

RANCANG BANGUN PENSTABILAN ROBOT BERKAKI *WALL-FOLLOWING* MENGUNAKAN SENSOR GP2Y0A21 UNTUK MENJAGA POSISI ROBOT DIANTARA DINDING

Bagus Rivaldi Putra¹, Anang Habibi², Taqijjuddin Alawi³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Islam Malang

Jl. MT Haryono 193 Malang

21901053041@unisma.ac.id, ananghabibi@unisma.ac.id, taqijjuddina@unisma.ac.id

Abstract

This study successfully designed and implemented a PID control system on a four-legged wall follower robot using the Sharp IR GP2Y0A21 sensor. The integration between the Arduino Uno and Raspberry Pi 5 demonstrated stable and efficient data communication. The Sharp IR sensors were able to detect object distances within a range of 10–30 cm with an average error between 0.5 and 1.08 cm, which was effectively reduced using a low-pass filter. The PID controller, with parameters $K_p = 0.5$, $K_i = 0.01$, and $K_d = 0.1$, maintained the robot's position in the center of a 30 cm-wide corridor dynamically and stably, showing adaptive correction responses based on distance changes on both sides. The results indicate that the designed system is effective for autonomous wall-following robot navigation. Further development can include the use of more precise sensors and optimized PID tuning methods for improved performance.

Keywords— *Wall Follower Robot, PID Controller, Infrared Sensor, Arduino Uno, Raspberry Pi 5, Low-pass Filter, Obstacle Avoidance.*

Abstraksi

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol PID pada robot berkaki empat tipe wall follower menggunakan sensor Sharp IR GP2Y0A21. Integrasi antara Arduino Uno dan Raspberry Pi 5 menunjukkan komunikasi data yang stabil dan efektif. Sensor Sharp IR mampu mendeteksi jarak objek dalam rentang 10–30 cm dengan error rata-rata sekitar 0,5–1,08 cm, yang berhasil dikurangi menggunakan low-pass filter. Kontrol PID dengan parameter $K_p = 0.5$, $K_i = 0.01$, dan $K_d = 0.1$ mampu menjaga posisi robot tetap berada di tengah lorong secara dinamis dan stabil, dengan koreksi gerak yang responsif terhadap perubahan jarak sisi kiri dan kanan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dirancang efektif untuk navigasi robot dalam mengikuti dinding secara otomatis. Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan sensor yang lebih presisi serta metode tuning PID yang lebih optimal.

Kata Kunci— *Robot Wall Follower, Kontrol PID, Sensor Infrared, Arduino Uno, Raspberry Pi 5, Filter Low-pass, Penghindar Halangan.*

I. PENDAHULUAN

Pada era modern ini dibutuhkan alat yang dapat membantu tugas manusia, salah satu alat yang banyak dikembangkan pada era modern saat ini adalah robot. Robot merupakan sekumpulan alat mekanik yang telah di rancang agar bisa meniru cara kerja makhluk hidup. Komponen-komponen pada robot juga digunakan untuk meniru fungsi dari organ-organ pada makhluk hidup [1].

Saat ini hampir semua orang tahu apa itu Robot. Robot perangkat otomatis self-propelled menyelesaikan pekerjaan Banyak orang. Agar robot dapat bergerak dan berinteraksi dengan andal di dalam dunia yang tidak terstruktur, mereka harus dapat merencanakan ulang gerakan untuk menangani gangguan atau perubahan lingkungan yang tidak terduga [2]. Banyak sekali robot yang telah dibuat oleh para ahli dengan meniru anatomi makhluk hidup. Salah satu jenis robot yang sedang banyak di perbincangkan adalah robot berkaki.

Berdasarkan pergerakan robot ini diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu robot berkaki dan Robot beroda.

Robot berkaki adalah robot yang bermanuver dengan kaki-kaki buatan, baik dengan robot berkaki dua yang sering disebut dengan robot humanoid, robot berkaki tiga

disebut dengan robot tripod, robot berkaki empat yang disebut dengan robot quadruped, robot berkaki enam yang disebut dengan robot hexapod, dan robot berkaki banyak yang lainnya. Sedangkan, robot beroda adalah robot yang bermanuver dengan menggunakan roda, baik itu dengan dua roda ataupun lebih dari dua roda [3].

Sistem penggerak merupakan gerakan yang melintasi sebuah permukaan datar sesuai lintasan yang dilalui serta tugas yang diberikan kepada robot tersebut. Salah satu contoh implementasi klasifikasi robot berdasarkan penggunaan aktuator adalah pengikut dinding. Robot pengikut dinding merupakan robot yang memiliki kemampuan untuk mendeteksi dan bergerak pada jalur ruang dinding tanpa atap (maze wall) [4].

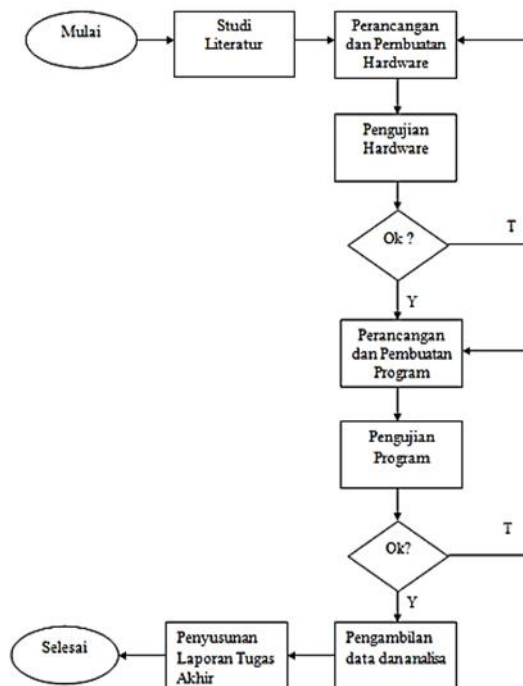
Dengan latar belakang diatas maka dibutuhkan solusi dan pengembangan robotika pada kampus Universitas Islam Malang untuk memenuhi kebutuhan belajar, praktikum dan perlombaan seperti Kontes Robot Cerdas Indonesia (KRCI) dimana robot tipe wall follower ini dapat mengikuti bentuk - bentuk dinding arena [5]. Robot tipe ini dipilih karena arena terdiri dari dinding-dinding yang membentuk lorong dan ruangan. Tugas akhir ini merancang dan mengimplementasikan algoritma kontrol pada robot wall follower menggunakan kontroler Proportional Integral Derivative (PID) sebagai sistem kontrol pada navigasi robot wall follower.

II. METODE PENELITIAN

Mengacu kepada latar belakang penelitian, serta rumusan masalah maka penelitian ini menggunakan metode penelitian dan pengembangan (Research and Development). Research and Development (Penelitian dan Pengembangan) merupakan metode penelitian yang bertujuan untuk menguji produk yang nantinya akan dikembangkan dalam dunia Pendidikan [6].

Model pengembangan yang diterapkan dalam penelitian ini mengacu pada model Borg dan Gall, yang dirancang khusus untuk proses pengembangan produk secara sistematis. Model ini dipilih karena dinilai tepat untuk menghasilkan produk yang terarah, efektif, dan adaptif, serta mampu memberikan kontribusi nyata dalam proses pembelajaran atau implementasi teknologi. Selain itu, model Borg dan Gall sangat membantu dalam menyusun langkah-langkah yang jelas dalam proses penelitian, mulai dari studi pendahuluan hingga evaluasi akhir[7]

A. Flowchart Sistem



Gambar 1. Flowchart Sistem

Pada bagian ini, langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Menunjukkan alur prosedur penelitian yang digunakan dalam tugas akhir ini. Proses penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur, yang bertujuan untuk memahami konsep-konsep dasar serta referensi teknis yang relevan dengan topik penelitian. Studi literatur ini mencakup pemahaman terhadap perangkat keras, perangkat lunak, serta metode yang akan digunakan dalam pengembangan sistem.

Setelah studi literatur, tahap berikutnya adalah perancangan dan pembuatan hardware. Pada tahap ini dilakukan proses desain dan perakitan komponen mekanik serta elektronik yang akan digunakan dalam sistem, termasuk pemilihan mikrokontroler, sensor, dan

aktuator. Setelah perangkat keras dirakit, dilakukan pengujian awal untuk memastikan semua komponen berfungsi dengan baik.

Langkah selanjutnya adalah perancangan software, yang mencakup penulisan kode program agar perangkat keras dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang diinginkan. Software dikembangkan menggunakan Arduino IDE untuk Arduino Uno dan Visual Studio Code untuk Raspberry Pi. Setelah program selesai, dilakukan proses unggah dan pengujian software pada perangkat keras untuk memastikan integrasi sistem berjalan sesuai rencana.

Tahap akhir dari prosedur ini adalah pengambilan data dan analisis hasil. Data yang diperoleh dari pengujian sistem kemudian dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem secara keseluruhan. Hasil analisis ini digunakan sebagai dasar dalam penyusunan laporan tugas akhir.

B. Alat Penelitian

Penelitian ini menggunakan kombinasi perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software) yang saling mendukung dalam proses pengembangan sistem robot penghindar halangan (robot avoider). Berikut ini adalah daftar alat yang digunakan:

• Hardware

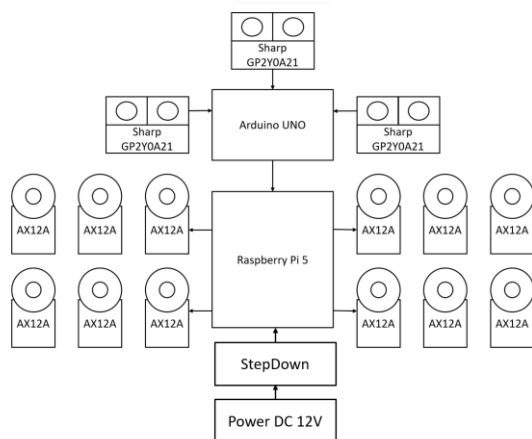
1. Laptop Digunakan sebagai perangkat utama untuk melakukan pemrograman, analisis data, serta komunikasi dengan mikrokontroler dan Raspberry Pi. Laptop ini menjalankan perangkat lunak seperti Arduino IDE dan Visual Studio Code.
2. Arduino Uno. Berfungsi sebagai pengendali awal yang menerima input dari sensor jarak (GP2Y0A21) dan meneruskan data tersebut ke Raspberry Pi. Arduino Uno dipilih karena kemudahan dalam pemrograman serta kompatibilitasnya dengan berbagai sensor.
3. Sensor Jarak Sharp GP2Y0A21. Sensor ini digunakan untuk mendeteksi jarak antara robot dan hambatan (seperti dinding atau objek lain). Sensor ini berbasis inframerah dan mampu mengukur jarak dalam rentang sekitar 10 cm hingga 80 cm dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi untuk aplikasi robotik.
4. Raspberry Pi 5. Raspberry Pi berfungsi sebagai unit kontrol utama yang menjalankan algoritma pemrosesan dan kendali berbasis metode PID. Dengan dukungan prosesor quad-core ARM Cortex-A76 dan RAM hingga 8 GB, Raspberry Pi 5 mampu menangani proses komputasi secara lokal tanpa perlu koneksi ke server eksternal.
5. Servo AX-12A. Servo digital ini digunakan sebagai aktuator penggerak robot, memungkinkan gerakan seperti maju, belok kanan, dan belok kiri. AX-12A dipilih karena kekuatannya dalam menahan beban dan fleksibilitas dalam pengaturan posisi.

• Software

1. Arduino IDE. Digunakan untuk menulis dan mengunggah program ke mikrokontroler Arduino Uno. Arduino IDE mendukung bahasa pemrograman berbasis C/C++ dan memiliki antarmuka yang mudah digunakan.
2. Visual Studio Code. Visual Studio Code digunakan untuk menulis dan menjalankan kode Python atau bahasa pemrograman lain yang berjalan pada Raspberry Pi. Editor ini mendukung berbagai ekstensi dan mempermudah debugging serta pengelolaan proyek..

C. Rancangan Penelitian

Bagian input pada blok diagram diatas terdiri dari 3 sensor GP2Y0A21 sedangkan bagian output pada blok diagram diatas yaitu Servo AX-12A yang terhubung ke Raspberry Pi. Dari diagram blok diatas bahwa robot yang akan dirancang terdiri dari beberapa bagian yaitu :



Gambar 2. Rancangan Sistem

Bagian sensor jarak menggunakan sensor GP2Y0A21, yang berfungsi untuk mendeteksi jarak antara robot dan hambatan atau dinding. Data yang dihasilkan oleh sensor ini akan diterima oleh Arduino Uno, kemudian dikirimkan ke Raspberry Pi untuk dijadikan acuan dalam menjalankan perintah pada robot avoider menggunakan metode PID.

Bagian catu daya menggunakan baterai 12 Volt yang dikonversi menggunakan modul step-down dengan output sebesar 5 Volt. Tegangan 5 Volt ini digunakan untuk memasok daya ke Raspberry Pi. Sementara itu, Arduino Uno terhubung ke Raspberry Pi melalui koneksi USB. Tegangan 5 Volt dari Arduino dan sinyal data digunakan untuk memberi daya dan komunikasi ke sensor. Selain itu, tegangan 12 Volt dari baterai juga digunakan untuk menyuplai daya ke servo AX-12A.

Bagian kontrol terdiri dari mini PC Raspberry Pi, yang berfungsi sebagai pusat kendali robot untuk secara otomatis menghindari rintangan dan dinding berdasarkan data sensor dan perhitungan kendali.

Bagian aktuator menggunakan servo AX-12A, yang berfungsi untuk menggerakkan robot ke depan,

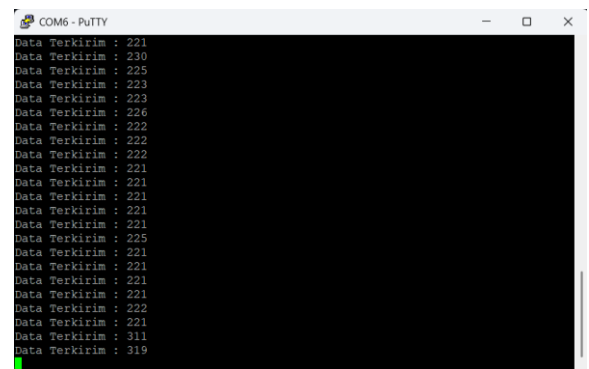
belok kanan, atau belok kiri. Servo ini dikendalikan langsung oleh Raspberry Pi sebagai pengendali utama.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tujuan pengujian yaitu untuk mengetahui hasil dari penggunaan PID pada robot berkaki dengan sensor InfraMerah untuk menghindari tembok. Pengujian dilakukan menjadi beberapa bagian yaitu :

1. Pengujian Integrasi Raspberry Pi 5 dan Arduino Uno
2. Pengujian Data Analog Sensor Sharp IR
3. Pengujian Konversi Data Sensor ke Jarak
4. Pengujian Low-pass Filter pada Data Sensor
5. Pengujian PID pada Koreksi Gerakan Robot

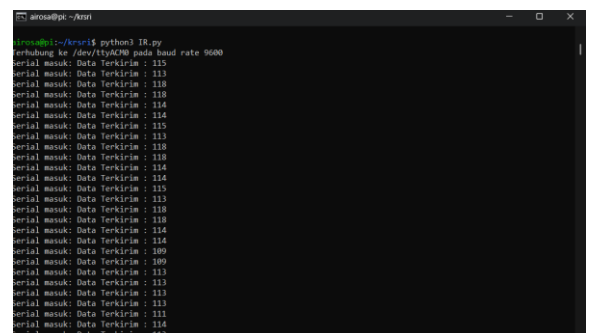
A. Hasil Pengujian Pengiriman Data dari Arduino



Gambar 3. Uji Coba Data dari Arduino

Pada Gambar 4.1 terlihat bahwa board Arduino Uno masih berfungsi dengan baik dan dapat mengirimkan data secara normal.

B. Hasil Pengujian Pengiriman Data dari Raspberry Pi 5



Gambar 4. Uji Coba Data Raspberry Pi 5

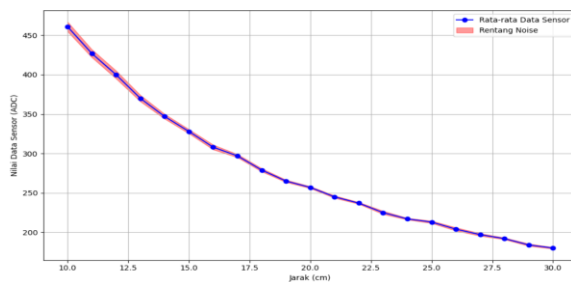
Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa Raspberry Pi 5 dapat menerima data dengan baik dari Arduino Uno

C. Pengujian Data Analog Sensor Sharp IR

Pengujian jarak objek pada robot dengan sensor Sharp IR dilakukan dengan menentukan jarak objek menggunakan penggaris. Pengujian sensor Sharp IR bertujuan untuk mengetahui berapa data analog yang dihasilkan sensor yang kemudian akan menghasilkan sebuah grafik untuk kalibrasi sensor

1. Hasil Pengujian Data Analog Sensor Depan

Uji coba sensor digunakan untuk mengetahui data analog yang dihasilkan sensor bagian depan, Gambar 5 adalah hasil pengambilan data pada sensor depan robot pada jarak objek 10 cm.

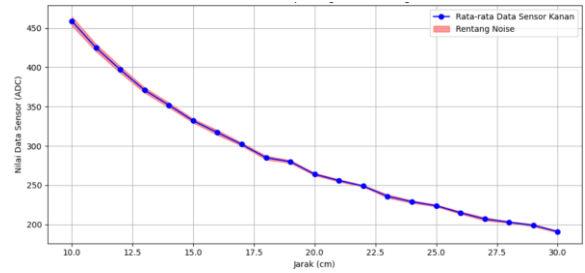


Gambar 5. Grafik Pengujian Sensor Depan

Kesimpulan dari grafik di atas menunjukkan noise relatif kecil dan stabil, rata-rata berada di bawah 1%. Hal ini menunjukkan bahwa sensor cukup stabil dan konsisten, meskipun terdapat sedikit fluktuasi kecil yang wajar dalam sistem pengukuran fisik

2. Hasil Pengujian Data Analog Sensor Kanan

Uji coba sensor digunakan untuk mengetahui data analog yang dihasilkan sensor bagian kanan, Gambar 6 adalah hasil pengambilan data pada sensor kanan robot pada jarak objek 10 cm.

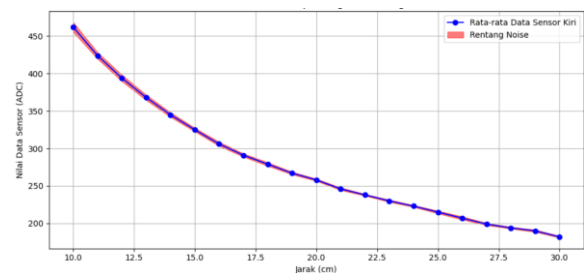


Gambar 6. Grafik Pengujian Sensor Kanan

Kesimpulan dari grafik disini menunjukkan noise relatif kecil dan stabil, rata-rata berada di bawah 1,3%. Hal ini menunjukkan bahwa sensor cukup stabil dan konsisten, meskipun terdapat sedikit fluktuasi kecil yang wajar dalam sistem pengukuran fisik

3. Hasil Pengujian Data Analog Sensor Kiri

Uji coba sensor digunakan untuk mengetahui data analog yang dihasilkan sensor bagian kiri, Gambar 7 adalah hasil pengambilan data pada sensor kiri robot pada jarak objek 10 cm.



Gambar 7. Grafik Pengujian Sensor Kiri

Kesimpulan ini menunjukan Sensor Sensor bekerja secara konsisten dalam mendeteksi perubahan jarak, dibuktikan dengan tren penurunan nilai data sensor seiring bertambahnya jarak. Noise yang terjadi relatif kecil ($<1.5\%$), menandakan akurasi dan kestabilan pembacaan cukup baik untuk aplikasi pengukuran jarak. Sensor paling stabil (dengan noise terendah) berada di kisaran 22–24 cm, menjadikannya rentang ideal untuk pengukuran jika dibutuhkan presisi tinggi, perlu pengamatan lebih lanjut di jarak-jarak tertentu yang mengalami fluktuasi noise seperti pada 10 cm dan 25–26 cm, untuk memastikan apakah gangguan tersebut bersifat sistematis atau acak.

4. Hasil Perhitungan Data Analog Sensor

Dari hasil pengujian data analog sensor sebanyak 20 jarak objek dihasilkan rumus konversi data analog ke jarak objek seperti pada tabel 25 dibawah ini.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Data Analog Sensor IR

Sensor	Y (Data Sensor)	R ²	X (Jarak Sensor)
Depan	$3445,5x^{-0.87}$	0,9996	$x^{-0.87}$ $= \frac{y}{3445,5}$
Kanan	$2844,9x^{-0.793}$	0,9999	$x^{-0.793}$ $= \frac{y}{2844,9}$
Kiri	$3190,8x^{-0.84}$	0,9997	$x^{-0.84}$ $= \frac{y}{3190,8}$

Berdasarkan tabel diatas, setiap sensor (Depan, Kanan, dan Kiri) memiliki model regresi yang sangat baik dalam menggambarkan hubungan antara nilai keluaran sensor (Y) dan jarak objek (X). Model matematis yang digunakan berbentuk fungsi eksponensial negatif, di mana nilai R² untuk ketiga sensor sangat mendekati 1 (masing-masing 0,9996 untuk sensor depan, 0,9999 untuk sensor kanan, dan 0,9997 untuk sensor kiri). Nilai R² yang sangat tinggi ini menunjukkan bahwa model tersebut mampu menjelaskan hampir seluruh variasi data pengukuran dengan sangat akurat. Dengan demikian, persamaan regresi yang diperoleh dapat diandalkan untuk mengonversi data sensor menjadi estimasi jarak secara presisi, yang penting dalam aplikasi sistem pengukuran otomatis atau robotik.

D. Hasil Pengujian Konversi Data Sensor ke Jarak Objek

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa akurat sensor Sharp IR mengetahui jarak objek dengan memasukkan rumus konversi yang telah dihitung sebelumnya. Untuk 1 pengujian dilakukan dalam waktu 20 detik pembacaan jarak, kemudian menghitung nilai rata-rata dari 100 data jarak yang ditampilkan

Dari hasil pengujian pembacaan sensor sebanyak 10 kali pada jarak 10 cm, 20 cm, dan 30 cm pada objek, dihasilkan nilai rata-rata jarak error seperti pada tabel 25 dibawah ini.

Tabel 2. Rata-rata Pengujian Hasil Pembacaan Sensor Sharp IR

Sensor	Error (cm)		
	10 cm	20 cm	30 cm
Depan	0,619	0,716	0,902
Kanan	0,573	0,75	0,885

Kiri	0,512	0,746	1,086
Kiri	0,512	0,746	1,086

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa error sensor cenderung meningkat seiring bertambahnya jarak target. Pada jarak 10 cm, rata-rata error sensor depan, kanan, dan kiri berturut-turut adalah 0,619 cm, 0,573 cm, dan 0,512 cm. Nilai ini meningkat pada jarak 30 cm menjadi 0,902 cm, 0,885 cm, dan 1,086 cm. Kenaikan error ini disebabkan oleh noise, yaitu gangguan yang muncul karena sinyal pantulan dari sensor semakin lemah pada jarak lebih jauh. Selain itu, faktor lingkungan seperti permukaan pantul yang tidak merata, sudut pantulan, dan interferensi dari cahaya atau objek lain juga turut memperbesar noise. Akibatnya, sensor memberikan pembacaan yang kurang akurat, terutama pada jarak yang lebih jauh.

E. Pengujian Low-Pass Filter pada Data Sensor

Pengujian low-pass filter dilakukan untuk menilai kemampuan filter dalam mengurangi noise pada data sensor analog. Data mentah dari sensor diukur dalam kondisi stabil dan kemudian dibandingkan dengan data yang telah difilter menggunakan metode exponential smoothing dengan konstanta α tertentu.

Penerapan low-pass filter terbukti efektif dalam mengurangi noise pada data sensor. Dengan menyaring fluktuasi tinggi yang tidak diinginkan, filter ini mampu menghasilkan data yang lebih stabil dan mendekati nilai sebenarnya. Hal ini berdampak langsung pada penurunan nilai error, sehingga pembacaan sensor menjadi lebih akurat dan konsisten. Dengan demikian, low-pass filter berperan penting dalam meminimalisir kesalahan pengukuran yang disebabkan oleh gangguan lingkungan atau ketidakstabilan sinyal

F. Pengujian PID Terhadap Tembok

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja kontrol PID dalam menjaga kestabilan arah gerak robot laba-laba berkaki empat saat bergerak maju di antara dua tembok. Dengan memanfaatkan input dari sensor inframerah (IR) di sisi kiri dan kanan, sistem PID secara otomatis mengoreksi arah gerakan robot agar tetap berada pada posisi tengah yang ideal. Tujuan utama dari penggunaan kontrol PID adalah untuk meminimalkan error (selisih jarak terhadap tengah) secara dinamis sehingga robot tidak menabrak tembok di kiri maupun kanan.

Hasil pengujian selama 100 detik, di mana robot secara kontinu bergerak maju sambil menjaga jaraknya agar tetap berada di tengah lorong selebar 30 cm. Data mencakup waktu, jarak sisi kiri dan kanan terhadap dinding, nilai error (selisih antara jarak kiri dan kanan), serta nilai koreksi yang dihasilkan oleh algoritma PID. Nilai koreksi ini menjadi dasar untuk penyesuaian arah gerak robot secara real-time.

Dari hasil pengamatan, terlihat bahwa ketika error bernilai positif (robot terlalu dekat ke dinding kanan), kontrol PID memberikan koreksi positif untuk mengarahkannya kembali ke kiri, dan sebaliknya. Respon PID relatif cepat dan adaptif, terbukti dari fluktuasi koreksi yang mampu mengimbangi perubahan posisi robot akibat gangguan atau dinamika lingkungan. Meski demikian, pada beberapa waktu, terdapat nilai error yang besar yang menyebabkan koreksi ekstrem, menunjukkan bahwa sistem masih bisa dipengaruhi oleh noise sensor atau kondisi medan tertentu.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa kontrol PID dengan parameter yang digunakan sudah cukup efektif dalam menjaga posisi robot tetap di tengah jalur secara dinamis dan stabil selama periode pengujian

III. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan terhadap sistem kontrol PID pada robot berkaki empat tipe wall follower menggunakan sensor Sharp IR GP2Y0A21, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem integrasi antara Arduino Uno dan Raspberry Pi 5 membaca jarak dan mengontrol posisi robot di antara dinding, ditandai dengan pengiriman serta penerimaan data sensor yang lancar selama pengujian, Sensor Sharp IR GP2Y0A21 mampu mengukur jarak objek dengan akurasi yang cukup baik untuk rentang 10–30 cm. Nilai rata-rata error pembacaan sensor berkisar antara 0,5 cm hingga 1,08 cm, dengan kecenderungan error meningkat seiring bertambahnya jarak. Penerapan metode low-pass filter terbukti efektif dalam mereduksi noise dan fluktuasi data sensor, sehingga menghasilkan pembacaan jarak yang lebih halus dan konsisten.
2. Sistem dirancang menggunakan kontrol PID dengan parameter $K_p = 0.5$, $K_i = 0.01$, dan $K_d = 0.1$ mampu menjaga kestabilan arah gerak robot agar tetap berada di tengah lorong selebar 30 cm. Koreksi arah yang dihasilkan oleh PID menunjukkan respons yang adaptif terhadap perubahan jarak kiri dan kanan secara real-time, secara keseluruhan, sistem yang dirancang telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu merancang dan mengimplementasikan sistem pengendali gerak pada robot berkaki empat menggunakan PID untuk menjaga posisi di antara dua dinding.
2. Penyempurnaan parameter PID melalui metode tuning yang lebih sistematis, misalnya dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols atau algoritma optimasi lainnya, untuk mendapatkan respons yang lebih halus dan mengurangi osilasi.
3. Pengujian sistem robot di berbagai jenis medan dan kondisi lingkungan yang berbeda, seperti permukaan tidak rata atau pencahayaan yang bervariasi, guna menguji ketahanan dan fleksibilitas sistem secara lebih komprehensif.
4. Pengembangan algoritma kontrol lanjutan seperti Model Predictive Control (MPC) atau penggunaan sensor kamera sebagai tambahan input navigasi untuk meningkatkan kemampuan adaptasi robot terhadap lingkungan yang lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Fadel Nugraha, M. Ramdhani, and R. Nugraha, "Perancangan Dan Kontrol Kaki Pada Robot Pemanjat Dinding Leg Design and Control on Wall Climbing Robot 1," vol. 6, no. 1, pp. 143–156, 2019.
- [2] N. J. Kong, C. Li, G. Council, and A. M. Johnson, "Hybrid iLQR Model Predictive Control for Contact Implicit Stabilization on Legged Robots," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 39, no. 6, pp. 4712–4727, 2023, doi: 10.1109/TRO.2023.3308773.
- [3] N. Syafitri, A. Zarkasi, and R. Passarella, "Rancang Bangun Robot Quadruped Berbasis Arduino," *J. Ilmu Komput. dan Teknol. Inf.*, vol. 10, no. 2, pp. 34–37, 2018, [Online]. Available: <https://repository.mercubuana.ac.id/40334/>
- [4] B. Darmawansyah, A. Zarkasih, and A. P. P. Prasetyo, "Rancang Bangun Robot Wall Follower Menggunakan Sensor Kamera," *Univ. Sriwij.*, vol. 11, no. 1, pp. 7–11, 2019.
- [5] F. Raza, W. Zhu, and M. Hayashibe, "Balance Stability Augmentation for Wheel-Legged Biped Robot through Arm Acceleration Control," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 54022–54031, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3071055.
- [6] A. Widyacandra, A. R. Al Tahtawi, and M. Martin, "Forward and inverse kinematics modeling of 3-DoF AX-12A robotic manipulator," *JITEL (Jurnal Ilm. Telekomun. Elektron. dan List. Tenaga)*, vol. 2, no. 2, pp. 139–150, 2022, doi: 10.35313/jitel.v2.i2.2022.139-150.
- [7] A. Prihatin and A. Musafa, "Sistem Kontrol Gerak Kaki Robot Dengan Memperhatikan Kondisi Suhu Motor Servo Pada Bagian Lutut Robot Humanoid," *Maestro*, vol. 2, no. 2, pp. 408–415, 2019, [Online]. Available: <https://jom.ft.budiluhur.ac.id/index.php/maestro/article/view/297>

Saran dalam penelitian dan pengembangan lebih lanjut dari penelitian ini yaitu :

1. Penambahan jumlah sensor atau penggunaan sensor dengan tingkat akurasi dan resolusi yang lebih tinggi (seperti LiDAR atau sensor Time of Flight) agar deteksi jarak lebih presisi dan dapat menjangkau jarak yang lebih jauh.