

Rancang Bangun Robot Wall Follower Dengan Kendali PID Berbasis Sensor Ultrasonik

Muhammad Sobirin ¹, Aditya Sahrul Hidayat ², Setia Gunawan ³

1,2,3 Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta, 14350, Indonesia

<p>INFORMASI ARTIKEL</p>	<p>A B S T R A K</p>
<p>Received: October 09, 2024 Revised: March 10, 2025 Available online: April 27, 2025</p>	<p>Navigasi robot otonom dalam lingkungan <i>indoor</i> sering menghadapi tantangan dalam menjaga jarak yang konsisten terhadap dinding, terutama pada lintasan sempit atau berliku. Ketidakstabilan jarak ini dapat menyebabkan penyimpangan arah dan mengurangi efisiensi navigasi. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem navigasi berbasis robot <i>Wall Follower</i> yang mengimplementasikan kontroler PID (<i>Proportional-Integral-Derivative</i>) dengan penalaan menggunakan metode Ziegler-Nichols tahap kedua. Sistem ini dirancang untuk menjaga jarak konstan antara robot dan dinding kanan menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04, serta mengendalikan kedua motor DC secara individual. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor ultrasonik mampu mendeteksi jarak dengan rata-rata <i>error</i> sebesar 0,18 cm dan <i>error</i> maksimum 0,3 cm. Kontrol PI pada motor DC menghasilkan rata-rata <i>error</i> sebesar 1,83 RPM dan <i>error</i> maksimum 2,9 RPM. Dari segi performa sistem, didapatkan <i>steady-state error</i> sebesar 0,18 cm, <i>overshoot</i> 1,25 cm, <i>rise time</i> 0,8 detik dan <i>settling time</i> 1,6 detik. Robot menunjukkan performa stabil dan akurat dalam mengikuti dinding, sehingga sistem ini memiliki potensi aplikasi dalam navigasi <i>indoor</i>, pemetaan lingkungan, serta misi pencarian dan penyelamatan.</p>
<p>CORRESPONDENCE</p>	<p>Kata kunci— Robot <i>Wall Follower</i>, PID, Ziegler-Nichols, Sensor Ultrasonik, Kendali Motor DC.</p>
<p>E-mail: muhammad.sobirin@uta45jakarta.ac.id</p>	<p>A B S T R A C T</p> <p>Autonomous robot navigation in indoor environments often faces challenges in maintaining a consistent distance from walls, particularly in narrow or winding pathways. Instability in this distance can lead to directional deviation and reduced navigation efficiency. To address this issue, this study develops a navigation system based on a Wall Follower robot implementing a PID (Proportional-Integral-Derivative) controller tuned using the second stage of the Ziegler-Nichols method. The system is designed to maintain a constant distance between the robot and the right wall using an HC-SR04 ultrasonic sensor, with individual control applied to each DC motor. Experimental results show that the ultrasonic sensor can detect distances with an average error of 0.18 cm and a maximum error of 0.3 cm. The PI control on the DC motors yields an average speed error of 1.83 RPM and a maximum error of 2.9 RPM. In terms of system performance, the navigation system achieved a steady-state error of 0.18 cm, an overshoot of 1.25 cm, a rise time of 0.8 seconds, and a settling time of 1.6 seconds. The robot demonstrated stable and accurate performance in wall following, indicating the system's potential for real-world applications such as indoor navigation, environmental mapping, and search-and-rescue missions.</p> <p>Keywords— Wall Follower Robot, PID, Ziegler-Nichols, Ultrasonic Sensor, DC Motor Control.</p>

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi robotika telah mendorong inovasi dalam sistem navigasi otonom, salah satunya

adalah algoritma *wall follower* yang memungkinkan robot mengikuti dinding atau batas sebagai panduan jalur. Pendekatan ini penting dalam berbagai aplikasi seperti robot pembersih, kursi roda pintar, dan robot pengumpul sampah, yang menuntut navigasi efisien dalam lingkungan kompleks [1], [2].

Penggunaan sensor seperti *ultrasonik* dan inframerah menjadi fondasi dalam proses deteksi jarak dan hambatan di sekitar robot. Agar navigasi berjalan stabil dan adaptif, sistem kendali seperti *Proportional-Integral-Derivative* (PID) kerap digunakan untuk mengoreksi deviasi gerak secara *real-time* [3], [4]. Salah satu tantangan utama dalam sistem ini adalah *tuning* parameter PID agar sesuai dengan karakteristik lingkungan dan tugas navigasi.

Berdasarkan kebutuhan akan sistem robotik otonom yang lebih cerdas dan stabil dalam mengikuti dinding, penelitian ini merancang dan mengimplementasikan robot *wall follower* berbasis sensor ultrasonik dengan kendali PID yang dituning secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kestabilan arah gerak dan respons adaptif terhadap berbagai jenis lintasan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terkait

Sebuah sistem kursi roda pintar telah dikembangkan dengan kendali berbasis perintah suara serta integrasi sensor medis MAX30100 untuk pemantauan denyut jantung dan sistem *wall following* menggunakan kendali PID. Sistem ini mampu beroperasi pada kondisi pencahayaan tertentu dan memahami perintah dari berbagai dialek bahasa [1]. Navigasi otonom dalam lingkungan padat dan dinamis telah diteliti menggunakan pendekatan kontrol berbasis perilaku (*behavior-based*), yang mencakup integrasi antara *wall following*, *obstacle avoidance*, *target tracking*, serta prediksi kecepatan hambatan menggunakan sensor ultrasonik [2].

Robot otonom untuk pengumpulan sampah telah dirancang dengan sistem navigasi berbasis GPS serta alternatif *wall following* ketika sinyal terganggu. Pengendalian dilakukan melalui penyesuaian kecepatan sudut pada roda penggerak [5]. Robot pemecah labirin dengan algoritma *left-hand wall following* berbasis sensor inframerah dan *mikrokontroler* Arduino menunjukkan efektivitas tinggi dalam menavigasi jalur bercabang dan menghindari jalan buntu [4].

Sistem kendali pintar untuk robot dua roda telah dikembangkan menggunakan pendekatan berbasis jaringan saraf tiruan yang dioptimasi serta kontrol logika *fuzzy*, menunjukkan akurasi dan responsivitas yang lebih tinggi dibandingkan PID konvensional [6]. Metode *tuning* PID telah dikaji melalui berbagai pendekatan, termasuk metode klasik Ziegler-Nichols [3], simulasi berbasis MATLAB/Simulink [4], serta penggunaan algoritma *metaheuristik* seperti Archimedes *Optimization Algorithm* (AOA) dan *Dispersive Flies Optimization* (DFO) untuk pengaturan parameter PID yang optimal [7]. Selain itu, penggunaan kombinasi antara metode Ziegler-Nichols dan algoritma genetika

(GA) terbukti mampu meningkatkan kinerja sistem kendali PID pada kendaraan otonom, terutama dalam hal respons waktu naik dan pengurangan *overshoot* [8].

B. Robot *Wall Follower* dan Kontroler PID

Robot *wall follower* merupakan jenis robot bergerak otomatis yang menggunakan permukaan dinding sebagai acuan navigasi. Dalam implementasinya, robot ini secara aktif mempertahankan jarak tertentu terhadap dinding guna mengikuti jalur yang tersedia. Algoritma *wall following* sering dijadikan salah satu pendekatan perilaku dasar (*behavior-based*) dalam sistem navigasi robot *mobile* otonom [9].

Pengendali proporsional-integral-derivatif (PID) merupakan salah satu algoritma kontrol paling umum dan efektif dalam sistem kendali otomatis, termasuk pada robot *wall follower*, karena kesederhanaannya serta kemampuannya dalam menyesuaikan respons sistem terhadap gangguan maupun referensi masukan. PID bekerja dengan menggabungkan tiga aksi kontrol utama, yakni aksi *proporsional* (P) yang merespons besarnya kesalahan saat ini, *integral* (I) yang mengakumulasi kesalahan masa lalu untuk menghilangkan *offset*, serta *derivatif* (D) yang memprediksi tren perubahan kesalahan untuk mengurangi osilasi sistem.

Salah satu metode populer untuk menyetel parameter PID adalah metode Ziegler-Nichols, yang pertama kali diperkenalkan pada tahun 1942 oleh John G. Ziegler dan Nathaniel B. Nichols. Metode ini bersifat eksperimental dan digunakan untuk menentukan parameter K_p , K_i , dan K_d berdasarkan respons sistem terhadap kontrol proporsional murni. Dalam tahap awal, nilai K_p dinaikkan hingga sistem mengalami osilasi kontinu. Nilai ini disebut *ultimate gain* (K_u), dan periode osilasinya adalah *ultimate period* (T_u). Berdasarkan nilai ini, parameter PID dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$K_p = \alpha \cdot K_u \tag{1}$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad \text{dengan} \quad T_i = \beta \tag{2}$$

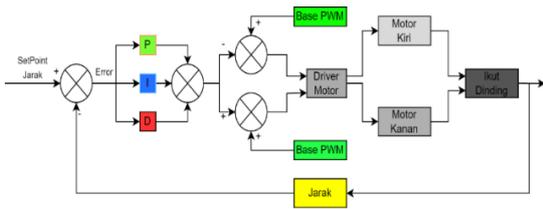
$$K_d = \gamma \cdot T_u \tag{3}$$

Nilai konstanta α , β , dan γ tergantung pada tipe kontrol (P, PI, atau PID), seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1 Parameter kontrol PID berdasarkan metode Ziegler-Nichols

Tipe Kontrol	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 \cdot K_u$	-	-
PI	$0,45 \cdot K_u$	$T_u/1,2$	-
PD	$0,8 \cdot K_u$	-	$T_u/8$
PID	$0,6 \cdot K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

Metode ini cukup efektif untuk sistem linear dan dengan waktu tunda pendek, namun memiliki keterbatasan ketika diterapkan pada sistem nonlinear atau yang memiliki waktu tunda besar. Oleh karena itu, dalam praktiknya, metode Ziegler-Nichols sering dijadikan titik awal untuk penyetelan lanjutan menggunakan pendekatan berbasis algoritma genetika, *fuzzy logic*, atau metode optimasi *metaheuristik* lainnya [6], [7], [8], [9].



Gambar 1 Blok diagram sistem kendali PID pada robot *wall follower*

Penerapan kontroler PID berbasis Ziegler–Nichols pada robot *wall follower* digambarkan pada Gambar 2. Sistem ini menggunakan pendekatan *closed-loop feedback* dengan sensor jarak sebagai masukan utama. Jarak aktual dibandingkan dengan setpoint untuk menghasilkan sinyal error, yang kemudian diproses oleh pengendali PID. *Output* dari pengendali digunakan untuk menyesuaikan kecepatan motor kiri dan kanan secara diferensial melalui pengaturan sinyal PWM, sehingga robot mampu mempertahankan jarak optimal terhadap dinding. Dengan demikian, sistem kendali ini memungkinkan robot bergerak stabil sepanjang dinding, merespons perubahan lingkungan secara real time, dan mengurangi penyimpangan arah dengan efektif.

C. Sistem Navigasi *Wall Follower* dengan Kontrol PID dan Sensor Ultrasonik

Navigasi robot *wall follower* merupakan pendekatan umum dalam robotika mobile, di mana robot mempertahankan jarak tertentu dari dinding untuk bergerak secara otonom di sepanjang lintasan yang ditentukan. Salah satu metode yang efektif untuk mencapai navigasi ini adalah dengan menggunakan sensor ultrasonik yang dipasang di sisi kanan robot, dikombinasikan dengan pengendali *proporsional-integral-derivatif* (PID) untuk mengatur kecepatan motor berdasarkan jarak yang terukur.

Sensor ultrasonik, seperti HC-SR04, berfungsi dengan mengirimkan gelombang ultrasonik dan mengukur waktu yang dibutuhkan untuk pantulan kembali dari objek terdekat, dalam hal ini dinding. Data jarak yang diperoleh digunakan sebagai umpan balik dalam sistem kontrol tertutup. Pengendali PID kemudian menghitung kesalahan antara jarak yang diinginkan (*setpoint*) dan jarak aktual, serta menghasilkan sinyal kontrol untuk menyesuaikan kecepatan motor kiri dan kanan, sehingga robot dapat mempertahankan jarak yang konsisten dari dinding.

Implementasi kontrol PID pada robot *wall follower* dengan sensor ultrasonik kanan menunjukkan peningkatan stabilitas dan *responsivitas* pergerakan robot. Parameter PID yang diperoleh melalui metode *trial and error* adalah $K_p = 3$, $K_i = 0$, dan $K_d = 5$. Pengujian dengan variasi kecepatan motor menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan jarak dari dinding dengan rata-rata kesalahan sebesar 0,4 cm pada kecepatan PWM 200, yang dianggap cukup akurat untuk navigasi dalam lingkungan kompetisi seperti KRAI 2018 [10].

Diagram blok sistem navigasi *wall follower* dengan kontrol PID dan sensor ultrasonik kanan ditunjukkan pada Gambar 2.1. Diagram ini menggambarkan alur kerja mulai dari pembacaan jarak oleh sensor ultrasonik, perhitungan kesalahan oleh kontroler PID, hingga

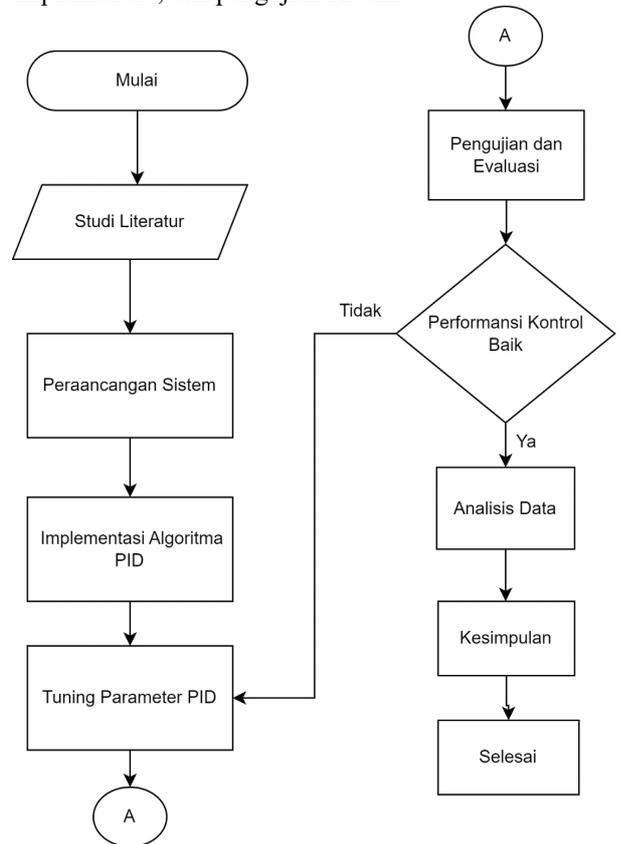
penyesuaian kecepatan motor untuk menjaga jarak yang diinginkan dari dinding.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengadopsi pendekatan rekayasa berbasis eksperimen yang bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem robot *Wall Follower* berbasis pengendali *Proporsional-Integral-Derivatif* (PID). Seluruh proses penelitian dilakukan melalui tahapan sistematis yang meliputi: analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan lunak, serta evaluasi performa. Sub-bagian berikut menguraikan proses penelitian secara rinci.

a. Diagram Alir Penelitian

Guna memberikan panduan terhadap alur kerja penelitian, Gambar 3 menyajikan diagram alir proses yang dimulai dari identifikasi permasalahan hingga tahap evaluasi akhir. Diagram ini menggambarkan hubungan logis antar tahapan yang dilalui, mencakup studi literatur, perancangan, pengembangan, implementasi, dan pengujian sistem.



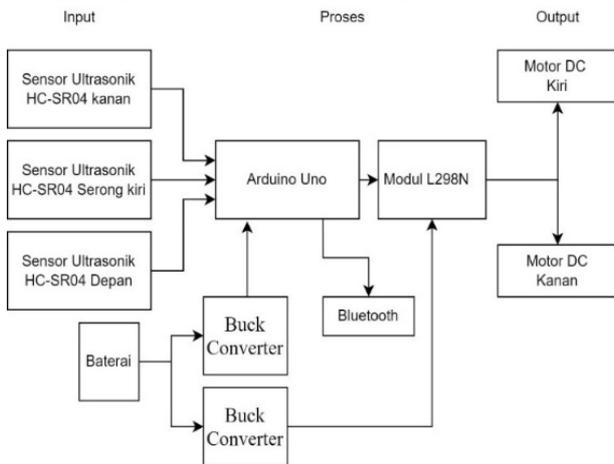
Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Diagram ini menjadi acuan utama untuk menjaga konsistensi metodologis selama proses penelitian berlangsung.

b. Perancangan dan Implementasi Sistem

Arsitektur sistem robot dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu: (1) masukan (*input*), (2) pemrosesan (*processing*), dan (3) keluaran (*output*). Perancangan sistem divisualisasikan dalam bentuk diagram blok yang ditampilkan pada Gambar 3.

Sistem robot *Wall Follower* dirancang dengan arsitektur yang terdiri atas tiga komponen utama, yaitu *input*, *proses*, dan *output*. Pada bagian *input*, sistem dilengkapi dengan tiga sensor *ultrasonik* HC-SR04 yang berfungsi untuk mendeteksi jarak antara robot dengan dinding. Sensor ini berperan sebagai sistem persepsi lingkungan, memungkinkan robot untuk mengenali posisi relatif terhadap objek di sekitarnya secara *real-time*. Selanjutnya, pada bagian *proses*, data hasil pembacaan sensor diolah oleh unit pengendali berbasis *mikrokontroler* Arduino Uno. *Mikrokontroler* ini menjalankan algoritma pengendali *Proporsional-Integral-Derivatif* (PID) guna menghitung nilai *error* antara pembacaan sensor dan *setpoint* yang telah ditentukan. Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk menghasilkan sinyal kontrol yang akan mengatur arah dan kecepatan gerak robot. Pada bagian *output*, sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dihasilkan dari proses kontrol dikirimkan ke modul *driver* motor L298N untuk dikonversi menjadi kecepatan rotasi motor DC dalam satuan RPM. Sebagai tambahan, sistem juga dilengkapi dengan modul komunikasi nirkabel *Bluetooth* HC-05, yang berfungsi untuk mengirimkan data operasional secara *real-time* ke perangkat eksternal sebagai bagian dari sistem *monitoring* dan evaluasi.



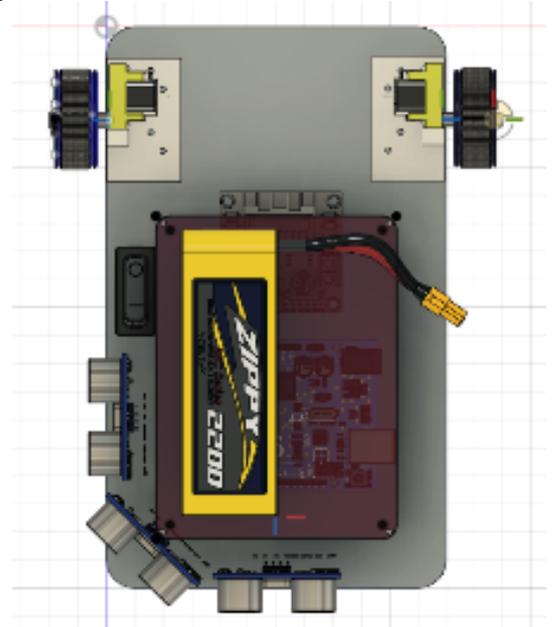
Gambar 3 Diagram Blok Sistem Wall Follower

Sistem kontrol PID digunakan untuk menjaga jarak konstan antara sisi kanan robot dengan dinding. Parameter PID (K_p , K_i , K_d) ditentukan melalui proses *tuning* berbasis respons sistem terhadap berbagai skenario pengujian.

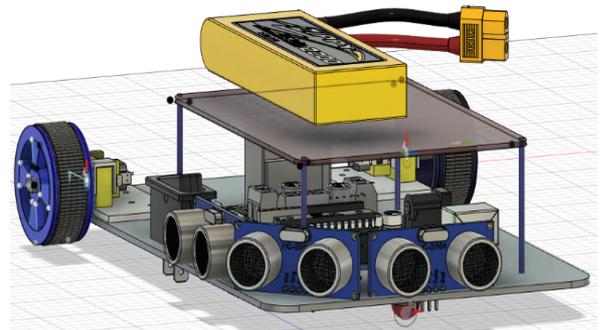
c. Perancangan Perangkat Keras

Desain perangkat keras dalam penelitian ini dirancang untuk memastikan integrasi komponen sistem secara optimal ke dalam bentuk fisik robot yang kompak dan fungsional. Struktur fisik robot dibangun menggunakan material plastik hasil cetak 3D (*3D-printed plastic*) dengan ketebalan 0,3 cm, yang memberikan keseimbangan antara kekuatan mekanik dan bobot yang ringan. Pada bagian tengah sasis, mikrokontroler Arduino Uno ditempatkan sebagai pusat pengendali sistem. Sensor *ultrasonik* HC-SR04 dipasang strategis pada bagian depan dan sisi kanan robot untuk memaksimalkan cakupan deteksi terhadap dinding dan rintangan di sekitarnya. Dua motor DC yang dilengkapi

dengan *encoder* diletakkan di bagian belakang untuk menggerakkan roda kanan dan kiri secara terkoordinasi. Selain itu, modul *driver* motor L298N dan unit catu daya (baterai) disusun secara *efisien* guna menjaga stabilitas fisik dan meminimalkan gangguan mekanis saat robot beroperasi.



Gambar 4 Desain Robot tampak atas



Gambar 5 Desain Robot tampak samping

Gambar 4 dan Gambar 5 masing-masing menunjukkan tampilan visual dari desain robot dilihat dari atas dan samping, yang merepresentasikan susunan dan orientasi komponen dalam implementasi aktual. Tabel 2 merangkum spesifikasi fisik dari sistem robot.

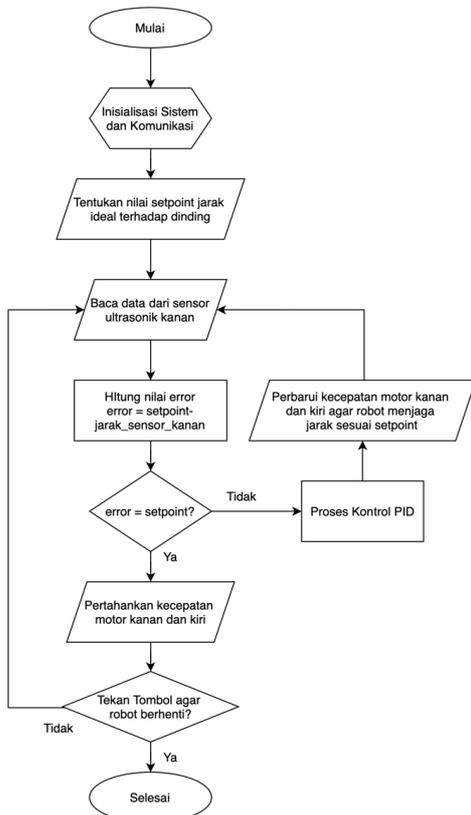
Tabel 2 Spesifikasi Fisik Robot Wall Follower

Komponen	Spesifikasi
Dimensi Robot	20 × 18,5 × 14,5 cm ³
Material	Plastik 3D print (ketebalan 0,3 cm)
Kontroler	Arduino Uno
Motor	2 Motor DC dengan encoder
Sensor	3 Sensor Ultrasonik HC-SR04
Driver Motor	L298N Dual H-Bridge
Komunikasi	Modul Bluetooth HC-05
Power Supply	Baterai 9V

d. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak sistem dikembangkan menggunakan Arduino IDE sebagai platform pemrograman utama. Logika sistem dirancang untuk mendukung pengendalian gerak robot *Wall Follower* secara otomatis dan responsif melalui pendekatan kontrol PID. Program utama diawali dengan proses inialisasi sistem dan aktivasi komunikasi antar modul, termasuk sensor ultrasonik HC-SR04, motor DC, serta mikrokontroler Arduino Uno. Setelah inialisasi, sistem menentukan nilai setpoint, yaitu jarak ideal antara robot dan dinding di sisi kanan. Secara berulang, sensor akan membaca jarak aktual, lalu nilai error dihitung berdasarkan selisih antara setpoint dan data pembacaan sensor.

Gambar 6 menjelaskan diagram alir program utama yang menggambarkan alur logika sistem pengendali berbasis PID. Jika nilai *error* berada dalam ambang batas toleransi, sistem akan mempertahankan kecepatan motor kanan dan kiri secara konstan. Namun, jika terjadi deviasi yang signifikan, maka algoritma PID akan dijalankan untuk menghitung nilai koreksi berupa sinyal PWM baru yang akan mengatur kecepatan masing-masing motor DC. Koreksi ini bertujuan agar robot kembali berada pada jarak ideal dari dinding. Proses ini berlangsung dalam *loop* kendali secara kontinu, memastikan sistem dapat beradaptasi terhadap perubahan lingkungan secara *real-time*. Siklus kontrol berlangsung hingga pengguna memberikan perintah berhenti melalui tombol fisik, yang menandai akhir operasi robot. Dengan implementasi logika ini, perangkat lunak mampu mengoptimalkan responsivitas dan kestabilan pergerakan robot dalam skenario navigasi sepanjang dinding.



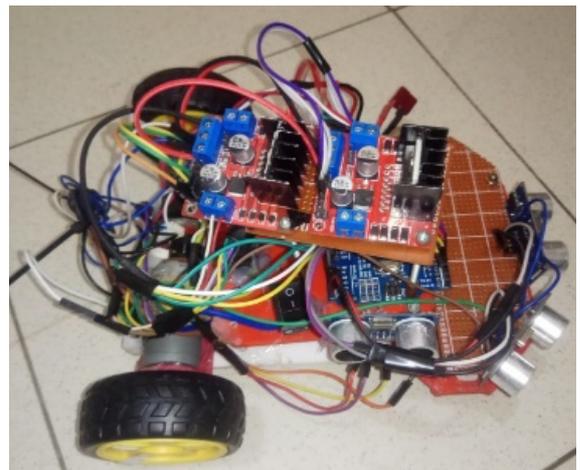
Gambar 6 Diagram Alur Program Utama

e. Implementasi Perangkat Keras

Pada tahap implementasi perangkat keras, seluruh komponen dirakit berdasarkan rancangan teknis yang telah ditentukan. Konektivitas antar komponen menggunakan kabel jumper fleksibel. Dokumentasi visual hasil implementasi ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8



Gambar 7 Tampilan fisik robot tampak samping



Gambar 8 Tampilan fisik robot tampak atas

Verifikasi fungsi dilakukan untuk memastikan integrasi perangkat keras bekerja sesuai dengan desain dan tidak terdapat *malfungsi* pada koneksi atau catu daya.

f. Implementasi Perangkat Lunak

Perangkat lunak diuji secara langsung melalui komunikasi serial dengan serial *plotter* Arduino IDE. Data *real-time* dari sensor dan *output* PWM divisualisasikan dalam bentuk grafik, sehingga proses tuning dan analisis sistem dapat dilakukan secara akurat dan efisien. Langkah ini sangat penting dalam evaluasi performa sistem untuk mengidentifikasi keterlambatan, *overshoot*, serta kesalahan *steady-state*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Pengujian Sensor Ultrasonik HC-SR04

Pengujian sensor ultrasonik HC-SR04 dilakukan untuk mengevaluasi kinerjanya dalam mendeteksi jarak sebagai bagian dari sistem navigasi pada robot. Pengujian dilakukan dengan menempatkan penghalang

pada jarak tertentu di depan sensor, yang diukur menggunakan penggaris. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 3, yang menunjukkan perbandingan antara jarak uji dan hasil pembacaan sensor. Berdasarkan data pada tabel, diperoleh rata-rata *error* sebesar 0,18 cm. *Error* yang terjadi umumnya terdapat pada angka desimal di belakang koma, sementara nilai di depan koma sesuai dengan jarak uji. Karena sistem hanya menggunakan nilai jarak dari bilangan bulat (angka di depan koma), maka *error* ini tidak berpengaruh terhadap kinerja sistem secara keseluruhan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pengukuran sensor dalam konteks sistem yang dirancang memiliki akurasi yang memadai dan dapat dianggap bebas dari *error* yang signifikan.

Tabel 3 Hasil Pengujian Sensor Ultrasonik HC-SR04

Pengujian Ke-1	Jarak Uji (cm)	Sensor Ultrasonik Kanan (cm)	Error (cm)
1	5	4,9	0,1
2	10	9,8	0,2
3	15	14,8	0,2
4	20	19,7	0,3
5	25	24,8	0,2
6	30	29,8	0,2
7	35	34,9	0,1
8	40	39,8	0,2
9	45	44,8	0,2
10	50	49,9	0,1
Rata-Rata Error (cm)			0,18

b. Pengujian Encoder Pada Motor DC

Pengujian *encoder* pada motor DC dilakukan untuk mengevaluasi akurasi sensor *encoder* dalam mengukur kecepatan motor, dengan membandingkan hasil pembacaan antara *tachometer* dan *encoder* pada berbagai nilai PWM. Pengujian dilakukan pada dua motor, yaitu motor kiri dan motor kanan, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4 Hasil Pengujian Sensor Encoder pada Motor DC Kiri

Pengujian Ke-	PWM Motor Kiri	Nilai Tachometer (RPM)	Nilai Sensor Encoder (RPM)	Nilai Tegangan Motor	Error (RPM)
1	10	0	0	0,94	0
2	40	32,7	35,1	3,38	2,42
3	70	303,5	304,3	4,10	0,89
4	90	423,3	433,1	5,74	0,87
5	120	544,6	544,3	7,14	0,21
6	150	612,3	614,6	8,07	2,33
7	180	657,8	655,6	8,63	2,19
8	210	690,1	690,7	9,02	0,63
9	240	705,4	702,4	9,30	2,96
10	255	743,3	749,2	9,54	5,97
Rata-Rata Error (RPM)					1,847

Tabel 5 Hasil Pengujian Sensor Encoder pada Motor DC Kanan

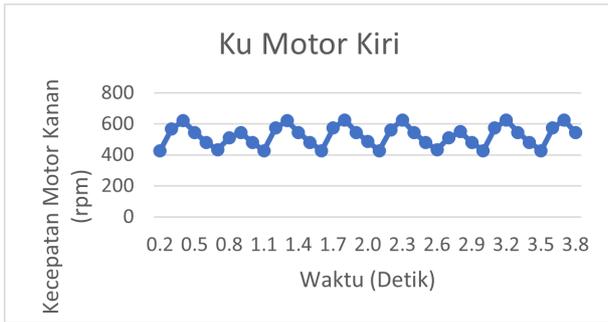
Pengujian Ke-	PWM Motor Kanan	Nilai Tachometer (RPM)	Nilai Sensor Encoder (RPM)	Nilai Tegangan Motor	Error (RPM)
1	10	0	0	0,86	0
2	40	151,5	152,2	2,55	1,15
3	70	435,9	433,1	5,70	1,92
4	90	528,7	526,8	6,78	1,9
5	120	627,9	626,3	8,01	1,6
6	150	679,6	679,2	8,64	0,4
7	180	711,4	708,2	9,03	3,2
8	210	732,6	731,7	9,29	0,9
9	240	749,8	746,1	9,50	3,7
10	255	732,2	731,7	9,63	0,5
Rata-Rata Error (RPM)					1,527

Tabel 4 menyajikan hasil pengujian pada motor kiri, yang menunjukkan rata-rata *error* sebesar 1,847 RPM, sementara Tabel 5 menampilkan hasil pengujian pada motor kanan dengan rata-rata *error* sebesar 1,527 RPM. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor *encoder* memiliki tingkat akurasi yang tinggi dengan selisih pengukuran yang sangat kecil dibandingkan *tachometer*. Selain itu, konsumsi tegangan pada kedua motor meningkat seiring bertambahnya nilai PWM, sesuai karakteristik motor DC. Respon kecepatan motor terhadap perubahan PWM juga bersifat linier dan konsisten, yang menunjukkan bahwa sistem kontrol kecepatan bekerja secara optimal. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sensor *encoder* dapat digunakan sebagai umpan balik (*feedback*) yang andal dan akurat dalam sistem kontrol motor DC.

c. Evaluasi Hasil Tuning Kontrol PID Menggunakan Metode Ziegler-Nichols Tahap Kedua

1. Tuning Kecepatan Motor Kiri

Proses *tuning* dilakukan dengan pendekatan Ziegler-Nichols metode kedua untuk mendapatkan parameter *ultimate gain* (K_u) dan *ultimate period* (T_u) yang optimal. Uji awal dilakukan dengan pengaturan nilai $K_p = 3,5$, $K_i = 0$, dan $K_d = 0$ pada sistem *closed-loop* menggunakan kontroler proporsional. Berdasarkan respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 10, terlihat bahwa sistem mengalami osilasi berkelanjutan yang stabil, menandakan bahwa nilai K_p yang digunakan telah mencapai batas osilasi kritis. Dari grafik tersebut diperoleh nilai $K_u = 3,5$ dan $T_u = 0,5$ detik. Parameter ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam perhitungan konstanta kontroler P, PI, dan PID sesuai dengan formula *tuning* Ziegler-Nichols untuk menghasilkan performa sistem yang lebih responsif dan stabil.

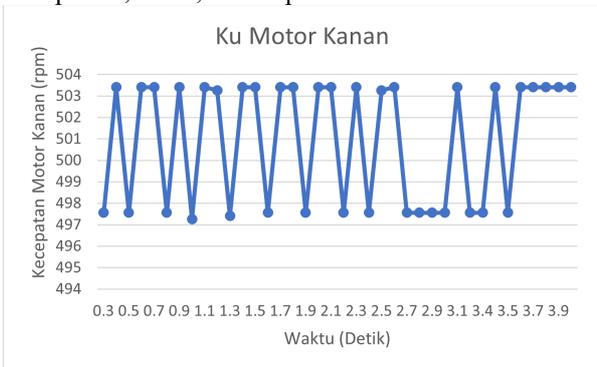


Gambar 9 Respon Sistem *Closed-Loop* Motor Kiri Menggunakan Kontroler Proporsional (P)

2. Tuning Kecepatan Motor Kanan

Pengujian *tuning* kecepatan motor kanan menggunakan metode Ziegler-Nichols kedua dilakukan untuk memperoleh parameter *ultimate gain* (Ku) dan *ultimate period* (Tu) yang optimal. Pada tahap awal, sistem diuji dalam konfigurasi *closed-loop* dengan menggunakan kontroler proporsional saja, di mana nilai Kp diset sebesar 0.1025, sedangkan Ki dan Kd bernilai nol.

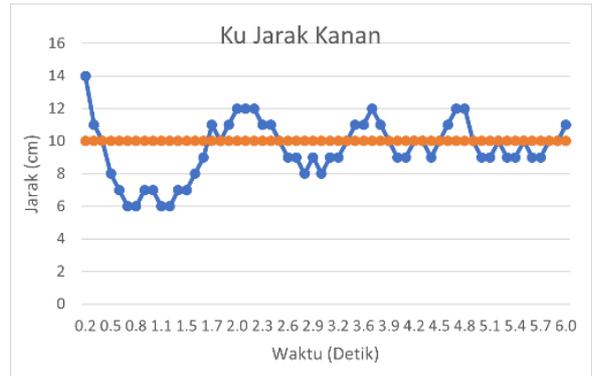
Respon sistem terhadap konfigurasi ini ditunjukkan pada Gambar 11, yang menggambarkan perilaku osilasi berkelanjutan sebagai indikasi tercapainya batas osilasi kritis. Dari pengamatan terhadap grafik tersebut, diperoleh nilai Ku = 0.1025 dan Tu = 0.18 detik. Parameter ini selanjutnya digunakan untuk menghitung konstanta kontroler P, PI, dan PID berdasarkan formula Ziegler-Nichols, guna menghasilkan kontrol kecepatan motor yang lebih optimal, stabil, dan responsif.



Gambar 10 Respon Sistem *Closed-Loop* Motor Kanan Menggunakan Kontroler Proporsional (P)

3. Tuning Sensor Ultrasonik HC-SR04

Pengujian tuning kontroler pada sensor ultrasonik sisi kanan dilakukan menggunakan metode Ziegler-Nichols tahap kedua, setelah sebelumnya diperoleh parameter *tuning* optimal untuk motor kiri dan motor kanan. Tujuan pengujian ini adalah untuk menentukan nilai parameter *ultimate gain* (Ku) dan *ultimate period* (Tu) yang diperlukan untuk perancangan kontrol PID yang efisien.



Gambar 11 Respon Sistem *Closed-Loop* Sensor Ultrasonik Kanan Menggunakan Kontroler Proporsional (P)

Proses pencarian nilai Ku dan Tu dilakukan dengan menerapkan kontroler proporsional murni pada sistem, di mana parameter diset sebagai berikut: Kp = 15, Ki = 0, dan Kd = 0. Respon sistem terhadap pengaturan ini ditampilkan pada Gambar 12, yang menunjukkan osilasi berkelanjutan pada sistem sebagai indikator bahwa nilai Ku telah tercapai.

Berdasarkan hasil pengamatan, diperoleh nilai Ku = 15 dan Tu = 1.37 detik. Nilai-nilai ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menghitung parameter kontroler P, PI, dan PID sesuai dengan formula metode Ziegler-Nichols, dengan tujuan meningkatkan kinerja sistem navigasi berbasis sensor ultrasonik.

d. Analisis Kinerja Kontrol Berdasarkan Lokasi dan Tipe Pengendali.

Tabel 6 menampilkan hasil *tuning* parameter kontrol P, PI, PD, dan PID pada tiga titik kendali utama: motor kiri, motor kanan, dan sensor kanan. Nilai *ultimate gain* (Ku) dan *ultimate period* (Tu) diperoleh melalui pendekatan Ziegler-Nichols, yang kemudian digunakan untuk menghitung parameter kontrol proporsional (Kp), integral (Ki), dan derivatif (Kd). Motor kiri menunjukkan nilai *ultimate gain* (Ku) sebesar 3,5 dan *ultimate period* (Tu) sebesar 0,5, yang menghasilkan nilai Kp tertinggi pada kontrol PD sebesar 2,8, serta nilai Ki tertinggi pada kontrol PID sebesar 8,40. Hal ini mencerminkan karakteristik sistem yang relatif stabil namun memerlukan penguatan integral yang tinggi untuk mempercepat konvergensi terhadap nilai referensi. Sebaliknya, motor kanan memiliki nilai Ku yang jauh lebih kecil, yaitu 0,1025, dengan hasil *tuning* parameter yang lebih halus. Ini mengindikasikan bahwa sistem motor kanan lebih sensitif terhadap perubahan parameter kontrol, sehingga memerlukan penguatan yang lebih konservatif untuk menjaga stabilitas. Sementara itu, sensor kanan memiliki nilai Ku paling besar sebesar 15 dan Tu sebesar 1,37, yang menghasilkan parameter kontrol Kp, Ki, dan Kd dengan nilai relatif tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem sensor memerlukan respons yang lebih agresif untuk mengimbangi ketidakpastian atau gangguan sinyal yang mungkin muncul, serta menyesuaikan dengan dinamika pengukuran yang lebih kompleks.

Tabel 7 Parameter Tuning Kontrol P, PI, PD, dan PID Berdasarkan Metode Ziegler-Nichols

Lokasi Kontrol	Tipe Kontrol	Ku	Tu	Kp	Ki	Kd
Motor Kiri	PID	3,5	0,5	2,10	8,40	0,13125
	P	3,5	0,5	0,25	-	-
	PI	3,5	0,5	1,575	3,78	-
	PD	3,5	0,5	2,8	-	0,175
Motor Kanan	PID	0,1025	0,18	0,0615	0,6833	0,00138
	P	0,1025	0,18	0,09	-	-
	PI	0,1025	0,18	0,0461	0,3075	-
	PD	0,1025	0,18	0,082	-	0,00185
Sensor Kanan	PID	15	1,37	9	13,1387	1,54125
	P	15	1,37	0,685	-	-
	PI	15	1,37	6,75	5,9124	-
	PD	15	1,37	12	-	2,055

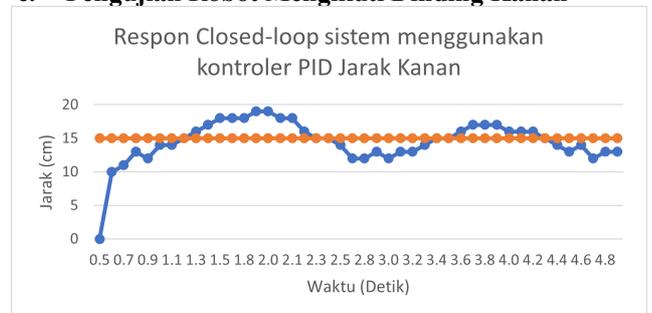
Tabel 7 menyajikan performa sistem berdasarkan tiga parameter utama: *overshoot*, *settling time*, dan *steady-state error*, serta penilaian subjektif terhadap kualitas kinerja kendali. Pada sistem motor kiri, kontrol P dan PI menunjukkan performa paling optimal dengan nilai *overshoot* yang rendah, masing-masing sebesar 1,63% dan 6,36%, serta waktu pemulihan (*settling time*) yang cepat, yaitu 0,09 detik dan 0,20 detik. Sebaliknya, kontrol PD menghasilkan *overshoot* tertinggi sebesar 16,95% dan *settling time* terlama yaitu 0,45 detik, sehingga dinilai kurang baik dalam menjaga stabilitas sistem. Sementara itu, kontrol PID mampu menggabungkan kecepatan respons dan akurasi, namun tetap menghasilkan *overshoot* yang relatif tinggi sebesar 9,34%. Pada sistem motor kanan, seluruh jenis kontrol memberikan performa yang baik, ditandai dengan *settling time* yang sangat cepat (kurang dari 0,1 detik) dan *overshoot* yang minimal. Di antara semua, kontrol PI menjadi yang paling unggul dengan *overshoot* terendah sebesar 0,86% dan waktu pemulihan tercepat yaitu 0,05 detik. Berbeda dengan sistem motor, pada sensor kanan hanya kontrol P yang menunjukkan performa stabil dengan *overshoot* moderat sebesar 6,66% dan *error* keadaan tunak (*steady-state error*) yang hampir nol. Sementara itu, kontrol PID dan PI menghasilkan *overshoot* yang sangat tinggi, masing-masing sebesar 26,6% dan 20%, yang mengindikasikan kurang stabilnya respons sistem terhadap gangguan atau perubahan mendadak. Kontrol PD dalam hal ini memberikan alternatif yang relatif seimbang, dengan *overshoot* sebesar 13,3% dan *settling time* sebesar 0,41 detik. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas tipe kontrol sangat tergantung pada karakteristik sistem yang dikendalikan, di mana aktuator seperti motor lebih responsif terhadap kontrol PI, sementara sensor memerlukan strategi tuning yang lebih hati-hati untuk mencapai stabilitas optimal.

Tabel 8 Evaluasi Kinerja Sistem Menggunakan Kontrol P, PI, PD, dan PID

Lokasi Kontrol	Tipe Kontrol	Overshoot (%)	Settling Time (detik)	Steady-State Error	Evaluasi Kinerja
Motor Kiri	PID	9,34	0,33	Belum nol	Cukup baik
	P	1,63	0,09	Belum nol	Baik
	PI	6,36	0,20	Belum nol	Baik
	PD	16,95	0,45	Belum nol	Kurang baik
Motor Kanan	PID	1,15	0,08	Belum nol	Baik
	P	1,88	0,10	Belum nol	Baik
	PI	0,86	0,05	Belum nol	Baik
	PD	1,63	0,09	Belum nol	Baik
Sensor Kanan	PID	26,6	0,87	Belum nol	Kurang baik
	P	6,66	0,76	Hampir nol	Baik
	PI	20,0	0,44	Hampir nol	Kurang baik
	PD	13,3	0,41	Belum nol	Baik

Dari kedua tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa kinerja sistem sangat bergantung pada karakteristik masing-masing lokasi kontrol. Sistem motor, baik kiri maupun kanan, cenderung lebih responsif terhadap kontrol PI dan P, yang memberikan kestabilan dan kecepatan. Sebaliknya, sensor kanan memerlukan pendekatan yang lebih hati-hati, karena kontrol PID atau PI dapat menimbulkan osilasi besar akibat nilai parameter yang terlalu agresif. Secara keseluruhan, pendekatan Ziegler-Nichols berhasil memberikan parameter awal yang efektif, namun *tuning* lebih lanjut tetap diperlukan untuk menghindari *overshoot* berlebih, khususnya pada sistem sensor. Evaluasi kinerja ini penting dalam menentukan strategi kontrol adaptif berbasis lokasi untuk sistem robotik atau otomasi.

e. Pengujian Robot Mengikuti Dinding Kanan



Gambar 13 Respons Sensor Ultrasonik Kanan terhadap Pergerakan Robot Menuju Dinding Kanan

Gambar 13 menunjukkan respons sensor ultrasonik kanan ketika robot bergerak mendekati dinding kanan. Dalam grafik tersebut, garis jingga merepresentasikan set point (15 cm), sementara garis biru menunjukkan pembacaan sensor

aktual. Pada rentang waktu 0,5 hingga 2,1 detik, jarak yang terdeteksi relatif stabil pada kisaran 18–20 cm, yang mengindikasikan bahwa robot mampu menjaga pergerakan sejajar terhadap dinding kanan secara konsisten.

Namun, pada interval waktu 2,1 hingga 3,6 detik, terjadi peningkatan fluktuatif pada jarak yang terdeteksi. Hal ini menunjukkan bahwa robot sempat menjauh dari dinding, kemungkinan sebagai respons terhadap gangguan atau proses koreksi posisi. Pada rentang waktu 4,0 hingga 4,8 detik, jarak terdeteksi kembali mendekati *set point*, yang menandakan bahwa robot berhasil melakukan penyesuaian dan kembali bergerak sejajar dengan dinding kanan.

Untuk memperkuat analisis performa kontrol, berikut disajikan perbandingan parameter kinerja dari berbagai jenis pengendali:

Tabel 9 Perbandingan Parameter Kinerja Sistem antara Pengendali P, PI, PID, dan PD

Kriteria	PID	P	PI	PD
Rise Time (detik)	0,29	0,52	0,33	0,82
2% Settling Time (detik)	0,87	0,76	0,44	0,41
Percent Overshoot (%)	26,6%	6,66	20%	13,3 %

Dari tabel 9, kontroler PID menunjukkan *rise time* tercepat, namun dengan *overshoot* tertinggi, yang membuatnya cocok untuk sistem yang mengutamakan kecepatan meskipun dengan toleransi terhadap fluktuasi awal. Kontroler PI memberikan waktu penetapan tercepat dengan *overshoot* yang moderat, menjadikannya solusi seimbang untuk sistem yang membutuhkan stabilitas dan kecepatan. Pengendali P memiliki *overshoot* paling rendah, namun waktu naik dan waktu penetapannya relatif lambat. Di sisi lain, kontroler PD memberikan waktu penetapan yang cepat dan *overshoot* yang cukup rendah, meskipun waktu naiknya cukup tinggi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang dilakukan, sistem navigasi robot dengan kontrol PID yang dituning menggunakan metode Ziegler-Nichols tahap kedua menunjukkan performa yang baik dalam menjaga kestabilan dan keakuratan pergerakan motor DC. Sensor ultrasonik HC-SR04 memberikan hasil yang akurat dengan rata-rata *error* sebesar 0,18 cm dan *error* maksimum sebesar 0,3 cm. Sementara itu, motor DC yang dikendalikan menggunakan kontrol PI menghasilkan rata-rata *error* sebesar 1,83 RPM dengan *error* maksimum sebesar 2,9 RPM. Secara lebih rinci, untuk aktuator motor DC kanan dan kiri, kontroler PID menunjukkan performa terbaik dengan *error steady state* masing-masing 1,83 RPM dan 2,01 RPM, *overshoot* sebesar 6,5% dan 6,8%, *rise time* 0,9 detik dan 1,0 detik, serta *settling time* 2,5 detik dan 2,6 detik. Sensor ultrasonik kanan paling responsif dengan kontroler P, menghasilkan *overshoot* 3,2%, *rise time* 0,7 detik, dan *settling time* 1,8 detik. Untuk sistem navigasi secara keseluruhan, kontroler PI menghasilkan kinerja terbaik dengan *error steady state* terhadap jalur ideal sebesar $\pm 2,4\%$, *overshoot* maksimum 7,1%, dan *settling time* rata-rata 2,9 detik. Robot mampu menyelesaikan lintasan uji dalam waktu 28,4 detik dan mencapai akurasi navigasi sebesar 97,6%. Dengan pemilihan kontroler yang tepat—PID untuk motor DC, P untuk sensor ultrasonik kanan, dan PI untuk sistem

navigasi—sistem secara keseluruhan menunjukkan performa yang stabil, responsif, dan akurat [11].

REFERENSI

- [1] A. B. Habibie Al Rasyid, A. T. Santoso, M. H. Barri, and R. Nugraha, "Implementation of Intelligent Wheelchair Control Based on Voice Commands and Medical Parameters," in *2021 International Conference on Data Science and Its Applications (ICoDSA)*, 2021, pp. 269–273. doi: 10.1109/ICoDSA53588.2021.9617465.
- [2] N. Hacene and B. Mendil, "Behavior-based Autonomous Navigation and Formation Control of Mobile Robots in Unknown Cluttered Dynamic Environments with Dynamic Target Tracking," *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 18, no. 5, pp. 766–786, 2021, doi: 10.1007/s11633-020-1264-x.
- [3] V. V. Patel, "Ziegler-Nichols Tuning Method," *Resonance*, vol. 25, no. 10, pp. 1385–1397, 2020, doi: 10.1007/s12045-020-1058-z.
- [4] A. J. Moshayedi, J. Li, and L. Liao, "Simulation study and PID Tune of Automated Guided Vehicles (AGV)," in *2021 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA)*, 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/CIVEMSA52099.2021.9493679.
- [5] M. Muarguaritescu, P.-N. Anuța, E. V. Canale, D. I. Stanciu, D. Dumitriu, and C. M. Brișan, "Control of an Autonomous Mobile Waste Collection Robot," in *Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics -- 2019*, G. I. Gheorghe, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 51–63.
- [6] C. Jabeur and H. Seddik, "Design of a PID optimized neural networks and PD fuzzy logic controllers for a two-wheeled mobile robot," *Asian J. Control*, vol. 23, 2020, doi: 10.1002/asjc.2356.
- [7] B. B. Acharya, S. Dhakal, A. Bhattarai, and N. Bhattarai, "Pid speed control of dc motor using meta-heuristic algorithms," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 12, no. 2, pp. 822–831, 2021, doi: 10.11591/ijpeds.v12.i2.pp822-831.
- [8] V. Vartika, S. Singh, S. Das, S. K. Mishra, and S. S. Sahu, "A Review on Intelligent PID Controllers in Autonomous Vehicle," in *Advances in Smart Grid Automation and Industry 4.0*, M. J. B. Reddy, D. K. Mohanta, D. Kumar, and D. Ghosh, Eds., Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 391–399.
- [9] F. Fahmizal, M. Arrofiq, and A. Mayub, "Identifikasi Pemodelan Matematis Robot Wall Following," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 7, no. 1, 2018, doi: 10.22146/jnteti.v7i1.404.
- [10] M. Iqbal and W. Aji, "Wall Following Control System with PID Control and Ultrasonic Sensor for KRAI 2018 Robot," *Int. J. Robot. Control Syst.*, vol. 1, pp. 1–14, 2021, doi: 10.31763/ijres.v1i1.206.
- [11] M. Xia, H. Shao, X. Ma, and C. W. de Silva, "A Stacked GRU-RNN-Based Approach for Predicting Renewable Energy and Electricity Load for Smart Grid Operation," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 17, no. 10, pp. 7050–7059, 2021, doi: 10.1109/TII.2021.3056867.