Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi Vol 18 (2), 2026 ISSN: 2085-2517
https://doi.org/10.5614/joki.2026.18.2.3 E-ISSN: 2460-6340

Rancang Bangun Purwarupa *Automated Guided Vehicle* (AGV) Hemat Biaya Berbasis Mikrokontroler untuk Distribusi Material Internal pada Industri Kecil Menengah (IKM)

Design and Development of a Low-Cost Automated Guided Vehicle (AGV) Prototype based on a Microcontroller for Internal Material Distribution in Industrial Small and Medium-Enterprises (SMEs)

[1]Yudha Hamdi Arzi*), [1]Nazuwatussya'diyah, [1]Achmad Chalid Afif Alfajrin, [1]Muhammad Ihsan Maulana, [1]Mufrih Labib Sadad dan [1]Dwi Rahmawati

[1]Program Studi Rekayasa Instrumentasi dan Automasi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung 35365, Indonesia

*) *corresponding email: yudha.arzi@ia.itera.ac.id*

Abstrak

Industri kecil dan menengah (IKM) membutuhkan sistem distribusi material internal yang efisien, aman, mudah dirawat, dan terjangkau. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji purwarupa *Automated Guided Vehicle* (AGV) hemat biaya berbasis mikrokontroler untuk distribusi material internal pada IKM. Sistem dikembangkan menggunakan konfigurasi differential drive, motor dengan *driver* BLDC, navigasi jalur magnetik, sensor Roboteq MGS1600, RPLIDAR C1, ESP32-C3, *limit switch*, *emergency stop*, baterai modular, dan PCB control board berbasis STM32. Metode penelitian mencakup identifikasi kebutuhan, penentuan persyaratan desain, perancangan mekanik dan elektronik, pengembangan perangkat lunak kendali, integrasi sistem, serta pengujian fungsional. Hasil pengujian menunjukkan sensor magnetik mampu mendeteksi pita magnet hingga jarak 3,0 cm. Sistem deteksi penghalang menghasilkan MAE jarak berhenti sebesar 4,02 cm untuk penghalang manusia dan 9,39 cm untuk penghalang benda terhadap *setpoint* 30 cm. Karakterisasi motor-*driver* menunjukkan zona kendali efektif pada *duty cycle* PWM sekitar 31–70% dengan kecepatan saturasi sekitar 283 RPM. Purwarupa AGV juga mampu menarik beban sekitar 403 kg pada lintasan datar. Hasil ini menunjukkan bahwa AGV berbasis mikrokontroler dengan sensor sederhana berpotensi menjadi alternatif awal otomasi *material handling* yang ekonomis untuk IKM.

Kata Kunci: AGV, differential drive, IKM, navigasi magnetik; otomasi industri, STM32.

Abstract

Small and medium-sized enterprises (SMEs) require internal material distribution systems that are efficient, safe, maintainable, and affordable. This study aims to design and test a low-cost microcontroller-based Automated Guided Vehicle (AGV) prototype for internal material distribution in SMEs. The system uses a differential drive configuration, BLDC motor driver, magnetic path navigation, Roboteq MGS1600 magnetic sensor, RPLIDAR C1, ESP32-C3, limit switches, emergency stop, modular battery, and STM32-based PCB control board. The research method includes requirement identification, design formulation, mechanical and electronic design, control software development, system integration, and functional testing. The results show that the magnetic sensor detected magnetic tape up to 3.0 cm. The obstacle detection system produced stopping-distance MAE values of 4.02 cm for human obstacles and 9.39 cm for object obstacles relative to the 30 cm setpoint. Motor-driver characterisation showed an effective PWM duty cycle range of 31-70%, with a saturation speed of about 283 RPM. The AGV prototype also towed approximately 403 kg on a flat track. These results indicate that the proposed AGV can serve as an economical initial alternative for material handling automation in SMEs.

Keywords: AGV, differential drive, SME, magnetic navigation, industrial automation, STM32.

Makalah diterima 11 Maret 2026 – makalah direvisi 21 Juni 2026– disetujui 25 Juli 2026

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi CC BY-SA.

1 Pendahuluan

Dalam era manufaktur modern, transformasi menuju sistem produksi yang otonom dan efisien menjadi kebutuhan strategis untuk menghadapi tantangan Industri 4.0. Salah satu area krusial yang memerlukan otomatisasi adalah proses logistik internal dan pendistribusian material antar-lini produksi. Di banyak negara

berkembang, termasuk Indonesia, aktivitas pemindahan material secara konvensional masih didominasi oleh penggunaan *forklift* manual maupun tenaga fisik manusia. Ketergantungan pada metode konvensional ini memicu berbagai persoalan signifikan, mulai dari tingginya biaya operasional, kerentanan terhadap kelelahan pekerja, peningkatan risiko *human error*, hingga potensi kecelakaan kerja yang mengancam keselamatan [1]. Oleh karena itu, modernisasi sistem transportasi material internal menjadi fokus utama dalam peningkatan produktivitas industri saat ini.

Penggunaan *Automated Guided Vehicle* (AGV) menjadi salah satu solusi yang menjanjikan untuk menggantikan transportasi manual karena menawarkan kecepatan dan ketepatan dengan akurasi tinggi, kontrol konsisten, dan minim risiko kerja [2], [3]. Beberapa studi menunjukkan bahwa implementasi AGV dapat meningkatkan efisiensi operasional hingga 25–50% dan menurunkan tingkat kesalahan manusia secara signifikan [4]. Sayangnya teknologi komersial AGV saat ini berfokus pada sistem navigasi yang mutakhir dan berkala besar seperti visual SLAM, LiDAR, dan kendali berbasis *machine learning* [5]. Meskipun teknologi tersebut menawarkan presisi tinggi, implementasinya memerlukan nilai investasi awal yang sangat besar, infrastruktur digital yang matang serta kompetensi teknis yang tinggi. Akibatnya sebagian besar IKM belum mengimplementasikannya [6].

Ketimpangan antara kecanggihan teknologi AGV yang tersedia di pasar dengan kemampuan adopsi sektor IKM menciptakan sebuah celah penelitian. Sebagian besar penelitian terdahulu cenderung mengoptimalkan performa AGV pada kompleksitas navigasi untuk industri skala besar, namun mengabaikan aspek keterjangkauan biaya dan kemudahan replikasi dengan keterbatasan sumberdaya. Akibatnya, adopsi AGV pada sektor IKM di Indonesia cenderung stagnan, sehingga IKM terjebak pada penggunaan metode manual yang tidak efisien. Oleh karena itu, perlu dikembangkan sistem AGV yang tidak hanya berfokus pada keandalan fungsi navigasi tetapi juga pada efisiensi biaya dan fleksibilitas struktur operasional.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengintegrasikan dan menguji purwarupa AGV berbasis mikrokontroler dengan aplikasi untuk distribusi material internal. Perancangan seluruhnya menggunakan perangkat lunak *open source*. PCB *control board* dirancang dengan memperhatikan kemungkinan pengembangan fitur-fitur penunjang yang nantinya akan dikembangkan mandiri, sehingga dapat meningkatkan unsur Tingkat Kandungan Dalam Negeri (TKDN). Pemilihan komponen dilakukan berdasarkan ketersediaannya di *marketplace online* tanpa harus impor barang dari luar negeri. Keterbaruannya bukan berdasarkan algoritma navigasi baru, tetapi pada integrasi sistem AGV yang sederhana, modular, ekonomis dan relevan untuk kebutuhan *material handling* pada IKM.

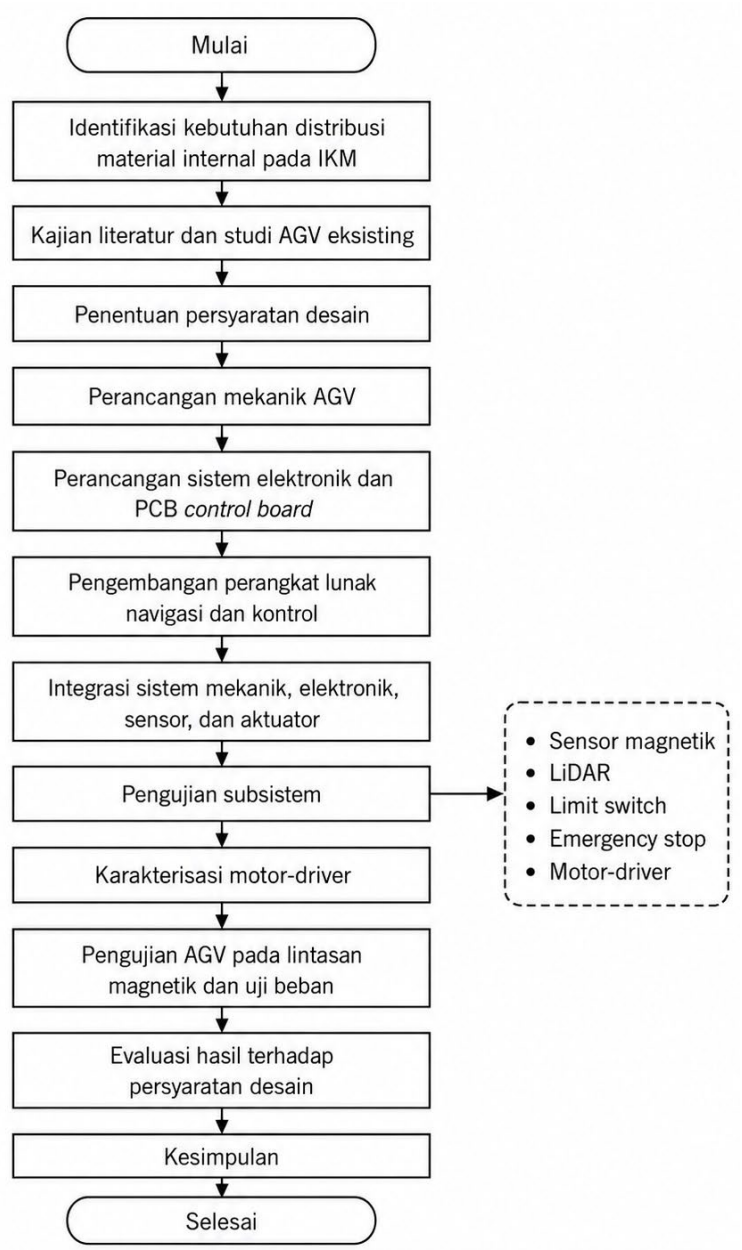
2 Metode

2.1 Pendekatan *State of the Art* Penelitian

Penelitian ini bersifat aplikatif dengan pendekatan rekayasa sistem yang mencakup perancangan mekanik dan elektronik AGV, pengembangan perangkat lunak navigasi dan kontrol berbasis mikrokontroler, integrasi keseluruhan sistem, serta pengujian pada simulasi lingkungan industri. Kebaruan utamanya adalah integrasi sederhana tetapi efektif antara perangkat keras (motor, sensor magnetik, sensor *obstacle*) dan perangkat lunak berbasis STM32 untuk menghasilkan AGV fungsional, hemat biaya, dan berbasis sensor sederhana sehingga relevan bagi industri kecil dan menengah (IKM). Berbeda dari studi sebelumnya yang menyoroti potensi STM32 untuk kendaraan otonom [7], strategi kontrol nonlinier dengan batasan kecepatan dan karakteristik motor [8], integrasi sensor inframerah dan ultrasonik [9], pendekatan tingkat lanjut seperti visual SLAM, LiDAR, dan pembelajaran mesin untuk penjadwalan multi AGV pada skala besar [10], [11], serta kerangka simulasi berbasis pemodelan perilaku dan Petri Net [12], riset ini secara khusus menargetkan konteks IKM dengan penekanan pada efisiensi biaya, kemudahan replikasi, dan aksesibilitas implementasi di dunia nyata.

2.2 Tahapan penelitian

Penelitian ini menerapkan metode kuantitatif-eksperimental dengan merujuk pada kebutuhan operasional sistem AGV yang telah beroperasi di perusahaan mitra. Secara umum, purwarupa yang dikembangkan terdiri atas beberapa subsistem utama, yaitu sistem navigasi, sistem pendeteksi kontak, pengendali motor, motor penggerak, roda utama, roda *caster* untuk manuver, catu daya baterai, dan PCB control board sebagai pusat kendali sistem [13], [14]. Berdasarkan pendekatan rekayasa sistem, penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan utama, yaitu identifikasi kebutuhan sistem, penentuan persyaratan desain, perancangan mekanik, perancangan perangkat keras elektronik, pengembangan perangkat lunak kendali, integrasi sistem, serta pengujian fungsional purwarupa AGV. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian pengembangan purwarupa AGV berbasis mikrokontroler.

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi kebutuhan distribusi material internal pada lingkungan IKM dan mengkaji sistem AGV yang telah digunakan di perusahaan mitra. Hasil identifikasi tersebut kemudian diterjemahkan menjadi persyaratan desain yang mencakup aspek perangkat keras, perangkat lunak, biaya produksi, dan faktor manusia. Setelah persyaratan desain ditetapkan, dilakukan perancangan mekanik AGV, pemilihan komponen aktuator dan sensor, perancangan PCB *control board*, serta pengembangan perangkat lunak kendali berbasis mikrokontroler. Sistem yang telah dirancang kemudian diintegrasikan dan diuji melalui pengujian subsistem, karakterisasi *motor-driver*, validasi sensor keselamatan, serta pengujian fungsional pada lintasan magnetik dengan beban tarik.

2.3 Persyaratan Desain Sistem AGV

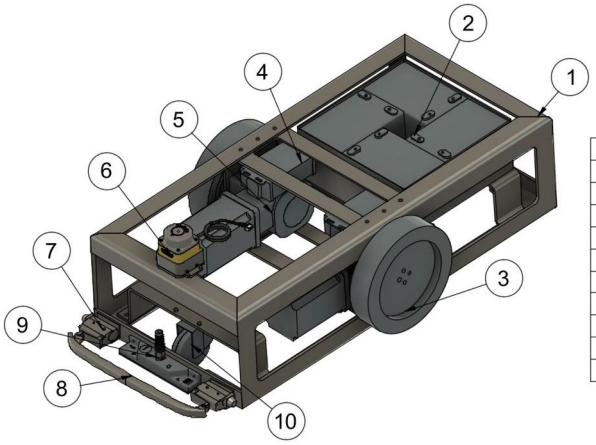
Sebagai penelitian rancang bangun, pengembangan purwarupa *Automated Guided Vehicle* (AGV) diawali dengan penentuan persyaratan desain. Persyaratan ini digunakan sebagai dasar dalam pemilihan komponen, perancangan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, integrasi sistem, serta evaluasi hasil pengujian. Karena sistem ditujukan untuk distribusi material internal pada industri kecil dan menengah (IKM), persyaratan desain tidak hanya berfokus pada performa teknis, tetapi juga mempertimbangkan aspek biaya, kemudahan penggunaan, keselamatan, dan kemudahan perawatan. Adapun persyaratan desain tersebut telah ditabulasikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Persyaratan desain purwarupa AGV hemat biaya berbasis mikrokontroler

No	Aspek persyaratan desain	Persyaratan desain	Indikator verifikasi
1	Persyaratan teknis perangkat keras	AGV menggunakan konfigurasi *differential drive*, motor BLDC, sasis besi, navigasi jalur magnetik, sensor LiDAR, *limit switch*, *emergency stop*, mikrokontroler 32-bit, PCB *control board*, dan baterai modular	AGV dapat mengikuti lintasan magnetik, mengendalikan motor kiri dan kanan, mendeteksi hambatan, berhenti saat *emergency stop* aktif, serta menarik beban uji sekitar 403 kg pada lintasan datar
2	Persyaratan teknis perangkat lunak	Perangkat lunak mampu membaca sensor, menjalankan logika navigasi, menghasilkan sinyal PWM dan arah motor, memproses kondisi keselamatan, serta mendukung komunikasi GPIO, serial, dan pengembangan CAN Bus	Program mampu menjalankan fungsi *line following*, kontrol motor, respons terhadap sensor keselamatan, dan komunikasi dasar antar perangkat
3	Persyaratan harga produksi	Sistem menggunakan komponen yang ekonomis, tersedia di pasaran, modular, dan tidak bergantung pada teknologi navigasi mahal seperti visual SLAM, LiDAR *mapping*, atau kamera industry	Komponen utama dapat diperoleh dari pasar umum, mudah diganti, dan biaya sistem lebih rendah dibandingkan AGV komersial berteknologi tinggi
4	Persyaratan faktor manusia	AGV harus mudah dioperasikan, memiliki *emergency stop* yang mudah dijangkau, indikator status, peringatan suara atau visual, serta mudah diperiksa oleh pengguna non-ahli	Operator dapat menyalakan, menjalankan, menghentikan, dan memeriksa status AGV dengan prosedur sederhana

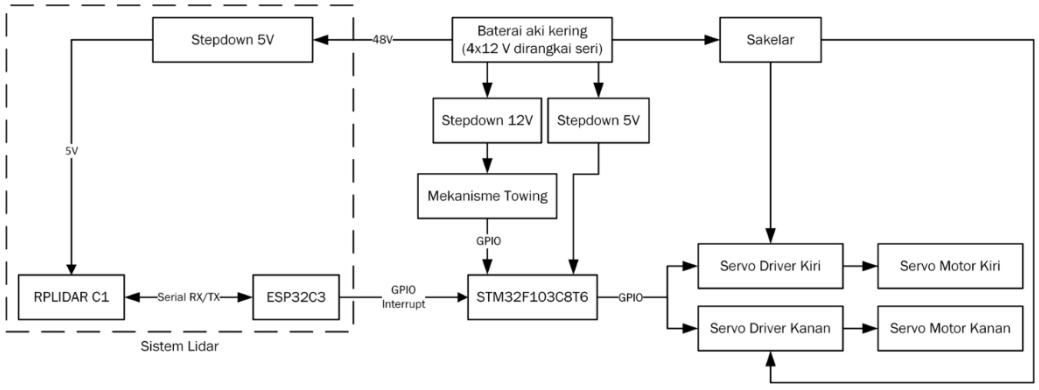
2.4 Perancangan Desain Mekanik AGV

Dengan mengacu pada persyaratan desain Tabel 1, konfigurasi desain penelitian ini mengikuti arsitektur serupa sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2 (desain mekanik) dan Gambar 3 (blok diagram sistem). Pada Gambar 1 ditunjukkan model *assembly* AGV yang dirancang menggunakan perangkat lunak FreeCAD yang merupakan perangkat lunak *open source*, tentunya tidak harus mengeluarkan biaya lisensi dibandingkan dengan CATIA dengan lisensi tahunan sebesar $7650 [9]. Konfigurasi *differential drive* yang memanfaatkan dua motor penggerak utama, roda *caster* sebagai penopang, serta struktur rangka modular untuk mempermudah perawatan dan penggantian komponen.



No	Komponen
1	Rangka Utama
2	Baterai 48V
3	Roda Penggerak
4	*Driver* BLDC
5	Motor Servo
6	Sensor Lidar
7	*Limit Switch*
8	*Bumper*
9	Sensor Magnet
10	Roda Caster

Gambar 2. Desain AGV yang akan dikembangkan.

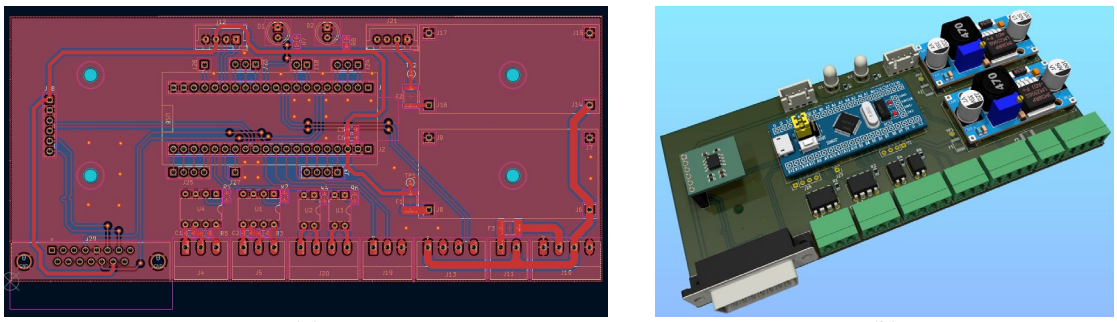


Gambar 3. Diagram blok AGV.

2.5 Perancangan PCB *Control Board*

Desain PCB untuk *control board* dirancang sebagai pusat kendali sistem dengan mikrokontroler STM32 sebagai unit pemroses utama yang menangani akuisisi data, logika kontrol, dan kendali aktuator. Pada sisi aktuasi, *driver* motor menggunakan *driver* motor BLDC untuk sepeda listrik. Selain dayanya yang besar (maksimal 500W), memiliki fungsi mundur, *driver* tersebut juga stabil dan ekonomis. Dari sisi persepsi dan keselamatan, PCB menampung beberapa jalur masukan penting, yaitu sinyal dari sensor magnetik *line* untuk navigasi, masukan dari modul LiDAR *converter* untuk kebutuhan deteksi objek, serta input dari *limit switch* sebagai sensor tabrak dan *emergency stop* sebagai lapisan proteksi saat terjadi kondisi batas atau keadaan darurat, penggunaan *fuse* yang dapat di-*reset* juga digunakan agar rangkaian utama tidak rusak jika nanti terjadi konsleting. Untuk meningkatkan keandalan sinyal, digunakan *optocoupler* sebagai isolasi galvanik sehingga gangguan *noise* dan lonjakan dari rangkaian daya atau *motor driver* tidak merambat ke bagian kontrol dan sensor. Secara implementasi, pendekatan modular dipilih dengan memanfaatkan modul siap pakai yang tersedia di pasaran guna menekan biaya sekaligus mempercepat waktu pengembangan, sementara layout komponen diatur rapi dan aksesibel agar proses inspeksi, pengukuran, dan *troubleshooting* lebih cepat. Selain itu, desain juga mempertimbangkan manajemen termal, terutama pada komponen berdaya tinggi, melalui penempatan yang tepat, jalur tembaga yang memadai, dan ruang disipasi panas yang cukup agar suhu operasi tetap aman dan performa sistem tetap konsisten.

Gambar 4 menampilkan *layout* PCB *control board* yang telah mencapai tahap 100 persen, memperlihatkan integrasi mikrokontroler STM32, *interface motor driver*, serta penggunaan *optocoupler* untuk isolasi sinyal. Terlihat juga terminal *block* berwarna hijau untuk koneksi eksternal dan kapasitor filter 470µF untuk stabilisasi *power supply*.



(a) (b)

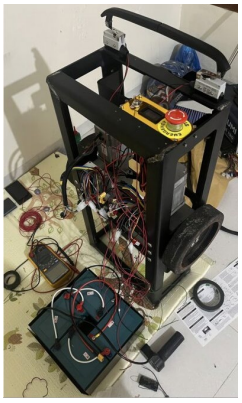
Gambar 4. Perancangan PCB (a) *Layout board* (b) Desain PCB.

3 Hasil dan Diskusi

3.1 Integrasi dan Implementasi Desain Mekanik AGV

Proses perakitan awal telah dimulai dengan kegiatan:

- Pemasangan motor dan *driver* ke rangka AGV
- Instalasi kabel power dan sinyal
- *Mounting* sensor-sensor navigasi dan keamanan
- Integrasi sementara sebelum PCB final selesai diproduksi



Gambar 5. Pemasangan kabel-kabel

Gambar 5 menunjukkan proses instalasi kabel *power* dan sinyal ke rangka AGV dengan *routing* yang rapi menggunakan *cable ties*, memperlihatkan tahap integrasi komponen elektronik ke struktur mekanik sebelum PCB *control board* final selesai diproduksi.

3.2 Pengujian Sensor Magnetik

Sensor yang digunakan untuk mendeteksi jalur magnetik pada AGV adalah Roboteq MGS1600. Sensor ini diperoleh melalui *marketplace* dalam kondisi bekas pakai, sehingga pengujian awal diperlukan untuk memastikan bahwa sensor masih dapat mendeteksi keberadaan pita magnet dan menghasilkan sinyal keluaran yang sesuai dengan kebutuhan sistem navigasi. Pengujian dilakukan terhadap dua jenis keluaran sensor, yaitu keluaran digital untuk mendeteksi keberadaan magnet dan keluaran analog untuk menunjukkan posisi relatif sensor terhadap pita magnet.

Pengujian keluaran digital dilakukan dengan mengubah jarak vertikal antara sensor magnetik dan pita magnet. Jarak pengujian divariasikan dari 0,5 cm sampai 5 cm dengan interval 0,5 cm. Pada sensor MGS1600 terdapat pin keluaran digital yang menunjukkan keberadaan medan magnet. Ketika pita magnet masih terdeteksi, keluaran pin berada pada kondisi HIGH. Sebaliknya, ketika medan magnet yang terbaca terlalu lemah atau tidak terdeteksi, keluaran pin berubah menjadi LOW. Hasil pengujian keluaran digital sensor magnetik ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian deteksi pita magnet berdasarkan variasi jarak sensor

No	Jarak sensor terhadap pita magnet (cm)	Kondisi deteksi magnet	*Output* pin digital
1	0,5	Terdeteksi	HIGH
2	1,0	Terdeteksi	HIGH
3	1,5	Terdeteksi	HIGH
4	2,0	Terdeteksi	HIGH
5	2,5	Terdeteksi	HIGH
6	3,0	Terdeteksi	HIGH
7	3,5	Tidak terdeteksi	LOW
8	4,0	Tidak terdeteksi	LOW
9	4,5	Tidak terdeteksi	LOW
10	5,0	Tidak terdeteksi	LOW

Berdasarkan hasil pengujian Tabel 2, sensor magnetik masih mampu mendeteksi pita magnet hingga jarak 3,0 cm. Pada jarak lebih dari 3,0 cm, keluaran digital berubah menjadi LOW, yang menunjukkan bahwa medan magnet tidak lagi terbaca secara memadai oleh sensor. Hasil ini menunjukkan bahwa pemasangan sensor pada AGV perlu mempertahankan jarak sensor terhadap pita magnet tidak lebih dari 3,0 cm. Untuk menjaga kestabilan deteksi selama AGV bergerak, jarak pemasangan yang lebih aman disarankan berada di bawah batas maksimum tersebut, misalnya pada rentang 1,0 sampai 2,5 cm, sehingga perubahan ketinggian akibat getaran mekanik atau ketidakrataan lantai tidak langsung menyebabkan kegagalan pembacaan jalur. Pembacaan yang pendek juga disebabkan pita magnet yang lemah, karena ketika di test menggunakan magnet yang lebih kuat, jarak pembacaan bisa lebih tinggi.

Selain keluaran digital, pengujian juga dilakukan pada keluaran analog sensor. Keluaran analog digunakan untuk menunjukkan posisi relatif pita magnet terhadap sensor. Berdasarkan datasheet sensor Roboteq MGS1600, ketika pita magnet berada tepat di tengah sensor, tegangan keluaran analog berada pada sekitar 1,5 V. Ketika pita magnet berada pada sisi kanan sensor, tegangan keluaran meningkat hingga sekitar 3 V. Sebaliknya, ketika pita magnet berada pada sisi kiri sensor, tegangan keluaran menurun hingga sekitar 0 V. Data analog ini nantinya yang akan digunakan untuk *feedback* oleh kontrol navigasi.

3.3 Pengujian Sensor LiDAR

Sebelum integrasi ke PCB utama, seluruh komponen telah diuji secara individual untuk memastikan fungsionalitasnya. Adapun komponen yang telah diuji, antara lain:

- *Emergency stop button*
- Sensor kontak (*limit switch*)
- PWM *control* menggunakan *optocoupler high speed*
- *Reverse motor control* dengan *optocoupler* PC817
- Sensor magnetik untuk *line following*
- Modul sensor LiDAR untuk deteksi objek



Gambar 6. Pengetesan sensor LiDAR

Pengujian sensor *obstacle* dilakukan dengan mengintegrasikan RPLIDAR C1 dan ESP32-C3 untuk mendeteksi penghalang pada area 30 cm di depan AGV. RPLIDAR C1 dipilih karena memiliki biaya yang relatif terjangkau, yaitu kurang dari Rp1,5 juta, dengan jarak deteksi hingga 12 m dan frekuensi pemindaian 10 Hz. ESP32-C3 digunakan sebagai unit pemroses tambahan untuk mengolah data dari sensor LiDAR, sehingga beban komputasi tidak sepenuhnya ditangani oleh mikrokontroler utama. Pada implementasinya, seluruh *data stream* dari sensor LiDAR diproses oleh ESP32-C3, kemudian sistem hanya mengambil data objek yang berada pada area deteksi 30 cm di depan sensor dengan rentang sudut 330° sampai 30°. Rentang jarak dan sudut deteksi tersebut dapat disesuaikan kembali sesuai kebutuhan operasional di lapangan. Pengujian dilakukan menggunakan dua jenis penghalang, yaitu manusia dan benda. Data diambil pada kondisi AGV bergerak dengan kecepatan maksimum 1,5 m/s. Setiap skenario penghalang diuji sebanyak 20 kali pengulangan untuk mengevaluasi jarak berhenti AGV terhadap *setpoint* jarak bahaya 30 cm. Hasil pengujian ditabulasikan pada Tabel 3 dan dianalisis menggunakan persamaan berikut.

$$Error = 30 - \text{jarak berhenti AGV} \tag{1}$$

$$Absolute\ Error = |Error| \tag{2}$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum |Error|}{n \text{ pengulangan}} \tag{3}$$

Tabel 3. Hasil pengujian jarak berhenti AGV terhadap dua jenis penghalang

No	Jarak berhenti AGV dengan orang sebagai penghalang (cm)	*Error* terhadap *setpoint* jarak bahaya (cm)	|*Error*| (cm)	Jarak berhenti AGV dengan benda sebagai penghalang (cm)	*Error* dari *setpoint* jarak bahaya (cm)	|*Error*| (cm)
1	22,5	7,5	7,5	19,4	10,6	10,6
2	22,5	7,5	7,5	22,5	7,5	7,5
3	29,5	0,5	0,5	19,8	10,2	10,2
4	27	3	3	20	10	10
5	24,2	5,8	5,8	31,2	-1,2	1,2
6	28,5	1,5	1,5	16,3	13,7	13,7
7	28,5	1,5	1,5	15,4	14,6	14,6
8	29,5	0,5	0,5	21,3	8,7	8,7
9	27,2	2,8	2,8	21,2	8,8	8,8
10	30,5	-0,5	0,5	20	10	10
11	29,7	0,3	0,3	23,3	6,7	6,7
12	30	0	0	22,2	7,8	7,8
13	36	-6	6	24,5	5,5	5,5
14	31	-1	1	19	11	11
15	28	2	2	20,8	9,2	9,2
16	18,6	11,4	11,4	18	12	12
17	24,2	5,8	5,8	13	17	17
18	24,5	5,5	5,5	24,3	5,7	5,7
19	19,7	10,3	10,3	24	6	6
20	23	7	7	18,4	11,6	11,6
Jumlah	534,6	65,4	80,4	414,6	185,4	187,8
Rata-rata	26,73	3,27	4,02	20,73	9,27	9,39
		Mean Absolute Error (MAE)	4,02		*Mean Absolute Error* (MAE)	9,39

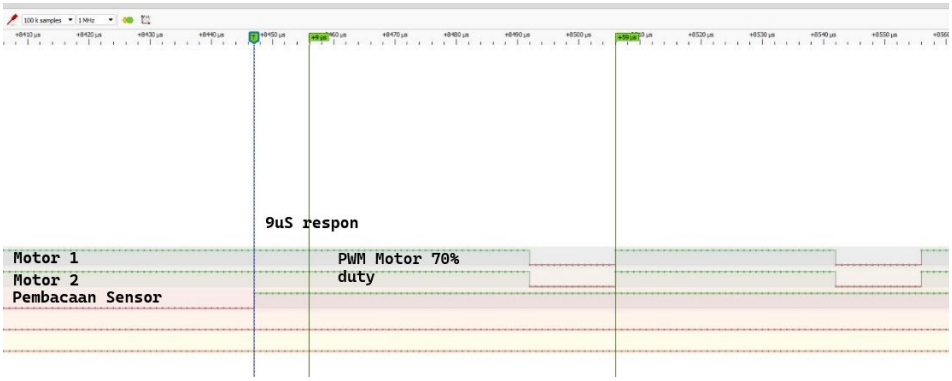
Berdasarkan Tabel 3, pengujian dengan orang sebagai penghalang menghasilkan rata-rata jarak berhenti sebesar 26,73 cm dengan MAE sebesar 4,02 cm terhadap *setpoint* jarak bahaya 30 cm. Sementara itu, pengujian dengan benda sebagai penghalang menghasilkan rata-rata jarak berhenti sebesar 20,73 cm dengan MAE sebesar 9,39 cm. Nilai MAE yang lebih kecil pada penghalang orang menunjukkan bahwa sistem deteksi dan penghentian AGV lebih konsisten pada objek manusia dibandingkan benda pada skenario pengujian ini. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik permukaan, ukuran, posisi, dan kemampuan pantulan objek terhadap sensor yang digunakan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa skenario deteksi orang dengan jarak 60 cm menghasilkan *error* atau jarak henti yang lebih kecil dibandingkan skenario penghalang berupa benda 1,2 m. *Error* ini disebabkan oleh tidak adanya fitur rem elektrik pada servo motor yang digunakan, sehingga penghentian AGV hanya dilakukan dengan memutus arus motor melalui *driver* BLDC. Pada jarak awal yang lebih jauh, AGV memiliki waktu akselerasi lebih panjang dan kecepatannya dapat mendekati nilai maksimum, sehingga membutuhkan jarak henti yang lebih panjang setelah sinyal interupsi diterima. Fitur pembalikan arah putaran roda belum digunakan sebagai mekanisme pengereman aktif karena pin kendali arah harus dipertahankan sekitar 2 detik sebelum perubahan arah bekerja stabil. Oleh karena itu, fitur tersebut hanya digunakan untuk manuver berbalik arah, bukan untuk pengereman saat deteksi hambatan.

3.4 Pengujian *Limit Switch*

Pada Gambar 7 dapat dilihat ketika sinyal dari *limit switch* mulai membaca (pulsa *high*), maka PWM dari motor mulai aktif setelah 9 μs. Hal ini dapat dilihat dari aktivasi PWM dengan *duty cycle* 70% pada frekuensi 20 khz.

- Frekuensi dan periode pulsa stabil, tidak ada jeda acak atau *glitch*.
- Beberapa kanal berubah *level* secara serempak, menandakan sinyal kendali antar-kanal (misalnya ke *driver* motor kiri dan kanan, atau sinyal *enable / step*) bekerja sinkron.
- Pengukuran pada *output* pin dari STM32, bukan setelah *optocoupler*. Karena *output* dari *optocoupler* adalah *invert* dari mikrokontroler



Gambar 7. *Waveform* hasil pengukuran dengan *logic analyzer* yang menunjukkan keterlambatan waktu (*response time*) antara sinyal sensor dan sinyal kontrol motor AGV.

3.5 Karakteristik Motor dan *Driver*

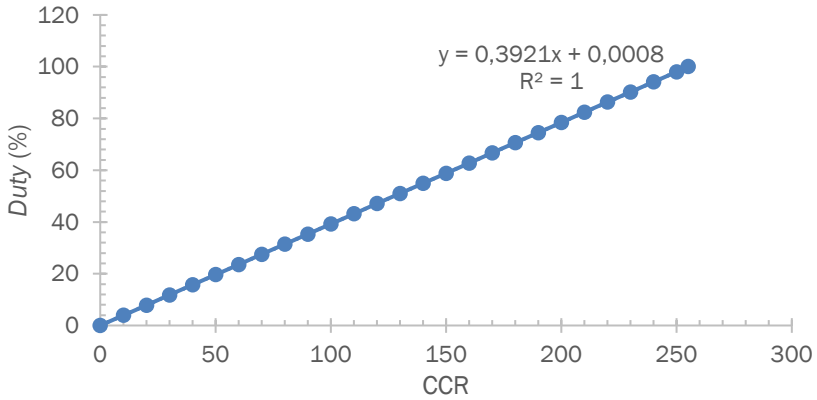
Pada penelitian ini, motor yang digunakan adalah *servo motor* dengan rasio gigi 1:25, sehingga torsi yang dikeluarkan sesuai dengan persamaan (4) adalah 25 kali lebih besar.

$$\frac{\text{Jumlah gigi } output}{\text{Jumlah gigi } input} = \frac{\text{Torsi } output}{\text{Torsi } Input} \tag{4}$$

Untuk menghemat biaya, servo motor yang digunakan adalah bekas pakai, serta *driver* menggunakan *driver* BLDC untuk sepeda listrik dengan kapasitas 500W. *Driver* tersebut memiliki fitur *cut off* untuk mematikan motor BLDC, serta fitur mundur yang dapat digunakan untuk AGV berputar arah. Untuk mendapatkan karakteristik dari kombinasi tersebut, maka dilakukan pengujian sistem aktuasi AGV, hubungan antara CCR, PWM, dan RPM digunakan untuk menggambarkan bagaimana perintah kendali dari mikrokontroler diterjemahkan menjadi kecepatan putar motor. PWM (*Pulse Width Modulation*) adalah teknik pengaturan daya dengan mengubah rasio waktu ON terhadap satu periode sinyal (*duty cycle*), sedangkan CCR (*Capture/Compare Register*) adalah nilai register pada timer mikrokontroler yang secara langsung menentukan *duty cycle* PWM yang dihasilkan. Perubahan CCR akan mengubah *duty cycle* PWM, dan perubahan *duty cycle* ini kemudian memengaruhi tegangan atau arus efektif yang diberikan *driver* ke motor.

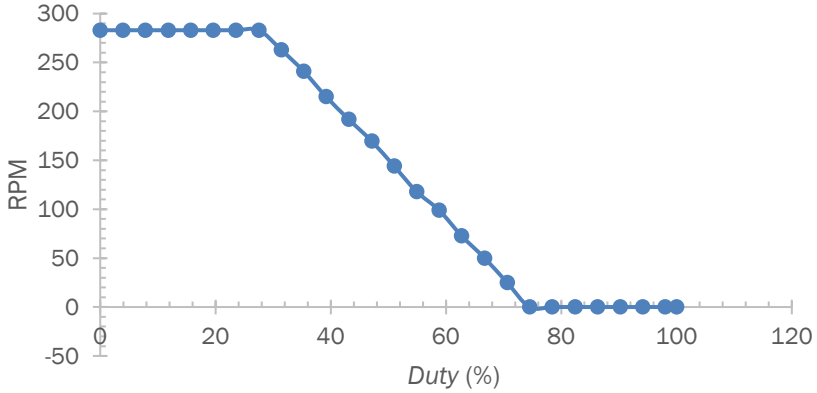
Dampak akhirnya diamati melalui RPM (*Revolutions Per Minute*), yaitu besaran kecepatan putar motor dalam satuan putaran per menit. Dengan demikian, data CCR, duty PWM, dan RPM menjadi dasar untuk mengevaluasi karakteristik respons motor dan *driver*, termasuk zona tidak berputar, rentang kontrol efektif, serta kondisi saturasi kecepatan.

Untuk mengkaji hubungan tersebut secara empiris, dilakukan pengukuran dengan memvariasikan nilai CCR pada timer sehingga *duty cycle* PWM berubah secara bertahap, kemudian respons motor dicatat dalam bentuk RPM. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi langsung apakah perubahan perintah PWM benar-benar menghasilkan perubahan kecepatan yang proporsional, sekaligus mengidentifikasi perilaku non-ideal pada sistem aktuasi, seperti adanya ambang awal motor mulai berputar (*dead zone*), rentang kerja yang paling responsif terhadap perubahan *duty*, serta kondisi saat motor mencapai batas kecepatan (saturasi). Hasil pengukuran inilah yang kemudian digunakan untuk memetakan karakteristik gabungan motor dan *driver* pada AGV.



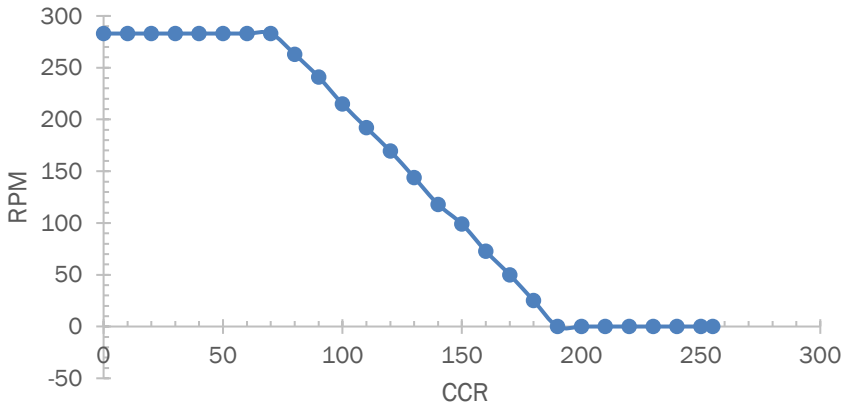
Gambar 8. Hubungan CCR terhadap *duty* PWM

Berdasarkan hasil pengukuran CCR, *duty cycle*, dan RPM, karakteristik gabungan motor dan *driver* pada Gambar 9 menunjukkan respons kecepatan yang tidak monoton terhadap *duty* PWM dan cenderung "terbalik" dibanding ekspektasi umum, hal ini disebabkan karena kesalahan pemilihan *optocoupler* yang menyebabkan sinyal dari mikrokontroler ketika sampai ke *driver* BLDC menjadi terbalik. Pemetaan CCR ke *duty* terlihat linear (CCR 0 hingga 255 menghasilkan *duty* 0% hingga 100%), tetapi keluaran kecepatan motor justru membentuk tiga zona kerja yang jelas.



Gambar 9. Hubungan *duty* PWM terhadap Kecepatan (RPM)

Pada *duty* tinggi (≥ 74,5% atau CCR ≥ 190) motor berada pada kondisi berhenti (RPM = 0) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 10, sehingga rentang ini dapat dikategorikan sebagai zona non-operasional. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sinyal PWM yang diterapkan ke *driver* tidak menghasilkan tegangan efektif ke motor, yang dapat disebabkan oleh logika PWM terinvers, mode *brake/disable* yang aktif pada *duty* besar, atau karakter *input driver* yang memetakan *duty* tinggi sebagai perintah berhenti. Motor mulai berputar pada sekitar *duty* 70,6% (CCR 180) dan kemudian RPM meningkat ketika *duty* diturunkan hingga sekitar 31,4% (CCR 80). Rentang ini dapat dianggap sebagai zona kontrol efektif karena perubahan *duty* menghasilkan perubahan RPM yang relatif konsisten. Selanjutnya, pada *duty* rendah (≤ 27,5% atau CCR ≤ 70) kecepatan mencapai saturasi di sekitar 283 RPM dan cenderung konstan meskipun *duty* terus diturunkan, yang menunjukkan adanya batas maksimum putaran akibat keterbatasan tegangan suplai, karakter back-EMF motor, beban mekanik, atau limitasi *driver*.

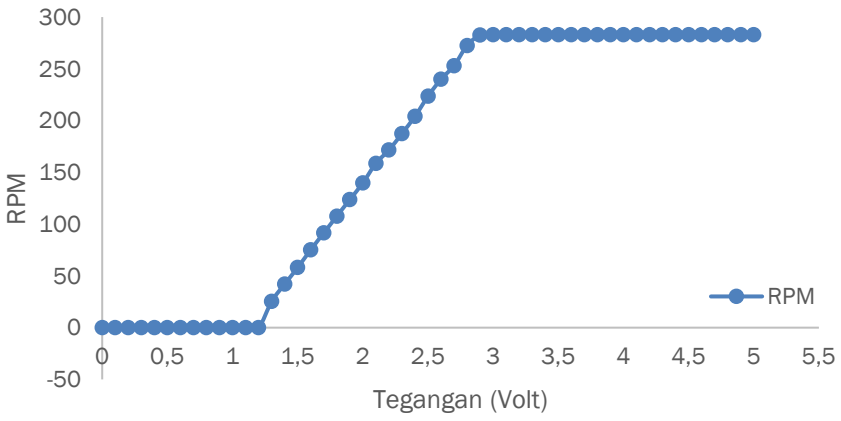


Gambar 10. Hubungan CCR terhadap kecepatan (RPM)

Secara keseluruhan, data ini menegaskan bahwa karakteristik sistem *motor-driver* memiliki *dead zone* pada *duty* tinggi dan saturasi pada *duty* rendah, sehingga untuk pengendalian kecepatan yang stabil disarankan menggunakan rentang *duty* menengah (sekitar 31% sampai 70%) sebagai rentang operasi utama. Selain itu, perlu dilakukan verifikasi konfigurasi logika PWM serta mode kerja *driver* (*enable/brake* dan polaritas PWM) agar hubungan *duty*-RPM sesuai dengan arah kontrol yang diinginkan dan lebih mudah dikendalikan secara konsisten pada implementasi AGV.

Gambar 11(b) menunjukkan grafik hubungan RPM terhadap tegangan menunjukkan tiga perilaku utama dari sistem motor dan *driver*. Pada tegangan rendah (sekitar 0 sampai kira-kira 1,2–1,4 V), RPM tetap bernilai 0 karena motor belum punya torsi yang cukup untuk mengatasi gesekan statis dan beban awal, atau karena *driver* memiliki ambang *input*, *deadband*, atau drop tegangan di rangkaian sehingga keluaran belum aktif secara efektif. Setelah melewati ambang tersebut, RPM meningkat hampir linear ketika tegangan dinaikkan pada kisaran sekitar 1,4 V hingga 3,0 V, yang menandakan rentang operasi paling efektif karena perubahan tegangan menaikkan back-EMF dan menghasilkan perubahan putaran yang relatif proporsional. Ketika tegangan berada di atas sekitar 3,0 V, kurva cenderung mendatar di sekitar 283 RPM yang menunjukkan saturasi kecepatan, sehingga penambahan tegangan tidak lagi menaikkan RPM karena sistem telah mencapai batas yang ditentukan oleh suplai dan kemampuan *driver*, atau oleh batas karakteristik motor dan beban mekanik. Secara ringkas, kurva ini memperlihatkan zona tidak berputar pada tegangan rendah, zona kendali efektif pada tegangan menengah, dan zona saturasi pada tegangan tinggi, serta konsisten dengan temuan sebelumnya mengenai adanya rentang efektif dan kondisi RPM maksimum yang stabil pada kondisi tanpa beban tertentu.





(a) (b)

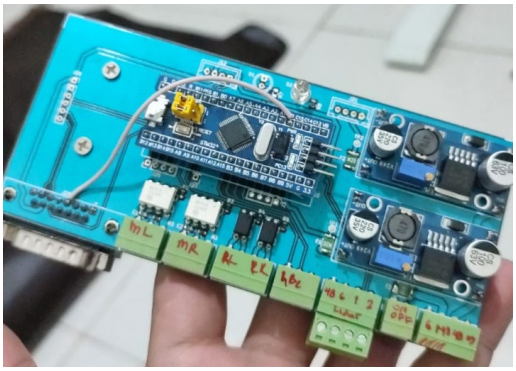
Gambar 11. (a) Pengujian data tegangan dan RPM, (b) Hubungan tegangan terhadap RPM.

3.6 Implementasi Rancangan PCB *Control Board*

PCB *control board* yang telah dirancang kemudian direalisasikan melalui proses perakitan dan integrasi komponen hingga siap digunakan pada prototipe AGV. Pada implementasi ini, modul mikrokontroler STM32 dipasang sebagai pengendali utama pada papan, kemudian seluruh jalur koneksi eksternal determinasi menggunakan terminal block untuk mempermudah pemasangan kabel lapangan dan mempercepat proses inspeksi saat pengujian. Antarmuka yang disiapkan pada papan mencakup koneksi untuk aktuator melalui

interface motor *driver* serta koneksi untuk perangkat sensor dan keselamatan, sehingga sistem dapat menerima masukan navigasi dari sensor magnetik dan masukan deteksi objek melalui modul LiDAR *converter*, sekaligus menerima sinyal proteksi dari *limit switch* dan *emergency stop*.

Untuk menjaga integritas sinyal saat sistem bekerja dengan beban dinamis, bagian input tertentu diimplementasikan dengan isolasi menggunakan *optocoupler* agar gangguan dari sisi daya dan aktuator tidak langsung masuk ke rangkaian kontrol. Pada sisi catu daya, dipasang rangkaian regulator/konverter dan kapasitor filter berkapasitas besar sebagai penyangga suplai, sehingga fluktuasi tegangan akibat arus start motor dapat diredam dan operasi mikrokontroler tetap stabil. Secara keseluruhan, implementasi ini menghasilkan papan kendali yang ringkas, modular, dan mudah ditangani saat *troubleshooting*, serta siap diintegrasikan dengan sistem mekanik dan dilakukan pengujian fungsional pada AGV. Gambar 12 memperlihatkan hasil implementasi PCB *control board* yang menampilkan modul STM32, terminal block koneksi eksternal, serta bagian catu daya dan komponen stabilisasi yang terpasang pada *board*.



Gambar 12. Implementasi desain PCB yang telah dicetak.

3.7 Pengujian AGV di Laboratorium

Pengujian diawali dengan pemasangan jalur magnet di lantai sebagai lintasan pergerakan AGV. Untuk mereplikasi kondisi beban kerja, pengujian melibatkan empat mahasiswa dan satu dosen, serta ditambah massa AGV dan empat kursi, sehingga total beban tarik saat uji berada pada kisaran 400 kg (±403 kg) sebagaimana dirangkum pada Tabel 4. Dengan demikian, skenario ini cukup representatif untuk memverifikasi kemampuan AGV menarik beban yang mendekati kondisi aktual di lingkungan industri.

Tabel 4. Uji massa beban yang ditarik AGV

No	Beban	Massa (kg)
1	Mahasiswa 1	50
2	Mahasiswa 2	55
3	Mahasiswa 3	55
4	Mahasiswa 4	70
5	Dosen 1	83
6	AGV	50
7	4 Kursi	±40
	Total massa	±403

Sebagai ilustrasi pelaksanaan uji beban, dilakukan pengujian AGV pada lintasan magnet di koridor dengan menarik beberapa orang penumpang yang mewakili beban aktual di lapangan, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 13.



Gambar 13. Pengujian AGV pada lintasan magnet dengan menarik beban > 400 kg

4 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan membangun purwarupa *Automated Guided Vehicle* (AGV) berbasis mikrokontroler STM32 yang fungsional, hemat biaya, dan relevan untuk diterapkan di industri kecil dan menengah. AGV yang dikembangkan mampu bernavigasi mengikuti jalur magnetik secara otonom menggunakan konfigurasi *differential drive*, serta berhasil menarik beban hingga sekitar 403 kg dalam pengujian di laboratorium, membuktikan kelayakannya untuk kondisi industri nyata. Sistem kontrol motor menunjukkan rentang operasi efektif pada *duty cycle* PWM antara 31% hingga 70% dengan kecepatan saturasi sekitar 283 RPM, sehingga parameter ini dapat dijadikan acuan dalam pengendalian kecepatan yang stabil. Sistem keamanan berlapis yang terdiri dari sensor LiDAR, *limit switch*, dan tombol *emergency stop* terbukti bekerja dengan andal, meningkatkan keselamatan operasional secara signifikan, tentunya harus ada perbaikan algoritma dari deteksi penghalang dan sistem pengereman agar dapat berhenti dengan konsisten. Penempatan roda caster di tengah juga mempengaruhi navigasi dari AGV tersebut, sehingga butuh perbaikan penempatan posisinya. PCB *control board* yang dirancang secara modular mempermudah proses inspeksi, perawatan, dan *troubleshooting*. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa solusi AGV berbasis mikrokontroler dengan sensor sederhana merupakan alternatif yang layak dan terjangkau dibandingkan AGV komersial berteknologi tinggi, sehingga membuka peluang lebih luas bagi IKM di Indonesia untuk mengadopsi otomasi industri dalam rangka mendukung transformasi digital menuju Industri 4.0. Tentunya dari hasil penelitian ini, masih banyak fitur lanjutan yang dapat dikembangkan. Salah satu yang paling penting adalah sistem kendali terpusat menggunakan WiFi, di mana sistem tersebut dapat memantau posisi dari AGV, serta memberikan perintah secara *real-time*. Dari segi perangkat keras, pengembangan HMI dibutuhkan untuk menentukan tujuan lintasan AGV, sensor magnetik, dan sistem pengisian daya baterai otomatis juga memiliki tantangan tersendiri, karena teknologi yang ada masih menggunakan alat-alat yang diimpor dari luar, sehingga dalam mendesain harus memperhatikan kompatibilitas dengan sistem yang sudah ada.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Rekayasa Instrumentasi dan Automasi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera (ITERA) atas dukungan fasilitas laboratorium dan sumber daya selama pelaksanaan penelitian ini, kepada perusahaan mitra atas akses dan referensi sistem AGV eksisting sebagai acuan pengembangan, serta kepada seluruh pihak yang membantu proses pengujian purwarupa di lapangan; penelitian ini didanai oleh Program Penelitian Hibah Internal ITERA 2025 (No. Kontrak: 1998ac/IT9.2.1/PT.01.03/2025) dan didukung oleh LPPM ITERA.

Referensi

[1] S. Lu, C. Xu, R. Y. Zhong, and L. Wang, “A RFID-enabled positioning system in automated guided vehicle for smart factories,” Journal of Manufacturing Systems, vol. 44, pp. 179–190, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.03.009

[2] A. K. Pamosoaji et al., “Pendampingan pengembangan *prototype Automated Guided Vehicles* untuk sektor pergudangan pada PT Stechoq Robotika Indonesia,” *Prosiding SENAPAS*, vol. 1, no. 1, pp. 152–155, Jun. 2023. https://doi.org/10.24002/senapas.v1i1.7367

[3] I. Kubasakova, J. Kubanova, D. Benco, and D. Kadlecová, "Implementation of Automated Guided Vehicles for the automation of selected processes and elimination of collisions between handling equipment and humans in the warehouse," *Sensors*, vol. 24, no. 3, Feb. 2024. https://doi.org/10.3390/s24031029

[4] J. Chen et al., "Toward Intelligent Machine Tool," *Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 679–690, Aug. 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.018

[5] A. P. Vancea and I. Orha, "A survey in the design and control of Automated Guided Vehicle systems," *Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 41–49, Dec. 2019. https://doi.org/10.2478/cjece-2019-0016

[6] D. Li, B. Ouyang, D. Wu, and Y. Wang, "Artificial intelligence empowered multi-AGVs in manufacturing systems," Sep. 2019, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1909.03373

[7] J. E. Sierra-García and M. Santos, "Mechatronic Modelling of Industrial AGVs: A Complex System Architecture," *Complexity*, vol. 2020, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/6687816

[8] A. Haber, "Clear and detailed explanation of kinematics equations and geometry of motion of differential wheeled robot (differential drive robot)," *aleksandarhaber.com*. Accessed: Oct. 01, 2025. [Online]. Available: https://aleksandarhaber.com/clear-and-detailed-explanation-of-kinematics-equations-and-geometry-of-motion-of-differential-wheeled-robot-differential-drive-robot/

[9] K. Bijanrostami, "Design and development of an Automated Guided Vehicle for educational purposes," M. Eng. Thesis, Institute of Graduate Studies and Research, Eastern Meditteranean University, Gazymağusa, North Cyprus, September 2011. [Online] Available : https://i-rep.emu.edu.tr/86261fae-d840-466b-9aa1

[10] G. Kaloutsakis, N. Tsourveloudis, and P. Spanoudakis, "Design and development of an Automated Guided Vehicle," in *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Technology*, pp. 990–993, 2003. https://doi.org/10.1109/icit.2003.1290796

[11] L. Zhang, C. Yang, Y. Yan, Z. Cai, and Y. Hu, "Automated guided vehicle dispatching and routing integration via digital twin with deep reinforcement learning," Journal of Manufacturing Systems, vol. 72, pp. 492–503, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.12.008

[12] R. Yan, S. J. Dunnett, and L. M. Jackson, "Model-Based Research for Aiding Decision-Making During the Design and Operation of Multi-Load Automated Guided Vehicle Systems," Reliability Engineering & System Safety, vol. 219, Art. no. 108264, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108264

[13] T. Wang, R. Dong, R. Zhang, and D. Qin, "Research on Stability Design of Differential Drive Fork-Type AGV Based on PID Control," Electronics, vol. 9, no. 7, Art. no. 1072, 2020. https://doi.org/10.3390/electronics9071072

[14] H. Li, J. Liu, C. Lyu, D. Liu, and Y. Liu, "Design and Implementation of Omnidirectional Mobile Robot for Materials Handling among Multiple Workstations in Manufacturing Factories," Electronics, vol. 12, no. 22, Art. no. 4693, 2023. https://doi.org/10.3390/electronics12224693