

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian yang dilakukan oleh Cui *et al.* dengan judul *AGV Research Based on Inertial Navigation and Vision Fusion*, merancang sistem navigasi AGV indoor berbasis kombinasi navigasi inersia dan navigasi visual dengan memanfaatkan *Data Matrix (DM) code* sebagai modul koreksi akumulasi *error* navigasi. Sistem tersebut menggunakan *Inertial Measurement Unit (IMU)* sebagai sumber utama informasi orientasi dan pergerakan robot, sedangkan *Data Matrix (DM) code* digunakan untuk mengoreksi akumulasi *drift* pada sistem navigasi inersia. Namun, metode tersebut masih menempatkan navigasi inersia sebagai sistem utama dan sistem visual hanya berperan sebagai modul koreksi, sehingga sistem visual belum berfungsi sebagai referensi utama dalam estimasi posisi dan orientasi AGV [2].

Penelitian yang dilakukan oleh Pivoňka *et al.* dengan judul *Fiducial Marker-Based Monocular Localization for Autonomous Docking*, merancang sistem lokalisasi robot indoor berbasis *fiducial marker* menggunakan kamera monokular untuk kebutuhan *autonomous docking*. Sistem tersebut mampu memberikan estimasi posisi dan orientasi secara presisi pada jarak dekat. Namun, kinerja lokalisasi dipengaruhi oleh jarak pengamatan dan jumlah marker yang terdeteksi, sehingga penerapannya lebih optimal pada lokalisasi jarak dekat dibandingkan pada sistem navigasi AGV dengan cakupan area yang lebih luas [4].

Selanjutnya, terdapat penelitian yang dilakukan oleh Strässer *et al.* dengan judul *Collision Avoidance Safety Filter for an Autonomous E-Scooter using Ultrasonic Sensors*, menunjukkan bahwa penggunaan sensor ultrasonik sebagai *safety filter* efektif dalam meningkatkan keselamatan kendaraan otonom melalui deteksi rintangan jarak dekat dan pembatasan pergerakan untuk mencegah tabrakan. Namun, penelitian tersebut berfokus pada fungsi keselamatan dan tidak membahas penerapan sensor ultrasonik dalam sistem navigasi otonom berbasis visi

maupun dalam arsitektur navigasi yang memanfaatkan estimasi posisi dan orientasi [5].

Penelitian lain yang dilakukan Venkatesh *et al.* dengan judul, *Vision-Based Automated Guided Vehicle*, merancang sistem *Automated Guided Vehicle* berbasis visi dengan memanfaatkan ArUco marker sebagai *landmark* buatan untuk estimasi posisi dan orientasi robot. Sistem tersebut menggunakan kamera dan pemrosesan citra berbasis OpenCV untuk mendeteksi marker dan menentukan pergerakan robot berdasarkan informasi *pose* yang diperoleh. Metode ini menunjukkan bahwa navigasi berbasis marker visual dapat diterapkan pada lingkungan *indoor* tanpa menggunakan sistem pemetaan berbasis *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM). Namun, sistem yang dikembangkan sepenuhnya bergantung pada hasil deteksi visual marker dan tidak diintegrasikan dengan sistem keselamatan [8].

Kemudian terdapat penelitian yang dilakukan oleh Syed *et al.* [7] dengan judul *Definition of a Reference Standard for Performance Evaluation of Autonomous Vehicles Real time Obstacle Detection and Distance Estimation in Complex Environments* menunjukkan bahwa model tersebut mampu melakukan deteksi objek secara real time dengan tingkat akurasi yang baik sehingga mendukung proses persepsi lingkungan (*environment perception*) pada sistem navigasi otonom. Namun, penelitian tersebut menggunakan kamera RGB-D Intel RealSense D455 untuk memperoleh informasi kedalaman (*depth estimation*) dalam menentukan jarak objek. Penggunaan kamera RGB-D memberikan informasi kedalaman yang lebih akurat, tetapi membutuhkan *hardware* yang lebih kompleks dan biaya implementasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan kamera USB monokular yang dipadukan dengan sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai alternatif yang lebih sederhana dan ekonomis. Pada sistem yang dikembangkan, YOLOv8n berfungsi untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan objek penghalang berupa *human* dan *box*, sedangkan sensor ultrasonik digunakan untuk mengukur jarak objek terhadap AGV sebagai dasar pengambilan keputusan berhenti ketika jarak berada di bawah batas aman dan melanjutkan pergerakan ketika jalur kembali aman.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu yang telah diuraikan, dilakukan perbandingan terhadap metode, perangkat atau sensor yang digunakan, fokus pengujian, hasil yang diperoleh, serta keterbatasan masing-masing penelitian. Perbandingan tersebut digunakan untuk menunjukkan posisi dan perbedaan penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini. Matriks perbandingan penelitian terdahulu ditunjukkan pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Matriks Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti/ Tahun	Sensor & Metode	Hasil	Keterbatasan	Posisi Penelitian
Cui <i>et al.</i> (2021)	IMU, kamera, Data Matrix; <i>vision-inertial fusion</i>	Koreksi <i>drift</i> navigasi	Visual sebagai koreksi	ArUco sebagai referensi navigasi
Pivoňka <i>et al.</i> (2023)	Kamera, <i>fiducial marker</i> ; <i>monocular localization</i>	Estimasi pose dan <i>docking</i>	Dipengaruhi jarak pengamatan	ArUco untuk navigasi dan <i>parking</i>
Strässer <i>et al.</i> (2024)	Ultrasonik; <i>safety filter</i>	Deteksi rintangan	Belum terintegrasi dengan visi	HC-SR04 untuk <i>obstacle avoidance</i>
Venkatesh <i>et al.</i> (2023)	Kamera, ArUco; <i>vision-based navigation</i>	Navigasi berbasis marker	Bergantung deteksi marker	ArUco + YOLOv8n + HC-SR04
Syed <i>et al.</i> (2025)	RGB-D; deteksi objek	Deteksi dan estimasi jarak	Membutuhkan RGB-D	YOLOv8n + kamera monokular + HC-SR04

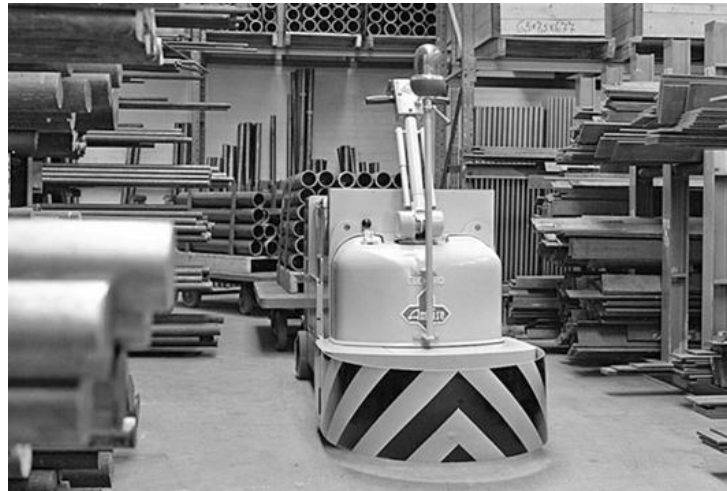
Berdasarkan keterbatasan pada beberapa penelitian terdahulu pada Tabel 2.1, penelitian ini merancang sistem *Automated Guided Vehicle (AGV) indoor* dengan navigasi *trackless* berbasis visi menggunakan kamera dan ArUco marker sebagai referensi estimasi posisi dan orientasi AGV. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa navigasi berbasis *inertial navigation* menjadikan AGV beroperasi tanpa *Global Positioning System (GPS)*, namun sistem visual pada pendekatan tersebut masih berperan sebagai modul koreksi terhadap akumulasi *drift* orientasi. Selain itu, lokalisasi berbasis *fiducial marker* menggunakan kamera monokular telah diterapkan untuk kebutuhan *autonomous docking* dengan struktur algoritma yang lebih sederhana dan kebutuhan komputasi yang lebih ringan, tetapi difokuskan pada lokalisasi jarak dekat. Di sisi lain, sensor ultrasonik telah dimanfaatkan sebagai

safety filter untuk meningkatkan keselamatan kendaraan otonom, namun berfokus pada fungsi pembatasan pergerakan dan tidak dikaitkan dengan sistem navigasi berbasis visi. Penelitian lain juga membuktikan navigasi berbasis marker visual efektif dalam lingkungan *indoor* tanpa pemetaan SLAM, namun sistem tersebut tidak menggunakan IMU sebagai sinyal *feedback* sistem. Selain itu, penelitian terdahulu membuktikan bahwa model YOLOv8n mampu melakukan deteksi objek secara *real time* dengan tingkat akurasi yang baik sehingga mendukung proses persepsi lingkungan (*environment perception*) pada kendaraan otonom. Akan tetapi, penelitian tersebut menggunakan kamera RGB-D Intel RealSense D455 untuk memperoleh informasi kedalaman (*depth estimation*) dalam menentukan jarak objek, sehingga membutuhkan *hardware* yang lebih kompleks dan biaya implementasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem AGV *indoor* dengan navigasi berbasis ArUco marker sebagai referensi estimasi posisi dan orientasi, dilengkapi YOLOv8n sebagai sistem deteksi rintangan, sensor ultrasonic sebagai *safety layer*, serta sistem kendali *closed-loop* yang memanfaatkan informasi orientasi dari *Inertial Measurement Unit* (IMU). Sistem yang dirancang tidak menggunakan algoritma *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM), melainkan menerapkan pendekatan navigasi berbasis *landmark* visual dalam arsitektur AGV *trackless*.

2. 2 Automated Guided Vehicle (AGV)

Automated Guided Vehicle (AGV) merupakan kendaraan transportasi yang dirancang untuk memindahkan material secara mandiri di dalam lingkungan industri dan logistik tanpa dikendalikan langsung oleh operator manusia. AGV beroperasi sebagai bagian dari *Automated Guided Vehicle System* (AGVS), yaitu suatu sistem terintegrasi yang terdiri atas kendaraan, sistem navigasi, sistem kendali, serta infrastruktur pendukung, sehingga proses material *handling* dapat berlangsung secara terkoordinasi dan terkontrol. AGVS berperan penting dalam sistem intralogistik karena mampu meningkatkan efisiensi distribusi material, menekan ketergantungan terhadap tenaga kerja manual, serta mendukung peningkatan keselamatan operasional [1].

Secara historis, konsep AGV pertama kali diperkenalkan pada awal 1950-an di Amerika Serikat. Di mana AGV sebagai solusi untuk menggantikan peran manusia pada kendaraan penarik barang di area industri. Pada tahap awal pengembangannya, sistem ini masih menggunakan mekanisme navigasi sederhana yang bergantung pada jalur fisik.



Gambar 2. 1 AGV sebagai Traktor Penarik [1]

Gambar 2.1 merupakan tampilan AGV pada awal tahap pengembangan yang menggunakan sistem pemandu sederhana berupa kawat induktif. Kawat ditanam di lantai serta sensor mekanik seperti bumper untuk mendeteksi rintangan. Sistem kontrol pada era ini masih sangat terbatas, di mana kendaraan bergerak mengikuti lintasan tetap tanpa kemampuan adaptasi terhadap perubahan lingkungan atau pengambilan keputusan secara mandiri [1].

Perkembangan teknologi AGV kemudian mengalami beberapa fase evolusi yang disebut sebagai epoch. Pada epoch kedua, yang berlangsung sekitar tahun 1970 hingga awal 1990-an, AGV mulai memanfaatkan kemajuan di bidang elektronik dan otomasi industri. Pada fase ini diperkenalkan penggunaan *Programmable Logic Controller* (PLC), sistem kontrol terpusat, serta komunikasi data melalui inframerah dan radio. Penerapan AGV pada periode ini didominasi oleh industri otomotif, khususnya untuk mendukung proses perakitan dan distribusi material dalam skala besar. Meskipun menunjukkan peningkatan produktivitas, sistem AGV pada fase ini masih memiliki keterbatasan dalam fleksibilitas lintasan serta memerlukan biaya tinggi ketika terjadi perubahan tata letak sistem [1].

Epoch ketiga yang berlangsung pada pertengahan 1990-an sampai sekitar 2010 menandai fase kematangan teknologi AGV dalam dunia intralogistik. Pada fase ini, AGV telah dilengkapi dengan sistem kontrol berbasis komputer, sensor non-kontak, serta metode navigasi yang lebih fleksibel seperti navigasi *magnetic*, *laser triangulation*, RFID, dan *contour navigation*. Penggunaan komunikasi nirkabel berbasis Wi-Fi memungkinkan koordinasi yang lebih cepat antara kendaraan dan sistem kontrol pusat. Pada tahap ini, AGV tidak lagi dipandang sebagai teknologi eksperimental, melainkan sebagai solusi intralogistik yang stabil, cepat, dan siap diimplementasikan secara luas di berbagai sektor industri [1].

Perkembangan terbaru memasuki epoch keempat, yang berlangsung sejak awal dekade 2010-an dan masih berlangsung hingga saat ini, di mana AGV mengalami peningkatan tingkat otonomi dan perluasan cakupan aplikasi di luar fungsi intralogistik. Pada epoch keempat, AGV tidak lagi hanya beroperasi sebagai kendaraan transportasi otomatis berbasis jalur tetap, tetapi berkembang menjadi sistem yang lebih fleksibel, adaptif, dan mampu mengambil keputusan secara mandiri. Pada epoch keempat, AGV tidak lagi hanya beroperasi sebagai kendaraan transportasi otomatis berbasis jalur tetap, tetapi berkembang menjadi sistem yang lebih fleksibel, adaptif, dan mampu mengambil keputusan secara mandiri.



Gambar 2. 2 AGV Swarm di Aula Uji Fraunhofer IMF, Dortmund (2011) [1]

Berdasarkan Gambar 2.2 merupakan salah satu konsep yang muncul pada epoch keempat, yaitu teknologi AGV berbasis *swarm*. AGV *swarm* adalah sekelompok AGV yang bekerja kolektif seperti kawanan (*swarm*), yang menyerupai perilaku kawanan (*swarm*) pada koloni semut atau lebah, AGV tersebut bergerak tanpa bergantung pada 1 pengendali pusat tunggal. Konsep AGV *swarm* tersebut telah diuji dalam teknologi transportasi seluler di aula uji Fraunhofer IML di Dortmund [1].

AGV modern tidak hanya digunakan pada lingkungan industri tertutup, tetapi juga mulai diterapkan pada lingkungan semi-publik dan publik. Tempat tersebut seperti rumah sakit, gudang fleksibel, dan fasilitas layanan, serta area yang melibatkan interaksi langsung dengan manusia. Hal ini menunjukkan kemajuan pada teknologi navigasi bebas jalur, sensor cerdas, komunikasi nirkabel, dan sistem keselamatan yang lebih adaptif [1].



Gambar 2. 3 Prinsip Kerja AGV Berbasis Layer [1]

Gambar 2.3 menunjukkan prinsip kerja navigasi AGV berbasis laser, di mana *laser scanner* yang dipasang di bagian atas kendaraan melakukan pemindaian lingkungan secara berputar. Hal tersebut bertujuan untuk mendeteksi struktur tetap seperti dinding dan langit-langit sebagai referensi penentuan posisi. Metode ini membuat AGV dapat bernavigasi bebas tanpa jalur dan tanpa ketergantungan pada jalur fisik di lantai.



Fig. 2.15 Multi-layer laser scanners, MRS1000 and LMS1000 on the left, VLP-16 Puck and AlphaPuck-VLS128 on the right. (Sources: Sick and Velodyne)

Gambar 2. 4 Multi-layer Laser Scanners [1]

Gambar 2.4 menunjukkan contoh *multi-layer laser scanner* yang digunakan pada sistem AGV untuk melakukan pemindaian lingkungan pada beberapa bidang ketinggian secara simultan. Berbeda dengan laser scanner satu lapis, sensor ini mampu mendeteksi objek pada level bawah, tengah, dan atas, sehingga memberikan informasi lingkungan yang lebih lengkap. Data dari beberapa lapisan pemindaian tersebut membuat AGV mengenali rintangan dengan berbagai dimensi, termasuk keberadaan manusia, rak, dan peralatan di sekitarnya. Kemampuan ini mendukung navigasi bebas jalur dan meningkatkan keselamatan operasional, khususnya pada lingkungan dinamis yang menjadi karakteristik AGV pada epoch keempat [1].

2.3 AGV Trackless

Automated Guided Vehicle trackless merupakan jenis AGV yang dirancang untuk beroperasi tanpa jalur pemandu kontinu seperti *line* atau *magnetic tape* yang dipasang pada lantai area operasional. Sistem AGV trackless menentukan arah dan tujuan pergerakan melalui sistem navigasi berbasis sensor, *landmark*, dan pemrosesan data. Di mana rute pergerakan dapat diubah secara fleksibel tanpa memerlukan perubahan infrastruktur fisik pada lingkungan operasional [9].

Pengembangan AGV trackless dilatarbelakangi oleh keterbatasan sistem AGV berbasis jalur tetap, khususnya pada lingkungan kerja yang sering mengalami perubahan tata letak peralatan. Pada sistem berbasis jalur, perubahan rute mengharuskan adanya modifikasi fisik pada lintasan navigasi yang berdampak pada meningkatnya biaya perawatan serta waktu henti sistem. Oleh karena itu, AGV *trackless* dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan menyediakan sistem navigasi yang lebih adaptif dan mudah dikonfigurasi ulang sesuai kebutuhan operasional [9].

AGV *trackless* umumnya diterapkan pada area dengan kebutuhan fleksibilitas rute yang tinggi dan tuntutan estetika area yang baik. AGV *trackless* banyak diterapkan pada fasilitas-fasilitas seperti manufaktur modern, gudang logistik, rumah sakit, perkantoran, kampus, dan area layanan publik lainnya. Tidak digunakannya jalur fisik pada lantai menjadikan area kerja lebih rapi serta mengurangi potensi gangguan operasional akibat kerusakan atau kotoran pada jalur navigasi [9].

Sistem navigasi pada AGV *trackless* memanfaatkan teknologi penentuan posisi lokal dan sensor lingkungan untuk menentukan posisi dan orientasi kendaraan secara real time. Teknologi yang umumnya digunakan pada AGV *trackless* mencakup berbagai metode, antara lain sistem berbasis kamera, sensor jarak, sensor inersia, serta teknologi penentuan posisi lokal. Metode tersebut membuat AGV dapat melakukan pergerakan *point to point* dengan tingkat akurasi yang tinggi dan memberikan kemudahan dalam proses perencanaan serta perubahan rute melalui sistem kendali terpusat [9].

Selain fleksibilitas navigasi, AGV *trackless* juga dirancang untuk meningkatkan aspek keselamatan dan efisiensi energi. Sistem ini memungkinkan integrasi berbagai sensor *safety* untuk mendeteksi keberadaan objek maupun manusia di sekitar area operasional. Dengan demikian, AGV *trackless* tidak hanya berfungsi sebagai alat transportasi otomatis, tetapi juga sebagai sistem transportasi cerdas yang mampu beroperasi secara aman, adaptif, dan efisien dalam area operasional yang dinamis.

2.4 Vision Based Navigation

Navigasi berbasis visi (*Vision Based Navigation*) merupakan metode navigasi pada robot bergerak yang memanfaatkan sensor kamera sebagai sumber utama informasi lingkungan. Kamera digunakan untuk membimbing robot menuju tujuan tertentu atau mengikuti lintasan yang telah ditentukan dengan tetap memperhatikan keberadaan rintangan. Pada metode ini, sistem visi komputer berperan sebagai komponen utama dalam proses akuisisi informasi lingkungan, penentuan keputusan navigasi, serta pengendalian pergerakan robot [10].

Dalam sistem navigasi berbasis visi, kamera berfungsi sebagai sensor pasif yang menangkap citra lingkungan tanpa memancarkan sinyal atau gelombang aktif ke sekitarnya. Citra yang diperoleh selanjutnya diproses menggunakan teknik visi komputer untuk mengekstraksi informasi penting, seperti fitur visual, *landmark*, dan struktur geometris lingkungan. Informasi visual tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan posisi robot, arah pergerakan, serta strategi navigasi yang sesuai dengan kondisi lingkungan [10].

Secara umum, sistem navigasi berbasis visi terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu representasi lingkungan, akuisisi data visual, ekstraksi fitur, pengenalan *landmark*, dan lokalisasi. Representasi lingkungan berfungsi untuk menyimpan informasi spasial hasil pengamatan visual. Tahap akuisisi data dilakukan melalui pengambilan citra oleh kamera, sedangkan tahap ekstraksi fitur bertujuan memperoleh ciri visual yang relevan, seperti tepi, tekstur, dan pola visual tertentu. Informasi fitur tersebut kemudian dimanfaatkan dalam proses pengenalan *landmark* serta penentuan posisi robot di dalam lingkungan operasional [10].

Permasalahan navigasi robot bergerak berbasis visi secara umum dapat dibagi menjadi empat subpermasalahan utama, yaitu *world perception*, *path planning*, *path generation*, dan *path tracking*. *World perception* bertujuan mengubah data visual mentah menjadi representasi lingkungan yang dapat diproses oleh sistem. *Path planning* digunakan untuk menentukan urutan titik tujuan yang harus dicapai robot, sedangkan *path generation* menghasilkan lintasan pergerakan yang dapat diikuti. Selanjutnya, *path tracking* berfungsi memastikan robot bergerak sesuai lintasan yang telah direncanakan melalui sistem kendali gerak [10].

Dalam navigasi *indoor*, navigasi berbasis visi dapat diklasifikasikan menjadi navigasi berbasis peta, navigasi berbasis pembentukan peta, dan *mapless navigation*. Metode *mapless navigation* memanfaatkan informasi visual yang diperoleh secara langsung dari lingkungan untuk mengambil keputusan navigasi secara reaktif tanpa memerlukan peta awal. Metode ini banyak diterapkan pada sistem AGV *trackless* karena memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap perubahan lingkungan secara dinamis serta tidak bergantung pada jalur fisik permanen [10].

2.5 ArUco Marker

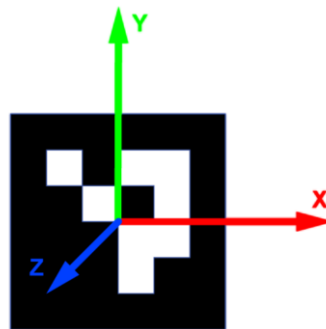
ArUco merupakan sistem *fiducial marker* yang digunakan dalam bidang visi komputer untuk mendukung proses pendeteksian objek serta perhitungan posisi dan orientasi terhadap kamera. Nama ArUco berasal dari istilah *Augmented Reality* dan *Universidad de Córdoba*, institusi yang menjadi pencetus dan pengembang sistem tersebut. Sistem ArUco menyediakan *marker* visual buatan berbentuk persegi beserta *library* perangkat lunak yang memungkinkan proses identifikasi *marker* dan estimasi pose. Dalam aplikasi robot bergerak, ArUco banyak dimanfaatkan sebagai referensi visual karena mampu menyediakan informasi posisi dan orientasi dengan tingkat kompleksitas komputasi yang rendah [11].



Gambar 2. 5 ArUco [11]

Berdasarkan Gambar 2.5 merupakan bentuk dan struktur ArUco marker, yang memiliki struktur monokromatik yang terdiri atas bingkai hitam tebal dan pola biner di bagian dalamnya. Pola biner tersebut merepresentasikan identitas unik (ID) setiap *marker*, sehingga sistem tidak hanya mampu mendeteksi keberadaan *marker*, tetapi juga membedakan *marker* satu dengan yang lain. ArUco *marker* sendiri termasuk dalam kategori *fiducial marker*, yaitu objek referensi visual buatan yang dirancang agar mudah dikenali oleh sistem pengolahan citra.

Pada proses deteksi, kamera terlebih dahulu mendeteksi empat titik sudut (*corner*) marker. Selanjutnya pola biner yang terdapat pada marker dibandingkan dengan *dictionary* ArUco untuk memperoleh identitas marker. Setelah marker dikenali, koordinat empat titik sudut digunakan sebagai masukan dalam proses *pose estimation* untuk menghitung hubungan geometris antara marker dan kamera [11].



Gambar 2. 6 Koordinat ArUco Marker [11]

Berdasarkan Gambar 2.6 pada sistem ArUco setiap *marker* didefinisikan memiliki sistem koordinat tiga dimensi yang terikat pada bidang *marker*. Sistem koordinat terdiri atas sumbu X, Y, dan Z yang terikat pada bidang marker (*marker coordinate frame*), sedangkan kamera memiliki sistem koordinat tersendiri (*camera coordinate frame*). Hubungan antara kedua sistem koordinat tersebut dihitung

melalui proses *pose estimation*. Nilai *translation vector* (*tvec*) merepresentasikan posisi marker terhadap kamera pada sumbu X, Y, dan Z. Sumbu X menunjukkan posisi horizontal marker, sumbu Y menunjukkan posisi vertikal marker, sedangkan sumbu Z menunjukkan jarak marker terhadap kamera [11].

Informasi orientasi marker diperoleh dari *rotation vector* (*rvec*). Nilai *rvec* belum dapat diinterpretasikan secara langsung sebagai sudut orientasi, sehingga terlebih dahulu dikonversi menjadi *rotation matrix* menggunakan transformasi Rodrigues (*Rodrigues Transformation*). Selanjutnya *rotation matrix* dikonversi menjadi sudut Euler yang terdiri atas θ_x (θ_x), θ_y (θ_y), dan θ_z (θ_z). Sudut θ_x menunjukkan rotasi terhadap sumbu X, θ_y menunjukkan rotasi terhadap sumbu Y, sedangkan θ_z menunjukkan rotasi terhadap sumbu Z [11]

Waypoint merupakan metode navigasi yang menggunakan sejumlah titik acuan (*waypoint*) sebagai lintasan yang harus dilalui robot untuk mencapai tujuan. Pada metode ini, robot bergerak secara berurutan dari satu waypoint menuju waypoint berikutnya hingga mencapai titik tujuan. Setiap waypoint memiliki identitas atau koordinat tertentu sehingga sistem dapat menentukan urutan navigasi yang harus diikuti [11]. Pada sistem navigasi berbasis ArUco, setiap marker berfungsi sebagai waypoint sekaligus *landmark* visual. Ketika kamera mendeteksi marker, sistem melakukan proses identifikasi ID marker dan estimasi pose untuk memperoleh posisi serta orientasi marker terhadap kamera. Informasi tersebut digunakan untuk mengetahui apakah robot telah mencapai waypoint yang dituju sebelum melanjutkan perjalanan menuju waypoint berikutnya.

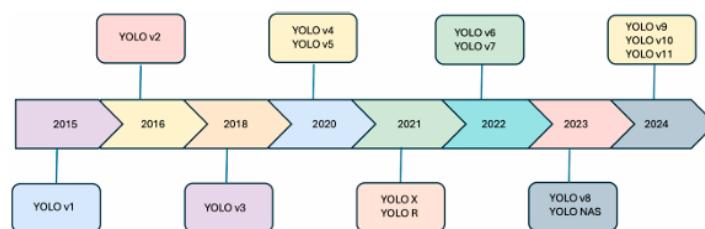
2.6 You Only Look Once (YOLO)

You Only Look Once (YOLO) merupakan algoritma deteksi objek berbasis *deep learning* yang termasuk ke dalam kategori *single stage object detector*, yaitu YOLO dirancang untuk melakukan prediksi lokasi objek dalam bentuk *bounding box* dan klasifikasi objek secara bersamaan melalui satu proses pemrosesan citra. Metode ini membedakan YOLO dari metode *two stage detector* yang memisahkan proses pembentukan *region proposal* dan tahap klasifikasi, sehingga YOLO memiliki keunggulan dalam efisiensi komputasi dan waktu tunda respons pemrosesan yang rendah. Oleh karena itu, YOLO banyak digunakan pada aplikasi

yang menuntut kinerja real time, seperti sistem kendaraan otonom, robotika, dan sistem pemantauan berbasis visi [12].

Secara umum, YOLO bekerja dengan membagi citra masukan menjadi beberapa *grid cell*, kemudian setiap sel bertanggung jawab untuk memprediksi keberadaan objek, koordinat *bounding box*, serta probabilitas kelas objek. Prediksi tersebut dihasilkan melalui arsitektur *Convolutional Neural Network* (CNN) yang mengekstraksi fitur spasial secara hierarkis sesuai tingkat kompleksitas pola pada citra. Hasil deteksi selanjutnya disaring menggunakan metode *Non-Maximum Suppression* (NMS) mengeliminasi *bounding box* dengan nilai *Intersection over Union* (IoU) yang melebihi nilai *threshold* yang telah ditetapkan serta mempertahankan prediksi dengan nilai *confidence* maksimum [12].

Perkembangan algoritma YOLO mengalami peningkatan secara bertahap sejak versi awal hingga versi terbaru. Setiap versi memperkenalkan penyempurnaan pada arsitektur jaringan yang digunakan dalam proses deteksi objek. Selain itu, dilakukan strategi *training* dengan tujuan meningkatkan ketelitian deteksi dan kestabilan hasil prediksi.



Gambar 2. 7 Timeline Model YOLO dari 2015 hingga 2023 [14]

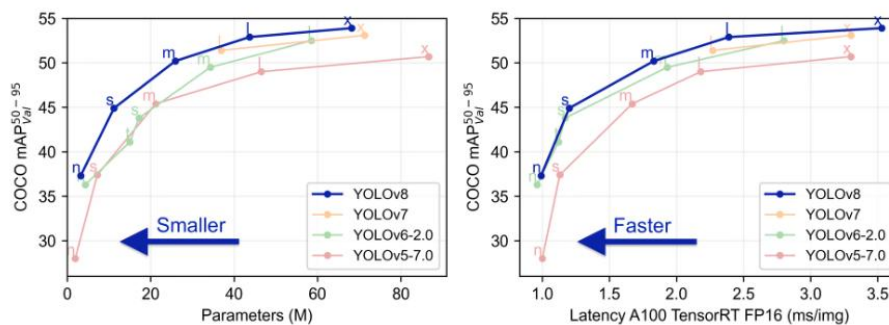
Berdasarkan Gambar 2.7 terlihat perkembangan model YOLO dari tahun 2015 hingga 2023. Gambar tersebut menunjukkan evolusi arsitektur model dari versi awal hingga versi terbaru. Perkembangan tersebut terjadi seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan akurasi deteksi dan efisiensi komputasi pada berbagai aplikasi berbasis visi [12].

Pada tahap awal pengembangannya, YOLO lebih menekankan kecepatan pemrosesan, namun masih memiliki keterbatasan dalam mendeteksi objek berukuran kecil serta objek dengan variasi bentuk dan skala yang kompleks. Pengembangan pada versi selanjutnya menerapkan metode prediksi berbasis *anchor box*, penggabungan fitur dari berbagai skala, serta perbaikan fungsi

kerugian (*loss function*) presisi lokalisasi dan akurasi klasifikasi objek. Perkembangan tersebut menunjukkan adanya pergeseran fokus dari kecepatan pemrosesan menuju keseimbangan antara kecepatan dan ketelitian deteksi [12].

2.6.1 YOLOv8

YOLOv8 memiliki arsitektur yang terdiri atas tiga bagian utama, yaitu *backbone*, *neck*, dan *detection head*. *Backbone* bertugas mengekstraksi fitur dari citra masukan pada beberapa tingkat abstraksi. Pada bagian ini digunakan modul C2f untuk melakukan ekstraksi dan penggabungan fitur secara efisien. Modul *Spatial Pyramid Pooling Fast* (SPPF) digunakan untuk memperluas informasi konteks dari fitur yang diperoleh tanpa memberikan peningkatan beban komputasi yang besar. Selanjutnya, bagian *neck* menggabungkan fitur dari beberapa tingkat resolusi menggunakan struktur *Feature Pyramid Network* (FPN) dan *Path Aggregation Network* (PAN), sehingga informasi dari objek dengan ukuran berbeda dapat digunakan pada proses deteksi. Bagian terakhir adalah *detection head* yang menghasilkan prediksi lokasi *bounding box*, kelas objek, dan nilai *confidence* menggunakan pendekatan *anchor free* [13].



Gambar 2.8 Grafik Perbandingan Performa [14]

Berdasarkan Gambar 2.8, ditunjukkan perbandingan kinerja YOLOv8 dengan beberapa versi YOLO sebelumnya. Pada grafik sebelah kiri terlihat hubungan antara jumlah parameter model dan tingkat ketelitian deteksi, di mana YOLOv8 mampu mencapai nilai mAP (*mean Average Precision*) yang tinggi dengan jumlah parameter yang relatif lebih kecil dibandingkan sebagian versi sebelumnya. Hal ini menunjukkan adanya efisiensi arsitektur yang lebih baik dalam memanfaatkan parameter jaringan. Sementara itu, pada grafik sebelah kanan ditunjukkan hubungan antara tingkat ketelitian deteksi dan *latency*. YOLOv8 mampu

mempertahankan nilai mAP yang tinggi dengan *latency* yang lebih rendah, yang menunjukkan peningkatan efisiensi waktu pemrosesan. Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa YOLOv8 mampu mencapai keseimbangan antara kompleksitas model, akurasi deteksi, dan kecepatan pemrosesan [13].

YOLOv8 memiliki beberapa varian model, yaitu YOLOv8n (*Nano*), YOLOv8s (*Small*), YOLOv8m (*Medium*), YOLOv8l (*Large*), dan YOLOv8x (*Extra Large*). Setiap varian memiliki perbedaan jumlah parameter dan kebutuhan komputasi yang berpengaruh terhadap kecepatan inferensi serta kemampuan deteksi. YOLOv8n merupakan varian dengan ukuran model paling ringan sehingga memiliki kebutuhan sumber daya komputasi yang lebih rendah dibandingkan varian lainnya. Model YOLOv8n memiliki sekitar 3,2 juta parameter dan kebutuhan komputasi sekitar 8,7 GFLOPs pada konfigurasi deteksi COCO [13].

2.7 Arsitektur High-Level dan Low-Level Controller

Arsitektur high-level dan low-level controller merupakan pembagian fungsi kendali berdasarkan tingkat pemrosesan dalam suatu sistem. High-level controller bertugas melakukan pemrosesan tingkat tinggi, seperti pengolahan informasi, pengambilan keputusan, dan penentuan perintah navigasi. Sementara itu, low-level controller bertugas menjalankan perintah tersebut melalui pembacaan sensor dan pengendalian aktuator. [15].

Dalam sistem Automated Guided Vehicle (AGV) yang dirancang, Raspberry Pi 5 berperan sebagai high-level controller yang melakukan pemrosesan visi komputer, meliputi deteksi marker ArUco dan objek menggunakan YOLOv8n, serta menentukan informasi yang diperlukan dalam proses navigasi. ESP32-S3 berperan sebagai low-level controller yang mengolah data sensor HC-SR04 dan TCRT5000 serta mengendalikan aktuator motor. Pembagian fungsi tersebut memungkinkan pemrosesan visi dan pengambilan keputusan navigasi dilakukan pada Raspberry Pi 5, sedangkan pembacaan sensor dan pengendalian aktuator dilakukan oleh ESP32-S3 secara terkoordinasi.

2.7.1 Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)

Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) merupakan protokol komunikasi serial asinkron dengan konfigurasi point-to-point.

Komunikasi UART tidak menggunakan sinyal clock bersama, tetapi menggunakan start bit dan stop bit sebagai penanda awal dan akhir data. UART mendukung komunikasi dua arah sehingga data dapat dikirim dan diterima antara dua perangkat yang terhubung [15].

Pada sistem AGV yang dirancang, komunikasi antara Raspberry Pi 5 dan ESP32-S3 dilakukan menggunakan UART secara dua arah (bidirectional). Raspberry Pi 5 melakukan pemrosesan visi menggunakan USB camera, kemudian mengirimkan informasi dan perintah navigasi kepada ESP32-S3. Selanjutnya, ESP32-S3 mengolah perintah tersebut serta mengirimkan data status dan sensor kembali kepada Raspberry Pi 5. Komunikasi tersebut mendukung pembagian fungsi antara high-level controller dan low-level controller dalam sistem AGV.

2.8 Raspberry Pi

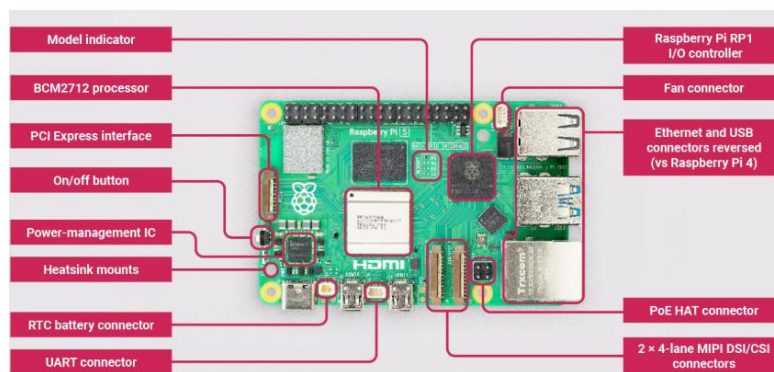
Raspberry Pi merupakan sebuah komputer papan tunggal (*single board computer*) yang pertama kali diluncurkan pada tahun 2012 oleh Raspberry Pi Foundation, yang dirancang untuk menggabungkan seluruh komponen utama komputer pada satu *Printed Circuit Board* (PCB), sehingga menghasilkan sistem komputasi dengan dimensi yang kecil. Dalam satu papan tersebut telah terpasang prosesor, memori, antarmuka I/O, serta antarmuka komunikasi. Raspberry Pi dikembangkan untuk mendukung pembelajaran, pengembangan sistem komputasi, dan aplikasi *embedded* yang memerlukan perangkat komputasi berukuran kecil namun fungsional [16].

Sebagai komputer papan tunggal, Raspberry Pi mampu menjalankan sistem operasi berbasis Linux. Selain itu, Raspberry Pi menyediakan berbagai antarmuka perangkat keras seperti port USB, port tampilan HDMI, antarmuka jaringan, serta pin *General Purpose Input/Output* (GPIO). Ketersediaan antarmuka tersebut menjadikan Raspberry Pi digunakan pada berbagai aplikasi, termasuk otomasi, robotika, dan sistem kendali berbasis komputer [16].

2.8.1 Raspberry Pi 5

Raspberry Pi 5 merupakan salah satu varian komputer papan tunggal yang dikembangkan oleh Raspberry Pi. Model ini dirancang dengan menggabungkan seluruh komponen utama komputer pada satu *Printed Circuit Board* (PCB),

sehingga membentuk sistem komputasi berukuran kecil yang dapat menjalankan sistem operasi dan aplikasi berbasis Linux. Arsitektur ini menjadikan Raspberry Pi 5 digunakan sebagai platform komputasi umum maupun sebagai pengendali utama pada sistem *embedded* [17].



Gambar 2. 9 Raspberry Pi 5 Tampak Depan [18]



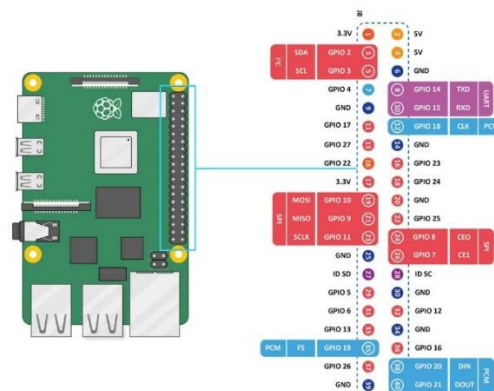
Gambar 2. 10 Raspberry Pi 5 Tampak Belakang [18]

Berdasarkan Gambar 2.9 dan Gambar 2.10, Raspberry Pi 5 merupakan komputer papan tunggal (*single board computer*) yang mengintegrasikan unit pemrosesan pusat, memori utama, serta antarmuka *input/output* (I/O) dalam satu papan sirkuit. Perangkat ini menggunakan prosesor Broadcom BCM2712 berbasis arsitektur Arm Cortex-A76 64-bit quad-core dengan frekuensi operasi hingga 2,4 GHz. Dibandingkan generasi sebelumnya, peningkatan arsitektur prosesor tersebut memberikan kemampuan komputasi yang lebih tinggi sehingga mampu menangani aplikasi dengan kebutuhan pemrosesan yang kompleks, seperti visi komputer, kecerdasan buatan, dan sistem robotika secara *real time* [17].

Raspberry Pi 5 tersedia dalam beberapa pilihan kapasitas memori LPDDR4X SDRAM, yaitu 2 GB, 4 GB, 8 GB, dan 16 GB, sehingga pengguna dapat menyesuaikan kapasitas memori sesuai kebutuhan aplikasi. Media penyimpanan utama menggunakan kartu microSD yang berfungsi sebagai media instalasi sistem operasi dan penyimpanan data aplikasi. Selain itu, Raspberry Pi 5 juga

menyediakan antarmuka PCI Express 2.0 satu jalur (PCIe 2.0 x1) melalui konektor FFC yang memungkinkan penambahan perangkat eksternal seperti SSD NVMe maupun akselerator AI [17].

Pada bagian antarmuka perangkat keras, Raspberry Pi 5 dilengkapi dengan dua port USB 3.0 berkecepatan 5 Gbps dan dua port USB 2.0 yang dapat digunakan untuk menghubungkan berbagai perangkat eksternal, seperti kamera, media penyimpanan tambahan, dan modul komunikasi. Selain itu, tersedia dua port micro-HDMI yang mendukung keluaran video hingga resolusi 4Kp60 pada dua layar secara simultan. Untuk komunikasi jaringan, Raspberry Pi 5 memiliki port Gigabit Ethernet, modul Wi-Fi IEEE 802.11ac dual-band (2,4 GHz dan 5 GHz), serta Bluetooth 5.0 dengan Bluetooth Low Energy (BLE) yang mendukung komunikasi nirkabel dengan perangkat lain [17].



Gambar 2. 11 Raspberry Pi 5 Pinout [19]

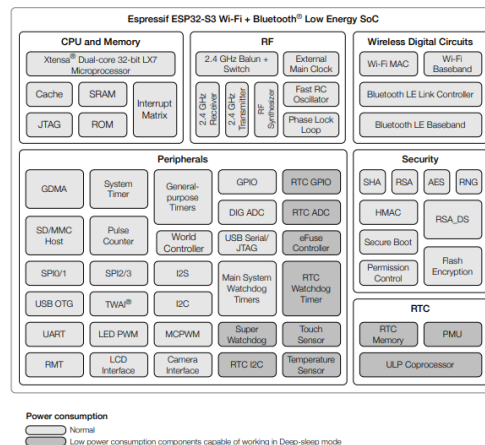
Antarmuka General Purpose Input/Output (GPIO) pada Raspberry Pi 5 ditunjukkan pada Gambar 2.11 dalam bentuk header 40 pin yang kompatibel dengan generasi Raspberry Pi sebelumnya. Pin-pin GPIO tersebut dapat dikonfigurasi sebagai masukan maupun keluaran digital, serta mendukung protokol komunikasi serial seperti UART, I2C, SPI, dan PWM. Selain itu, Raspberry Pi 5 dilengkapi dengan RP1 I/O Controller yang dirancang untuk menangani fungsi antarmuka dan komunikasi perifer. Dengan adanya antarmuka GPIO dan pengendali I/O tersebut, Raspberry Pi 5 dapat berinteraksi secara langsung dengan berbagai sensor dan aktuator. Untuk lebih jelasnya lagi, berikut adalah spesifikasi Raspberry Pi 5 [17], seperti pada Tabel 2.2 di bawah.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Raspberry Pi 5

Spesifikasi	Keterangan
Sistem pada Chip (<i>System on Chip</i>)	Broadcom BCM2712
Central Processing Unit (CPU)	Quad-core Arm Cortex-A76 64-bit dengan frekuensi hingga 2,4 GHz
Level 2 Cache (L2 Cache)	512 KB pada setiap inti prosesor
Level 3 Cache (L3 Cache)	2 MB <i>shared cache</i>
Unit Pemrosesan Grafis (GPU)	VideoCore VII
Application Programming Interface (API) Grafis	OpenGL ES 3.1 dan Vulkan 1.2
Video Decoder	Hardware HEVC 4Kp60 Decoder
Random Access Memory (RAM)	LPDDR4X-4267 SDRAM (2 GB, 4 GB, 8 GB, dan 16 GB)
Media Penyimpanan (<i>storage</i>)	Slot microSD dengan dukungan SDR104 High-Speed Mode
Universal Serial Bus (USB)	2 × USB 3.0 (5 Gbps) dan 2 × USB 2.0
High Definition Multimedia Interface (HDMI)	2 × Micro-HDMI dengan dukungan dual display 4Kp60
Ethernet	Gigabit Ethernet dengan dukungan PoE+ HAT
Wireless Fidelity (Wi-Fi)	IEEE 802.11ac dual-band (2,4 GHz dan 5 GHz)
Bluetooth	Bluetooth 5.0 dan Bluetooth Low Energy (BLE)
Peripheral Component Interconnect Express (PCIe)	PCIe 2.0 ×1 melalui konektor FFC
Camera Serial Interface (CSI)	2 × 4-lane MIPI CSI/DSI transceiver
General Purpose Input Output (GPIO)	Header GPIO 40 pin
Real Time Clock (RTC)	RTC internal dengan konektor baterai eksternal
Input/Output Controller	RP1 I/O Controller
Catu Daya	5 V / 5 A melalui USB Type-C dengan Power Delivery
Dimensi	85 mm × 56 mm

2. 9 Mikrokontroler ESP32-S3

ESP32-S3 merupakan sebuah *microcontroller* berbasis *System on Chip* (SoC) yang dikembangkan oleh Espressif Systems sebagai platform mikrokontroler dengan kemampuan komunikasi nirkabel. ESP32-S3 menggabungkan unit pemrosesan, memori internal, komunikasi Wi-Fi dan Bluetooth, serta berbagai antarmuka digital dan analog dalam satu chip. Hal tersebut menjadikan ESP32-S3 banyak digunakan pada sistem tertanam (*embedded system*) yang memerlukan konektivitas jaringan dan pemrosesan data lokal [20].



Gambar 2. 12 ESP32-S3 Functional Block Diagram [20]

Berdasarkan Gambar 2.12, ESP32-S3 dirancang dengan konsep *System on Chip* (SoC), yaitu seluruh komponen utama seperti prosesor, memori, modul komunikasi, dan antarmuka periferil terintegrasi dalam satu chip. Arsitektur ini memungkinkan proses pengolahan data, komunikasi, dan pengendalian perangkat eksternal dilakukan secara efisien tanpa memerlukan banyak komponen tambahan [20].

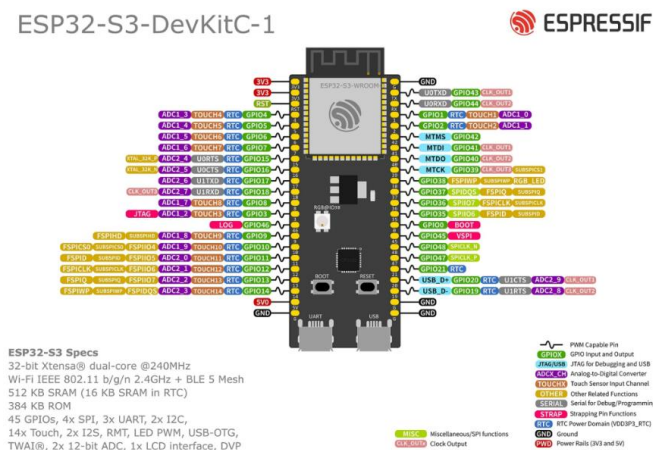
Bagian pemrosesan ESP32-S3 menggunakan arsitektur Xtensa® Dual-Core 32-bit LX7 yang terdiri atas dua inti prosesor dengan kecepatan hingga 240 MHz. Kedua inti prosesor dapat menjalankan tugas aplikasi dan tugas sistem secara bersamaan melalui mekanisme *task scheduling* pada sistem operasi *Real time Operating System* (RTOS). Dengan mekanisme tersebut, beban komputasi dapat dibagi sesuai prioritas sehingga kinerja sistem menjadi lebih optimal [20].

Memori internal ESP32-S3 terdiri atas *Read Only Memory* (ROM) dan *Static Random Access Memory* (SRAM). ROM digunakan untuk proses *boot* dan penyimpanan firmware dasar, sedangkan SRAM berfungsi sebagai memori kerja selama proses eksekusi program dan pengolahan data. Selain itu, ESP32-S3 juga mendukung penggunaan memori Flash dan PSRAM eksternal untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan dan kinerja aplikasi [20].

Pada bagian komunikasi, ESP32-S3 telah dilengkapi modul Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n pada frekuensi 2,4 GHz serta Bluetooth 5 Low Energy (BLE). Integrasi kedua modul komunikasi tersebut memungkinkan pertukaran data secara nirkabel tanpa memerlukan modul komunikasi eksternal [20].

ESP32-S3 juga menyediakan berbagai antarmuka periferil yang terhubung melalui jalur internal SoC. Antarmuka digital meliputi *General Purpose Input/Output* (GPIO), *Universal Asynchronous Receiver Transmitter* (UART), *Serial Peripheral Interface* (SPI), *Inter-Integrated Circuit* (I²C), *Inter-IC Sound* (I²S), USB OTG, dan TWAI (CAN). Sementara itu, periferil analog yang tersedia meliputi *Analog-to-Digital Converter* (ADC), *Pulse Width Modulation* (PWM), sensor sentuh kapasitif (*touch sensor*), dan sensor suhu internal. Beragam periferil tersebut memungkinkan ESP32-S3 digunakan sebagai pengendali utama untuk membaca sensor, mengendalikan aktuator, serta berkomunikasi dengan perangkat lain pada sistem AGV [21].

Berikut adalah tampilan pinout dari ESP32-S3 seperti pada Gambar 2.13 di bawah ini [21].



Gambar 2. 13 Pinout ESP32-S3

ESP32-S3 juga memiliki beberapa spesifikasi seperti tampak pada tabel 2.3 di bawah ini.

Tabel 2. 3 Spesifikasi ESP32

Spesifikasi	Keterangan
Mikrokontroler Unit (MCU)	Xtensa dual-core 32-bit LX7
Kecepatan Clock	Hingga 240 MHz
Kinerja	Hingga 512 DMIPS
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n (2,4 GHz)
Bluetooth	Bluetooth 5.0 Low Energy (BLE)
SRAM	512 kB SRAM internal
PSRAM	8 MB
Memori Flash	16 MB SPI Flash

Spesifikasi	Keterangan
GPIO (General Purpose Input/Output)	Hingga 45 GPIO (bergantung pada board)
PWM (LEDC)	8 channel (hingga 16 output PWM)
SPI / I ² C / I ² S / UART	4 / 2 / 2 / 3
ADC (Analog to Digital Converter)	12-bit
USB	USB 1.1 OTG
TWAI (CAN)	1 Controller
Touch Sensor	Ya (14 kanal kapasitif)
Temperature Sensor	Ya (internal)
Working Temperature	-40 °C hingga 105 °C

2. 10 Sensor Ultrasonik

Sensor ultrasonik HC-SR04 merupakan modul pengukur jarak yang bekerja dengan prinsip pemancaran dan penerimaan gelombang ultrasonik untuk menentukan jarak suatu objek. Modul ini dirancang untuk menghasilkan sinyal jarak berbasis waktu tempuh gelombang ultrasonik. HC-SR04 banyak digunakan pada sistem robot bergerak sebagai sensor pendeteksi rintangan jarak dekat hingga menengah [22].

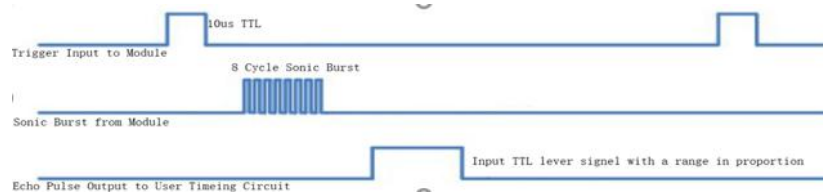


Gambar 2. 14 Sensor Ultrasonik [22]

Berdasarkan Gambar 2.14, tampilan fisik modul menunjukkan dua elemen sensor ultrasonik yang terpasang berdampingan, yaitu *ultrasonic transmitter* dan *ultrasonic receiver*. *Ultrasonic transmitter* berfungsi memancarkan gelombang ultrasonik, sedangkan *ultrasonic receiver* berfungsi menangkap gelombang pantul yang kembali setelah mengenai objek. Pada modul juga terlihat empat pin utama yang masing-masing berfungsi sebagai VCC, Trigger, Echo, dan GND [22].

Modul HC-SR04 bekerja dengan cara menerima *trigger pulse* berupa pulsa TTL pada pin Trigger. *Trigger pulse* yang diberikan memiliki lebar pulsa sebesar 10 μ s. Setelah *trigger pulse* diterima, modul akan mengaktifkan *ultrasonic transmitter* untuk memancarkan delapan siklus gelombang ultrasonik secara

berurutan pada frekuensi kerja 40 kHz. Gelombang ultrasonik tersebut merambat melalui udara, mengenai objek yang berada di depan sensor, kemudian dipantulkan kembali menuju *ultrasonic receiver*.



Gambar 2. 15 Diagram Waktu Sinyal Ultrasonik [22]

Berdasarkan Gambar 2.15 diagram waktu sinyal memperlihatkan keterkaitan antara *Trigger signal*, *sonic burst* yang dipancarkan oleh modul, dan *Echo signal* yang dihasilkan. Setelah gelombang pantul diterima oleh *ultrasonic receiver*, modul menghasilkan *logic high level* pada pin *Echo*. Lebar pulsa *echo signal* merepresentasikan interval waktu rambat gelombang ultrasonik dari sensor menuju objek dan kembali ke sensor. Oleh karena itu, durasi pulsa *Echo signal* memiliki hubungan linier dengan jarak objek yang terukur [22].

Perhitungan jarak dilakukan berdasarkan interval waktu rambat gelombang ultrasonik dan nilai kecepatan rambat bunyi di udara. Interval waktu yang direpresentasikan oleh *echo signal* merupakan waktu tempuh total gelombang ultrasonik sejak dipancarkan oleh *ultrasonic transmitter*, dipantulkan oleh objek, hingga diterima kembali oleh *ultrasonic receiver*. Karena gelombang ultrasonik menempuh lintasan 2 arah, yaitu dari sensor ke objek dan kembali ke sensor, maka nilai interval waktu tersebut dibagi 2 untuk memperoleh jarak 1 arah antara sensor dan objek [22].

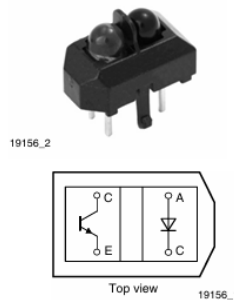
Tabel 2. 4 *Electric Parameter Tabel Ultrasonic Sensor*

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Kerja (<i>Working Voltage</i>)	DC 5 V
Arus Kerja (<i>Working Current</i>)	15 mA
Frekuensi Kerja (<i>Working Frequency</i>)	40 kHz
Jarak Maksimum	4 m
Jarak Minimum	2 cm
Sudut Pengukuran (<i>Measuring Angle</i>)	15°
Sinyal Masukan Trigger	Pulsa TTL 10 μ s
Sinyal Keluaran Echo	Sinyal level TTL dengan durasi pulsa berbanding lurus terhadap jarak
Dimensi Modul	45 mm $\times$ 20 mm $\times$ 15 mm

Berdasarkan Tabel 2.4 sensor HC-SR04 bekerja pada tegangan DC 5 V dengan arus kerja sebesar 15 mA. Sensor memiliki jarak pengukuran minimum 2 cm dan jarak pengukuran maksimum hingga 4 m, dengan sudut pengukuran sekitar 15°. Frekuensi kerja gelombang ultrasonik yang digunakan adalah 40 kHz, sedangkan dimensi fisik modul sebesar 45 $\times$ 20 $\times$ 15 mm. Spesifikasi tersebut menunjukkan bahwa HC-SR04 dirancang untuk pengukuran jarak dekat hingga menengah dengan sinyal keluaran berbasis TTL yang mudah diintegrasikan dengan sistem digital [22].

2. 11 Sensor TCRT5000

Sensor TCRT5000 merupakan sensor optik inframerah berbasis pantulan cahaya yang dikembangkan oleh Vishay Intertechnology untuk aplikasi deteksi jarak pendek pada sistem otomasi dan robotika. Sensor ini banyak digunakan pada modul *line follower* karena kemampuannya mendeteksi perbedaan karakteristik pantulan permukaan berdasarkan intensitas cahaya inframerah yang diterima. Karakteristik tersebut menjadikan sensor ini sesuai untuk sistem navigasi robot bergerak yang memerlukan deteksi lintasan tanpa kontak fisik dengan permukaan [23].



Gambar 2. 16 Sensor TCRT5000 [23]

Gambar 2.16 menunjukkan bentuk fisik sensor TCRT5000. Berdasarkan gambar tersebut, TCRT5000 terdiri atas satu LED inframerah sebagai pemancar dan satu fototransistor sebagai penerima yang terdapat dalam satu kemasan. Konfigurasi ini membuat sensor dapat mendeteksi cahaya inframerah yang dipantulkan kembali dari permukaan objek di depannya. Sensor TCRT5000 bekerja berdasarkan prinsip pantulan cahaya inframerah. LED inframerah pada TCRT5000 memancarkan cahaya dengan panjang gelombang sekitar 950 nm. Ketika cahaya tersebut mengenai suatu permukaan, sebagian energi cahaya akan dipantulkan kembali menuju fototransistor. Intensitas cahaya pantul yang diterima fototransistor bergantung pada karakteristik permukaan objek, seperti warna dan tekstur, serta jarak antara sensor dan objek. Cahaya inframerah yang dipantulkan oleh permukaan terang menghasilkan sinyal keluaran yang lebih besar dibandingkan permukaan gelap. Perbedaan intensitas sinyal inilah yang dimanfaatkan dalam sistem line follower untuk membedakan jalur garis dan latar belakang. Keluaran sensor TCRT5000 berupa arus kolektor dari fototransistor yang nilainya bergantung pada intensitas cahaya pantul [23].

Berikut adalah pinout dari TCRT5000, seperti tampak pada Tabel 2.5 di bawah.

Tabel 2. 5 Pinout TCRT5000

Nama Pin	Fungsi
Collector	Kolektor dari fototransistor, terhubung ke sisi positif catu daya melalui resistor <i>pull-up</i> , titik pada <i>collector</i> dapat digunakan sebagai keluaran sinyal menuju mikrokontroler.
Emitter	Emitter fototransistor yang dihubungkan ke ground sebagai jalur keluaran fototransistor.
Anode	Anoda dari LED inframerah (fotodioda pemancar) yang dihubungkan ke tegangan positif melalui pembatas arus.

Nama Pin	Fungsi
Cathode	Katoda dari LED inframerah (fotodiode pemancar) yang dihubungkan ke ground.

TCRT5000 memiliki beberapa spesifikasi seperti pada Tabel 2.6 di bawah.

Tabel 2. 6 Spesifikasi TCRT5000

Parameter	Keterangan
Jenis Sensor	Sensor inframerah dengan keluaran fototransistor
Tegangan Operasi	5 V
<i>Diode Forward Current</i>	60 mA
Output	Sinyal analog atau digital (tergantung rangkaian)
Transistor Collector Current	Maksimum 100 mA
<i>Operating Temperature</i>	-25°C hingga 85°C

2. 12 LCD Nextion

LCD Nextion merupakan modul *Human Machine Interface* (HMI) yang dikembangkan oleh ITEAD dan dirancang untuk sistem tertanam dengan kebutuhan tampilan interaktif. Modul ini mengintegrasikan layar TFT, panel sentuh, unit pemroses internal, serta memori dalam satu perangkat, sehingga fungsi tampilan grafis dapat dijalankan secara mandiri tanpa membebani unit pemroses utama. Dengan konfigurasi tersebut, LCD Nextion digunakan sebagai media interaksi antara operator sistem dan perangkat yang dikendalikan melalui tampilan visual dan masukan sentuh berbasis layer [24].

LCD Nextion menampilkan elemen visual seperti teks, indikator, dan tombol sentuh yang berfungsi sebagai sarana komunikasi antara sistem dan operator. Elemen-elemen tersebut diproses secara internal oleh modul Nextion sehingga mikrokontroler eksternal hanya perlu mengirimkan data atau perintah melalui komunikasi serial. LCD Nextion menggunakan panel sentuh berbasis tekanan (*pressure based touch panel*), di mana masukan diperoleh melalui kontak fisik pada permukaan layar. Jenis panel ini dipilih karena stabilitasnya dalam lingkungan industri dan sistem robotik yang tidak selalu memerlukan sensitivitas tinggi seperti panel kapasitif [24].

Pengembangan antarmuka visual pada LCD Nextion dilakukan melalui perangkat lunak *Nextion Editor* yang menyediakan komponen grafis siap pakai.

Perancangan tampilan dilakukan dengan metode perancangan visual (*visual design method*), sehingga elemen antarmuka dapat disusun secara langsung pada kanvas layar dan dikonfigurasi melalui parameter yang tersedia. Metode ini mengurangi kompleksitas pemrograman grafis pada mikrokontroler eksternal [24].

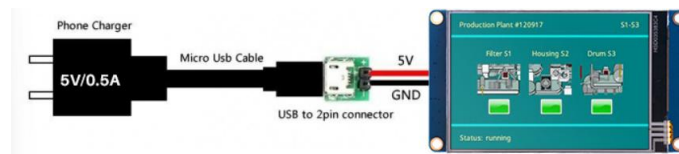
2.12.1 LCD Nextion Tipe NX4827T034_011

Modul NX4827T034_011 merupakan salah satu modul *Human Machine Interface* (HMI) pada Basic Series yang mengintegrasikan layar TFT LCD, panel sentuh resistif, mikrokontroler, serta memori dalam satu perangkat.



Gambar 2. 17 LCD Nextion NX4827T043_011 [25]

Berdasarkan Gambar 2.17, menunjukkan modul LCD Nextion NX4827T043_011 yang memiliki ukuran layar 4,3 inci dengan resolusi 480×272 piksel. Modul ini dirancang untuk aplikasi *embedded system* yang memerlukan tampilan informasi dan interaksi pengguna melalui layar sentuh. Antarmuka grafis dirancang menggunakan perangkat lunak Nextion Editor, kemudian diunduh ke memori internal modul sehingga tampilan dapat dijalankan secara mandiri [25].



Gambar 2. 18 Catu Daya Nextion NX4827T043_011 [25]

Gambar 2.18 menunjukkan skema penyediaan catu daya untuk modul LCD Nextion. Modul bekerja pada tegangan 5 V DC yang disuplai melalui konektor micro USB atau pin VCC dan GND. Tegangan yang stabil diperlukan agar modul dapat bekerja secara normal, karena di dalamnya terdapat mikrokontroler yang mengendalikan tampilan, panel sentuh, serta komunikasi serial. Ketidakstabilan catu daya dapat menyebabkan tampilan tidak berjalan dengan baik, komunikasi UART terganggu, maupun terjadinya reset pada sistem. Oleh karena itu, disarankan

menggunakan catu daya 5 V dengan arus yang memadai agar kinerja modul tetap stabil [25].

LCD Nextion NX4827T043_011 dilengkapi mikrokontroler internal yang menangani pemrosesan grafis, pengelolaan objek antarmuka, serta pembacaan layar sentuh. Komunikasi dengan Raspberry dilakukan menggunakan antarmuka UART berlevel TTL sehingga hanya memerlukan jalur TX, RX, VCC, dan GND [25]. Berikut Tabel 2.7 spesifikasi LCD Nextion.

Tabel 2. 7 Spesifikasi LCD Nextion NX4832T043_011

Spesifikasi	Keterangan
Model	NX4827T043_011
Seri	Basic Series
Ukuran Layar	4,3 inci
Resolusi	480 × 272 piksel
Jumlah Warna	65.536 (16-bit, RGB565)
Jenis Panel Sentuh	Resistif
Memori Flash	16 MB
RAM	3584 Byte
Area Tampilan (V.A.)	73,44 mm × 48,96 mm
Dimensi Modul	100,5 mm × 54,94 mm × 5,45 mm
Lampu Latar	LED
Tegangan Operasi	5 V DC
Arus Operasi	±145 mA

2. 13 Web Dashboard

Web dashboard merupakan antarmuka berbasis web yang digunakan untuk menyajikan informasi dalam bentuk visual sehingga pengguna dapat memantau kondisi suatu sistem secara cepat dan terpusat. Dashboard dirancang untuk menampilkan berbagai indikator penting (*Key Performance Indicators* atau KPI) dalam satu halaman sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan pemantauan, analisis, dan pengambilan keputusan. Pada sistem monitoring, dashboard tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi data, tetapi juga sebagai antarmuka interaktif yang memungkinkan pengguna mengendalikan perangkat secara langsung melalui *web browser* [26].

Dalam sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT), web dashboard berperan sebagai media komunikasi antara pengguna dan perangkat. Dashboard menerima data yang dikirimkan oleh perangkat secara berkala, kemudian

menampilkan kondisi sistem secara *real time*. Selain itu, dashboard juga dapat digunakan untuk mengirimkan perintah kendali, seperti menjalankan atau menghentikan perangkat, mengubah parameter operasi, maupun melakukan pemantauan status sensor dari lokasi yang berbeda selama perangkat terhubung ke jaringan [27].

Pada penelitian ini, web dashboard digunakan sebagai antarmuka monitoring dan pengendalian AGV. Informasi yang ditampilkan meliputi nilai sensor ultrasonik, berat hasil pembacaan *load cell*, kondisi baterai, kecepatan motor, serta status pergerakan AGV. Selain menampilkan data secara *real time*, dashboard juga menyediakan tombol kendali sehingga pengguna dapat mengoperasikan AGV melalui *web browser*. Antarmuka tersebut dibangun menggunakan HTML sebagai bahasa markah (*markup language*) untuk menyusun struktur halaman, CSS untuk mengatur tampilan antarmuka, dan JavaScript untuk memberikan fungsi interaktif serta memperbarui data secara dinamis.

2. 14 Kamera Monokular Berbasis USB

Kamera monokular merupakan sensor penginderaan visual yang menggunakan 1 unit sensor citra untuk memperoleh informasi lingkungan dalam bentuk citra dua dimensi. Pada sistem *vision-based navigation*, kamera berfungsi sebagai sumber utama data visual yang selanjutnya diproses untuk keperluan deteksi objek, identifikasi *landmark*, serta pengambilan keputusan navigasi. Sistem berbasis visi merupakan sebagai salah satu metode yang memanfaatkan kamera untuk memperoleh informasi lingkungan secara langsung tanpa bergantung pada jalur fisik tetap [3].

Kamera USB termasuk dalam kategori kamera monokular RGB yang mentransmisikan data citra melalui antarmuka *Universal Serial Bus* (USB). Integrasi melalui USB mempermudah koneksi dengan unit pemrosesan seperti *single board computer* tanpa memerlukan rangkaian antarmuka tambahan. Pada sistem navigasi AGV berbasis visi, kamera menghasilkan citra dalam bentuk matriks piksel yang kemudian diproses menggunakan algoritma pengolahan citra dan pembelajaran mendalam untuk mendeteksi objek dan menentukan orientasi relatif terhadap lingkungan [3].

Secara prinsip, kamera monokular bekerja berdasarkan model proyeksi perspektif, di mana titik tiga dimensi pada lingkungan diproyeksikan ke bidang citra dua dimensi. Informasi posisi relatif dan orientasi diperoleh melalui pemrosesan geometri citra atau analisis fitur visual. Dalam pendekatan navigasi modern, kamera digunakan sebagai sensor utama karena fleksibilitas implementasi, biaya yang relatif rendah, serta kemampuannya mendukung sistem navigasi tanpa lintasan fisik (*trackless navigation*) [3].

2. 15 Buzzer

Buzzer merupakan komponen elektroakustik yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi suara. Buzzer digunakan sebagai perangkat keluaran (*output device*) pada sistem elektronika untuk memberikan informasi atau peringatan dalam bentuk bunyi. Suara yang dihasilkan buzzer dapat digunakan sebagai indikator kondisi tertentu, seperti keberhasilan proses, kesalahan sistem, maupun adanya objek yang terdeteksi oleh sensor. Berdasarkan prinsip kerjanya, buzzer dibedakan menjadi buzzer aktif (*active buzzer*) dan buzzer pasif (*passive buzzer*). Buzzer aktif memiliki rangkaian osilator internal sehingga dapat menghasilkan bunyi hanya dengan diberikan tegangan DC sesuai spesifikasi kerjanya. Sebaliknya, buzzer pasif tidak memiliki osilator internal sehingga memerlukan sinyal pulsa atau *Pulse Width Modulation* (PWM) dari mikrokontroler agar dapat menghasilkan suara dengan frekuensi tertentu [28].