

## Desain dan Implementasi Kendaraan Otonom Berpemandu (AGV) Menggunakan Raspberry Pi 4B dengan OpenCV, Pengenalan Karakter Optik (OCR), dan Navigasi GPS

### *Design and Implementation of an Autonomous Guided Vehicle (AGV) Utilizing Raspberry Pi 4B with OpenCV, Optical Character Recognition (OCR), and GPS Navigation*

Yan Estomihi Siahaan<sup>a</sup>, Florentinus Budi Setiawan<sup>b</sup>  
Universitas Katolik Soegijapranata Semarang<sup>a,b</sup>  
<sup>a</sup>tomisiahaan2001@gmail.com

#### **Abstract**

*An Auto Guided Vehicle (AGV) is an industrial automation system designed for the autonomous transfer of goods. This study designs and implements an Automated Guided Vehicle (AGV) using Raspberry Pi 4B, integrating digital image processing through OpenCV for line-following navigation, Optical Character Recognition (OCR) for pallet or destination identification, and a GPS module for real-time location tracking. The line-following navigation system employs the Pi camera, utilizing thresholding and contour detection algorithms to discern the path with 94% accuracy. The OCR module utilizes the Tesseract OCR library to precisely interpret numbers or codes on objects, with a success rate of 90%. The GPS (Global Positioning System) module delivers AGV location coordinates with an accuracy margin of  $\pm 3$  meters. The test findings indicate that the AGV can function reliably in indoor and semi-outdoor settings at an average velocity of 0.5 m/s. The amalgamation of these three technologies enhances the AGV's adaptability for logistics, warehousing, and industrial applications.*

**Keywords:** AGV, Raspberry Pi 4B, Line Follower, OCR, GPS

#### **Abstrak**

Kendaraan Otomatis Terpandu (AGV) adalah sistem otomatisasi industri yang dirancang untuk transfer barang secara otonom. Studi ini merancang dan mengimplementasikan Kendaraan Terpandu Otomatis (AGV) menggunakan Raspberry Pi 4B, mengintegrasikan pemrosesan citra digital melalui OpenCV untuk navigasi mengikuti garis, Pengenalan Karakter Optik (OCR) untuk identifikasi palet atau tujuan, dan modul GPS untuk pelacakan lokasi waktu nyata. Sistem navigasi pengikut garis menggunakan kamera Pi, memanfaatkan algoritma ambang batas dan deteksi kontur untuk membedakan jalur dengan akurasi 94%. Modul OCR menggunakan pustaka OCR Tesseract untuk menafsirkan angka atau kode pada objek secara akurat, dengan tingkat keberhasilan 90%. Modul GPS (Global Positioning System) memberikan koordinat lokasi AGV dengan margin akurasi  $\pm 3$  meter. Temuan pengujian menunjukkan bahwa AGV dapat berfungsi dengan andal di lingkungan dalam ruangan dan semi-luar ruangan dengan kecepatan rata-rata 0,5 m/s. Penggabungan ketiga teknologi ini meningkatkan kemampuan adaptasi AGV untuk aplikasi logistik, pergudangan, dan industri.

**Kata Kunci:** AGV, Raspberry Pi 4B, Line Follower, OCR, GPS

## 1. Pendahuluan

Bidang otomasi industri dan logistik terus mengalami kemajuan yang pesat. Automated Guided Vehicles (AGVs), yaitu kendaraan otonom yang dirancang untuk mengangkut dan memindahkan material secara otomatis di lingkungan terstruktur dan semi-terstruktur, adalah salah satu teknologi yang menjadi perhatian utama. Ada bukti bahwa penggunaan AGV dapat meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual, dan secara keseluruhan mengurangi biaya operasional. Akibatnya, banyak penelitian saat ini berkonsentrasi pada bagaimana

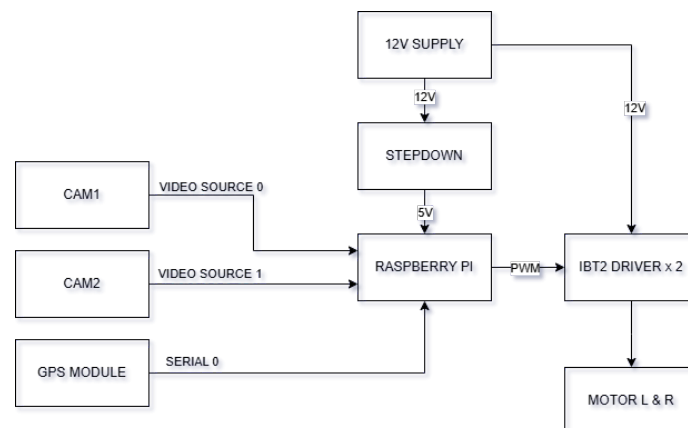
AGV dapat menjadi lebih andal, adaptif, dan fleksibel dalam berbagai kondisi lingkungan.

Sistem navigasi dan pengoperasian AGV mulai menggunakan teknologi modern seperti pengolahan citra berbasis visi komputer (Computer Vision), Pengenalan Karakter Optik (Optical Character Recognition/OCR), dan Sistem Lokasi Dunia (GPS). Dengan bantuan pustaka OpenCV, AGV dapat mendeteksi jalur atau garis sebagai rute yang harus diikuti. Selain itu, OCR membantu kendaraan mengenali tanda atau kode numerik yang berfungsi sebagai penanda lokasi, identifikasi inventaris, dan penanda instruksi kerja. Kemudian, GPS melengkapi sistem dengan memberikan informasi posisi secara real-time, memungkinkan kendaraan untuk menavigasi lingkungannya dengan lebih akurat, bahkan di lingkungan yang rumit.

Menggabungkan berbagai metode dan sensor ke dalam platform komputasi yang relatif murah namun memiliki kemampuan pemrosesan yang memadai merupakan masalah utama dalam penerapan AGV. Raspberry Pi 4B memiliki prosesor yang kuat yang memungkinkan pengolahan gambar secara real-time, mendukung antarmuka kamera, dan memiliki General Purpose Input/Output (GPIO) yang fleksibel yang memungkinkan integrasi dengan perangkat keras tambahan. Dengan dukungan ini, Raspberry Pi 4B dapat menjalankan algoritma pengajaran mesin yang sederhana serta metode visi komputer tanpa memerlukan perangkat komputasi eksternal yang mahal.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat dan menerapkan sistem Kendaraan Otonom Berpemandu (AGV) berbasis Raspberry Pi 4B yang memiliki kamera untuk pengikutan garis, OCR untuk membaca tanda atau kode tertentu, dan GPS untuk navigasi berbasis lokasi. Dengan kombinasi ketiga teknologi tersebut, AGV diharapkan dapat beroperasi secara mandiri dalam lingkungan gudang atau logistik dan menjadi solusi yang murah dan dapat diperluas untuk berbagai aplikasi industri.

## 2. Metode

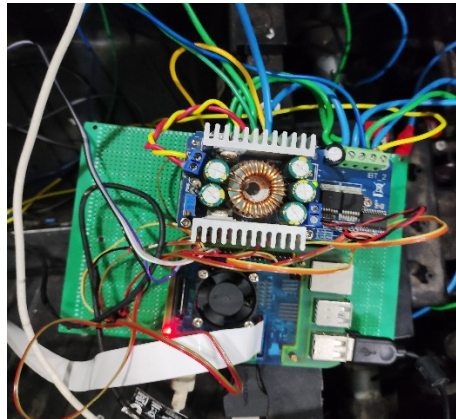


Gambar 1. Diagram Blok Sistem AGV

Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem AGV. Alur kerja sistem dimulai dengan aliran catu daya menuju stepdown untuk memberikan pasokan daya yang tepat untuk Raspberry Pi. Perangkat Raspberry Pi dilengkapi dengan dua kamera yang digunakan dalam proses pengolahan citra (image processing). Selain itu, Raspberry Pi juga berperan sebagai pusat pemrograman sekaligus pengendali pergerakan motor DC pada sistem 4WD. Untuk menggerakkan keempat motor DC yang disusun secara paralel, digunakan dua motor driver BTS7960 yang dijump, berfungsi dalam mengatur kecepatan serta kestabilan putaran motor.

Dalam metode penelitian, terdapat beberapa tahapan utama yang dilakukan, yaitu perancangan sistem penggerak AGV, pembuatan pola jalur AGV, serta implementasi image processing untuk mendukung navigasi kendaraan.

### Sistem Penggerak AGV



Gambar 2. Wiring Diagram Motor

Pada Gambar 2. Menunjukkan sistem penggerak pada AGV ini menggunakan empat motor DC 12V sebagai penggerak utama untuk melaju ke depan. Mekanisme steering dikendalikan melalui sinyal PWM (Pulse Width Modulation) yang mengatur putaran motor ke arah kanan atau kiri. Sumber daya motor berasal dari aki 12V, sedangkan Raspberry Pi menyuplai tegangan 5V pada tiap motor melalui pin yang tersedia.

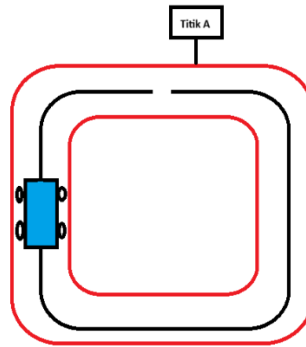
Untuk mengontrol kecepatan putaran motor, digunakan driver BTS7960 yang menerima sinyal PWM sesuai nilai yang telah ditentukan. Komponen utama dari keseluruhan sistem adalah Raspberry Pi, yang berfungsi mendukung kinerja driver BTS7960 sekaligus menjadi pusat kendali. Driver tersebut bekerja berdasarkan nilai PWM sehingga dapat menghasilkan kecepatan motor DC yang stabil sesuai kebutuhan.

AGV ini dirancang agar dapat berjalan secara otomatis mengikuti jalur yang telah ditentukan tanpa kendali langsung dari pengguna. Raspberry Pi juga dimanfaatkan untuk fungsi timer, yang digunakan sebagai batasan waktu putaran roda saat kendaraan bergerak pada jalurnya. Jika pengaturan timer tidak sesuai dengan jalur yang direncanakan, maka AGV berpotensi menyimpang atau tidak mengikuti lintasan dengan benar. Dari hasil pembahasan, diperoleh persamaan yang menggambarkan hubungan antara nilai PWM dengan kecepatan motor yang dihasilkan.

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}}$$
$$V_{out} = Duty\ Cycle \cdot V_{in}$$

### Pola Jalur AGV

Gambar 3 menunjukkan pola jalur yang dibuat pada robot AGV. Gerak motor DC yang digunakan diatur oleh fungsi timer, yang diatur sesuai panjang lintasan sehingga AGV berjalan sesuai jalur. Program timer untuk AGV harus tepat sehingga mendapatkan hasil yang diinginkan.

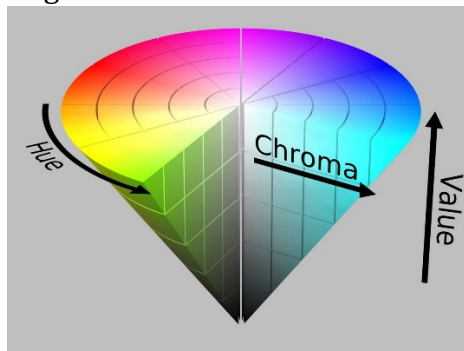


Gambar 3. Pola Jalur AGV

### Proses Image Processing

Komponen utama proses pengolahan gambar adalah kamera Raspberry Pi V2, yang dapat menangkap gambar secara real-time dalam bentuk video. Selanjutnya, data video tersebut diproses oleh Raspberry Pi 4B, perangkat utama yang mendukung teknologi pengolahan gambar digital. Kamera ini menggunakan metode HSV (Hue, Saturation, Value) untuk menemukan garis atau pola tertentu. Proses deteksi dilakukan dalam beberapa tahap hingga hasil filter warna HSV dihasilkan, yang dapat digunakan untuk membedakan warna garis lintasan dari warna permukaan di sekitarnya. Model warna HSV terdiri dari tiga komponen utama: Hue, yang menunjukkan panjang gelombang warna utama dengan rentang nilai antara 0 dan 255; Saturation, yang menunjukkan intensitas, yang menunjukkan

Dengan metode ini, sistem dapat mengenali warna garis lintasan secara lebih akurat sehingga mendukung kinerja AGV dalam mengikuti jalur yang telah ditentukan. Gambar 4. menjelaskan mengenai warna model HSV.



Gambar 4. Komposisi HSV

Nilai HSV diperoleh dengan mengubah nilai RGB. Persamaan untuk mengubah nilai RGB ke HSV dapat ditemukan.

$$h = \tan \left[ \frac{3(g - b)}{(r - g) + (r - b)} \right]$$

$$s = 1 - \left[ \frac{\min(r, g, b)}{v} \right]$$

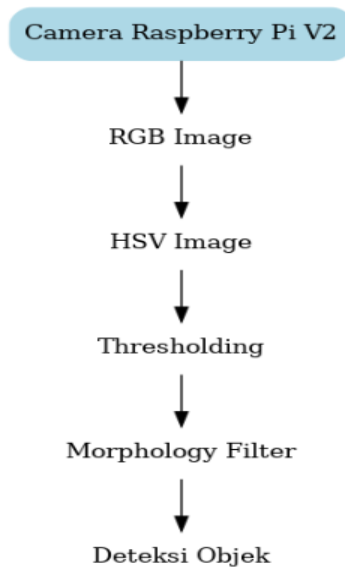
$$v = \frac{r + g + b}{3}$$

Nilai HSV dapat diubah dari RGB ke HSV dengan menggunakan persamaan ini.

$$s = \begin{cases} \frac{v - \min(r, g, b)}{v} & \text{jika } v > 0 \\ 0 & \text{jika } v = 0 \end{cases}$$

$$H = \begin{cases} 0 & \text{jika } s = 0 \\ \frac{60x(g-b)}{sv} & \text{jika } v = R \\ 60 \times \left[ 2 + \frac{(b-r)}{s \times v} \right] & \text{jika } v = G \\ 60 \times \left[ 4 + \frac{(r-g)}{s \times v} \right] & \text{jika } v = B \end{cases}$$

Untuk menggunakan filter HSV, harus mengkalibrasi semua lintasan dan kondisi pencahayaan, jadi gunakan fungsi ambang batas untuk menentukan nilai HSV untuk sistem robot AGV.



Gambar 5. Pra-Pemrosesan Filter Warna HSV

Pada Gambar 5. ditunjukkan langkah-langkah dalam proses filter warna HSV, yang digunakan sebagai dasar untuk identifikasi objek. Thresholding adalah metode sederhana untuk mengubah gambar grayscale menjadi gambar biner dengan hanya dua nilai piksel—hitam dan putih. Proses ini segmentasi gambar, memungkinkan objek terpisah dari latar belakang berdasarkan perbedaan tingkat kecerahan.

Tahap berikutnya dalam pengolahan gambar adalah filter morfologi, yang digunakan untuk menganalisis dan mengubah struktur objek yang ada dalam gambar. Untuk berbagai tujuan, seperti memisahkan objek satu sama lain, mendeteksi tepi, meningkatkan kualitas gambar, dan mengurangi noise, teknik pengolahan gambar ini sangat bermanfaat.

Dilasi membuat kontur objek lebih besar atau lebih lebar. Itu juga membersihkan suara hitam (0) dan putih (1). Proses ini menggunakan matriks kecil, atau kernel, untuk mengubah piksel sehingga celah kecil pada objek dapat dipenuhi. Sebaliknya, erosi mengikis batas objek. Nilai piksel yang dipertahankan dengan kernel hanya dapat dipertahankan jika semua piksel memenuhi logika (1).

Kombinasi operasi dilasi dan erosi memungkinkan sistem menghasilkan citra yang lebih bersih, dengan objek yang terdefinisi jelas dari latar belakangnya. Pada proses erosi dan dilasi dapat dituliskan dengan persamaan.

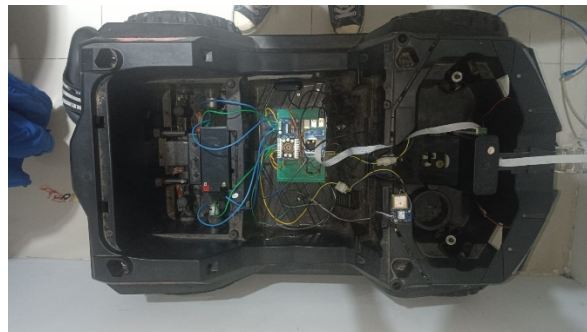
$$g(x, y) = F(x, y) \oplus SE$$

$$g(x, y) = f(x, y) \ominus SE$$

Proses filter Gaussian Blur bertujuan untuk menghasilkan efek keburaman atau pemulusan sambil mengurangi noise frekuensi tinggi dan detail dalam gambar sambil mempertahankan struktur keseluruhan dan komponen frekuensi rendah.

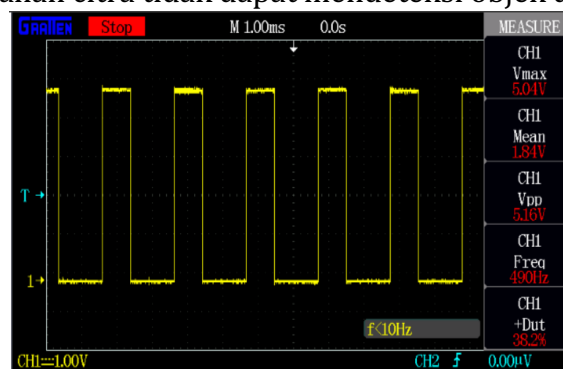
### 3. Hasil Dan Pembahasan

Gambar 6. menunjukkan prototipe robot AGV yang digunakan. Pengujian dilakukan di ruangan tertutup dengan pencahayaan yang memadai. Raspberry Pi 4B dan kamera Raspberry Pi V2 digunakan untuk mendeteksi pola jalur AGV yang telah ditentukan sebelumnya, dua komponen yang sangat penting untuk uji coba ini. Raspberry Pi 4B juga dapat mengontrol motor DC yang menggerakkan roda depan dan belakang dalam konfigurasi 4WD dan mengatur sistem pengemudi untuk robot AGV.



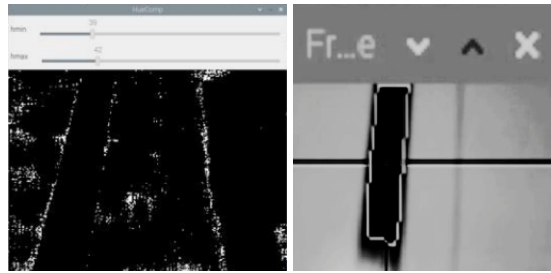
Gambar 6. Prototipe AGV

Sistem robot AGV menggunakan osiloskop untuk mengukur sinyal PWM. Mengubah nilai PWM pada Raspberry Pi memungkinkan motor DC untuk mengubah kecepatan. Gambar 7 menunjukkan hasil pengukuran, di mana motor DC menghasilkan sinyal PWM dengan duty cycle 38,2%. Hasil uji coba menunjukkan bahwa AGV dapat bergerak dengan kecepatan 3 m/s pada duty cycle 38,2%. Kecepatan ini dianggap sebagai batas tertinggi yang masih memungkinkan pengolahan gambar berjalan dengan lancar. Kesalahan navigasi dapat terjadi jika kecepatan robot melebihi 3 m/s, karena sistem pengolahan citra tidak dapat mendeteksi objek dengan benar.



Gambar 7. Sinyal PWM

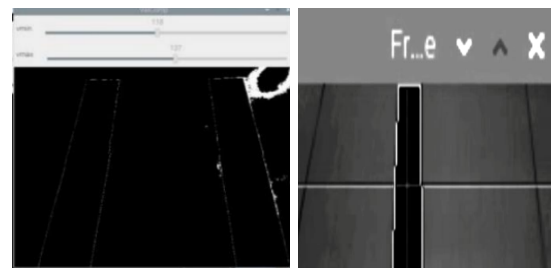
Pada pengujian alat ini dilakukan uji coba menggunakan filter HSV. Langkah awal yang diperlukan adalah melakukan kalibrasi untuk menentukan nilai minimum dan maksimum pada parameter Hue, Saturation, dan Value. Dari hasil kalibrasi diperoleh nilai sebagai berikut:  $H_{min} = 179$ ,  $S_{min} = 71$ ,  $S_{max} = 255$ ,  $V_{min} = 67$ , dan  $V_{max} = 123$ . Dengan nilai kalibrasi tersebut, objek berupa garis maupun pola gambar dapat terdeteksi sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan. Pada Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10 hasil sebelum dan sesudah kalibrasi filter HSV.



a) Sebelum *Thresholding*, b) Sesudah *Thresholding*  
Gambar 8. Penentuan nilai *Hue*



a) Sebelum *Thresholding*, b) Sesudah *Thresholding*  
Gambar 9. Penentuan nilai *saturation*



a) Sebelum *Thresholding*, b) Sesudah *Thresholding*  
Gambar 10. Penentuan nilai *Value*

Tabel 1 menunjukkan hasil uji coba thresholding Hue, Tabel 2 menampilkan hasil uji coba thresholding Saturation, dan Tabel 3 berisi hasil uji coba thresholding Value. Data pada tabel-tabel tersebut menggambarkan kondisi citra sebelum dan sesudah dilakukan proses thresholding

Proses thresholding dilakukan dengan cara menyesuaikan nilai minimum dan maksimum hingga diperoleh hasil yang paling akurat. Uji coba dilakukan melalui perubahan nilai min ke max maupun max ke min untuk menentukan kombinasi terbaik. Tujuan dari metode ini adalah membedakan warna hitam dan putih pada jalur yang ditentukan. Jika garis lintasan berhasil terdeteksi sebagai warna putih, maka dapat disimpulkan bahwa pengujian filter HSV berjalan dengan baik.

**Tabel 1. Uji Coba Threshold Hue**

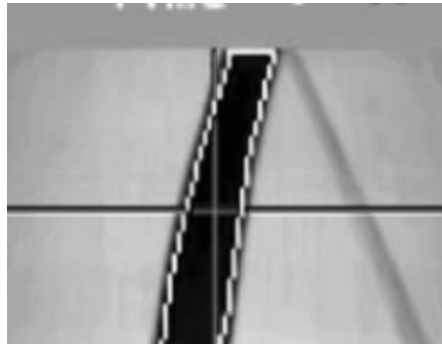
$H_{min}$	$H_{max}$	Warna Putih	Warna Hitam
39	42	Tidak Terdeteksi	Tidak Terdeteksi
145	179	Terdeteksi	Tidak Terdeteksi

**Tabel 2. Uji Coba Threshold Saturation**

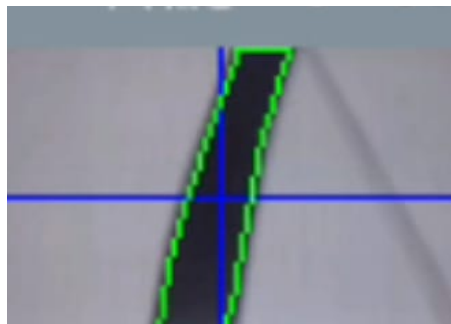
$S_{min}$	$S_{max}$	Warna Putih	Warna Hitam
58	42	Tidak Terdeteksi	Tidak Terdeteksi
71	255	Terdeteksi	Tidak Terdeteksi

**Tabel 3. Uji Coba Threshold Value**

$V_{min}$	$V_{max}$	Warna Putih	Warna Hitam
118	137	Tidak Terdeteksi	Tidak Terdeteksi
67	123	Terdeteksi	Tidak Terdeteksi



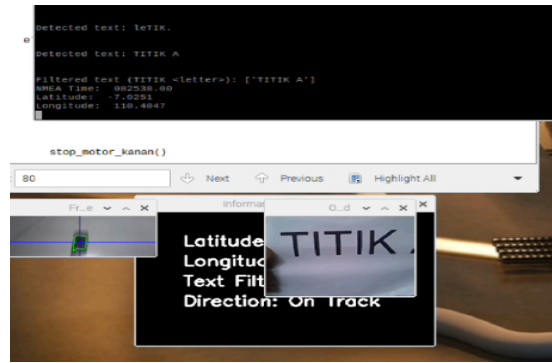
Gambar 11. Hasil Keluaran Proses Filter



Gambar 12. Hasil Tracking

Hasil dari proses thresholding dan penerapan filter Gaussian menghasilkan gambar dengan filter warna HSV yang bebas dari noise. Dengan demikian, filter ini mampu mengidentifikasi objek yang berbentuk garis atau pola gambar, menghasilkan keluaran yang sesuai dengan jalur yang telah ditentukan. Gambar 11 dan 12 menunjukkan output sistem dan proses pengawasan AGV. Pengujian kalibrasi nilai thresholding menggunakan metode HSV menunjukkan bahwa jika nilai thresholding tidak tepat, garis lintasan tidak dapat diidentifikasi dengan baik atau bahkan tidak dapat diidentifikasi sama sekali. Sebaliknya, jika nilai thresholding telah disesuaikan dengan benar, objek berupa garis lintasan dapat diidentifikasi dengan jelas dan akurat.





Gambar 13. Hasil OCR dan GPS

Pada Gambar 13. kamera menangkap teks yang bertuliskan “TITIK”. Sistem OCR sempat membaca teks awal sebagai “leTIK”, namun melalui proses filtering dan koreksi, hasil akhirnya dikenali dengan benar menjadi “TITIK A”. Hal ini membuktikan bahwa OCR dapat digunakan sebagai penanda visual untuk mendeteksi titik lokasi atau persimpangan tertentu.

Dengan adanya penanda visual ini, AGV dapat melakukan identifikasi lokasi lokal secara langsung di lapangan. Tantangan yang masih muncul adalah tingkat keakuratan pembacaan OCR yang dipengaruhi oleh kualitas pencahayaan, jarak kamera dengan objek, serta kontras teks terhadap latar belakang. Selain OCR, sistem juga menampilkan data koordinat GPS. Pada contoh hasil pengujian, koordinat yang terdeteksi adalah:

- *Latitude: -7.0251*
- *Longitude: 110.4047*

Data GPS ini berfungsi sebagai penanda global yang menunjukkan posisi aktual AGV di lingkungan pengujian. Informasi GPS selanjutnya digunakan untuk memastikan bahwa AGV bergerak menuju lokasi yang sesuai dengan rute atau waypoint yang telah ditentukan.

#### 4. Simpulan

Penelitian ini mengembangkan dan menerapkan kendaraan otonom berpemandu (AGV) berbasis Raspberry Pi 4B yang dilengkapi dengan OpenCV untuk pengolahan gambar, OCR untuk mengenali tanda atau karakter pada rute, dan GPS sebagai sistem navigasi. Dengan menggabungkan ketiga teknologi ini, AGV dapat mendeteksi dan mengikuti jalur secara mandiri melalui pengolahan gambar dan menggunakan OCR untuk mendapatkan informasi tambahan tentang tanda atau karakter di lingkungan. Melakukan navigasi menuju tujuan yang telah ditentukan dengan bantuan GPS untuk mengetahui posisi dan arah pergerakannya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat melakukan tugas-tugas utama AGV dengan cukup akurat, seperti mendeteksi jalur, membaca karakter, dan menentukan koordinat lokasi. Meskipun demikian, ada beberapa keterbatasan yang masih perlu diperbaiki, seperti pengaruh sensor terhadap cahaya dan akurasi GPS di area tertutup. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penggabungan Raspberry Pi 4B, OpenCV, OCR, dan GPS dapat menjadi solusi yang efektif dan relatif murah untuk mengembangkan sistem kendaraan otonom skala kecil.

## 5. Daftar Pustaka

- Farkh, R., & Aljaloud, K. (2023). Vision navigation based PID control for line tracking robot. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 35(1), 901–911. <https://doi.org/10.32604/iasc.2023.027614>
- Justiadi, J., Hair, J., & Yusdianto, Y. (2019). Automated guided vehicle (AGV) pengikut garis menggunakan roda mecanum dengan kendali PID adaptif terinterpolasi. In *Seminar Nasional Kontrol, Instrumentasi dan Otomasi (SNIKO) 2018*. Pusat Teknologi Instrumentasi dan Otomasi ITB. <https://doi.org/10.5614/sniko.2018.42>
- Setiawan, F. B., Wijaya, O. J. A., Pratomo, L. H., & Riyadi, S. (2021, March). Sistem navigasi automated guided vehicle berbasis computer vision dan implementasi pada Raspberry Pi. *Jurnal Rekayasa Elektronika*, 17(1), 1–?. <https://doi.org/10.17529/jre.v17i1.18087>
- Shirmohammadi, S., & Baghbani, F. (2024, February). Design and implementation of a line follower robot. In *2024 10th International Conference on Artificial Intelligence and Robotics (QICAR)* (pp. 268–271). [10.1109/QICAR61538.2024.10496637](https://doi.org/10.1109/QICAR61538.2024.10496637)
- Setiawan, F. B., Kurnianingsih, F. A., Riyadi, S., & Pratomo, L. H. (2021, February). Pattern recognition untuk deteksi posisi pada AGV berbasis Raspberry Pi. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 10(1), 1–?. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v10i1.738>
- Audilina, A. R., Pangaribuan, P., & Wibowo, A. S. (2019). Perancangan sistem kendali pada prototipe AGV berbasis line follower menggunakan kontrol logika fuzzy [Design AGV prototype control system based on line follower using fuzzy logic control]. *e-Proceeding of Engineering*, 6(2), 2910–2916. [https://repositori.telkomuniversity.ac.id/pustaka/files/152457/jurnal\\_eproc/perancangan-sistem-kendali-pada-prototipe-agv-berbasis-line-follower-menggunakan-kontrol-logika-fuzzy.pdf](https://repositori.telkomuniversity.ac.id/pustaka/files/152457/jurnal_eproc/perancangan-sistem-kendali-pada-prototipe-agv-berbasis-line-follower-menggunakan-kontrol-logika-fuzzy.pdf)
- Jang, J. Y., Lee, H., & Kim, J. (2023). Automated Guided Vehicle (AGV) Driving System Using Vision Sensor and Color-Code Recognition. *Electronics*, 12(6), 1415. <https://doi.org/10.3390/electronics12061415>
- Fu, H., Hu, Y., Zhao, S., Zhu, J., & Liu, B. (2024). AGV monocular vision localization algorithm based on Gaussian saliency heuristic. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2024, Article 40. <https://doi.org/10.1186/s13634-024-01112-8>
- Ramasamy, P., & Kabadı, M. (2022). An autonomous navigational system using GPS and computer vision for futuristic road traffic. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(1), 179–188. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i1.pp179-188>
- Yingbo Z, Shichao X, Yuan H, Xinyu B. Study on automated guided vehicle navigation method with external computer vision. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2024;239(5):635-647. doi:10.1177/09544054241245476