vL = dLeft / dt;
float actual_vR = dRight / dt;

geometry_msgs::TransformStamped tf_msg;
tf_msg.header.stamp = nh_odom.now();
tf_msg.header.frame_id = "odom"; tf_msg.child_frame_id = "base_link";
tf_msg.transform.translation.x = x_pos;
tf_msg.transform.translation.y = y_pos; tf_msg.transform.translation.z
= 0.0;
tf_msg.transform.rotation = quaternionFromYaw(yaw);

odom_msg.header.stamp = nh_odom.now();
odom_msg.header.frame_id = "odom"; odom_msg.child_frame_id =
"base_link";
odom_msg.pose.pose.position.x = x_pos; odom_msg.pose.pose.position.y =
y_pos; odom_msg.pose.pose.position.z = 0.0;
odom_msg.pose.pose.orientation = quaternionFromYaw(yaw);
odom_msg.twist.twist.linear.x = dCenter / dt;
odom_msg.twist.twist.linear.y = 0.0;
odom_msg.twist.twist.angular.z = dTheta / dt;

if (nh_odom.connected()) {
    broadcaster.sendTransform(tf_msg);
    odom_pub.publish(&odom_msg);
}
// IMU PROCESSING
mpu.getMotion6(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz);
ax -= ax_offset; ay -= ay_offset; az -= az_offset;
gx -= gx_offset; gy -= gy_offset; gz -= gz_offset;

imu_msg.header.stamp = nh_imu.now(); imu_msg.header.frame_id =
"imu_link";
imu_msg.linear_acceleration.x = ax * ACCEL_SCALE;
imu_msg.linear_acceleration.y = ay * ACCEL_SCALE;
imu_msg.linear_acceleration.z = az * ACCEL_SCALE;
imu_msg.angular_velocity.x = gx * GYRO_SCALE;
imu_msg.angular_velocity.y = gy * GYRO_SCALE; imu_msg.angular_velocity.z
= gz * GYRO_SCALE;

```



### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
imu_msg.orientation.w = 1.0; imu_msg.orientation.x = 0.0;
imu_msg.orientation.y = 0.0; imu_msg.orientation.z = 0.0;

if (nh_imu.connected()) imu_pub.publish(&imu_msg);
// PID & KONTROL MOTOR
float v = linear_x;
float w = angular_z;

float target_vL = ((v * ARAH_MAJU) - (w * WHEEL_BASE / 2.0f));
float target_vR = ((v * ARAH_MAJU) + (w * WHEEL_BASE / 2.0f));

if (v == 0.0f && w != 0.0f) {
    if (abs(target_vL) < MIN_ROT_VEL) target_vL = (target_vL >= 0.0f) ?
MIN_ROT_VEL : -MIN_ROT_VEL;
    if (abs(target_vR) < MIN_ROT_VEL) target_vR = (target_vR >= 0.0f) ?
MIN_ROT_VEL : -MIN_ROT_VEL;
}

if (v == 0.0f && w == 0.0f) {
    integral_L = integral_R = 0.0f;
    prev_error_L = prev_error_R = 0.0f;
    setMotor(0, 0);
    return;
}

float error_L = target_vL - actual_vL;
float error_R = target_vR - actual_vR;

integral_L = constrain(integral_L + error_L * dt, -INTEGRAL_MAX,
INTEGRAL_MAX);
integral_R = constrain(integral_R + error_R * dt, -INTEGRAL_MAX,
INTEGRAL_MAX);

float derivative_L = (error_L - prev_error_L) / dt;
float derivative_R = (error_R - prev_error_R) / dt;

float out_L = (Kp * error_L) + (Ki * integral_L) + (Kd *
derivative_L);
float out_R = (Kp * error_R) + (Ki * integral_R) + (Kd *
derivative_R);

int pwm_L = constrain((int)((out_L * PELAMBAT_VAR_L) * ARAH_KIRI), -
255, 255);
int pwm_R = constrain((int)(out_R * ARAH_KANAN), -255, 255);
prev_error_L = error_L; prev_error_R = error_R;

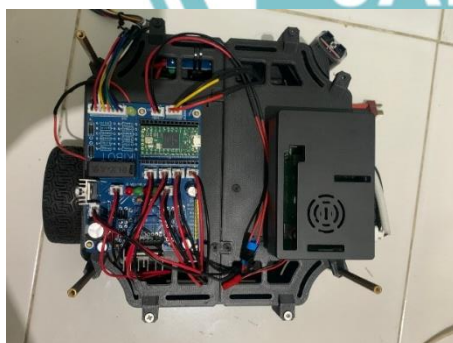
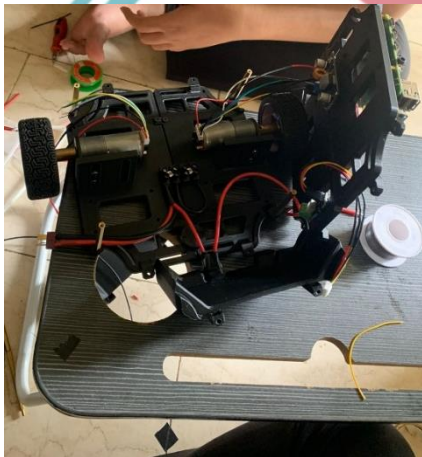
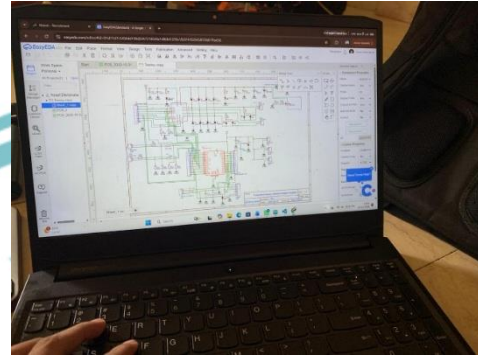
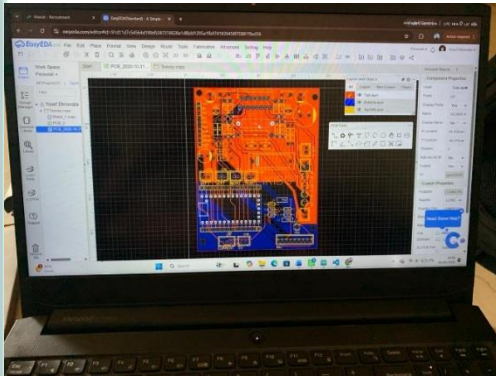
setMotor(pwm_L, pwm_R);
```

## Lampiran 3 Dokumentasi Alat

## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

## Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta





## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

## Lampiran 4 Program Python to CSV

```
#!/usr/bin/env python3

import rosbag
import pandas as pd
import argparse

def extract_data(bag_file):
    odom_data = []
    goal_data = []
    power_data = []
    amcl_data = []
    global_plan_data = []
    local_plan_data = []

    print(f"Loading bag file: {bag_file}")
    bag = rosbag.Bag(bag_file)

    for topic, msg, t in bag.read_messages():
        timestamp = t.to_sec()

        # ODOM
        if topic == "/odom":
            pos = msg.pose.pose.position
            ori = msg.pose.pose.orientation
            vel = msg.twist.twist
            odom_data.append({
                'time': timestamp,
                'odom_x': pos.x, 'odom_y': pos.y, 'odom_z': pos.z,
                'odom_qx': ori.x, 'odom_qy': ori.y, 'odom_qz': ori.z, 'odom_qw': ori.w,
                'linear_x': vel.linear.x, 'linear_y': vel.linear.y, 'angular_z': vel.angular.z
            })
        # GOAL
        elif topic == "/move_base_simple/goal":
            pos = msg.pose.pose.position
            goal_data.append({'time': timestamp, 'goal_x': pos.x, 'goal_y': pos.y})
        # POWER
        elif topic == "/power_consumption":
            power_data.append({'time': timestamp, 'power_x': msg.x, 'power_y': msg.y, 'power_z': msg.z})
        # AMCL
        elif topic == "/amcl_pose":
            pos = msg.pose.pose.position
            amcl_data.append({'time': timestamp, 'amcl_x': pos.x, 'amcl_y': pos.y})
        # GLOBAL PLAN
        elif topic == "/move_base/DWAPlanerROS/global_plan":
            global_plan_data.append({'time': timestamp, 'global_plan_points': len(msg.poses)})
        # LOCAL PLAN
        elif topic == "/move_base/DWAPlanerROS/local_plan":
            local_plan_data.append({'time': timestamp, 'local_plan_points': len(msg.poses)})

    bag.close()

    # DATAFRAME
    df_odom = pd.DataFrame(odom_data)
    df_goal = pd.DataFrame(goal_data)
    df_power = pd.DataFrame(power_data)
    df_amcl = pd.DataFrame(amcl_data)
    df_global = pd.DataFrame(global_plan_data)
    df_local = pd.DataFrame(local_plan_data)

    df_odom = df_odom.sort_values('time')

    # MERGE (Hanya data non-CMD)
```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
for df_part in [df_goal, df_power, df_amcl, df_global, df_local]:
    if not df_part.empty:
        df_odom = pd.merge_asof(df_odom, df_part.sort_values('time'), on='time', direction='nearest')

# ODOM TO MAP ALIGNMENT
if {'amcl_x', 'amcl_y'}.issubset(df_odom.columns):
    valid = df_odom.dropna(subset=['odom_x', 'odom_y', 'amcl_x', 'amcl_y'])
    if len(valid) > 0:
        N = min(50, len(valid))
        dx = valid['amcl_x'].iloc[:N].mean() - valid['odom_x'].iloc[:N].mean()
        dy = valid['amcl_y'].iloc[:N].mean() - valid['odom_y'].iloc[:N].mean()
        df_odom['odom_x_map'] = df_odom['odom_x'] + dx
        df_odom['odom_y_map'] = df_odom['odom_y'] + dy
    else:
        df_odom['odom_x_map'] = df_odom['odom_x']
        df_odom['odom_y_map'] = df_odom['odom_y']
else:
    df_odom['odom_x_map'] = df_odom['odom_x']
    df_odom['odom_y_map'] = df_odom['odom_y']

# ERRORS
if {'goal_x', 'goal_y'}.issubset(df_odom.columns):
    df_odom['trajectory_error'] = ((df_odom['goal_x'] - df_odom['odom_x_map'])**2 + (df_odom['goal_y'] -
df_odom['odom_y_map'])**2)**0.5
if {'amcl_x', 'amcl_y'}.issubset(df_odom.columns):
    df_odom['tracking_error'] = ((df_odom['amcl_x'] - df_odom['odom_x_map'])**2 + (df_odom['amcl_y'] -
df_odom['odom_y_map'])**2)**0.5

return df_odom

if __name__ == "__main__":
    parser = argparse.ArgumentParser()
    parser.add_argument('--bag', required=True, help='Rosbag file')
    parser.add_argument('--output', default='MPC_log.csv', help='Output CSV')
    args = parser.parse_args()

    df = extract_data(args.bag)
    df.to_csv(args.output, index=False)
    print(f"\n[✓] CSV berhasil disimpan: {args.output}")
```

## Lampiran 5 Program CSV to Analysis



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
#!/usr/bin/env python3

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os
# =====
# FILE CSV

PID_FILE = "PID_P1_3T.csv"
MPC_FILE = "0MPC_3TITIK_3.csv"

# OUTPUT

OUTPUT_DIR = "comparison_output"
os.makedirs(OUTPUT_DIR, exist_ok=True)

# LOAD DATA

pid = pd.read_csv(PID_FILE)
mpc = pd.read_csv(MPC_FILE)

print("\nPID Columns")
print(pid.columns)

print("\nMPC Columns")
print(mpc.columns)

# CLEAN DATA

for df in [pid, mpc]:

    for col in df.columns:
        df[col] = pd.to_numeric(df[col], errors='coerce')

    df.replace(
        [np.inf, -np.inf],
        np.nan,
        inplace=True
    )

pid = pid.reset_index(drop=True)
mpc = mpc.reset_index(drop=True)

# NORMALIZE TIME

pid["time"] = pid["time"] - pid["time"].iloc[0]
mpc["time"] = mpc["time"] - mpc["time"].iloc[0]

# FUNCTIONS

def calc_rmse(data):

    data = np.asarray(data, dtype=float)
```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

data = data[~np.isnan(data)]

if len(data) == 0:
    return 0

return np.sqrt(np.mean(data**2))

def calc_mean(data, ignore_zero=False):

    data = np.asarray(data, dtype=float)

    data = data[~np.isnan(data)]

    if ignore_zero:
        # buang nilai 0 dan nilai sangat kecil
        data = data[np.abs(data) > 1e-4]

    if len(data) == 0:
        return 0

    return np.mean(data)

# RMSE

rmse_pid_traj = calc_rmse(pid["trajectory_error"])
rmse_mpc_traj = calc_rmse(mpc["trajectory_error"])

rmse_pid_track = calc_rmse(pid["tracking_error"])
rmse_mpc_track = calc_rmse(mpc["tracking_error"])

# AVERAGE

avg_pid_traj = calc_mean(pid["trajectory_error"])
avg_mpc_traj = calc_mean(mpc["trajectory_error"])

avg_pid_track = calc_mean(pid["tracking_error"])
avg_mpc_track = calc_mean(mpc["tracking_error"])

avg_pid_linear = calc_mean(
    pid["linear_x"],
    ignore_zero=True
)

avg_mpc_linear = calc_mean(
    mpc["linear_x"],
    ignore_zero=True
)

avg_pid_angular = calc_mean(
    pid["angular_z"],
    ignore_zero=True
)

avg_mpc_angular = calc_mean(

```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

mpc["angular_z"],
ignore_zero=True
)

# POWER CONSUMPTION

avg_pid_power = calc_mean(pid["power_y"])
avg_mpc_power = calc_mean(mpc["power_y"])

max_pid_power = np.nanmax(pid["power_y"])
max_mpc_power = np.nanmax(mpc["power_y"])

min_pid_power = np.nanmin(pid["power_y"])
min_mpc_power = np.nanmin(mpc["power_y"])

dt_pid = np.mean(np.diff(pid["time"]))
dt_mpc = np.mean(np.diff(mpc["time"]))

energy_pid = np.nansum(pid["power_y"]) * dt_pid
energy_mpc = np.nansum(mpc["power_y"]) * dt_mpc

# TRAJECTORY

plt.figure(figsize=(10,8))

plt.plot(
    pid["odom_x_map"].to_numpy(),
    pid["odom_y_map"].to_numpy(),
    color='blue',
    linewidth=3,
    label='PID Actual'
)

plt.plot(
    pid["amcl_x"].to_numpy(),
    pid["amcl_y"].to_numpy(),
    '--',
    color='blue',
    linewidth=2,
    label='PID AMCL'
)

plt.plot(
    mpc["odom_x_map"].to_numpy(),
    mpc["odom_y_map"].to_numpy(),
    color='green',
    linewidth=3,
    label='MPC Actual'
)

plt.plot(
    mpc["amcl_x"].to_numpy(),
    mpc["amcl_y"].to_numpy(),
    '--',
    color='green',
    linewidth=2,

```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

label='MPC AMCL'
)

plt.xlabel("X Position (m)")
plt.ylabel("Y Position (m)")
plt.title("Trajectory Comparison")

plt.grid(True)
plt.axis("equal")
plt.legend()
plt.tight_layout()

plt.savefig(
    os.path.join(
        OUTPUT_DIR,
        "trajectory_comparison.png"
    ),
    dpi=300
)

plt.close()

# TRAJECTORY ERROR

plt.figure(figsize=(12,5))

plt.plot(
    pid["time"].to_numpy(),
    pid["trajectory_error"].to_numpy(),
    color='blue',
    linewidth=3,
    label=f"PID RMSE={rmse_pid_traj:.3f}"
)

plt.plot(
    mpc["time"].to_numpy(),
    mpc["trajectory_error"].to_numpy(),
    color='green',
    linewidth=3,
    label=f"MPC RMSE={rmse_mpc_traj:.3f}"
)

plt.xlabel("Time (s)")
plt.ylabel("Error (m)")
plt.title("Trajectory Error Comparison")

plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()

plt.savefig(
    os.path.join(
        OUTPUT_DIR,
        "trajectory_error_comparison.png"
    ),
    dpi=300

```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

)

plt.close()

# TRACKING ERROR

plt.figure(figsize=(12,5))

plt.plot(
    pid["time"].to_numpy(),
    pid["tracking_error"].to_numpy(),
    color='blue',
    linewidth=3,
    label=f"PID RMSE={rmse_pid_track:.3f}"
)

plt.plot(
    mpc["time"].to_numpy(),
    mpc["tracking_error"].to_numpy(),
    color='green',
    linewidth=3,
    label=f"MPC RMSE={rmse_mpc_track:.3f}"
)

plt.xlabel("Time (s)")
plt.ylabel("Error (m)")
plt.title("Tracking Error Comparison")

plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()

plt.savefig(
    os.path.join(
        OUTPUT_DIR,
        "tracking_error_comparison.png"
    ),
    dpi=300
)

plt.close()

# LINEAR VELOCITY

plt.figure(figsize=(12,6))

plt.plot(
    pid["time"].to_numpy(),
    pid["linear_x"].to_numpy(),
    color='blue',
    linewidth=3,
    label="PID"
)

plt.plot(
    mpc["time"].to_numpy(),

```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

mpc["linear_x"].to_numpy(),
color='green',
linewidth=3,
label="MPC"
)

plt.xlabel("Time (s)")
plt.ylabel("Linear Velocity (m/s)")
plt.title("Linear Velocity Comparison")

plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()

plt.savefig(
    os.path.join(
        OUTPUT_DIR,
        "linear_velocity_comparison.png"
    ),
    dpi=300
)

plt.close()

# ANGULAR VELOCITY

plt.figure(figsize=(12,6))

plt.plot(
    pid["time"].to_numpy(),
    pid["angular_z"].to_numpy(),
    color='blue',
    linewidth=3,
    label="PID"
)

plt.plot(
    mpc["time"].to_numpy(),
    mpc["angular_z"].to_numpy(),
    color='green',
    linewidth=3,
    label="MPC"
)

plt.xlabel("Time (s)")
plt.ylabel("Angular Velocity (rad/s)")
plt.title("Angular Velocity Comparison")

plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()

plt.savefig(
    os.path.join(
        OUTPUT_DIR,
        "angular_velocity_comparison.png"

```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

),
    dpi=300
)

plt.close()

# POWER CONSUMPTION

plt.figure(figsize=(12,6))

plt.plot(
    pid["time"].to_numpy(),
    pid["power_y"].to_numpy(),
    color='blue',
    linewidth=2.5,
    label="PID"
)

plt.plot(
    mpc["time"].to_numpy(),
    mpc["power_y"].to_numpy(),
    color='green',
    linewidth=2.5,
    label="MPC"
)

plt.xlabel("Time (s)")
plt.ylabel("Power (W)")
plt.title("Power Consumption Comparison")

plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()

plt.savefig(
    os.path.join(
        OUTPUT_DIR,
        "power_consumption_comparison.png"
    ),
    dpi=300
)

plt.close()
# SUMMARY
with open(
    os.path.join(OUTPUT_DIR,"summary.txt"),
    "w"
) as f:

    f.write("==== PID VS MPC =====\n\n")

    f.write(f"PID RMSE Trajectory : {rmse_pid_traj:.4f}\n")
    f.write(f"MPC RMSE Trajectory : {rmse_mpc_traj:.4f}\n")
    f.write(f"PID AVG Trajectory : {avg_pid_traj:.4f}\n")
    f.write(f"MPC AVG Trajectory : {avg_mpc_traj:.4f}\n\n")

```



## © Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

### Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
f.write(f"PID RMSE Tracking : {rmse_pid_track:.4f}\n")
f.write(f"MPC RMSE Tracking : {rmse_mpc_track:.4f}\n")
f.write(f"PID AVG Tracking : {avg_pid_track:.4f}\n")
f.write(f"MPC AVG Tracking : {avg_mpc_track:.4f}\n\n")

f.write(f"PID AVG Linear Velocity : {avg_pid_linear:.4f}\n")
f.write(f"MPC AVG Linear Velocity : {avg_mpc_linear:.4f}\n\n")

f.write(f"PID AVG Angular Velocity : {avg_pid_angular:.4f}\n")
f.write(f"MPC AVG Angular Velocity : {avg_mpc_angular:.4f}\n\n")

f.write("POWER CONSUMPTION\n")
f.write(f"PID AVG Power : {avg_pid_power:.4f} W\n")
f.write(f"MPC AVG Power : {avg_mpc_power:.4f} W\n\n")

f.write(f"PID MAX Power : {max_pid_power:.4f} W\n")
f.write(f"MPC MAX Power : {max_mpc_power:.4f} W\n\n")

f.write(f"PID MIN Power : {min_pid_power:.4f} W\n")
f.write(f"MPC MIN Power : {min_mpc_power:.4f} W\n\n")

f.write(f"PID Energy : {energy_pid:.4f} J\n")
f.write(f"MPC Energy : {energy_mpc:.4f} J\n")

print("\n=====")
print("ANALISIS SELESAI")
print("=====")
print("Output tersimpan di :", OUTPUT_DIR)
```

POLITEKNIK  
NEGERI  
JAKARTA