

Desain dan Implementasi *Automated Guided Vehicle* (AGV) dengan Sistem Navigasi Berbasis Pita Magnetik yang Andal

Widianto Stevanus^{1*}, Linda Wijayanti¹, Stefani Prima Dias Kristiana²

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51 Jakarta 12930

²Program Studi Teknik Industri, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51 Jakarta 12930

Article Info	Abstract
<i>Article history:</i> Received 01 Juny 2026 Accepted 13 Juny 2026 <i>Keywords:</i> Automated Guided Vehicle, Magnetic Navigation, Motor Control, Industrial Automation.	<i>The increasing demand for automation in industrial environments has accelerated the adoption of Automated Guided Vehicles (AGVs) as efficient material handling solutions. This study presents the design and implementation of a robust magnetic-guided AGV system that emphasizes reliability, safety, and operational stability. The proposed system combines magnetic tape-based navigation with a digitally controlled motor drive and embedded control architecture. Unlike vision-based or LiDAR-based systems, magnetic guidance offers a cost-effective and interference-resistant alternative for structured environments. The developed AGV demonstrates consistent path tracking, adaptive motion control, and reliable response to operational markers such as stop and speed commands. The performance of the system is validated through real-world implementation, showing improved navigation stability and reduced system complexity compared to alternative guidance approaches reported in recent studies.</i>

Info Artikel	Abstrak
<i>Histori Artikel:</i> Diserahkan: 01 Juni 2026 Diterima: 13 Juni 2026 <i>Kata Kunci:</i> AGV, Navigasi Pita Magnetik, Kontrol Motor, Otomasi Industri.	Meningkatnya permintaan akan otomatisasi di lingkungan industri telah mempercepat adopsi <i>Automated Guided Vehicles</i> (AGV) sebagai solusi penanganan material yang efisien. Penelitian ini menyajikan desain dan implementasi sistem AGV berpandu magnetik yang tangguh yang menekankan keandalan, keselamatan, dan stabilitas operasional. Sistem yang diusulkan menggabungkan navigasi berbasis pita magnetik dengan penggerak motor yang dikendalikan secara digital dan arsitektur kontrol tertanam. Berbeda dengan sistem berbasis <i>visionon</i> atau berbasis LiDAR, pemandu magnetik menawarkan alternatif yang hemat biaya dan tahan gangguan untuk lingkungan terstruktur. AGV yang dikembangkan menunjukkan pelacakan jalur yang konsisten, kontrol gerakan adaptif, dan respons yang andal terhadap marka operasional seperti perintah berhenti dan kecepatan. Kinerja sistem divalidasi melalui implementasi dunia nyata, menunjukkan stabilitas navigasi yang ditingkatkan dan kompleksitas sistem yang berkurang dibandingkan dengan pendekatan panduan alternatif yang dilaporkan dalam studi baru-baru ini.

1. PENDAHULUAN

Evolusi cepat dari Industri 4.0 telah mengubah sistem penanganan material secara signifikan, di mana otomatisasi memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi dan

*Corresponding author. Widianto Stevanus
Email address: WIDIANT.12025008079@student.atmajaya.ac.id

mengurangi intervensi manusia. *Automated Guided Vehicles* (AGV) telah muncul sebagai teknologi inti di pabrik pintar, gudang, dan sistem logistik (Jasprabhjit Mehami, Mauludin Nawi, Ray Y Zhong, 2018). Berbagai teknik navigasi telah dieksplorasi, termasuk sistem berbasis vision, panduan laser, dan navigasi inersial. Namun, pendekatan-pendekatan ini sering kali melibatkan persyaratan komputasi yang tinggi, sensitivitas terhadap kondisi lingkungan, dan peningkatan biaya sistem (Abu Bakar, M. A., Mohamad, A. A., & Rahiman, W., 2023). Pemandu magnetik, sebaliknya, memberikan solusi yang lebih sederhana dan lebih tangguh untuk lingkungan industri terstruktur. Ini mengandalkan deteksi medan magnet di sepanjang jalur yang ditentukan sebelumnya, memungkinkan navigasi yang stabil bahkan dalam kondisi berdebu atau kurang cahaya. Penelitian terbaru telah menyoroti efektivitas pemandu magnetik dalam AGV industri karena keandalan dan persyaratan perawatannya yang rendah (Kim, C. W., Tanchoco, J. M. A., & Koo, P. H, 2012).

Makalah ini menyajikan implementasi praktis dari sistem AGV berpandu magnetik, dengan fokus pada integrasi perangkat keras yang tangguh dan desain sistem kontrol. Pekerjaan ini berkontribusi pada literatur yang ada dengan menyediakan sistem tervalidasi dunia nyata yang mengintegrasikan penginderaan magnetik, kontrol motor digital, dan mekanisme keselamatan ke dalam platform yang terpadu.

2. METODE PELAKSANAAN

Sistem *Automated Guided Vehicle* (AGV) yang diusulkan dirancang untuk mencapai navigasi yang tangguh, andal, dan hemat biaya menggunakan pemandu magnetik dengan tetap mempertahankan fleksibilitas untuk penyebaran industri. Sistem secara keseluruhan mengintegrasikan komponen mekanis, elektrik, penginderaan, dan kontrol ke dalam arsitektur terpadu yang memastikan operasi stabil di bawah kondisi dunia nyata. Desain mengadopsi pendekatan modular, di mana setiap subsistem beroperasi secara independen tetapi berkontribusi pada kinerja sistem secara keseluruhan. Platform AGV terdiri dari sasis kompak yang menampung mekanisme penggerak, sistem baterai, unit modul kontrol, dan modul sensor. Desain profil rendah meningkatkan manuver di jalur industri yang sempit sambil mempertahankan integritas struktural untuk membawa beban. Atur inti sistem terletak modul pemandu magnetik, yang memungkinkan AGV untuk mengikuti jalur yang ditentukan sebelumnya menggunakan pita magnetik yang tertanam di lantai. Sensor magnetik yang dipasang di bawah sasis terus mendeteksi posisi lintasan dan menghasilkan sinyal umpan balik. Sinyal-sinyal ini diproses oleh modul kontrol untuk menentukan deviasi lateral kendaraan dan menyesuaikan perintah motor yang sesuai. Mekanisme koreksi *loop* tertutup ini memastikan pelacakan jalur yang tepat dan meminimalkan kesalahan deviasi, yang telah terbukti efektif dalam lingkungan terstruktur.

Arsitektur sistem kendali pada AGV ini berpusat pada pengendali motor digital (*digital motor controller*) yang berfungsi mengatur pergerakan kendaraan serta operasi sistem secara keseluruhan. Pengendali menerima masukan dari sensor magnetik, perangkat keselamatan, dan perintah pengguna, kemudian mengolahnya menjadi sinyal kendali motor menggunakan teknik berbasis *Pulse Width Modulation* (PWM). Pemisahan antara catu daya logika (*logic power*) dan catu daya motor (*motor power*) meningkatkan stabilitas sistem, terutama saat terjadi fluktuasi beban selama operasi. Selain itu, pengendali mendukung berbagai mode operasi, termasuk kendali *loop* terbuka (*open-loop*) dan kendali *loop* tertutup (*closed-loop*), sehingga sistem dapat beradaptasi dengan berbagai kebutuhan operasional. Untuk meningkatkan fleksibilitas operasional, sistem mengimplementasikan strategi navigasi berbasis penanda magnetik (*magnetic marker*). Penanda magnetik yang ditempatkan pada jalur berfungsi sebagai sinyal terkode yang memicu tindakan tertentu, seperti berhenti di

stasiun yang telah ditentukan, menyesuaikan kecepatan, atau mengubah arah pergerakan. Pendekatan ini menghilangkan kebutuhan akan sistem komunikasi yang kompleks sekaligus memungkinkan pengendalian perilaku AGV secara dinamis dan efisien selama proses operasional.. Menurut panduan operasional, marka-marka ini dirancang dengan dimensi dan penempatan khusus untuk memastikan deteksi yang andal. Pendekatan serupa telah berhasil diimplementasikan dalam AGV industri untuk meningkatkan otomatisasi tanpa meningkatkan kompleksitas sistem (Ding, H. 2022)

Sistem penggerak menggunakan konfigurasi diferensial motor ganda, memungkinkan kontrol independen dari roda kiri dan kanan. Konfigurasi ini memberikan manuver yang lebih baik dan memungkinkan putaran yang mulus dengan memvariasikan kecepatan roda. Modul kontrol motor mengatur arus dan kecepatan menggunakan PWM, memastikan penggunaan energi yang efisien dan kontrol gerakan yang responsif. Umpan balik loop tertutup semakin meningkatkan stabilitas, terutama selama fase akselerasi dan deselerasi, seperti yang didukung oleh studi baru-baru ini dalam sistem kontrol robot seluler (Ding, H., 2022). Keselamatan adalah aspek kritis dari desain yang diusulkan. Sistem mengintegrasikan beberapa lapisan keselamatan, termasuk mekanisme penghentian darurat, pemindai keselamatan, dan algoritma deteksi kesalahan. Jika terjadi kondisi abnormal seperti kegagalan sensor atau komunikasi loss, Modul kontrol dapat segera menonaktifkan output motor untuk mencegah situasi berbahaya. Pendekatan keselamatan berlapis ini selaras dengan standar keselamatan industri dan penelitian terbaru yang menekankan pentingnya mekanisme *fail-safe* dalam sistem otonom (Koumboulis *et al*, 2023). Selain itu, AGV dilengkapi dengan manajemen baterai dan sistem pengisian daya yang mendukung operasi berkelanjutan. Penggunaan konfigurasi baterai 24V memastikan daya yang cukup untuk elektronik kontrol dan operasi motor, sementara stasiun pengisian daya memungkinkan pengisian energi otomatis selama siklus operasi. Desain ini mendukung penyebaran jangka panjang di lingkungan industri dengan waktu henti minimal. Secara keseluruhan, desain yang diusulkan menekankan kesederhanaan, ketangguhan, dan skalabilitas. Dengan menggabungkan navigasi magnetik dengan kontrol motor canggih dan fitur keselamatan terintegrasi, sistem ini menyediakan solusi praktis untuk otomatisasi industri. Dibandingkan dengan sistem navigasi yang lebih kompleks, pendekatan yang diusulkan menawarkan pengurangan biaya implementasi, peningkatan keandalan, dan kemudahan perawatan, menjadikannya cocok untuk berbagai aplikasi dalam *manufacturing* cerdas dan logistik (Jasprabhjit Mehami, Mauludin Naw, Ray Y Zhong, 2018).

Sistem AGV yang diusulkan terdiri dari tiga subsistem utama, yaitu struktur mekanis, arsitektur elektrikal, dan sistem kontrol. Subsistem ini dirancang untuk beroperasi secara kohesif untuk memastikan navigasi yang stabil dan efisien.

2.1. Struktur Mekanis

Desain mekanis AGV mengadopsi sasis yang kompak dan berprofil rendah yang memungkinkan operasi di ruang industri yang terbatas. Struktur ini menggabungkan mekanisme penggerak diferensial yang didukung oleh roda penyeimbang untuk menjaga stabilitas selama gerakan. Enklosur dirancang untuk melindungi komponen internal sekaligus memungkinkan akses mudah untuk perawatan. Dari implementasi prototipe, sasis menunjukkan kekakuan yang memadai untuk mendukung sistem baterai, rakitan motor, dan modul elektronik tanpa mengorbankan mobilitas. Desain struktural serupa telah dilaporkan dalam pengembangan AGV baru-baru ini, menekankan modularitas dan kemudahan perawatan (Stevanus, W., 2019). Desain mekanis AGV yang dikembangkan terdiri dari sasis kompak, sistem penggerak diferensial, dan ruang integrasi komponen elektronik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1.
Desain Mekanis Keseluruhan

2.2. Desain Sistem Elektrikal

Arsitektur elektrikal mengintegrasikan catu daya baterai, driver motor, modul sensor, dan elektronika kontrol. AGV beroperasi pada sistem baterai 24V yang dibentuk dengan menghubungkan dua baterai secara seri, memastikan daya yang memadai untuk operasi logika dan motor. Modul kontrol motor memainkan peran penting dalam mengelola distribusi daya dan kontrol gerakan. Menurut dokumentasi Modul kontrol, sistem memisahkan daya logika dari daya motor, meningkatkan stabilitas operasional dan mencegah penghentian yang tidak terduga karena fluktuasi tegangan. Pendekatan desain ini selaras dengan sistem kontrol tertanam modern, di mana isolasi daya meningkatkan keandalan dan keselamatan (Iob, P., Schiavo, M., & Cenedese, A. 2024). Arsitektur elektrikal AGV mengintegrasikan sumber daya baterai, modul kontrol motor, sensor, dan perangkat keselamatan dalam satu sistem terpadu seperti diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2.
Desain Elektrikal Keseluruhan

2.3. Integrasi Sistem Kontrol

Sistem kontrol didesain menggunakan modul kontrol motor digital yang mampu menangani beberapa mode input, termasuk komunikasi analog, pulsa, dan serial. Modul kontrol mendukung operasi loop tertutup menggunakan umpan balik dari sensor, memungkinkan kontrol kecepatan dan posisi yang tepat. Fitur-fitur canggih seperti pensaklaran waktu pengawas (*watchdog timers*), deteksi kesalahan, dan mekanisme penghentian darurat dimasukkan untuk memastikan operasi yang aman. Fitur-fitur ini sangat penting dalam AGV industri, di mana kegagalan sistem dapat menyebabkan gangguan operasional atau bahaya keselamatan (Koumboulis *et al*, 2023).

2.4. Sistem Pemandu Magnetik

2.4.1. Prinsip Navigasi

Sistem navigasi didasarkan pada pita magnetik yang diletakkan di sepanjang jalur yang diinginkan. Sensor magnetik yang dipasang di bawah AGV mendeteksi variasi dalam

medan magnet dan memberikan umpan balik posisi waktu nyata. Sistem kontrol terus menyesuaikan kecepatan motor untuk menjaga keselarasan dengan lintasan. Metode ini menawarkan keuntungan signifikan dibandingkan sistem optik, karena kurang dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti kondisi pencahayaan atau kontaminasi permukaan. Studi terbaru telah mengkonfirmasi bahwa pemandu magnetik tetap menjadi salah satu teknik navigasi paling andal untuk aplikasi industri dalam ruangan (Kim, C.W., Tanchoco, J.M.A., & Koo, P.H. 2012). Sistem navigasi memanfaatkan sensor magnetik yang mendeteksi pita magnetik yang dipasang pada lantai sebagai jalur panduan AGV, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 dan karakteristik teknis pita magnetik yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 4 sebagai acuan dalam perancangan sistem navigasi.



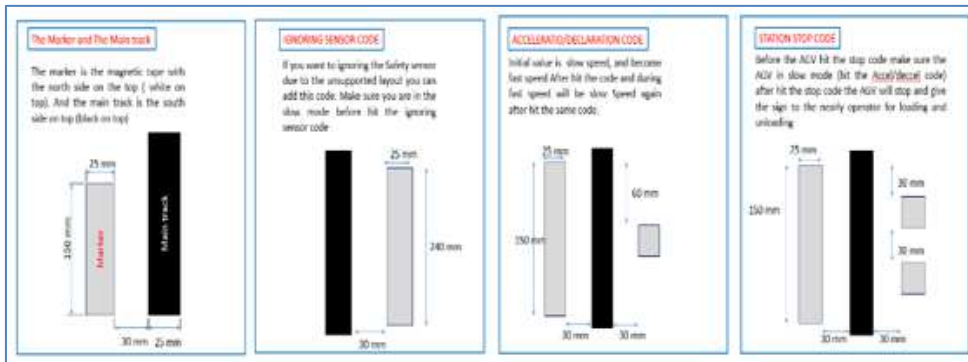
Gambar 3.
Sensor Magnetik dan Pita Magnetik

5mm, 25mm and 50mm Magnetic Tape	TEST METHOD	HE1.4
MAGNETIC PROPERTIES		
MAXIMUM ENERGY PRODUCT($\times 10^{-4}$ Gauss Oersteds)	HYSTERESIS	1.35
RESIDUAL INDUCTION (Br) (Gauss)	HYSTERESIS	2300
COERCIVE FORCE (Hc) (Oersteds)	HYSTERESIS	2040
INTRINSIC COERCIVE FORCE (Hci) (Oersteds)	HYSTERESIS	3350
THERMAL COEFFICIENT OF MAGNETIZATION ($\%/^{\circ}\text{F}$)		-1
THERMAL COEFFICIENT OF COERCIVITY ($\%/^{\circ}\text{F}$)		-0.09
MECHANICAL PROPERTIES		
DENSITY (g/cc)	ASTM D-792	3.65
DUROMETER	Shore D	60
TENSILE STRENGTH (psi)	ASTM D-412	1125
ELONGATION @ BREAK (%)	ASTM 412	100
STIFFNESS (psi @ .090")	ASTM D-747	9050
THERMAL PROPERTIES		
THERMAL COEFFICIENT OF LINEAR EXPANSION ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	ASTM D-696	4.8
MAXIMUM CONTINUOUS OPERATING TEMPERATURE ($^{\circ}\text{F}$)		175
FLAMMABILITY – VERTICAL	UL94	N/A
FLAMMABILITY – HORIZONTAL	UL94	HB
ELECTRICAL PROPERTIES		
VOLUME RESISTIVITY (OHMS CM $\times 10^{13}$)	ASTM D-257	1.1
DIELECTRIC STRENGTH (VOLTS/MIL)	ASTM D-149	225

Gambar 4.
Lembar Data Pita Magnetik

2.4.1. Strategi Kontrol Berbasis Marka

Selain pelacakan jalur berkelanjutan, sistem menggunakan marka magnetik untuk mengkodekan perintah operasional. Marka-marka ini memicu tindakan spesifik seperti menghentikan, mempercepat, atau memperlambat AGV.

**Gambar 5.**

Panduan Jalur Kode Pita Magnetik

Untuk mendukung fungsi kendali berbasis marka, AGV menggunakan konfigurasi kode pita magnetik sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5. Panduan implementasi menunjukkan bahwa marka ditempatkan secara strategis di sepanjang lintasan dengan dimensi yang ditentukan sebelumnya untuk memastikan deteksi yang akurat. Pendekatan ini memungkinkan AGV untuk melakukan tugas-tugas kompleks tanpa memerlukan infrastruktur komunikasi tambahan, yang telah diadopsi secara serupa dalam sistem AGV baru-baru ini untuk otomatisasi fleksibel.

2.5. Kontrol Motor dan Sistem Penggerak

Gerakan AGV dikendalikan menggunakan sistem penggerak motor ganda yang ditenagai oleh modul kontrol motor digital. Modul kontrol mengatur operasi motor melalui *Pulse Width Modulation* (PWM), memungkinkan kontrol kecepatan dan torsi yang tepat. Karakteristik utama sistem ini adalah hubungan antara arus baterai dan arus motor, di mana arus motor berbanding terbalik dengan *duty cycle* PWM. Ini memungkinkan pemanfaatan energi yang efisien sambil mempertahankan output torsi tinggi saat diperlukan. Kontrol *loop* tertutup diimplementasikan untuk memastikan gerakan yang stabil, terutama selama akselerasi dan deselerasi. Sistem dapat beroperasi dalam berbagai mode, termasuk kontrol kecepatan dan pelacakan posisi, yang meningkatkan fleksibilitas untuk aplikasi industri yang berbeda. Strategi kontrol serupa telah diadopsi secara luas dalam AGV modern untuk meningkatkan akurasi gerakan dan responsivitas (Ding, H. 2022). Pengaturan kecepatan dan arah gerak AGV dilakukan menggunakan modul kontrol motor digital Roboteq yang ditunjukkan pada Gambar 6 (Roboteq Inc., 2019).

**Gambar 6.**

Modul Kontrol Motor Roboteq

2.5.1. Motor DC Tanpa Sikat (*Brushless DC Motor*)

Untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan kinerja dinamis dari sistem AGV yang diusulkan, motor *Brushless DC* (BLDC) dimasukkan ke dalam mekanisme penggerak. Dibandingkan dengan motor DC sikat konvensional, motor BLDC menawarkan efisiensi yang unggul, pengurangan persyaratan perawatan, dan masa pakai yang ditingkatkan karena

tidak adanya komutator mekanis. Karakteristik ini membuatnya sangat cocok untuk operasi industri berkelanjutan, di mana daya tahan dan efisiensi energi sangat penting. Motor BLDC beroperasi berdasarkan komutasi elektronik, di mana pensaklaran arus dalam belitan stator dikendalikan oleh Modul kontrol motor daripada *physical brush*. Dalam sistem yang diusulkan, Modul kontrol motor digital mengelola proses komutasi ini dengan generating sinyal pensaklaran yang sesuai berdasarkan umpan balik posisi rotor. Umpan balik ini dapat diperoleh melalui sensor efek Hall atau sistem enkoder, memungkinkan sinkronisasi yang tepat antara medan magnet stator dan posisi rotor. Dalam desain ini, kontrol kecepatan loop tertutup diimplementasikan untuk memastikan gerakan yang stabil dan respons yang akurat terhadap perintah navigasi. Modul kontrol terus memantau kecepatan motor dan menyesuaikan sinyal input untuk mempertahankan kecepatan yang diinginkan, yang sangat penting selama koreksi jalur dalam sistem pemandu magnetik. Motor DC juga berkontribusi pada karakteristik gerakan yang lebih mulus, pengurangan kebisingan, dan efisiensi torsi yang lebih tinggi. Fitur-fitur ini meningkatkan kemampuan AGV untuk menangani beban variabel dan mempertahankan kinerja yang konsisten selama fase akselerasi dan deselerasi. Studi baru-baru ini telah menunjukkan bahwa sistem penggerak berbasis BLDC secara signifikan meningkatkan kinerja robot seluler dan AGV dengan memberikan keterkontrolan dan efisiensi energi yang lebih baik. Dari perspektif desain sistem, motor BLDC terhubung ke modul kontrol melalui antarmuka daya dan umpan balik khusus. Pengkabelan yang tepat, termasuk koneksi fase dan input sensor, sangat penting untuk memastikan operasi motor yang benar dan mencegah masalah seperti rotasi terbalik atau ketidakstabilan. Modul kontrol juga mencakup mekanisme perlindungan seperti arus lebih, tegangan lebih, dan perlindungan termal untuk melindungi motor dan sistem secara keseluruhan. Selain itu, penggunaan motor BLDC selaras dengan tren modern dalam otomatisasi industri, di mana solusi hemat energi dan rendah perawatan semakin diprioritaskan. Dengan mengintegrasikan teknologi BLDC ke dalam desain AGV, sistem mencapai keandalan operasional yang ditingkatkan dan pengurangan biaya siklus hidup dibandingkan dengan sistem motor tradisional.

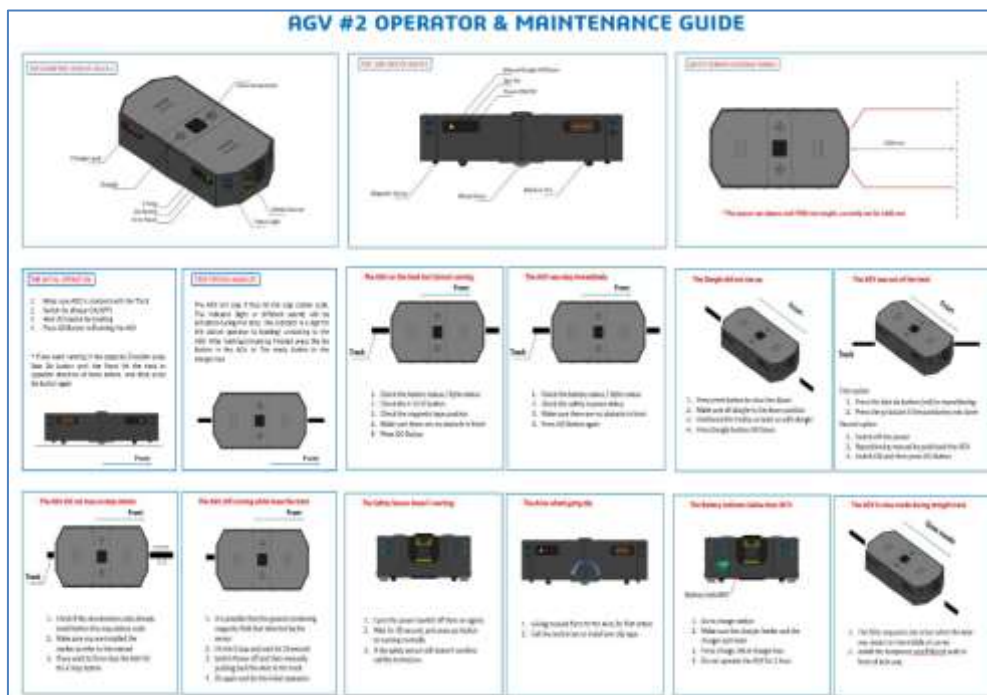
2.5.2. Operasi Sistem dan Keselamatan

Alur kerja operasional AGV dimulai dengan inisialisasi sistem, di mana Modul kontrol melakukan prosedur *boot-up* sebelum mengaktifkan gerakan. Operator memulai gerakan melalui antarmuka kontrol, setelah itu AGV mengikuti lintasan magnetik secara otonom. Selama operasi, sistem terus memantau input sensor dan status sistem. Mekanisme keselamatan seperti tombol penghentian darurat, *safety scanner*, dan algoritma deteksi kesalahan diimplementasikan untuk mencegah kecelakaan. Modul kontrol mampu mematikan operasi motor sebagai respons terhadap kondisi abnormal, memastikan perilaku sistem yang aman (Koumboulis et al, 2023). Untuk menjamin keselamatan operasi, sistem dilengkapi dengan *safety* laser scanner yang berfungsi mendeteksi objek atau personel di area kerja AGV seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7.
Safety Laser Scanner

Prosedur penanganan kesalahan mencakup respons terhadap kehilangan lintasan, malafungsi sensor, dan kondisi baterai rendah. Mekanisme ini berkontribusi pada ketangguhan sistem, memungkinkannya mempertahankan operasi di bawah kondisi yang bervariasi. Penelitian terbaru menekankan pentingnya sistem keselamatan terintegrasi dalam AGV, terutama di lingkungan industri kolaboratif (International Organization for Standardization, 2020; Ding, H. 2022). Alur operasi normal serta prosedur penanganan kesalahan yang diterapkan pada sistem AGV ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8.

Panduan Operasi dan Penanganan Kesalahan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem AGV yang dikembangkan diuji di bawah kondisi industri terkendali untuk mengevaluasi kinerjanya. Hasil menunjukkan bahwa sistem pemandu magnetik menyediakan pelacakan jalur yang stabil dan akurat, bahkan dalam lingkungan dengan potensi gangguan. Integrasi kontrol berbasis marka memungkinkan operasi yang fleksibel, memungkinkan AGV untuk melakukan tugas-tugas seperti berhenti di point yang ditentukan dan menyesuaikan kecepatan secara dinamis. Dibandingkan dengan sistem berbasis vision, pendekatan yang diusulkan menunjukkan persyaratan komputasi yang lebih rendah dan keandalan yang lebih tinggi (Abu Bakar, M. A., Mohamad, A. A., & Rahiman, W., 2023). Penggunaan Modul kontrol motor digital memastikan gerakan yang mulus dan manajemen energi yang efektif. Temuan ini konsisten dengan studi baru-baru ini yang menyoroti keuntungan menggabungkan metode navigasi sederhana dengan sistem kontrol canggih untuk otomatisasi industri.

Meskipun sistem AGV berbasis navigasi pita magnetik yang dikembangkan menunjukkan kinerja yang stabil dan andal pada lingkungan industri terstruktur, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Pertama sistem navigasi yang digunakan masih bergantung pada keberadaan pita magnetik yang dipasang secara permanen pada lantai sehingga fleksibilitas perubahan jalur masih terbatas dibandingkan dengan metode navigasi berbasis LiDAR atau vision (Abu Bakar, M. A., Mohamad, A. A., & Rahiman, W., 2023).

Kedua, penelitian ini belum mengevaluasi performa sistem pada kondisi lalu lintas AGV yang padat maupun pada skenario multi-AGV yang memerlukan koordinasi dan manajemen lalu lintas secara *real-time* (Draganjac et al, 2020).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Makalah ini menyajikan desain dan implementasi sistem AGV berpandu magnetik yang tangguh yang disesuaikan untuk aplikasi industri. Sistem ini berhasil mengintegrasikan navigasi magnetik, kontrol motor canggih, dan fitur keselamatan komprehensif ke dalam platform yang terpadu. Hasil menunjukkan bahwa pemandu magnetik tetap menjadi solusi yang layak dan efisien untuk lingkungan terstruktur, menawarkan keandalan dan kesederhanaan dibandingkan dengan metode navigasi yang lebih kompleks. Pekerjaan masa depan akan fokus pada peningkatan kecerdasan sistem melalui komunikasi nirkabel, koordinasi multi AGV, dan integrasi dengan sistem *smart factory* (Jasprabhjit Mehami, Mauludin Nawi, Ray Y Zhong, 2018).

5. DAFTAR PUSTAKA

1. Abu Bakar, M. A., Mohamad, A. A., & Rahiman, W. (2023). A survey on Navigation Approaches for Automated Guided Vehicle Robots in Dynamic Surrounding. *IEEE Access*, 11, 33934–33955. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3263734>.
2. Ding, H. (2022). A Novel Industrial AGV Control Strategy Based on Dual-Wheel Chassis Model. *Assembly Automation*, 42(3), 306–318. <https://doi.org/10.1108/AA-09-2021-0122>.
3. Draganjac, I., Petrović, T., Miklić, D., Kovačić, Z., & Oršulić, J. (2020). Highly-Scalable Traffic Management of Autonomous Industrial Transportation Systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63, 101915. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101915>.
4. International Organization for Standardization. (2020). *ISO 3691-4:2020 Industrial trucks—Safety requirements and verification—Part 4: Driverless industrial trucks and their systems*. <https://www.iso.org/standard/67338.html>.
5. Iob, P., Schiavo, M., & Cenedese, A. (2024). Integrated Hardware and Software Architecture for Industrial AGV with Manual Override Capability. *2024 IEEE 29th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. <https://doi.org/10.1109/ETFA61755.2024.10710689>.
6. Jasprabhjit Mehami, Mauludin Nawi, Ray Y Zhong. (2018). Smart Automated Guided Vehicles for Manufacturing in the Context of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 26, 1077–1086. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.144>.
7. Kim, C. W., Tanchoco, J. M. A., & Koo, P. H. (2012). Navigation of Automated Guided Vehicles Using Magnet Spot Guidance Method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(3), 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.11.005>.
8. Koumboulis, F. N., Fragkoulis, D. G., Panagiotakis, G. E., & Mavroeidis, E. (2023). Safe Performance of an Industrial Autonomous Ground Vehicle in the Supervisory Control Framework. *Electronics*, 12(24), 5035. <https://doi.org/10.3390/electronics12245035>.
9. Roboteq Inc. (2019). Advanced Brushed and Brushless Digital Motor Controllers. *Roboteq Inc.* <https://www.roboteq.com/docman-list/motor-controllers-documents-and-files>.
10. Stevanus, W. (2019). Data Hasil Perancangan dan Pengujian Automated Guided Vehicle (AGV) Berbasis Navigasi Magnetik [Data penelitian tidak dipublikasikan]. PT Akebono Brake Astra Indonesia.