

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Kajian Teoritis

1. Automatic Guided Vehicle (AGV)

Automatic Guided Vehicle (AGV) merupakan kendaraan otomatis yang digunakan untuk memindahkan material dari satu lokasi ke lokasi lain tanpa dikendalikan secara langsung oleh operator. AGV bekerja berdasarkan sistem navigasi tertentu, seperti line follower, pita magnetik, laser guidance, kamera, maupun teknologi navigasi lainnya yang memungkinkan kendaraan bergerak secara mandiri sesuai lintasan yang telah ditentukan. Dalam dunia industri, AGV banyak dimanfaatkan untuk mendukung proses material handling karena mampu meningkatkan efisiensi distribusi material, mengurangi human error, serta meningkatkan keselamatan kerja pada aktivitas pemindahan barang yang dilakukan secara berulang (Noviardi et al., 2023).



Automatic Guided Vehicle (AGV)

Gambar 2.1 Sumber: Dokumen Pribadi

AGV telah banyak diterapkan pada industri manufaktur, pergudangan (warehouse), rumah sakit, maupun laboratorium karena mampu melakukan proses distribusi material secara konsisten dan efisien. Pada AGV skala kecil, salah satu metode navigasi yang paling banyak digunakan adalah sistem line follower. Metode ini memanfaatkan sensor untuk mendeteksi lintasan sebagai acuan pergerakan robot. Sistem line follower dipilih karena memiliki struktur yang sederhana, biaya implementasi relatif rendah, serta mudah dikembangkan dan diintegrasikan dengan sistem kendali berbasis mikrokontroler (Ramadani et al., 2025).

2. Sistem Navigasi Berbasis Lintasan

Sistem navigasi berbasis lintasan (line-following navigation) merupakan metode navigasi yang menggunakan lintasan berupa garis sebagai jalur acuan pergerakan robot. Metode ini bekerja dengan memanfaatkan sensor reflektif inframerah untuk mendeteksi perbedaan warna antara garis dan permukaan lintasan. Informasi yang diperoleh sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler untuk menentukan arah gerak robot, seperti bergerak lurus, berbelok ke kiri, berbelok ke kanan, maupun berhenti pada titik tertentu sesuai lintasan yang telah dirancang. Metode ini banyak diterapkan pada robot AGV karena memiliki implementasi yang sederhana, biaya relatif rendah, dan mudah dikombinasikan dengan berbagai metode pengendalian, termasuk kontroler PID (Johnny et al., 2025) (Noviardi et al., 2023).

Pada sistem line follower, sensor reflektif dipasang pada bagian bawah robot untuk mendeteksi posisi lintasan secara terus-menerus. Perubahan hasil pembacaan sensor akan diproses oleh mikrokontroler sebagai dasar dalam menentukan koreksi arah gerak robot. Selanjutnya, sistem kendali mengatur kecepatan putaran motor kanan dan kiri sehingga robot dapat kembali berada pada posisi yang sesuai terhadap lintasan. Agar proses koreksi berlangsung secara cepat dan stabil, sistem navigasi umumnya dipadukan dengan metode pengendalian, salah satunya kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID), yang berfungsi meminimalkan kesalahan posisi robot terhadap lintasan (Ogata, n.d.); (Noviardi et al., 2023).

3. Beban Muat (Payload) pada Robot AGV

Beban muat (payload) merupakan kapasitas beban maksimum yang dapat dibawa oleh suatu robot atau sistem transportasi otomatis selama proses operasional. Pada robot AGV, besarnya beban muatan memengaruhi performa sistem, terutama terhadap kecepatan gerak, kestabilan arah, konsumsi daya, dan kebutuhan torsi motor penggerak. Semakin besar beban yang dibawa, semakin besar pula gaya dan torsi yang harus dihasilkan motor sehingga diperlukan sistem pengendalian yang mampu mempertahankan performa robot tetap stabil selama proses perpindahan material (Nugraha et al., 2023).

Penambahan beban menyebabkan karakteristik dinamis motor DC berubah karena motor harus menghasilkan torsi yang lebih besar untuk

mempertahankan kecepatan putaran. Kondisi tersebut dapat mengakibatkan penurunan kecepatan, bertambahnya waktu tempuh, serta meningkatnya kemungkinan penyimpangan robot terhadap lintasan. Oleh karena itu, perubahan beban menjadi salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam perancangan sistem kendali AGV agar robot tetap mampu bergerak secara stabil pada berbagai kondisi pembebanan (Abdillah, 2023).

Dalam perancangan robot AGV, kapasitas beban muat digunakan sebagai dasar dalam menentukan spesifikasi motor penggerak. Besarnya gaya yang diperlukan untuk menggerakkan robot dapat dihitung berdasarkan Hukum II Newton menggunakan persamaan:

$$F = m \times a \dots\dots\dots(\text{Persamaan 1}) \text{ (Ahmad et al., n.d.)}.$$

dengan F adalah gaya (N), m merupakan massa total robot beserta beban (kg), dan a adalah percepatan (m/s^2).

Selanjutnya, kebutuhan torsi motor dihitung menggunakan persamaan:

$$T = F \times r \dots\dots\dots(\text{Persamaan 2}) \text{ (Ahmad et al., n.d.)}.$$

dengan T adalah torsi (Nm) dan r merupakan jari-jari roda (m).

Kecepatan linear robot dapat dihitung berdasarkan hubungan antara diameter roda dan putaran motor menggunakan persamaan:

$$V = \frac{\pi D n}{60} \dots\dots\dots(\text{Persamaan 3}) \text{ (Ahmad et al., n.d.)}.$$

dengan V merupakan kecepatan linear (m/s), D adalah diameter roda (m), dan n merupakan kecepatan putaran roda (rpm). Berdasarkan hubungan tersebut, semakin besar beban yang dibawa, semakin besar pula kebutuhan torsi motor sehingga pemilihan spesifikasi motor harus disesuaikan dengan kapasitas beban yang direncanakan (Ahmad et al., n.d.).

4. Sistem Penggerak Robot AGV

Sistem penggerak (drive system) merupakan bagian utama pada robot Automatic Guided Vehicle (AGV) yang berfungsi menghasilkan gerakan sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan. Sistem ini mengubah energi listrik menjadi energi mekanik sehingga robot dapat bergerak maju, mundur, berbelok, maupun berhenti sesuai perintah sistem kendali. Pada robot AGV berbasis line follower, sistem penggerak berperan penting dalam menjaga kestabilan arah gerak robot berdasarkan informasi yang diperoleh dari sensor pembaca lintasan. Oleh karena itu, pemilihan motor, driver motor, dan metode pengendalian yang sesuai sangat memengaruhi performa robot selama proses perpindahan material (Noviardi et al., 2023).

Sistem penggerak robot AGV umumnya terdiri atas motor DC sebagai aktuator, driver motor sebagai pengendali daya, dan metode pengaturan kecepatan menggunakan *Pulse Width Modulation* (PWM). Ketiga komponen tersebut bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan pergerakan robot yang stabil sesuai dengan perintah dari mikrokontroler. Pada sistem yang menggunakan kontroler PID, nilai keluaran pengendali

diubah menjadi sinyal PWM yang digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor sehingga robot mampu mempertahankan posisinya pada lintasan (Noviardi et al., 2023).

5. Motor DC Gearbox 12V

Motor Direct Current (DC) merupakan aktuator listrik yang mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Motor DC banyak digunakan pada robot bergerak karena memiliki konstruksi sederhana, mudah dikendalikan, serta kecepatan putarnya dapat diatur melalui perubahan tegangan atau sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM). Karakteristik tersebut menjadikan motor DC sebagai salah satu aktuator yang banyak diterapkan pada sistem robot AGV dan mobile robot (Wardani & Iklima, 2022).



Gambar 2.2 Motor DC Gearbox 12V

Sumber: <https://id.aliexpress.com/item/1005004762032978.html>

Motor DC gearbox merupakan motor DC yang dipadukan dengan sistem reduksi roda gigi (gear reduction) sehingga mampu menghasilkan

torsi yang lebih besar dengan kecepatan putar yang lebih rendah. Penambahan gearbox meningkatkan kemampuan motor dalam menggerakkan robot yang membawa beban sehingga lebih sesuai digunakan pada sistem AGV. Semakin besar beban yang dibawa, semakin besar pula torsi yang diperlukan agar robot tetap dapat bergerak secara stabil. Oleh karena itu, pemilihan motor gearbox harus disesuaikan dengan kapasitas beban dan karakteristik sistem penggerak yang dirancang (Abdillah, 2023).

6. Baterai



Gambar 2.3 Baterai

Sumber: <https://shopee.co.id/Baterai-Lipo-2S-7.4Volt-1500-mAh-25C-Hobby-RC-i.88610095.18655304183>

Baterai merupakan sumber energi listrik utama pada robot bergerak (mobile robot) yang berfungsi menyuplai daya ke seluruh komponen sistem, seperti mikrokontroler, sensor, driver motor, dan motor DC. Pemilihan baterai harus disesuaikan dengan kebutuhan daya sistem dengan mempertimbangkan tegangan nominal, kapasitas, serta kemampuan arus keluaran (discharge current), karena karakteristik tersebut memengaruhi kestabilan tegangan, lama waktu operasi, dan performa robot. Selain itu,

massa baterai juga menjadi faktor yang perlu diperhatikan karena dapat menambah beban robot sehingga memengaruhi kinerja sistem selama proses operasi (Mcnulty et al., 2022).

7. Regulator Tegangan (*Buck converter*)

Regulator tegangan merupakan rangkaian elektronika yang berfungsi untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran agar sesuai dengan kebutuhan beban. Pada sistem robot bergerak, regulator digunakan untuk menurunkan dan menstabilkan tegangan dari sumber daya sehingga setiap komponen memperoleh tegangan kerja yang sesuai. Penggunaan regulator sangat penting karena fluktuasi tegangan dapat menyebabkan penurunan kinerja, kesalahan pembacaan sensor, bahkan kerusakan pada mikrokontroler dan perangkat elektronika lainnya (Tyanggoro et al., 2024).



Gambar 2.4 Regulator Tegangan (*Buck converter*)

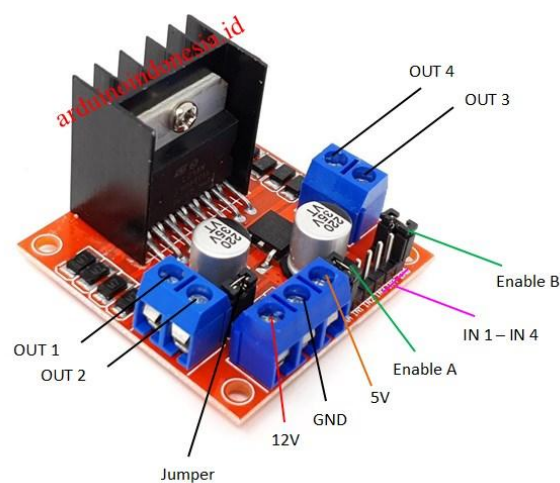
Sumber: <https://indonesian.alibaba.com/product-detail/LM2596-DC-Buck-Step-Down-Power-62054021130.html>

Salah satu jenis regulator yang banyak digunakan adalah *buck converter* atau step-down DC-DC converter, yaitu konverter yang berfungsi menurunkan tegangan searah (DC) menjadi tegangan DC yang

lebih rendah dengan efisiensi yang tinggi. *Buck converter* bekerja menggunakan metode *switching* sehingga memiliki efisiensi yang lebih baik dibandingkan regulator linier karena daya yang hilang dalam bentuk panas relatif kecil. Karakteristik tersebut menjadikan *buck converter* sesuai digunakan pada sistem robot bergerak yang mengutamakan efisiensi penggunaan energi baterai (Mahardi et al., 2024).

8. Driver Motor

Driver motor merupakan rangkaian elektronika yang berfungsi sebagai antarmuka antara mikrokontroler dan motor DC. Mikrokontroler tidak mampu menyediakan arus yang cukup untuk menggerakkan motor secara langsung sehingga diperlukan driver motor sebagai penguat arus sekaligus pengendali arah putaran motor. Pada robot AGV, driver motor memungkinkan motor bergerak maju, mundur, maupun berputar dengan kecepatan tertentu sesuai sinyal kendali yang diberikan oleh mikrokontroler (Margirahayu et al., 2022).



Gambar 2.5 Driver Motor Modul L298N

Sumber: <https://www.arduinoindonesia.id/2022/10/driver-motor-l298n.html>

Modul L298N merupakan salah satu driver motor berbasis dual H-bridge yang mampu mengendalikan dua motor DC secara independen. Modul ini mendukung pengaturan arah putaran motor (clockwise dan counterclockwise) serta pengaturan kecepatan menggunakan sinyal PWM. Pada robot AGV berbasis line follower, kemampuan mengatur kecepatan masing-masing roda sangat penting karena memengaruhi proses koreksi arah dan kestabilan robot selama mengikuti lintasan (Maung et al., 2018).

9. *Pulse Width Modulation (PWM)*

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan teknik pengaturan daya listrik dengan mengubah lebar pulsa (*duty cycle*) sinyal digital tanpa mengubah besar tegangan sumber. Pada motor DC, perubahan nilai *duty cycle* akan memengaruhi besar tegangan rata-rata yang diterima motor sehingga kecepatan putaran motor dapat diatur secara efisien. Semakin besar nilai *duty cycle*, semakin besar pula daya yang diterima motor sehingga kecepatan putarnya meningkat (Amarullah & Djaohar, n.d.).

Pada sistem robot bergerak, PWM digunakan untuk mengatur kecepatan putaran roda kanan dan kiri sesuai kebutuhan manuver robot. Perbedaan nilai PWM pada kedua motor memungkinkan robot bergerak lurus, berbelok, maupun melakukan koreksi arah ketika terjadi penyimpangan dari lintasan. Pada sistem yang menggunakan kontroler PID, keluaran pengendali dikonversi menjadi sinyal PWM untuk mengatur kecepatan motor melalui driver motor sehingga robot dapat

mempertahankan kestabilan geraknya selama mengikuti lintasan (Noviardi et al., 2023).

10. Sensor Inframerah TCRT5000

Sensor TCRT5000 merupakan sensor inframerah reflektif yang banyak digunakan pada sistem robot line follower untuk mendeteksi lintasan berdasarkan perbedaan warna permukaan. Sensor ini terdiri atas infrared emitter sebagai pemancar cahaya inframerah dan phototransistor sebagai penerima cahaya pantul. Permukaan berwarna terang akan memantulkan cahaya inframerah dengan intensitas lebih tinggi dibandingkan permukaan berwarna gelap, sehingga sensor mampu membedakan posisi garis terhadap permukaan lintasan. Sensor TCRT5000 banyak digunakan karena memiliki respons yang cepat, dimensi yang kecil, serta mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler seperti Arduino (E. Prasetyo et al., 2019).



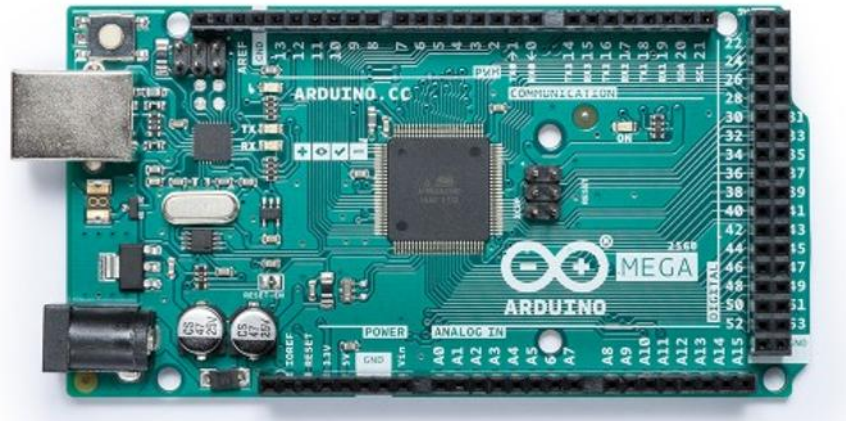
Gambar 2.6 Sensor Inframerah TCRT5000

Sumber: <https://store.ichibot.id/product/sensor-infrared-line-tracking-tcrt-5000-sensor-garis-pcb-biru/>

Pada robot line follower, sensor TCRT5000 dipasang pada bagian bawah robot untuk mendeteksi posisi garis secara terus-menerus selama

robot bergerak. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh mikrokontroler sebagai dasar dalam menentukan arah gerak robot, baik bergerak lurus, berbelok, maupun melakukan koreksi posisi agar tetap berada pada lintasan. Akurasi pembacaan sensor sangat memengaruhi kestabilan navigasi karena kesalahan pembacaan dapat menyebabkan penyimpangan jalur. Oleh karena itu, sensor TCRT5000 sering dipadukan dengan metode pengendalian, seperti kontroler PID, untuk meningkatkan ketepatan robot dalam mengikuti lintasan (E. Prasetyo et al., 2019).

Arduino Mega 2560 merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega2560 yang banyak digunakan pada sistem kendali robotika dan otomasi karena memiliki jumlah pin input/output yang relatif banyak. Arduino Mega menyediakan 54 pin digital, 16 pin analog, serta beberapa pin *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dapat digunakan untuk mengendalikan berbagai sensor dan aktuator. Selain itu, kapasitas memori yang lebih besar dibandingkan Arduino Uno memungkinkan mikrokontroler ini menangani proses pengolahan data dan pengendalian beberapa perangkat secara bersamaan (Arduino, 2024).



Gambar 2.7 Mikrokontroler Arduino Mega 2560

Sumber: <https://www.arduinoindonesia.id/2019/01/arduino-mega-2560.html>

Pada sistem robot AGV, Arduino Mega 2560 berfungsi sebagai pusat kendali yang memproses data dari sensor dan menghasilkan sinyal kendali untuk aktuator. Data hasil pembacaan sensor diolah menggunakan algoritma pengendalian sehingga menghasilkan keluaran berupa sinyal PWM yang digunakan untuk mengatur kecepatan serta arah putaran motor melalui driver motor. Kemampuan Arduino Mega dalam mengelola banyak pin input/output menjadikannya sesuai untuk aplikasi robot bergerak yang menggunakan beberapa sensor dan aktuator secara bersamaan (Arduino, 2024).

11. Kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID)

a. Pengertian Kontroler PID

Kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan salah satu metode pengendalian umpan balik (feedback control) yang banyak digunakan pada sistem otomatis untuk mempertahankan keluaran sistem agar tetap berada pada nilai yang diinginkan

(setpoint). Kontroler PID bekerja dengan menghitung nilai kesalahan (error) antara nilai referensi dan nilai aktual, kemudian menghasilkan sinyal kendali berdasarkan kombinasi aksi *Proportional* (P), *Integral* (I), dan *Derivative* (D). Metode ini banyak diterapkan pada sistem robotika, otomasi industri, dan pengendalian motor karena memiliki struktur algoritma yang sederhana, mudah diimplementasikan, serta mampu meningkatkan kestabilan dan akurasi sistem (Miftahul et al., 2016); (Noviardi et al., 2023); (Ogata, n.d.).

Persamaan matematis kontroler PID dinyatakan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

dengan:

$u(t)$ = sinyal kendali

$e(t)$ = nilai kesalahan (error)

K_p = konstanta *proporsional*

K_i = konstanta *integral*

K_d = konstanta *derivatif*

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa keluaran kontroler dipengaruhi oleh tiga parameter utama yang saling melengkapi. Kombinasi parameter yang tepat akan menghasilkan respons sistem yang cepat, stabil, dan memiliki tingkat kesalahan yang kecil (Pangestu & Prasajo, n.d.) (Ogata, n.d.).

b. Komponen Kontroler PID

1) Kontrol *Proporsional* (P)

Kontrol proporsional menghasilkan aksi kendali yang sebanding dengan besar kesalahan yang terjadi pada sistem. Semakin besar nilai kesalahan, semakin besar pula sinyal kendali yang diberikan. Parameter K_p berfungsi mempercepat respons sistem, namun nilai yang terlalu besar dapat menyebabkan osilasi dan menurunkan kestabilan sistem (Tejado et al., n.d.); (Ogata, n.d.).

2) Kontrol *Integral* (I)

Kontrol *integral* berfungsi menghilangkan *steady-state error* dengan mengakumulasi nilai kesalahan terhadap waktu. Penambahan parameter K_i membuat sistem lebih akurat dalam mencapai nilai referensi, tetapi penggunaan nilai yang terlalu besar dapat menyebabkan respons menjadi lebih lambat dan meningkatkan kemungkinan terjadinya overshoot (Tejado et al., n.d.); (Ogata, n.d.).

3) Kontrol *Derivatif* (D)

Kontrol derivatif memperkirakan perubahan kesalahan berdasarkan laju perubahan error. Parameter K_d berfungsi meredam osilasi dan memperhalus respons sistem sehingga gerakan robot

menjadi lebih stabil saat melakukan koreksi arah (Tejado et al., n.d.); (Ogata, n.d.).

c. Pengaruh Parameter K_p , K_i , dan K_d terhadap Respon Sistem

Tabel 2.1 Pengaruh Parameter PID terhadap Respons Sistem

Parameter	Pengaruh Jika Nilai Ditambah
K_p	Mempercepat respons sistem, tetapi nilai yang terlalu besar dapat menyebabkan osilasi dan menurunkan kestabilan.
K_i	Mengurangi <i>steady-state error</i> , tetapi dapat memperlambat respons dan meningkatkan <i>overshoot</i> .
K_d	Mengurangi osilasi, memperhalus respons, serta meningkatkan kestabilan sistem.

Berdasarkan Tabel 2.7.3, setiap parameter PID memiliki karakteristik yang berbeda sehingga proses penentuan nilai K_p , K_i , dan K_d harus dilakukan secara hati-hati. Kombinasi parameter yang tepat akan menghasilkan sistem kendali yang mampu merespons perubahan kondisi dengan cepat, stabil, dan memiliki tingkat kesalahan yang rendah (Ogata, n.d.); (Bassi et al., 2022).

d. Metode Penalaan Manual (Manual Tuning PID)

Metode manual tuning merupakan teknik penentuan parameter kontroler PID dengan mengubah nilai K_p , K_i , dan K_d secara bertahap berdasarkan respons sistem hingga diperoleh performa yang diinginkan. Metode ini banyak digunakan pada sistem robot bergerak karena sederhana, mudah diterapkan, dan dapat disesuaikan dengan karakteristik sistem yang dikendalikan. Pada penelitian ini, penalaan

dilakukan melalui beberapa kali pengujian hingga robot mampu bergerak stabil saat mengikuti lintasan (Ogata, n.d.).

Proses penalaan diawali dengan menentukan nilai K_p (*Proportional Gain*) untuk memperoleh respons sistem yang cepat terhadap perubahan posisi lintasan. Nilai K_p dinaikkan secara bertahap hingga robot mampu mengikuti lintasan dengan baik tanpa menghasilkan osilasi yang berlebihan. Setelah nilai K_p sesuai, parameter K_d (*Derivative Gain*) ditambahkan untuk meredam osilasi dan memperhalus gerakan robot saat melakukan koreksi arah (Ogata, n.d.).

Tahap terakhir adalah menambahkan K_i (*Integral Gain*) dengan nilai yang relatif kecil untuk mengurangi *steady-state error* setelah sistem mencapai kondisi stabil. Penambahan K_i dilakukan secara bertahap agar tidak menyebabkan overshoot atau memperlambat respons sistem. Berdasarkan tahapan tersebut, urutan penalaan manual PID dilakukan dengan menaikkan K_p , kemudian menambahkan K_d , dan terakhir menyesuaikan K_i hingga diperoleh parameter yang menghasilkan respons robot paling stabil (Ogata, n.d.).

Berdasarkan penelitian (Noviardi et al., 2023), proses penalaan parameter PID dilakukan secara bertahap dengan menguji beberapa kombinasi nilai K_p , K_i , dan K_d hingga diperoleh respons robot yang paling stabil. Nilai K_p diuji pada rentang 1 sampai 5, K_i 0, dan K_d pada rentang 1 sampai 5. Setiap kombinasi parameter dievaluasi

berdasarkan kemampuan robot mengikuti lintasan, tingkat osilasi, dan kestabilan gerak. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengujian parameter secara bertahap dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan nilai awal *manual tuning* pada robot AGV berbasis *line follower*.

Tabel 2.2 Tahapan Manual Tuning PID

Tahap	Parameter	Tujuan
1	Kp	Meningkatkan kecepatan respons robot terhadap perubahan posisi lintasan.
2	Kd	Mengurangi osilasi dan meningkatkan kestabilan gerak robot.
3	Ki	Mengurangi <i>steady-state error</i> agar robot tetap berada pada lintasan.

12. Navigasi Robot AGV Berbasis Persimpangan Jalur

Navigasi merupakan kemampuan robot untuk menentukan arah pergerakan dari posisi awal menuju lokasi tujuan secara otomatis. Pada robot Automatic Guided Vehicle (AGV) berbasis line follower, navigasi dilakukan dengan memanfaatkan sensor pembaca garis untuk mengikuti lintasan yang telah ditentukan. Metode ini banyak digunakan pada sistem distribusi material di lingkungan industri, laboratorium, maupun pergudangan karena memiliki implementasi yang sederhana serta tingkat keandalan yang baik pada lintasan tetap (Illah, n.d.).

Pada sistem navigasi berbasis persimpangan jalur, setiap percabangan berfungsi sebagai titik keputusan (decision point) yang digunakan robot untuk menentukan arah gerak berikutnya. Keputusan tersebut dapat berupa bergerak lurus, berbelok ke kiri, atau berbelok ke

kanan sesuai dengan algoritma yang telah diprogram. Informasi urutan arah disimpan pada mikrokontroler sehingga robot dapat mengikuti rute distribusi secara otomatis menuju lokasi yang telah ditentukan. Metode ini banyak diterapkan pada robot AGV karena sederhana, mudah dikembangkan, dan memiliki tingkat akurasi yang baik pada lingkungan dengan lintasan tetap (Robotics, n.d.).

Keberhasilan navigasi pada robot AGV tidak hanya ditentukan oleh algoritma penentuan rute, tetapi juga dipengaruhi oleh kemampuan sistem kendali dalam mempertahankan posisi robot pada lintasan. Oleh karena itu, sistem navigasi umumnya dipadukan dengan kontroler PID agar robot mampu melakukan koreksi arah secara cepat ketika terjadi penyimpangan akibat perubahan kondisi lintasan maupun variasi beban.

B. Kajian Empiris

Kajian empiris merupakan kajian terhadap penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan topik penelitian. Penelitian terdahulu digunakan sebagai dasar pembandingan dalam menentukan kebaruan (novelty), metode yang digunakan, serta pengembangan sistem yang akan dilakukan pada penelitian ini. Pada penelitian robot AGV berbasis line follower, beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan kontroler PID untuk meningkatkan kestabilan navigasi robot. Akan tetapi, penelitian terkait pengaruh beban muat terhadap performa robot AGV distribusi sampel berbasis PID masih relatif terbatas sehingga diperlukan pengembangan lebih lanjut.

Tabel 2.3 Kajian Empiris Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Judul Penelitian	Fokus Penelitian	Hasil Penelitian	Research Gap
1	(Noviardi et al., 2023)	<i>Prototipe Robot Automatic Guided Vehicle (AGV) Line Follower Dengan Metode Kendali PID</i>	Penerapan kontrol PID pada robot AGV line follower.	Robot mampu mengikuti lintasan secara stabil menggunakan kontrol PID.	Penelitian ini menambahkan pengujian beban 1 kg dan navigasi lokasi distribusi sampel jagung.
2	(Abdillah, 2023)	<i>Kontrol Kecepatan Carrier Conveyor Dengan Perubahan Beban Berbasis Hybrid Fuzzy Logic–PID</i>	Pengendalian kecepatan motor menggunakan Hybrid Fuzzy Logic–PID.	Sistem mampu menjaga kestabilan kecepatan motor saat terjadi perubahan beban.	Penelitian ini menerapkan PID pada robot AGV line follower tanpa metode fuzzy.
3	(P. Prasetyo et al., 2022)	<i>Sistem Kontrol PID pada Purwarupa Robot Pembawa Barang berbasis Line Follower menggunakan Algoritma Path Planning</i>	Robot pembawa barang berbasis line follower dengan PID dan <i>path planning</i> .	Robot berhasil mengikuti lintasan dan mendistribusikan barang secara otomatis.	Penelitian ini menggunakan navigasi percabangan tanpa QR Code serta menguji performa pada beban 0 kg dan 1 kg.
4	(Jha, n.d.)	<i>Design and Implementation of the Line Following Robot with Odometer</i>	Robot line follower berbasis Arduino Uno dengan odometer.	Robot mampu mengikuti lintasan dan mengukur jarak tempuh secara otomatis.	Penelitian ini menggunakan Arduino Mega, sensor TCRT5000, kontrol PID, serta pengujian pada beban 0 kg dan 1 kg.

No	Peneliti	Judul Penelitian	Fokus Penelitian	Hasil Penelitian	Research Gap
5	(Demir & Demirok, 2023)	<i>Designs of Particle-Swarm-Optimization-Based Intelligent PID Controllers and DC/DC Buck converters for PEM Fuel-Cell-Powered Four-Wheeled Automated Guided Vehicle</i>	Optimasi kontrol PID berbasis PSO pada AGV.	Kontrol PID berbasis PSO meningkatkan akurasi pelacakan lintasan dan efisiensi energi AGV.	Penelitian ini menggunakan metode penalaan manual tanpa PSO serta menguji performa AGV line follower pada kondisi tanpa beban dan beban 1 kg.

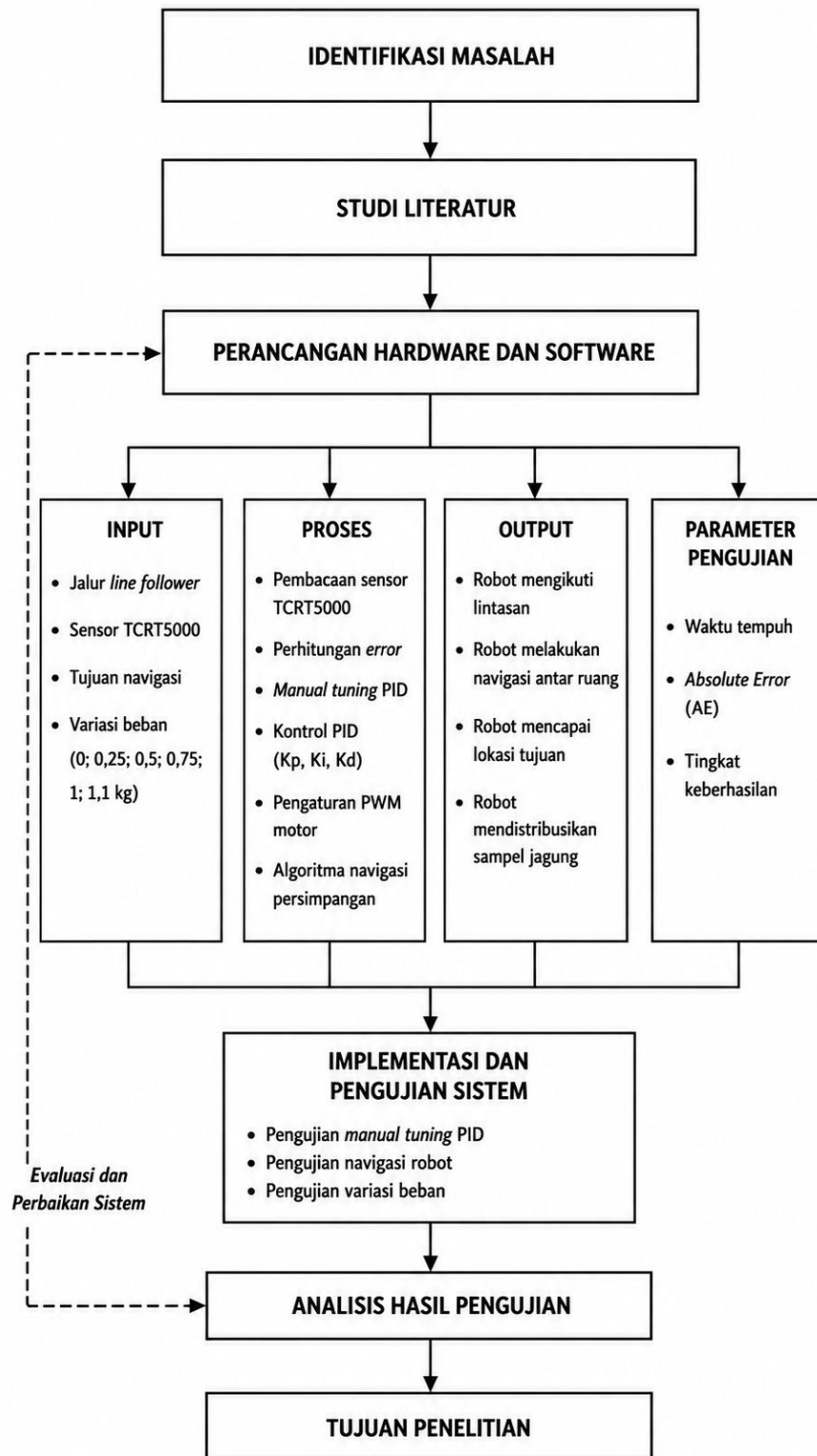
Analisis Penelitian Terdahulu

Berdasarkan penelitian terdahulu, penerapan kontroler PID terbukti mampu meningkatkan performa robot Automatic Guided Vehicle (AGV) maupun robot line follower dalam mengikuti lintasan secara lebih stabil. Penelitian Noviardi et al. (2023) menunjukkan bahwa kontrol PID mampu meningkatkan kestabilan pergerakan robot AGV line follower, sedangkan Prasetyo et al. (2022) membuktikan bahwa robot pembawa barang berbasis line follower dapat melakukan distribusi secara otomatis dengan dukungan kontrol PID dan algoritma path planning. Selain itu, penelitian Jha (2022) menunjukkan bahwa robot line follower mampu mengikuti lintasan dan mengukur jarak tempuh secara otomatis, sementara Demir dan Demirok (2023) membuktikan bahwa optimasi kontrol PID mampu meningkatkan akurasi pelacakan lintasan serta efisiensi sistem AGV. Di sisi lain, penelitian Rizky dkk. (2023) menunjukkan bahwa perubahan beban dapat memengaruhi

performa sistem sehingga diperlukan metode pengendalian yang mampu menjaga kestabilan kerja sistem.

Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini mengembangkan robot AGV untuk distribusi sampel jagung dengan kapasitas beban 1 kg menggunakan kontroler PID. Penelitian difokuskan pada pengujian performa robot pada kondisi tanpa beban (0 kg) dan berbeban 1 kg serta implementasi navigasi berbasis percabangan jalur menuju lokasi distribusi. Penentuan parameter PID dilakukan menggunakan metode penalaan manual berdasarkan pengalaman implementasi sistem sejenis yang kemudian disesuaikan melalui beberapa tahap pengujian hingga diperoleh respon robot yang stabil dalam mengikuti lintasan.

C. Kerangka Berpikir Penelitian



Gambar 2.8 Diagram Kerangka Berpikir Penelitian

Sumber: Dokumen Pribadi

Berdasarkan Gambar 2.8, penelitian diawali dengan identifikasi masalah, yaitu belum optimalnya proses distribusi sampel jagung yang masih dilakukan secara manual sehingga berpotensi menimbulkan ketidakefisienan dalam proses distribusi. Permasalahan tersebut menjadi dasar dalam merancang sistem distribusi otomatis menggunakan robot AGV.

Tahap berikutnya adalah studi literatur, yang dilakukan untuk memperoleh landasan teori mengenai robot AGV, sistem line follower, kontroler PID, sensor TCRT5000, Arduino Mega 2560, motor DC gearbox, serta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan sistem navigasi dan pengendalian robot. Studi literatur menjadi acuan dalam menentukan metode penelitian, pemilihan komponen, serta perancangan sistem.

Selanjutnya dilakukan perancangan hardware dan software. Perancangan hardware meliputi pemilihan dan integrasi komponen utama, yaitu Arduino Mega 2560 sebagai pengendali sistem, sensor TCRT5000 sebagai pendeteksi lintasan, motor DC gearbox 12 V sebagai aktuator, driver motor L298N sebagai pengendali motor, serta rangka robot AGV. Perancangan software meliputi pembuatan program pembacaan sensor, algoritma navigasi antar ruang, serta implementasi kontroler PID untuk mengatur kecepatan kedua motor sehingga robot mampu mengikuti lintasan secara stabil.

Tahap perancangan sistem terdiri atas empat bagian utama, yaitu input, proses, output, dan parameter pengujian. Pada bagian input, sistem menerima informasi berupa jalur line follower, pembacaan sensor TCRT5000, tujuan

navigasi yang dipilih melalui push button, serta variasi beban sebesar 0 kg, 0,25 kg, 0,5 kg, 0,75 kg, 1 kg, dan 1,1 kg. Seluruh data tersebut menjadi masukan bagi sistem untuk menentukan pergerakan robot.

Pada bagian proses, Arduino Mega 2560 melakukan pembacaan data sensor TCRT5000 untuk menentukan posisi robot terhadap lintasan. Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai error sebagai dasar pengendalian menggunakan kontroler PID. Parameter PID diperoleh melalui proses manual tuning dengan mengubah nilai konstanta K_p , K_i , dan K_d hingga diperoleh respons robot yang paling stabil. Nilai keluaran kontroler PID kemudian digunakan untuk mengatur sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) pada motor kanan dan kiri. Selain itu, sistem menjalankan algoritma navigasi berbasis persimpangan jalur untuk menentukan arah belok robot sesuai tujuan yang dipilih.

Hasil dari proses tersebut menghasilkan beberapa output, yaitu robot mampu mengikuti lintasan secara otomatis, melakukan navigasi antar ruang sesuai tujuan, mencapai lokasi yang ditentukan, serta mendistribusikan sampel jagung sesuai skenario pengujian.

Untuk mengevaluasi performa sistem, penelitian menggunakan tiga parameter pengujian, yaitu waktu tempuh, *Absolute Error* (AE), dan tingkat keberhasilan. Waktu tempuh digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi beban terhadap kecepatan robot dalam menyelesaikan lintasan. *Absolute Error* digunakan untuk mengevaluasi kemampuan kontroler PID dalam mempertahankan posisi robot tetap berada pada lintasan. Tingkat

keberhasilan digunakan untuk mengetahui kemampuan robot mencapai lokasi tujuan tanpa keluar dari lintasan.

Tahap selanjutnya adalah implementasi dan pengujian sistem. Pada tahap ini dilakukan implementasi program ke dalam robot AGV, kemudian dilakukan pengujian manual tuning PID, pengujian navigasi robot, serta pengujian variasi beban menggunakan parameter PID terbaik yang diperoleh dari hasil penalaan. Seluruh pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem secara menyeluruh.

Data hasil pengujian kemudian dianalisis pada tahap analisis hasil pengujian. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian pada setiap variasi beban berdasarkan parameter waktu tempuh, *Absolute Error*, dan tingkat keberhasilan. Hasil analisis digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi beban terhadap performa robot serta mengevaluasi efektivitas kontroler PID dalam menjaga kestabilan gerak robot selama mengikuti lintasan dan melakukan navigasi.

Apabila selama proses pengujian masih ditemukan ketidaksesuaian antara hasil yang diperoleh dengan tujuan penelitian, dilakukan evaluasi dan perbaikan sistem. Tahap ini meliputi penyempurnaan perangkat keras maupun perangkat lunak. Setelah sistem memenuhi kriteria yang diharapkan, penelitian diakhiri dengan tercapainya tujuan penelitian, yaitu menghasilkan robot AGV distribusi sampel jagung yang mampu melakukan navigasi otomatis, mengikuti lintasan secara stabil menggunakan kontroler PID, serta mampu beroperasi dengan baik pada variasi beban hingga 1 kg.