

Implementasi Sensor IMU MPU6500 dan Panel Surya untuk Kestabilan Navigasi dan Kemandirian Energi Robot Line Follower

¹Khodijah Selobright, ²Nur Insani Kamilya, ³Muhamad Reza Pahlawan, ⁴Nur Alif Mardiyah, ⁵Basri Noor Cahyadi,

^{1,2,3,4,5} Teknik Elektro, Universitas Muhamadiyah Malang, Malang

¹selobrightkhodijah@gmail.com, ²nurinsanikamilya22@gmail.com, ³rezapahlawan022@gmail.com, ⁴nuralif@umm.ac.id,

⁵basrinoorc@umm.ac.id

Abstract - Conventional line follower robots often experience navigation instability due to motor torque imbalance and surface friction, while dependence on external charging restricts operational flexibility. To address these challenges, this study implemented a hybrid navigation system integrating an MPU6500 Inertial Measurement Unit (IMU) with a solar-powered battery charging system. The novelty of this work lies in the integration of real-time yaw-angle feedback with line-sensor-based navigation for anticipatory motion correction, combined with a photovoltaic subsystem to enhance energy autonomy. The system was developed through hardware design, controller implementation using a PID algorithm, and experimental validation. Results demonstrated that the proposed system improved motion synchronization and navigation accuracy. The average speed difference between motors was reduced by 65.86%, and navigation error on a 3-meter straight track decreased from 54.87 % to 16.40 %, representing a 70.12 % reduction. For 90° turning maneuvers, the average turning error was reduced to 0.63° with no significant overshoot or undershoot. The solar-powered charging system generated a peak output voltage of 7.3 V and a charging current of up to 0.221 A under optimal solar irradiance. These findings indicate that the integration of MPU6500-based orientation feedback and renewable energy technology effectively enhances both navigation stability and energy independence for educational robots.

Keywords — Educational robot, IMU MPU6500, Hybrid Navigation, Controller, Solar Power

Abstrak—Robot line follower konvensional sering mengalami ketidakstabilan navigasi akibat ketidakseimbangan torsi motor dan pengaruh gesekan permukaan, sementara ketergantungan pada pengisian daya eksternal membatasi fleksibilitas operasional. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengimplementasikan sistem navigasi hibrida yang mengintegrasikan Inertial Measurement Unit (IMU) MPU6500 dengan sistem pengisian baterai berbasis tenaga surya. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi umpan balik sudut yaw secara real-time dengan navigasi berbasis sensor garis untuk koreksi gerakan secara antisipatif, yang dikombinasikan dengan subsistem fotovoltaik guna meningkatkan kemandirian energi. Sistem dikembangkan melalui perancangan perangkat keras, implementasi pengendali menggunakan algoritma PID, serta validasi eksperimental. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan mampu meningkatkan sinkronisasi gerakan dan akurasi navigasi. Rata-rata selisih kecepatan antar motor berkurang sebesar 65,86%, error navigasi pada lintasan lurus sepanjang 3 m menurun dari 54,87% menjadi 16,40%, atau mengalami penurunan sebesar 70,12% menjadi 16,40%, dan rata-rata error manuver belok 90° berkurang menjadi 0,63° tanpa overshoot maupun undershoot yang signifikan. Sistem pengisian daya berbasis tenaga surya menghasilkan tegangan keluaran sebesar 7,3 V dan arus pengisian hingga 0,221 A pada kondisi intensitas radiasi matahari optimal. Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi umpan balik orientasi berbasis MPU6500 dan teknologi energi terbarukan efektif dalam meningkatkan stabilitas navigasi serta kemandirian energi pada robot pendidikan.

Kata Kunci—Robot Line Follower; MPU6500; PID; Navigasi Hibrida; Kontroler; Tenaga Surya.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi otomasi dan sistem cerdas mendorong pemanfaatan robot dalam berbagai bidang, termasuk pendidikan [1]. Salah satu implementasinya adalah robot line follower yang banyak digunakan sebagai media pembelajaran sistem kendali dan navigasi robot bergerak karena memiliki struktur mekanik sederhana dan mudah dikembangkan [2]. Meskipun demikian, robot line follower masih menghadapi permasalahan pada kestabilan navigasi [3]. Khususnya dalam menjaga pergerakan lurus dan akurasi saat melakukan manuver belok 90°.

Permasalahan tersebut umumnya disebabkan oleh ketidakseimbangan karakteristik motor penggerak, variasi beban mekanik, serta perubahan kondisi lintasan yang menyebabkan deviasi arah gerak robot [4][5]. Selain itu,

keterbatasan sistem catu daya juga menjadi kendala pada robot edukasi bergerak karena sebagian besar masih bergantung pada pengisian daya konvensional menggunakan adaptor eksternal sehingga mobilitas robot menjadi terbatas[4].

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan untuk meningkatkan performa navigasi robot line follower. Penggunaan pengendali Proportional-Integral-Derivative (PID) terbukti mampu meningkatkan kestabilan navigasi dan mengurangi error gerak robot pada lintasan kompleks maupun sudut ekstrem[6]. Penelitian menunjukkan bahwa integrasi sensor IMU dengan sistem navigasi robot dapat meningkatkan akurasi estimasi posisi dan orientasi melalui pemrosesan data gerak secara real-time[7].

Temuan tersebut menunjukkan potensi pemanfaatan sensor IMU sebagai sumber umpan balik tambahan untuk meningkatkan performa navigasi robot bergerak. Berbagai pendekatan berbasis data inersial telah terbukti mampu meningkatkan akurasi estimasi orientasi robot bergerak. Integrasi data IMU dengan algoritma estimasi dan koreksi kesalahan memungkinkan pengurangan noise sensor serta peningkatan akurasi navigasi secara keseluruhan[8]. Di sisi lain, pemanfaatan energi surya telah banyak diterapkan pada perangkat Internet of Things (IoT) dan sistem elektronik berbasis baterai lithium-ion untuk meningkatkan kemandirian energi[9]. Selain itu, penggunaan Solar Charge Controller (SCC) memungkinkan proses pengisian daya berlangsung lebih efisien dan stabil dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi yang dihasilkan panel surya[10][11].

Meskipun berbagai penelitian telah memanfaatkan sensor IMU dan algoritma sensor fusion untuk meningkatkan akurasi estimasi orientasi[12] dan penelitian terkait robot line follower berbasis sensor inersial juga telah dilaporkan, di antaranya penerapan accelerometer dan gyroscope yang dipadukan dengan metode fuzzy logic dan Kalman filter untuk menjaga kestabilan robot selama mengikuti lintasan[13]. Namun, penerapan data orientasi IMU sebagai mekanisme koreksi dini terhadap deviasi arah baik pada lintasan lurus maupun belokan tajam 90° pada robot line follower masih jarang dilaporkan dalam penelitian sebelumnya. Selain itu, integrasi sistem navigasi berbasis IMU dengan sistem pengisian daya mandiri berbasis energi surya pada robot edukasi bergerak juga masih relatif terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem navigasi hibrida yang mengintegrasikan sensor garis dan IMU MPU6500 untuk meningkatkan stabilitas navigasi pada robotline follower. Selain itu, sistem pengisian daya bertenaga surya diimplementasikan untuk meningkatkan kemandirian energi. Kinerja sistem yang diusulkan dievaluasi melalui sinkronisasi motor, akurasi navigasi, dan pengujian pengisian baterai.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi data orientasi real-time dari sensor MPU6500 sebagai mekanisme koreksi dini terhadap deviasi arah pada robot line follower, yang dikombinasikan dengan sistem pengisian daya mandiri berbasis energi surya untuk meningkatkan kemandirian energi robot edukasi

II. METODE PENELITIAN

A. Perancangan Sistem Robot

Robot line follower berbasis mikrokontroler Arduino Nano menggunakan motor DC gearbox sebagai penggerak, enam sensor garis sebagai pendeteksi lintasan, dan sensor IMU MPU6500 sebagai pembaca orientasi sudut yaw. Data orientasi IMU digunakan sebagai sinyal umpan balik tambahan untuk mengoreksi perbedaan kecepatan motor kanan dan kiri, sehingga robot mampu bergerak lebih stabil[14].

Empat roda penggerak digunakan untuk meningkatkan kestabilan mekanik, dengan driver motor L298N mengatur arah dan kecepatan putaran motor berdasarkan hasil pengolahan data sensor oleh mikrokontroler. Namun, konfigurasi ini menuntut presisi manuver, terutama di belok tajam 90° , yang lebih tinggi dibandingkan robot beroda tiga[15], mengingat adanya potensi ketidakseimbangan torsi dan friksi pada keempat titik tumpu motor, sehingga data orientasi dari sensor IMU MPU6500 menjadi elemen krusial dalam mengompensasi deviasi gerak melalui mekanisme koreksi secara dini[16].

B. Metode Kendali Navigasi

Metode kendali yang digunakan adalah pengendali PID berbasis hybrid error dari sensor garis dan sudut yaw sensor MPU6500. Nilai error diperoleh dari penyimpangan posisi garis serta perubahan orientasi robot terhadap arah gerak yang diinginkan[17].

Data sudut yaw digunakan untuk mengurangi osilasi gerak akibat ketidakseimbangan karakteristik motor dan perubahan kondisi lintasan[18]. Sistem kendali kemudian menghasilkan nilai koreksi Pulse Width Modulation (PWM) pada motor kanan dan kiri secara real-time untuk mempertahankan kestabilan arah gerak robot pada lintasan lurus maupun ketepatan belok tajam 90° .

Nilai parameter pengendali PID yang digunakan diperoleh melalui tuning eksperimental, yaitu $K_p = 5$, $K_i = 0$, dan $K_d = 3$. Komponen integral (K_i) diatur nol karena akumulasi error pada lintasan pendek tidak memberikan perbaikan signifikan dan berisiko menimbulkan windup, sehingga kendali yang digunakan secara efektif bersifat Proportional-Derivative (PD). Data sudut kecepatan rotasi sumbu-Z (gyroZ) dari sensor MPU6500 tidak diproses melalui algoritma sensor fusion (seperti complementary atau Kalman filter), melainkan digabungkan secara langsung dengan output PID melalui penjumlahan berbobot menggunakan gain $K_g = 0,5$. Nilai koreksi arah gerak (u) dirumuskan sebagai:

$$u(t) = (K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \sum e(t) + K_d \cdot (e(t) - e(t-1))) + K_g \cdot \omega_z \quad (1)$$

dengan $e(t)$ merupakan error posisi garis yang diperoleh dari rata-rata terbobot lima sensor garis, dan ω_z adalah kecepatan sudut rotasi sumbu-Z dari IMU. Nilai $u(t)$ selanjutnya digunakan untuk menentukan sinyal PWM motor kiri dan kanan melalui persamaan

$$PWM_{kiri} = v_{base} + u(t) \text{ dan } PWM_{kanan} = v_{base} - u(t) \quad (2)$$

dengan kecepatan dasar (v_{base}) sebesar 65.

C. Sistem Pengisian Daya Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Sistem pengisian daya menggunakan dua panel surya mini 12 V 1,5 Watt-peak (Wp) yang dirangkai paralel untuk meningkatkan arus keluaran[19]. Tegangan keluaran panel distabilkan menggunakan modul LM2596 sebelum digunakan untuk mengisi baterai Lithium-Ion 2S 7,4 V berkapasitas 6800 mAh.

D. Metode Pengujian

Uji stabilitas kecepatan motor dilakukan dengan membiarkan robot bergerak di sepanjang lintasan lurus sepanjang 3 m selama enam kali percobaan. Parameter yang diamati adalah perbedaan kecepatan rata-rata antara motor kiri dan kanan, yang digunakan sebagai indikator sinkronisasi[20]. Selain itu nilai error dari sensor line follower juga dianalisis untuk melihat apakah robot benar-benar berjalan lurus. Akurasi navigasi robot dievaluasi menggunakan persentase kesalahan, yang dihitung dari nilai Root Mean Square (RMS) (1) dari semua sampel kesalahan posisi garis dan dinormalisasi oleh nilai kesalahan maksimum yang diperoleh pada setiap percobaan[21].

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (3)$$

Pengujian manuver belok dilakukan pada lintasan dengan tikungan 90° dalam kondisi lingkungan yang terkontrol. Robot diuji dengan sudut target belok sebesar 90° , dan sudut hasil belok diperoleh dari selisih nilai yaw sensor IMU sebelum dan sesudah melewati tikungan.

Sistem pengisian baterai diuji di bawah paparan sinar matahari langsung dengan mengukur tegangan dan arus keluaran panel surya menggunakan multimeter digital. Uji ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan dan stabilitas sistem pembangkit listrik fotovoltaik dalam mengisi daya baterai robot.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Integrasi Sensor IMU

Data perbandingan selisih kecepatan antara motor kanan dan kiri untuk sistem PID murni dan sistem integrasi PID+IMU disajikan dalam tabel dan gambar berikut:

No	PID Kiri	PID Kanan	Selisi h PID	PID+IM U Kiri	PID+IM U Kanan	Selisi h PID+IMU	Reduksi Selisi h
1	60,39	59,61	0,78	59,83	60,17	0,33	57,69%
2	62,89	57,11	5,78	55,19	54,77	0,42	92,73%
3	58,37	61,63	3,27	56,70	56,28	0,42	87,16%
4	61,14	58,86	2,28	60,15	58,28	1,87	17,98%
5	58,69	61,31	2,62	58,76	58,43	0,33	87,40%
6	60,61	59,39	1,21	58,94	58,36	0,59	51,24%
Rat a- rat a	60,35	59,65	2,66	58,26	57,72	0,66	65,86%

Tabel .1 Rata-rata Kecepatan Motor Kanan dan Kiri pada Lintasan Lurus

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem PID+IMU secara konsisten mampu mereduksi selisih kecepatan antara motor kanan dan kiri dibandingkan sistem PID konvensional. Rata-rata selisih kecepatan pada sistem PID mencapai 2,66 RPM, sedangkan pada sistem PID+IMU turun menjadi 0,66 RPM, dengan tingkat reduksi rata-rata sebesar 65,86%.

Reduksi terbesar terjadi pada percobaan kedua, di mana selisih kecepatan berkurang dari 5,78 menjadi 0,42 (92,73%). Sebaliknya, Reduksi terkecil terjadi pada percobaan keempat dengan penurunan hanya sebesar 17,98%. Kondisi ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh gangguan mekanis sesaat, seperti selip roda atau perubahan gesekan permukaan, yang terjadi dalam interval waktu yang terlalu singkat untuk dikoreksi sepenuhnya oleh sistem IMU.

Peningkatan kestabilan kecepatan motor disebabkan karena sensor IMU berperan sebagai sistem deteksi pre-emptive terhadap deviasi arah. Berbeda dengan PID murni yang hanya mengandalkan error posisi dari sensor garis, integrasi nilai kecepatan sudut rotasi pada sumbu-Z (gyroZ) memungkinkan mikrokontroler mendeteksi inersia rotasi sekecil apa pun akibat ketidakseimbangan torsi motor atau friksi permukaan lintasan. Dengan memberikan koreksi langsung pada sinyal PWM motor segera setelah rotasi terdeteksi tanpa menunggu robot bergeser dari garis sistem mampu menjaga sinkronisasi putaran kedua roda secara lebih responsif. Hal ini meminimalkan akumulasi selisih kecepatan rata-rata hingga 65,86%, sehingga gerak robot menjadi lebih koheren dan stabil

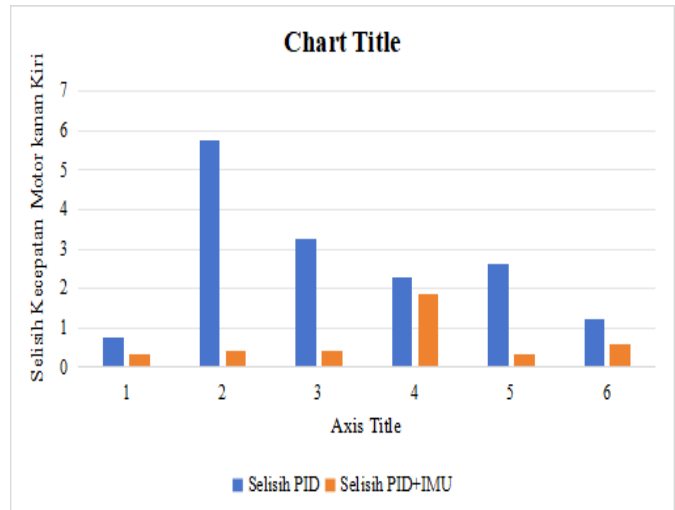
B. Persentase Error pada Lintasan Lurus

Visualisasi tingkat akurasi navigasi robot yang direpresentasikan melalui persentase error pada lintasan lurus sepanjang 3 meter dapat diamati pada tabel dan gambar berikut:

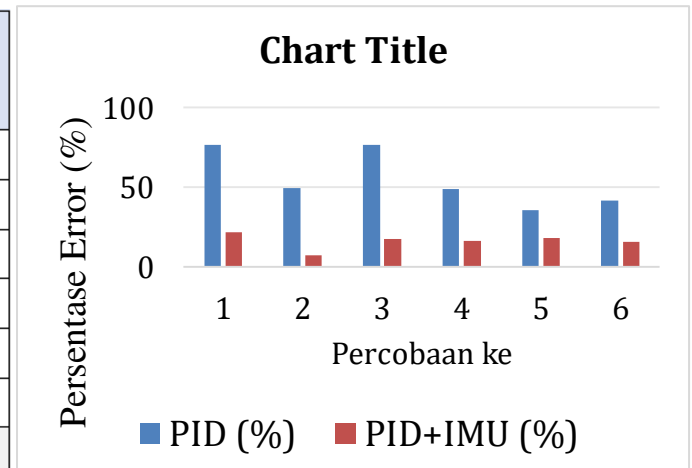
No	PID (%)	Max PID	PID+IM U (%)	Max PID+IM U	Selisi h Error (%)	Ket
1	76,65	1,25	22,19	2,5	54,46	↓
2	49,76	1,67	7,72	10	42,04	↓
3	76,75	1,25	17,82	5	58,93	↓
4	48,79	1,67	16,73	10	32,06	↓
5	35,50	1,67	18,13	5	17,37	↓
6	41,79	1,67	15,78	5	26,01	↓
Rata-	54,87	1,53	16,40	6,25	38,47	-

*Max PID/Max PID+IMU dihitung berdasarkan rasio rata-rata error terhadap nilai error maksimum yang tercatat selama pengujian,

Tabel 2. Prosentase Error PID dan PID+IMU pada Lintasan Lurus



Gambar 1. Grafik Kestabilan Motor



Gambar 2. Grafik Nilai Persentase Error Sensor Line Follower

Sistem PID konvensional menghasilkan persentase error rata-rata sebesar 54,87%, yang menunjukkan bahwa nilai error selama pergerakan secara rata-rata berada di atas separuh nilai error maksimum. Kondisi ini mengindikasikan ketidakstabilan arah gerak yang cukup signifikan. Sementara itu, sistem PID+IMU menghasilkan persentase error rata-rata sebesar 16,40%, dengan selisih penurunan sebesar 38,47 poin persentase atau setara dengan 70,12% terhadap nilai PID murni.

Penurunan persentase error pada sistem PID+IMU dipicu oleh mekanisme koreksi dini melalui pemantauan sudut yaw secara real-time. Pada sistem PID murni, koreksi bersifat reaktif karena baru terjadi setelah sensor garis mendeteksi pergeseran posisi, yang sering mengakibatkan gerakan robot beresilasi di sepanjang garis. Dengan integrasi data gyroZ dari IMU, sistem dapat mendeteksi kecenderungan penyimpangan arah segera setelah terjadi ketidakseimbangan torsi motor, sehingga tindakan korektif dilakukan sebelum robot benar-benar bergeser dari titik tengah lintasan. Kemampuan antisipatif ini mereduksi amplitudo osilasi, sehingga robot mempertahankan trajektori yang lebih lurus dan stabil serta menekan akumulasi nilai error secara keseluruhan.

C. Hasil Pengujian Manuver belok 90°

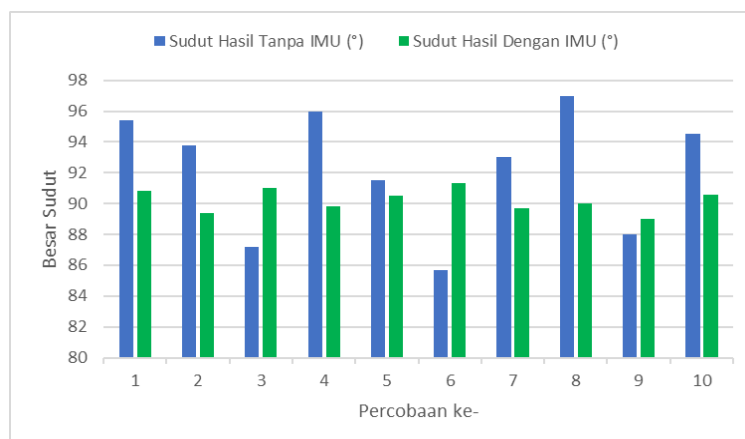
Perbedaan tingkat akurasi pada manuver belok 90°, ditampilkan pada tabel dan gambar berikut:

Percobaan	Sudut Target (°)	Sudut Hasil IMU (°)	Error (°)	Status Lintasan	Keterangan
1	90	95,4	5,4	<u>Berhasil</u>	Overshoot
2	90	93,8	3,8	<u>Berhasil</u>	Overshoot
3	90	87,2	2,8	<u>Berhasil</u>	Undershoot
4	90	96	6	<u>Gagal</u>	Keluar lintasan
5	90	91,5	1,5	<u>Berhasil</u>	-
6	90	85,7	4,3	<u>Berhasil</u>	Undershoot
7	90	93	3	<u>Berhasil</u>	-
8	90	97	7	<u>Gagal</u>	Keluar lintasan
9	90	88	2	<u>Berhasil</u>	-
10	90	94,5	4,5	<u>Berhasil</u>	Overshoot
Rata-rata Error = 4,03°					

Tabel 3. Hasil Pengujian Belok 90° Sebelum Menggunakan IMU

Percobaan	Sudut Target (°)	Sudut Hasil IMU (°)	Error (°)	Status Lintasan	Keterangan
1	90	90,8	0,8	<u>Berhasil</u>	-
2	90	89,4	0,6	<u>Berhasil</u>	-
3	90	91	1	<u>Berhasil</u>	-
4	90	89,8	0,2	<u>Berhasil</u>	-
5	90	90,5	0,5	<u>Berhasil</u>	-
6	90	91,3	1,3	<u>Berhasil</u>	-
7	90	89,7	0,3	<u>Berhasil</u>	-
8	90	90	0	<u>Berhasil</u>	-
9	90	89	1	<u>Berhasil</u>	-
10	90	90,6	0,6	<u>Berhasil</u>	-
Rata-rata Error = 0,63°					

Table 4. Hasil Pengujian Belok 90° Setelah Menggunakan IMU



Gambar 3. Perbandingan Hasil Tanpa IMU dan Dengan IMU

Sebelum dilakukan optimasi sensor IMU, hasil pengujian menunjukkan bahwa manuver belok robot masih menghasilkan error yang cukup besar, yaitu pada rentang 1,5°–7° dengan rata-rata error sebesar 4,03°. Selain itu, terdapat dua percobaan yang gagal akibat overshoot sehingga robot keluar dari lintasan.

Setelah optimasi pengolahan data IMU diterapkan, performa robot mengalami peningkatan yang signifikan. Error manuver berhasil ditekan menjadi 0° – $1,3^{\circ}$ dengan rata-rata $0,63^{\circ}$, dan seluruh percobaan dapat diselesaikan tanpa overshoot maupun undershoot yang menyebabkan robot keluar dari lintasan. Hasil ini menunjukkan bahwa optimasi IMU efektif meningkatkan akurasi dan stabilitas manuver belok robot.

D. Hasil Pengujian Sistem Pengisian Daya Surya

Karakteristik performa pengisian daya baterai oleh sistem panel surya, yang mencakup fluktuasi tegangan dan arus terhadap waktu, ditampilkan pada Tabel dibawah ini.

No	Jam	Tegangan Pengisian (V)	Arus Rata-rata Pengisian (A)	Persentase calculated SOC (%)	Kapasitas Terisi Kumulatif (mAh)
1.	10.00	6,9	0,183	0% (start)	0 mAh
2.	11.00	7,1	0,210	2,69%	183 mAh
3.	12.00	7,3	0,221	5,78%	393 mAh
4.	13.00	7,2	0,202	9,03%	614 mAh
5.	14.00	7,1	0,174	12,00%	816 mAh

Tabel 6. Hasil Pengujian Data Pengisian Baterai Menggunakan PLTS

No	Jam	Tegangan Pengisian (V)	Arus Rata-rata Pengisian (A)	Persentase calculated SOC (%)	Kapasitas Terisi Kumulatif (mAh)
1.	10.00	7,4	0,500	0% (start)	0 mAh
2.	11.00	7,4	0,500	7,35%	500 mAh
3.	12.00	7,4	0,500	14,70%	1000 mAh
4.	13.00	7,4	0,500	22,05%	1500 mAh
5.	14.00	7,4	0,500	29,40%	2000 mAh

Table 7. Hasil Pengujian Data Pengisian Baterai Menggunakan Adaptor

Berdasarkan hasil pengujian, panel surya mampu menghasilkan tegangan 6,9–7,3 V dengan arus pengisian 0,174–0,221 A. Nilai pengisian tertinggi terjadi pada pukul 12.00 saat intensitas cahaya matahari maksimum. Sistem pengisian daya surya dapat bekerja dengan baik dan stabil dalam mengisi baterai robot edukasi

Berdasarkan grafik, tegangan dan arus charging mengalami peningkatan dari pukul 10.00 WIB dan mencapai kondisi puncak (peak) pada rentang waktu 11.30–12.30 WIB. Pada kondisi tersebut, panel surya menghasilkan tegangan dan arus pengisian tertinggi karena intensitas cahaya matahari berada pada kondisi optimal. Setelah melewati waktu tersebut, nilai tegangan dan arus mulai mengalami penurunan secara bertahap.

Meskipun arus pengisian yang dihasilkan relatif kecil, sistem tetap dapat digunakan sebagai implementasi konsep energi terbarukan dan kemandirian energi pada robot edukasi.:

IV. KESIMPULAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi sensor IMU MPU6500 meningkatkan kestabilan navigasi melalui koreksi orientasi secara real-time. Penggunaan data gyroZ mampu mereduksi selisih kecepatan rata-rata motor sebesar 65.86% — dari 2.66 menjadi 0.66. Persentase error pada lintasan lurus juga turun hingga 70.12%, dari 54.87% menjadi 16.40%. Berbeda dengan sistem PID konvensional yang bersifat reaktif, sensor IMU mampu mendeteksi deviasi sudut sebelum terjadi pergeseran posisi, sehingga amplitudo osilasi gerak dapat ditekan lebih efektif.

Sebagai fitur pendukung, sistem panel surya berhasil diimplementasikan untuk pengisian daya baterai secara mandiri, dengan tegangan puncak 7.3 volt dan arus 0.221 ampere pada kondisi cahaya optimal. Meski arus pengisian relatif kecil, sistem ini membuktikan bahwa konsep kemandirian energi dapat diterapkan pada robot edukasi. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan penggunaan panel surya berkapasitas lebih besar dan penerapan algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT) guna meningkatkan efisiensi daya keluaran)

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Kaur and Sukhpreet Singh, "Robots in education," in *Deep Science Publishing*, Deep Science Publishing, 2025, pp. 81–95. doi: 10.70593/978-81-983916-1-2_4.

-
- [2] K. Hidayat, M. C. Hasani, N. A. Mardiyah, and M. Lestandy, "PENGEMBANGAN ROBOT LINE FOLLOWER UNTUK PEMBELAJARAN DI SD MUHAMMADIYAH 08 DAU MALANG," *Community Development Journal : Jurnal Pengabdian Masyarakat*, vol. 6, no. 4, pp. 5544–5549, Sep. 2025, doi: 10.31004/cdj.v6i4.49288.
 - [3] T. Xia, "A Bidirectional 8-Neighborhood Border Tracking and Kalman-Based Centerline Reconstruction Method for Line-Following Robots," *Applied and Computational Engineering*, vol. 167, no. 1, pp. 122–129, Jul. 2025, doi: 10.54254/2755-2721/2025.GL25448.
 - [4] L.-H. Juang and J.-S. Zhang, "Robust visual line-following navigation system for humanoid robots," *Artif Intell Rev*, vol. 53, no. 1, pp. 653–670, Jan. 2020, doi: 10.1007/s10462-018-9672-9.
 - [5] T. D. Tolossa *et al.*, "Trajectory tracking control of a mobile robot using fuzzy logic controller with optimal parameters," *Robotica*, vol. 42, no. 8, pp. 2801–2824, Aug. 2024, doi: 10.1017/S0263574724001140.
 - [6] Z. Aung, N. N. War, S. V. Shidlovsky, and P. L. T. Tin, "Robot Trajectory Tracking with Pid Control," in *2025 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, IEEE, Nov. 2025, pp. 795–798. doi: 10.1109/SUMMA68668.2025.11302202.
 - [7] Y. Liu, C. Zhao, and M. Ren, "An Enhanced Hybrid Visual-Inertial Odometry System for Indoor Mobile Robot," *Sensors*, vol. 22, no. 8, p. 2930, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22082930.
 - [8] X. Deng *et al.*, "Data-Driven Based Cascading Orientation and Translation Estimation for Inertial Navigation," in *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, Oct. 2023, pp. 3381–3388. doi: 10.1109/IROS55552.2023.10341493.
 - [9] V. Pecunia, L. G. Occhipinti, and R. L. Z. Hoyer, "Emerging Indoor Photovoltaic Technologies for Sustainable Internet of Things," *Adv Energy Mater*, vol. 11, no. 29, Aug. 2021, doi: 10.1002/aenm.202100698.
 - [10] N. K. Raghavendra and K. Padmavathi, "Solar Charge Controller for Lithium-Ion Battery," in *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, IEEE, Dec. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/PEDES.2018.8707743.
 - [11] T. Sutikno, T. Wahono, and M. H. Jopri, "Monitoring the Charging of a Lithium-Ion Battery from a Photovoltaic Source Using a PZEM-017 Sensor via the ESP32-Based Internet of Things," in *2025 12th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, IEEE, Sep. 2025, pp. 325–330. doi: 10.1109/EECSI67060.2025.11290698.
 - [12] H. T. Chang and J. Y. Chang, "Sensor glove based on novel inertial sensor fusion control algorithm for 3-D real-time hand gestures measurements," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 1, pp. 658–666, Jan. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2912765.
 - [13] A. Sanjaya, H. Mawengkang, S. Efendi, and M. Zarlis, "Stability Of Line Follower Robots With Fuzzy Logic and Kalman Filter Methods," *J Phys Conf Ser*, vol. 1361, no. 1, p. 012016, Nov. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1361/1/012016.
 - [14] S. B. Marwanto and R. D. Puriyanto, "IMU Sensor Based Omnidirectional Robot Localization and Rotary Encoder," *Control Systems and Optimization Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 103–110, Aug. 2023, doi: 10.59247/csol.v1i2.39.
 - [15] D. A. P. Wardhana, M. Septyan, and G. B. Nurul Irawan, "PENGUNAAN OMNI DIRECTIONAL WHEELS 4-AXIS DALAM PERGERAKAN ROBOT MAZE-SOLVING," *Mechonversio: Mechanical Engineering Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 50–54, Feb. 2025, doi: 10.51804/mmej.v7i2.16851.
 - [16] F. Mangkusasmito, D. Y. Tadeus, H. Winarno, and E. Winarno, "Peningkatan Akurasi Sensor GY-521 MPU-6050 dengan Metode Koreksi Faktor Drift," *Ultima Computing : Jurnal Sistem Komputer*, vol. 12, no. 2, pp. 91–95, Nov. 2020, doi: 10.31937/sk.v12i2.1791.
 - [17] A. al Farouq and S. Prastiwi Renanda Putri, "Desain Mobile Robot dengan Differential Steering untuk Penyemprot Nutrisi Tanaman Melon di Greenhouse," *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 22, no. 2, pp. 100–105, Oct. 2023, doi: 10.23917/emitor.v22i2.21922.
 - [18] D. Adi Prayoga, T. Winarno, and I. Siradjuddin, "Sistem Pengaturan Orientasi Arah Hadap Robot Humanoid Menggunakan Inertial Measuring Unit dan Time of Flight," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 12, no. 1, pp. 1–10, May 2025, doi: 10.33795/elkolind.v12i1.3292.
 - [19] D. S. Wicaksono and A. Musafa, "Design and Implementation of Dual Axis Solar Tracker PV to Increase Cleaning Robot Operating Time," *J Phys Conf Ser*, vol. 1376, no. 1, p. 012022, Nov. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1376/1/012022.

- [20] P.-C. Shih, C. J. Steele, V. Nikulin, A. Villringer, and B. Sehm, "Kinematic profiles suggest differential control processes involved in bilateral in-phase and anti-phase movements," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, p. 3273, Mar. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-40295-1.
- [21] A. N. Serov, A. A. Shatokhin, and N. A. Serov, "Application of the Signal Samples Approximation for Accurate RMS Measurement," in *2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*, IEEE, Sep. 2021, pp. 147–153. doi: 10.23919/MIPRO52101.2021.9597075.