

Sistem Kendali Pergerakan Pada Prototipe Kereta Lori Inspeksi Berbasis Sensor IMU Dan PLC

1st Falah Alghiffari Rizqi
Telkom University
S1 Teknik Elektro
Bandung, Indonesia
falahalghiffari@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Ahmad Sugiana
Telkom University
S1 Teknik Elektro
Bandung, Indonesia
sugianaa@telkomuniverisyt.ac.id

3rd Kharisma Bani Adam
Telkom University
S1 Teknik Elektro
Bandung, Indonesia
kharismaadam@telkomuniversity.ac.id

3rd Heru Syah Putra
Telkom University
S1 Teknik Elektro
Bandung, Indonesia
herusyahputra@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Penelitian ini merancang dan menguji prototipe kereta lori inspeksi skala 1:12 dengan kendali kecepatan berbasis PLC menggunakan dua pendekatan, yaitu kontrol berbasis jarak melalui encoder/HSC dan kontrol adaptif berbasis kondisi lintasan menggunakan IMU MPU6050. Pengujian dilakukan pada lintasan rel skala 1:12 dengan total panjang 8140 mm yang dibagi menjadi tiga zona kecepatan. Metode kontrol encoder dilakukan dengan mengonversi pulsa menjadi jarak dan kecepatan secara periodik di PLC, kemudian setpoint kecepatan ditentukan berdasarkan zona lintasan. Nilai pembandingan (ground truth) kecepatan diperoleh menggunakan metode timestamp dari sensor IR yang ditempatkan pada batas tiap zona. Hasil pengujian menunjukkan error jarak pada batas zona sebesar 5,38% dengan kecenderungan over-estimate, sedangkan error rata-rata kecepatan PLC terhadap kecepatan referensi sebesar 6,07% (zona 1), 10,05% (zona 2), dan 5,70% (zona 3). Pada pendekatan berbasis IMU, status belok/lurus dibentuk melalui mekanisme threshold, filtering, hold time, dan minimum state time sehingga bersifat event-based dan mengalami keterlambatan dibanding batas zona berbasis jarak. Hal ini terlihat dari deteksi masuk belok (referensi 2235 mm) yang rata-rata terbaca 2956,8 mm (error 32,294%) dan deteksi keluar belok (referensi 5385 mm) yang rata-rata terbaca 6536,4 mm (error 21,382%). Secara keseluruhan, sistem berbasis jarak memberikan presisi zona lebih baik, sedangkan IMU lebih sesuai sebagai indikator kondisi lintasan untuk adaptasi kecepatan. Rentang kecepatan prototipe 0,52–0,75 m/s masih relevan sebagai acuan awal karena ekuivalen secara proporsional menjadi sekitar 22–32 km/jam pada ukuran sebenarnya.

Kata Kunci: PLC, encoder, HSC, IMU MPU6050, PWM, setpoint zona, Modbus RS485, ESP32, skala 1:12, kereta lori.

I. PENDAHULUAN

Perkeretaapian adalah kesatuan sistem yang terdiri dari prasarana, sarana dan sumber daya manusia. Ketiga unsur tersebut harus terpenuhi agar kereta api layak dioperasikan [1]. Dari salah satu unsur tersebut, sarana perkeretaapian menguraikan berbagai jenis kendaraan yang berjalan pada jalur kereta api, salah satunya adalah kereta inspeksi lori yang termasuk ke dalam kereta peralatan.

Kereta inspeksi atau bisa disebut lori merupakan kereta api yang berfungsi untuk menunjang kegiatan pemeriksaan jalan rel [2]. Kegiatan tersebut dilakukan oleh petugas penilik jalur (PPJ) yang memeriksa kelayakan konstruksi jalur rel dengan menyusuri sepanjang jalur tersebut [3]. Untuk menunjang kemudahan terhadap kegiatan petugas, dibutuhkan kereta lori yang dapat beroperasi secara otomatis tanpa operator yang menggerakkan kereta tersebut.

Pada pengembangan sebelumnya, terdapat beberapa jenis otomasi yang diterapkan pada kereta lori. Salah satunya adalah otomasi menggunakan motor DC yang dapat menggerakkan lori secara otomatis serta mampu bergerak dengan kecepatan 2,05 km/j hingga 2,99 km/j [3].

Dalam modifikasinya, pengembangan terhadap pergerakan kereta lori cukup memungkinkan untuk menunjang keamanan terhadap perjalanan kereta yang melewati berbagai kondisi rel seperti belokkan. Berdasarkan operasi kereta inspeksi, kereta memiliki batas kecepatan untuk menjaga keamanan operasi tersebut. Dalam uraiannya kecepatan kereta inspeksi dibagi menjadi dua berdasarkan kondisi lintasannya. Pada lintasan lurus, kecepatan dibatasi dalam 45 km/jam, sedangkan pada lintasan sulit kereta dibatasi dalam 30 km/jam [4]. Dengan aturan tersebut kereta dapat beroperasi secara otomatis dalam batas aman.

II. KAJIAN TEORI

Kajian teori bertujuan untuk memberikan dasar teoritis terhadap variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian. Teori-teori yang disajikan merupakan acuan untuk membangun prototipe hingga penggunaan komponen-komponen yang memiliki fungsinya tersendiri pada sistem.

A. Kereta Api Lori

lori merupakan kereta angkut yang digunakan untuk kegiatan pemeriksaan prasarana kereta api dengan membawa petugas dan material kerja. Lori dapat berupa kereta dengan atau tanpa penggerak sendiri yang dapat diangkat dari rel di jalan bebas oleh tenaga yang ada pada kendaraan tersebut dalam waktu tidak lebih dari 2 menit

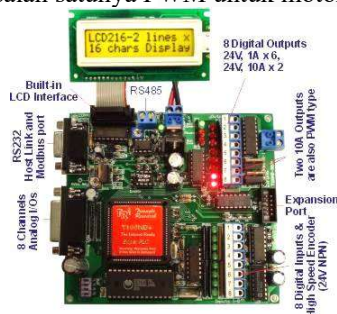
B. Pemodelan

Pemodelan digunakan sebagai penyederhanaan rancangan agar merepresentasikan sistem nyata dengan mempertimbangkan ketersediaan sumber daya seperti biaya, data, dan perangkat. Pada penelitian ini, skala prototipe ditentukan berdasarkan dimensi komponen utama, yaitu PLC T100MD888+, agar desain bodi dan lintasan tetap seimbang saat beroperasi. Ukuran prototipe dihitung dengan persamaan

$$\text{Ukuran Model Prototipe} = \frac{\text{Ukuran Realita Model}}{\text{Skala}} \quad (1)$$

C. PLC T100MD888+

PLC atau *Programmable Logic Control* merupakan komputer digital yang dirancang untuk mengontrol proses otomatisasi. PLC memroses sinyal input dengan logika program yang terdiri dari *ladder diagram*, *structured text*, dan *function block*. Dari program tersebut PLC mengeluarkan sinyal kendali, salah satunya PWM untuk motor.



GAMBAR 1
PLC T100MD888+

D. ESP32

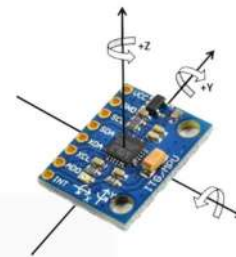
ESP32 adalah mikrokontroler yang umum dipakai karena memiliki kemampuan pemrosesan yang cukup dan komunikasi bawaan (Wi-Fi/Bluetooth) untuk akuisisi serta pengiriman data secara *real-time*.



GAMBAR 2
ESP32

E. Sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*)

Inertial measurement unit atau disebut IMU adalah peranti yang tersusun atas sensor akselerometer, giroskop dan terkadang dilengkapi dengan magnetometer. Unit ini dapat digunakan untuk menentukan pergerakan dan orientasi suatu benda di ruang tiga dimensi. Hal tersebut tidak secara langsung terukur oleh IMU, namun dengan melewati berbagai proses matematis



GAMBAR 3
SENSOR IMU MPU6050

F. Sensor Encoder

Encoder inkremental merupakan peranti yang mengubah rotasi mekanikal menjadi sinyal listrik digital berupa pulsa. Hal tersebut bertujuan memperoleh kontrol otomatis yang lebih presisi. Cara kerja dari sensor tersebut adalah dengan menghasilkan tinggi rendahnya pulsa sebagai jumlah rotasi yang terjadi. Dengan demikian sensor dapat mengindikasikan kecepatan atau posisi yang sedang terjadi.



GAMBAR 4
MOTOR JGA25-370 + ENCODER

G. Kontrol PID Digital

Kontrol PID digital merupakan bentuk lain dari controller PID namun program dibangun serta dijalankan menggunakan komputer

$$u(t) = K_p e(k) + K_i T \sum_0^k e(k) + \frac{1}{T} K_d (e_k - e_{k-1}) \quad (2)$$

Perhitungan akan dijalankan pada program untuk menghitung error sebelumnya dengan error yang diperbarui, serta disimpan di variabel error sekarang. Aksi tersebut dilakukan berulang sesuai dengan program yang dibangun. Pada kasus pengontrolan motor, keluaran nilai perhitungan PID disini berupa PWM.

H. Modbus RTU

Modbus RTU adalah protokol komunikasi serial industri berbasis request-response antara perangkat master dan slave, dengan pengiriman data dalam bentuk frame biner (ID, function code, data, dan CRC) yang umum digunakan pada media RS-485. Pada penelitian ini, Modbus RTU digunakan untuk komunikasi antara ESP32 dan PLC T100MD888+, dengan ESP32 sebagai master yang membaca/menulis register pada PLC sebagai slave.

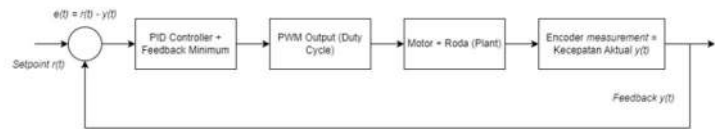
III.METODE

Pada penelitian ini digunakan prototipe kereta dengan skala 1:12. Pemilihan skala tersebut bertujuan untuk menghemat ruang sehingga sistem dapat diimplementasikan dan diuji pada area yang terbatas. Selain itu, penentuan skala 1:12 juga mempertimbangkan dimensi perangkat kendali yang digunakan, yaitu PLC T100MD888+. Skala ini dipilih sebagai ukuran minimum yang masih memungkinkan PLC dipasang dengan stabil untuk ditopang oleh rangka kereta. Adapun rancangan lintasan dan bogie pada prototipe mengacu pada rel dengan gauge 1067 mm.

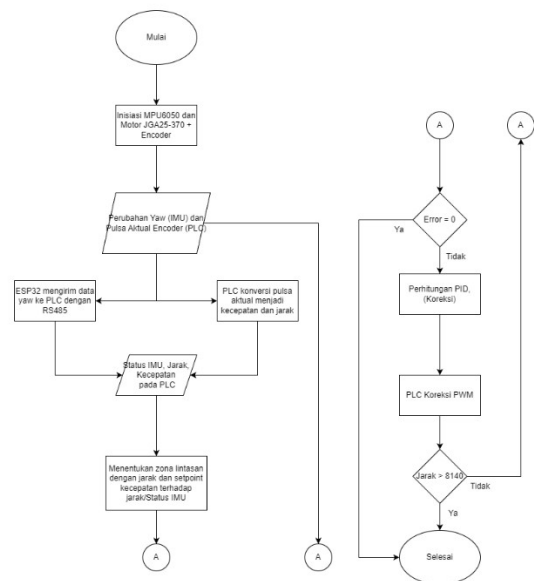
Sistem yang dibangun adalah melakukan pengendalian kecepatan kereta secara otomatis dengan memanfaatkan hasil konversi pulsa deteksi sensor encoder menjadi kecepatan dan jarak. Kedua nilai tersebut berfungsi sebagai parameter otomatisasi untuk mencapai nilai kecepatan 45 km/jam pada lintasan lurus dan 30 km/jam pada lintasan sulit. Sedangkan sensor IMU sebagai pendeteksi sudut arah kereta terhadap bidang datar, menentukan kondisi kereta apakah sedang dalam lintasan lurus atau tidak.

A. Flowchart

Flowchart menggambarkan alur logika dari sistem yang berjalan mulai dari inialisasi variabel proses, pembacaan sensor, logika fungsi dari variabel terkait dst.



GAMBAR 5
Blok Diagram Kontrol PID

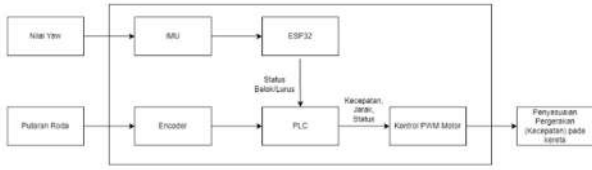


GAMBAR 6
FLOWCHART

Alur kerja sistem dimulai ketika perangkat diaktifkan. ESP32 terlebih dahulu melakukan inisiasi sensor MPU6050 dan kalibrasi otomatis untuk meminimalisir noise pada pembacaan, sementara PLC menginisiasi PWM, kontrol PID, counter pulse, serta komunikasi MODBUS. Setelah itu, MPU6050 membaca perubahan yaw dan PLC membaca pulsa motor dari encoder. Nilai yaw dikirim oleh ESP32 melalui RS485, sedangkan pulsa encoder dikonversi oleh PLC menjadi kecepatan dan jarak tempuh. Berdasarkan jarak (zona lintasan) dan kondisi yaw (belok/lurus), PLC menentukan setpoint kecepatan yang sesuai. Ketika error mendekati nol, kontrol berusaha menurunkan kecepatan hingga menuju kondisi berhenti, kemudian PLC menjalankan perhitungan PID untuk menghasilkan PWM yang mengendalikan motor. Sistem akan terus berjalan sampai jarak mencapai batas ujung zona atau lintasan, dan pada kondisi tersebut sistem dihentikan.

B. Blok Diagram

Blok diagram menunjukkan hubungan antar komponen perangkat keras yang digunakan dalam sistem ini, termasuk sensor, controller, dan alur komunikasi data.



GAMBAR 7

BLOK DIAGRAM SISTEM PWM OTOMATIS BERBASIS PID

Gambar diatas menunjukkan diagram blok sistem kendali pergerakan prototipe lori inspeksi secara keseluruhan. Sensor IMU digunakan untuk memperoleh nilai yaw yang kemudian diproses oleh ESP32 untuk menentukan status lintasan (lurus atau belok). Di sisi lain, encoder membaca putaran roda sebagai umpan balik kecepatan dan jarak yang diproses oleh PLC. Berdasarkan status lintasan dari ESP32 serta informasi kecepatan dan jarak dari encoder, PLC menentukan setpoint dan menghasilkan sinyal PWM untuk mengendalikan motor. Output PWM tersebut menghasilkan penyesuaian pergerakan (kecepatan) prototipe kereta agar sesuai dengan kondisi lintasan.

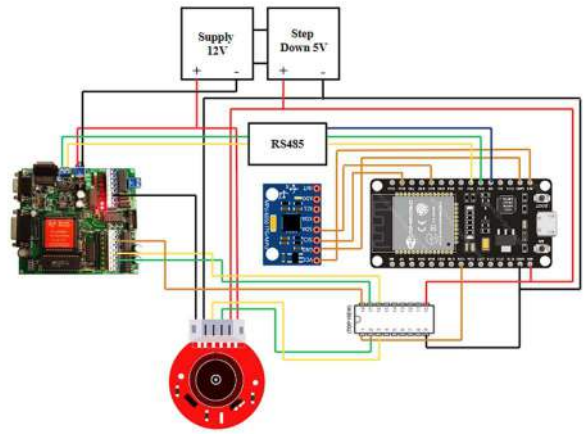
Sistem dibangun dengan kombinasi kontrol PID dengan feedback eksternal secara periodic selama 0.1 sekon. Kedua parameter input tersebut berfungsi sebagai penentu setpoint yang merupakan nilai kecepatan. Berikut diagram alur kontrol PID pada sistem.

Gambar tersebut menunjukkan sistem kontrol kecepatan *closed-loop* pada prototipe lori inspeksi. Setpoint kecepatan $r(t)$ dibandingkan dengan kecepatan aktual $y(t)$ yang dibaca encoder untuk menghasilkan error $e(t) = r(t) - y(t)$. Error ini diproses oleh pengendali PID untuk menghasilkan sinyal koreksi, kemudian dikombinasikan dengan batas minimum PWM agar motor tidak mudah *stall*. Keluaran kendali berupa duty cycle PWM menggerakkan motor-roda (plant), sedangkan encoder memberikan umpan balik kecepatan secara kontinu sehingga PWM dapat disesuaikan otomatis untuk menjaga kecepatan mendekati setpoint. Berdasarkan kecepatan referensi, setpoint silih berganti sejauh jarak tempuh tertentu yang dialami kereta. Dengan batas PWM minimum yang ditentukan membantu kontrol PID dalam pengoreksiannya yang dapat dilihat pada tabel dibawah.

Zona (Jarak Tempuh)	Kecepatan 1:12	Setpoint	PWM (Batas Duty Cycle)
1 (250 cm)	3.75	375	+70%
2 (565 cm)	2.50	250	+40%
3 (815 cm)	3.75	375	+70%

C. Desain Perangkat Keras

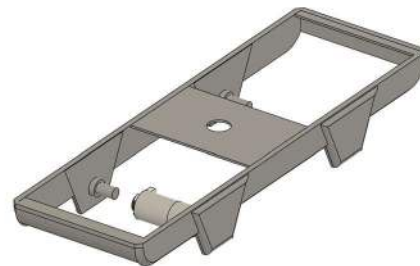
Dalam penelitian ini, penelitian dirancang untuk melakukan pemilihan komponen dan struktur penting kereta prototipe yang proporsional dengan kereta lori asli.



GAMBAR 8

WIRING KOMPONEN

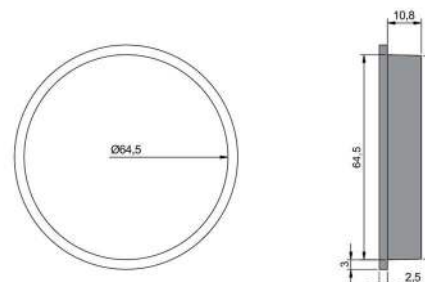
PLC dan motor JGA25-370 disuplai oleh sumber utama sebesar 12V, sedangkan ESP32 dan encoder diberikan tegangan hasil step down sebesar 5V. PLC memproses penuh menghubungkan channel A/B encoder ke input 5 dan 6 PLC via IC ULN2803 untuk memproporsionalkan tegangan kerja. sedangkan ESP32 dan yang memroses IMU dihubungkan ke PLC via RS485 dengan komunikasi modbus RTU.



GAMBAR 9

BODI KERETA

Gambar diatas merupakan visualisasi bogie kereta prototipe dalam skala 1:12 dengan Panjang kereta 40 cm dan lebar 12.8 cm. Bagian bearing kereta dirancang supaya masuk dengan sepur kereta yang digunakan. Bagian roda bogie tidak dilengkapi dengan axle untuk memberikan ruang motor DC sebagai penggerak.



GAMBAR 10

DIMENSI RODA

Gambar di atas menunjukkan spesifikasi dimensi roda prototipe pada skala 1:12. Berdasarkan rujukan beberapa referensi roda kereta asli, diperoleh parameter roda meliputi,

Keterangan	Ukuran 1:12
Lebar <i>Tread</i>	64.5 cm
Tebal <i>Tread</i>	10.8
Kemiringan <i>Tread</i>	1.43° (Slope 1:40)
Tinggi <i>Flange</i>	3 mm
Tebal <i>Flange</i>	2.5 cm

D. Pengolahan Data Encoder

Diketahui persamaan dalam mencari keliling suatu lingkaran adalah:

$$K = 2 \times \pi \quad (3)$$

Dengan persamaan tersebut diperoleh keliling roda (dihitung dari sisi lebar *tread*) sebesar 20.25 cm. Dengan *gear ratio* yang dimiliki Motor JGA25-370 sebesar 1:21.3 maka *pulse per revolution* yang diperoleh sebesar 234.3 PPR. Pada penelitian digunakan jarak cm/pulsa untuk memperoleh data kecepatan. Berikut persamaannya.

$$\text{Pulsa per cm} = \frac{\text{Keliling Roda}}{\text{PPR}} \quad (4)$$

Sehingga dengan persamaan tersebut dengan nilai yang sudah ada diperoleh cm/pulsa sebesar 0.0865 cm. Pada sistem, pembacaan pula diterapkan menggunakan fungsi HSC (*high speed counter*) yang disediakan software i-TRiLOGI serta dapat dirumuskan pada program dengan,

$$\Delta s = n \times 0.0865 \quad (5)$$

Variabel n mendefinisikan pembacaan hasil deteksi pulsa oleh fungsi HSCPV. Maka, dengan perumusan tersebut sistem dapat memperoleh nilai jarak sesuai dengan periode waktu sistem berjalan yang ditentukan. Maka dengan perolehan data jarak dapat ditentukan data kecepatan dengan persamaan,

$$\Delta v = \frac{\Delta s}{t} \quad (6)$$

Dengan waktu yang ditetapkan untuk perulangan berjalannya sistem, kecepatan aktual dapat diperoleh secara *realtime*.

E. Pengolahan Data IMU

Status kondisi lintasan lurus atau belok pada prototipe diperoleh dari sensor giroskop pada IMU (MPU6050) dengan parameter yang digunakan adalah hasil pembacaan giroskop pada sumbu Z (Gz), yang merepresentasikan gerakan berputar arah kanan-kiri (yaw) ketika kereta mengikuti lintasan. Keluaran giroskop MPU6050 mentah berupa satuan LSB yang akan dikonversi menjadi kecepatan sudut dengan persamaan sebagai berikut.

$$\omega z = \frac{\Delta n}{131} \quad (7)$$

Pada pengaturan default giroskop MPU6050 dengan rentang $\pm 250^\circ/\text{s}$, sensitivitas giroskop adalah 131 LSB/(deg/s). Dengan itu, setiap perubahan sebesar 131 LSB setara dengan 1 deg/s. Dengan persamaan tersebut kecepatan sudut dimasukkan ke dalam perumusan pada program dengan fungsi,

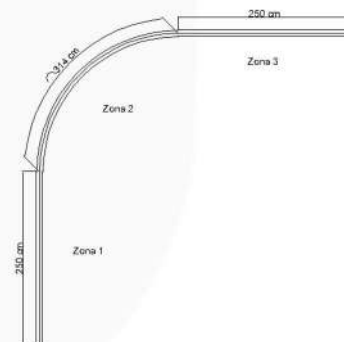
$$Pos_{yaw}[n] = Pos_{yaw}[n-1] + (\omega z \times \Delta t) \quad (8)$$

Dengan persamaan tersebut nilai perubahan kecepatan sudut yang terakumulasi terhadap perubahan waktu Δt .

F. Skenario Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menjalankan kereta prototipe pada lintasan penuh yang terdiri dari tiga zona. Sistem diprogram bekerja secara periodik setiap 0,1 s, di mana PLC membaca pulsa encoder dan mengonversinya menjadi kecepatan serta jarak tempuh, sedangkan ESP32 membaca IMU untuk mengolah perubahan kecepatan sudut menjadi informasi status lintasan lurus/belok.

Zona	Tipe	Jarak(m)	Kondisi	v_maks
1.	Lurus	2.50	Cepat	45km/jam
2.	Tikungan 90°	3.14	Lambat	30km/jam
3.	Lurus	2.50	Cepat	45km/jam



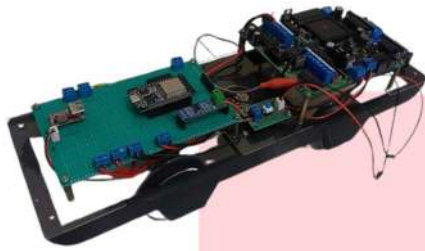
GAMBAR 11
SKENARIO UJI PADA LINTASAN

Sebagai bukti kevalidan nilai terukur tersebut, digunakan metode kecepatan referensi berbasis timestamp sensor IR dengan empat sensor IR reflektif yang dipasang berurutan pada ujung jarak yang telah diketahui (zona tempuh 1-3). Saat kereta melewati sensor, timestamp dicatat dan kecepatan referensi dihitung dari perbandingan jarak antar sensor terhadap selisih waktu. Selanjutnya, performa sistem dievaluasi dengan membandingkan kecepatan terukur terhadap kecepatan referensi sehingga error dapat dihitung secara kuantitatif.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Alat

Implementasi sistem dilakukan dengan merangkai seluruh komponen ke dalam satu kesatuan yang utuh dan fungsional. PLC T100MD888+ bertindak sebagai pengendali utama, mengatur pembacaan pulsa encoder (HSC), perhitungan PID, serta menghasilkan sinyal PWM untuk mengendalikan motor kereta prototipe. ESP32 berperan sebagai unit akuisisi data IMU dan komunikasi, yaitu membaca MPU6050 untuk memperoleh nilai yaw dan mengirimkannya ke PLC melalui Modbus RTU pada media RS-485, sekaligus meneruskan data monitoring ke ESP32 receiver melalui ESP-NOW.



GAMBAR 12
PROTOTIPE KERETA LORI 1:12 MODEL

Program PLC disusun pada lingkungan TRILOGI/TBASIC, sedangkan program ESP32 ditulis menggunakan bahasa C/C++ dan diunggah melalui Arduino IDE. Tampilan monitoring dilakukan melalui Serial Monitor pada komputer untuk menampilkan kecepatan (m/s) dan jarak (m) secara real-time.

B. Pengujian Nilai Ground Truth

Pengujian kecepatan referensi dilakukan untuk memperoleh waktu tempuh aktual pada setiap zona lintasan sebagai acuan pembandingan (v_{ref}).

no	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	t_ref (s)	v_ref (m/s)	t_ref (s)	v_ref (m/s)	t_ref (s)	v_ref (m/s)
1	3.314	0.6743	6.270	0.5024	3.718	0.6723
2	2.956	0.7559	5.845	0.5389	3.548	0.7045
3	3.054	0.7316	5.856	0.5379	3.526	0.7089
4	2.988	0.7479	5.904	0.5335	3.542	0.7058
5	3.139	0.7119	6.025	0.5228	3.624	0.6898

C. Pengujian Nilai Jarak

Bagian ini menyajikan hasil pengukuran jarak hasil PLC (s_{plc}) yang digunakan untuk memetakan posisi kereta terhadap zona lintasan. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan s_{plc} pada waktu referensi tertentu terhadap jarak fisik lintasan pada titik sensor IR, sehingga dapat terlihat akurasi jarak terukur pada tiap zona.

Zona	t_ref (s)	s_ref (cm)	s_plc (cm)	Error (%)
1	12.670	223.5	234.4	4.88
2	18.250	538.5	564.0	4.74
3	21.662	788.5	830.9	5.38

Error jarak pada s_{plc} dapat terjadi karena konversi pulsa encoder melalui HSC belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi aktual, serta dipengaruhi slip roda saat akselerasi/deselerasi dan wheel contact yang tidak ideal akibat kondisi lintasan. Toleransi mekanik dan perubahan beban/getaran juga dapat mengganggu kestabilan pembacaan pulsa, sehingga selisih jarak tetap muncul meskipun logika zona dan perubahan setpoint sudah berjalan sesuai rancangan.

D. Pengujian Nilai Kecepatan

Bagian ini menampilkan profil kecepatan terukur PLC (v_{plc}) yang diperoleh dari hasil konversi pulsa encoder secara periodik. Data v_{plc} kemudian digunakan untuk melihat kestabilan kecepatan pada tiap zona serta kecenderungan deviasi terhadap target/referensi

Zona	v_plc (m/s)	v_ref (m/s)	Error Rata Rata
1	0.68	0.6724	6.07%
2	0.58	0.527	10.05%
3	0.73	0.69	5.70%

Error v_{plc} terhadap v_{ref} menunjukkan Zona 1 paling fluktuatif karena transien awal, Zona 2 paling tinggi dan konsisten, sedangkan Zona 3 lebih kecil dan stabil. Kecenderungan v_{plc} lebih besar pada zona 2-3 berkaitan dengan *over-estimate* jarak encoder yang menggeser perpindahan zona, sehingga setpoint dapat berubah lebih awal dari posisi lintasan. Karena itu, diperlukan pemicu tambahan berbasis IMU (lurus/belok) agar perubahan setpoint lebih adaptif dan tidak hanya bergantung pada jarak.

E. Pengujian Nilai Hasil IMU

Pada pengujian berbasis IMU, perubahan setpoint kecepatan ditentukan oleh indikasi kondisi lintasan (lurus/belok) dari data IMU. Berdasarkan hasil tuning pada pengujian, deteksi belok ditetapkan ketika *yaw* melebihi 6,5 deg/s secara kontinu selama 120 ms (*enter threshold*). Status kembali lurus ditetapkan ketika *yaw* turun di bawah 3,8 deg/s dan perubahan *yaw* antar sampel memenuhi kestabilan < 0,8° selama 120 ms (*exit threshold*) dan sistem menerapkan jeda minimum perubahan status sebesar 300 ms untuk mencegah noise. Status akhir dikodekan sebagai 0 = lurus dan 1 = belok, kemudian dikirim ke PLC melalui Modbus dengan periode pengiriman 50 ms.

Percobaan	Batas Masuk	Masuk Aktual	Error
1	2235	3035	35.79%
2	2235	3155	41.16%
3	2235	2744	22.77%
4	2235	2806	25.55%
5	2235	3044	36.2%
Rata-Rata	2235	2956.8	32.27%

hasil pengujian menunjukkan bahwa deteksi IMU masuk belok belum sesuai dengan referensi batas zona, yaitu 2235 mm. Pada lima percobaan, jarak aktual masuk belok berada pada rentang 2744-3155 mm, sehingga seluruh percobaan mengalami keterlambatan deteksi dengan error 22,77%-41,16% dan rata-rata error sebesar 32,27%. Nilai rata-rata jarak aktual masuk belok sebesar 2956,8 mm, yang berarti

terjadi keterlambatan sekitar 721,8 mm dibanding nilai referensi.

Percobaan	Ref_Exit	Actual_Exit	Error
1	5385	6464	20,04%
2	5385	6628	23,08%
3	5385	6625	23,03%
4	5385	6516	21%
5	5385	6449	19,76%
Rata-Rata	5385	6536.4	21.38%

deteksi IMU keluar belok juga menunjukkan keterlambatan dibanding referensi 5385 mm. Jarak aktual keluar belok berada pada rentang 6449–6628 mm, dengan error 19,76%–23,08% dan rata-rata error sebesar 21,38%. Rata-rata jarak aktual keluar belok sebesar 6536,4 mm, sehingga deteksi keluar belok terlambat sekitar 1151,4 mm dari nilai referensi.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merealisasikan prototipe kontrol kecepatan lori inspeksi berbasis PLC dengan umpan balik encoder serta integrasi ESP32–Modbus untuk pengiriman status. Pada metode berbasis jarak, error posisi pada batas zona berada pada 4,74%–5,38%

dengan kecenderungan *over-estimate*, sedangkan error rata-rata kecepatan sebesar 6,07% (Zona 1), 10,05% (Zona 2), dan 5,70% (Zona 3), dengan error terbesar terjadi saat transisi antar zona. Metode berbasis IMU mampu memicu perubahan setpoint secara adaptif sesuai kondisi lurus/belok. Namun deteksi masuk/keluar belok terlambat dibanding batas zona berbasis jarak, yakni rata-rata 2956,8 mm vs 2235 mm (32,27%) dan 6536,4 mm vs 5385 mm (21,38%), sehingga IMU lebih sesuai sebagai indikator event lintasan daripada penentu batas zona

REFERENSI

- [1] Republik Indonesia, *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 23 Tahun 2007 tentang Perkeretaapian*, Jakarta, Indonesia, 25 Apr. 2007.
- [2] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Perhubungan Nomor KM.49 Tahun 2010 tentang Sistem Manajemen Keselamatan Perkeretaapian*, Jakarta, Indonesia, 21 Jul. 2010.
- [3] H. N. Rafi, A. T. A. Salim, M. E. Echsony, S. N. Patrialoya, dan R. H. Setyawan, "Rancang bangun rail inspection berpenggerak mandiri menggunakan motor DC," *J-TETA (Jurnal Teknik Terapan)*, vol. 1, no. 2, pp. 30-35, okt. 2022.
- [4] *Peraturan Dinas 19 Jilid II, KEP.U/HK.202/XI/1/KA-2011*, ed. Sep. 2011.