KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

DOKUMENTASI PROYEK CAPSTONE

Identitas Dokumen

Nama Dokumen	: Dokumen C3
Edisi Dokumen	: Juni 2026
Isi Dokumen	: Metode dan Perancangan

IDENTITAS KELOMPOK

Pengusul	Nama	: Nicodemus Oloan Simanjuntak	Jabatan:
	NIM	: 2305110016	
	Prodi	: Teknik Komputer	Tanda Tangan
	Nama	: Maulana Fathurahman	Jabatan :
	NIM	: 2305110022	
	Prodi	: Teknik Komputer	Tanda Tangan
	Nama	: Muhammad Nabel Al Fayyed	Jabatan :
	NIM	: 2305110037	
	Prodi	: Teknik Komputer	Tanda Tangan
	Nama	: Shaviraj Samad Shaikh	Jabatan :
	NIM	: 2305110047	
	Prodi	: Teknik Komputer	Tanda Tangan
Pembimbing	Nama	: Dr. Feddy Setio Pribadi, S.Pd., M.T.	Tanda Tangan
	NIP	: 197808222003121002	
JUDUL PROYEK CAPSTONE		Perancangan dan Implementasi Robot Pemotong Rumput Otonom dengan Sistem Navigasi Cerdas untuk Pemeliharaan Halaman Rumah	
Pengesahan	Tanggal Pengesahan		Semarang, 23 Juni 2026

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

Sistematika Dokumen C3

Riwayat Perubahan Dokumen

No.	Tanggal Bimbingan	Isi Bimbingan	Tindak Lanjut	Paraf Dosbing
1.	1 April 2026	Pembahasan Judul Proyek Capstone dengan 2 opsi Proyek	✔	
2.	8 April 2026	Finalisasi Judul Proyek capstone dan pembagian jobdesk masing - masing anggota	✔	
3.	16 April 2026	Perancangan Desain 3D Menggunakan Software Autodesk Fusion	✔	
4.	21 Mei 2026	Pelaporan estimasi biaya yang dibutuhkan untuk proyek capstone	✔	
5.	10 Juni 2026	Tanda tangan dan diskusi tentang C2	✔	
6.	15 Juni 2026	Menampilkan simulasi Computer Vision	✔	
7.				
8.				

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

RINGKASAN ISI DOKUMEN

Dokumen C3 ini membahas penelitian terkait perancangan dan Implementasi Robot Pemotong Rumput Otonom dengan Sistem Navigasi Cerdas untuk Pemeliharaan Halaman Rumah. Sistem yang dikembangkan memiliki empat fokus utama yaitu Visi Komputer dan Perencanaan Jalur (Object Detection & Navigation), Sistem Kendali Gerak dan Fusi Sensor (Kinematics & Odometry), Optimasi Mekanisme Pemotong dan Daya (Cutting Deck & Power Management), dan Sistem Penyemprotan Herbisida Presisi (Variable Rate Application).

Selain itu, dokumen ini memuat Metode yang diterapkan, Metode Pengujian, Perancangan Design, Spesifikasi Poduk, serta Simulasi Produk. Sistem ini dirancang untuk mengefisiensi waktu bagi pengguna yang memiliki sedikit waktu luang untuk merawat rumput yang ada di halama rumah.

METODE YANG DITERAPKAN

A. Analisis Metode

Pengembangan robot “Pemotong Rumput Otonom dengan Sistem Navigasi Cerdas untuk Pemeliharaan Halaman Rumah” ini dirancang menggunakan pendekatan sistem terintegrasi yang menggabungkan berbagai disiplin ilmu teknik. Analisis metode pada dokumen ini bertujuan untuk memberikan justifikasi ilmiah dan landasan rekayasa terhadap pemilihan algoritma, arsitektur kendali, serta desain perangkat keras yang diterapkan guna merespons tantangan operasional di lingkungan luar ruangan (outdoor).

Secara komprehensif, kesatuan sistem robot ini ditopang oleh kolaborasi empat fokus kepakaran utama yang bekerja secara sinergis, yaitu: (1) Visi Komputer dan Perencanaan Jalur (Object Detection & Navigation) untuk persepsi lingkungan dan deteksi rintangan; (2) Sistem Kendali Gerak dan Fusi Sensor berbasis logika cerdas dan kinematika odometri untuk menjaga stabilitas navigasi; (3) Sistem Penyemprotan Herbisida Presisi (Variable Rate Application) serta (4) Optimasi Mekanisme Pemotong dan Daya (Cutting Deck & Power Management). Penggabungan keempat metode ini dianalisis secara mendalam untuk memastikan bahwa robot tidak hanya mampu menjalankan tugas secara mandiri, tetapi juga adaptif, presisi, dan aman terhadap dinamika hambatan di lapangan.

1. Visi Komputer dan Perencanaan Jalur (Object Detection & Navigation)

   Sub-sistem ini bertugas sebagai otak persepsi dan pengambil keputusan spasial pada robot. Arsitektur pemrosesan dibangun dengan mengintegrasikan deteksi objek berbasis *Deep Learning* dan pemetaan kedalaman ruang secara konseptual untuk

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

menghasilkan rute navigasi otonom yang reaktif, tanpa memerlukan instrumen sensor jarak aktif seperti LiDAR.

a. Lokalisasi Rintangan Berbasis YOLOv8 Nano

Proses visi komputer diawali dengan inferensi citra menggunakan algoritma pelokalan objek satu tahap (*single-stage detector*) yaitu YOLOv8 varian Nano (YOLOv8n). Arsitektur model paling ringan ini dipilih untuk mengakomodasi beban komputasi *Edge AI* pada mikrokontroler agar mampu mempertahankan kecepatan *frame* (FPS) tinggi, yang merupakan syarat mutlak untuk menjamin kecepatan waktu reaksi pengereman robot otonom di lapangan.

Untuk menjamin presisi peletakan kotak prediksi (*bounding box*) terhadap rintangan nyata, model dioptimasi memanfaatkan pendekatan *Distance Intersection over Union* (DIoU). Secara konseptual, metode ini tidak hanya menilai persentase tumpang-tindih kotak, melainkan meminimalkan jarak titik pusat antara kotak prediksi dengan target aslinya. Melalui optimasi ini, sistem dapat secara presisi mengekstraksi garis batas bawah dari kotak deteksi, yang secara logika merepresentasikan titik kontak rintangan dengan permukaan tanah. Algoritma *Non-Maximum Suppression* (NMS) kemudian diterapkan untuk membuang deteksi kotak ganda pada satu rintangan yang sama.

b. Estimasi Jarak Geometris (ROI Trapesium)

Titik batas bawah dari rintangan yang telah diekstraksi kemudian diumpankan ke dalam fungsi estimasi jarak berbasis pandangan monokuler (*Geometry-Based Distance Estimation*). Sistem memproyeksikan sebuah *Region of Interest* (ROI) berbentuk koridor trapesium imajiner tepat di atas kanvas matriks video. Koridor ini membagi kedalaman pandangan ke dalam tiga zonasi hirarkis: Zona Hijau (Pantau), Zona Kuning (Awas), dan Zona Merah (Berhenti/Manuver Darurat).

Dimensi garis tepi dari koridor trapesium ini direntangkan secara proporsional mengikuti sudut perspektif kamera. Sistem secara otomatis memvalidasi apakah rintangan secara spasial berada murni memotong lajur kerja robot, atau sekadar berada di luar jalur lintasan. Apabila titik tumpu rintangan menembus batas zonasi kedalaman trapesium tersebut, sistem akan mengklasifikasikan tingkat ancamannya.

c. Strategi Perencanaan Jalur (*Coverage Path Planning* & Manuver)

Setelah objek diklasifikasikan ke dalam zona kedalamannya, matriks keputusan pergerakan (berupa transmisi karakter perintah ke mikrokontroler) dieksekusi berdasarkan heuristik perencanaan jalur (*Path Planning*):

- Pemotongan Jalur Linier & Manuver *U-Turn*: Selama algoritma mendeteksi area rumput dengan kepadatan visual yang tinggi di depannya, robot mempertahankan rute maju linier. Apabila kerapatan visual menipis menembus batas toleransi bawah, logika spasial mengidentifikasinya sebagai titik buta atau ujung halaman,

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

yang seketika memicu evaluasi orientasi *U-Turn* (putar balik) mengarah ke sisa lapangan yang belum dikerjakan.

- Interupsi Keamanan Aktif (*Fail-Safe Override*): Rintangan dengan klasifikasi makhluk hidup (manusia atau hewan) memiliki prioritas mitigasi tertinggi. Pergeseran objek makhluk hidup dari Zona Kuning menuju Zona Merah secara otomatis mengesampingkan seluruh perintah kemudi dan seketika memicu transmisi pengereman absolut untuk mencegah tabrakan.
- Manuver Hindar Cerdas (*Smart Dodge*): Berbeda dengan benda dinamis, kemunculan rintangan statis (seperti batu, pohon, atau tiang) di lintasan Zona Merah akan mengeksekusi subrutin menghindar cerdas. Sistem akan membelah geometri area pandangan menjadi bagian kiri dan kanan untuk mengomparasi persentase area rumput antar wilayah. Robot kemudian menerbitkan parameter manuver menyimpang ke arah sisi yang memiliki porsi rumput terbanyak, memastikan cakupan pengerjaan lahan tetap berlanjut secara optimal tanpa harus berhenti total.

2. Sistem Kendali Gerak dan Fusi Sensor (Kinematics & Odometry)
   a. Analisis Fusi Sensor Navigasi Inersia (IMU)

Pada sasis robot berjenis tracked dengan sistem kemudi skid-steering, pergerakan arah ditentukan oleh perbedaan kecepatan putar antara lintasan roda kiri dan kanan. Namun, manuver di atas permukaan tanah atau rumput yang tidak rata secara inheren menghasilkan gaya gesek non-linear yang memicu gelincir mekanis (slip) secara longitudinal maupun lateral [9]. Oleh karena itu, penggunaan sensor rotary encoder konvensional pada motor dinilai tidak efektif, sebab putaran roda saat terjadi slip tidak merepresentasikan perpindahan fisik sasis yang sebenarnya, sehingga rentan memicu akumulasi eror odometri (dead-reckoning drift) [10]. Sebagai solusinya, metode fusi sensor inersia menggunakan IMU MPU6050 diterapkan. Melalui integrasi numerik dari data kecepatan sudut giroskop (ω_z), sistem mampu mengekstraksi estimasi orientasi aktual (heading) robot secara real-time yang independen terhadap kondisi traksi roda di lapangan.

Sasis skid-steering berbelok dengan cara memaksa roda meluncur/tergelincir (slip) di atas permukaan. Jika Anda beroperasi di atas rumput, tingkat slip ini sangat liar. Rotary encoder hanya menghitung putaran roda secara buta—roda bisa berputar 5 kali akibat selip, padahal sasis tidak berbelok sama sekali. IMU memecahkan masalah ini dengan mengukur orientasi fisik sasis yang sebenarnya di dunia nyata (menggunakan giroskop), bukan sekadar putaran aktuatornya [9]

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

b. Analisis Kendali Cerdas *Fuzzy* Sugeno Orde-0

Untuk mengonversi ralat navigasi spasial menjadi sinyal aktuasi motor yang adaptif, metode kendali Fuzzy Inference System (FIS) dipilih guna menangani sifat dinamis dan non-linear dari penggerak skid-steering. Secara spesifik, algoritma Takagi-Sugeno (Sugeno Orde-0) diterapkan. Berbeda dengan metode Mamdani yang membutuhkan komputasi titik berat (centroid) dari bangun dua dimensi pada tahap defuzzifikasinya, konsekuen dari Sugeno Orde-0 berupa nilai konstanta diskrit (tegas) [11]. Hal ini memberikan keuntungan komputasional yang sangat signifikan, di mana proses defuzzifikasi Weighted Average dapat dieksekusi dengan beban pemrosesan memori yang sangat efisien dan responsif pada mikrokontroler kelas rendah seperti ESP32 [Performance Comparison of Fuzzy Mamdani and Sugeno in Curtain and Lighting Control]. Efisiensi ini meminimalisasi latensi eksekusi program dan mencegah terjadinya hambatan eksekusi (Watchdog Reset) saat prosesor menghitung dua variabel masukan secara simultan, yakni Heading Error (e_θ) dan Cross-Track Error (e_{ct}).

Kontroler PID (Proporsional-Integral-Derivatif) sangat bagus untuk sistem yang linier (misal: line follower di atas lantai keramik datar). Namun, saat robot skid-steering berada di atas rumput, gaya gesek berubah-ubah setiap detik secara non-linear. Melakukan tuning rumus PID di atas rumput sangat sulit. Logika Fuzzy memecahkan masalah ini menggunakan heuristik ("jika miring ke kiri, perkuat putaran roda kiri"). Terutama Fuzzy Sugeno Orde-0, komputasinya jauh lebih ringan dari metode Mamdani, sehingga mikrokontroler seperti ESP32 tidak mengalami kegagalan proses [12]

c. Analisis *Finite State Machine* (FSM) Berbasis *Non-Blocking*

Sebagai pengawas tingkat tinggi (supervisor control), algoritma Finite State Machine (FSM) diterapkan untuk mengatur transisi status operasional robot secara terstruktur (seperti JALAN_LURUS, REM_MANUSIA, MENGHINDAR_BATU, dan U_TURN). Arsitektur FSM pada sistem ini dirancang secara khusus menggunakan manajemen waktu non-blocking (event-driven) melalui fungsi timer millis(). Pada desain sistem tertanam (embedded system), penggantian fungsi jeda statis (seperti delay()) dengan FSM non-blocking sangat esensial agar siklus unit pemroses pusat (CPU) tidak membeku (freeze) selama transisi status berlangsung [15]. Dengan ketiadaan instruksi blocking, ESP32 tetap dapat mempertahankan siklus komunikasi I2C untuk membaca data sensor IMU tanpa jeda sedikit pun, sehingga akurasi perhitungan sudut integrasi pada manuver panjang tetap terjaga ketat.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

Fuzzy pada robot dirancang untuk menjaga kestabilan navigasi secara kontinu (Continuous Control). Namun, jika robot dihadapkan pada interupsi mendadak (misalnya "Ada batu!" atau "Sudah sampai ujung batas"), Anda tidak bisa memasukkan kondisi ini ke dalam 25 Rule Base Fuzzy yang sudah ada tanpa membuat sistem menjadi tumpang tindih. FSM hadir sebagai pengawas (Supervisor) yang menggunakan logika diskrit. Ia mengisolasi tugas: ketika mendeteksi batu, FSM mematikan Fuzzy sementara, menjalankan manuver menghindar secara sekuensial, dan mengembalikan kontrol ke Fuzzy setelah aman. Arsitektur ini disebut Hybrid Control Architecture.

3. Optimasi Mekanisme Pemotong dan Daya (Cutting Deck & Power Management)

Perancangan sistem pada proyek Capstone ini dilakukan menggunakan pendekatan Engineering Design Process (EDP) yang terdiri atas tahapan identifikasi kebutuhan sistem, analisis kebutuhan fungsional, perancangan perangkat keras (hardware), perancangan perangkat lunak (software), simulasi sistem kendali, implementasi algoritma, serta pengujian dan evaluasi performa sistem. Pendekatan ini dipilih karena mampu menghasilkan sistem yang terstruktur dan memudahkan proses integrasi antara subsistem mekanik, elektronika, serta algoritma kendali.

Fokus penelitian pada bagian ini berada pada pengembangan Cutting Deck and Power Management System, yaitu subsistem yang bertanggung jawab menjaga performa motor pemotong rumput ketika menghadapi perubahan beban akibat variasi tinggi maupun kepadatan rumput. Pada sistem konvensional, perubahan beban tersebut menyebabkan arus motor meningkat secara signifikan sehingga berpotensi mengakibatkan overload, penurunan efisiensi energi, bahkan kerusakan motor akibat temperatur yang berlebihan.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut dirancang suatu sistem kendali tertutup (closed-loop control system) yang memanfaatkan sensor arus INA219 sebagai sensor umpan balik (feedback sensor), algoritma Proportional Integral Derivative (PID) sebagai pengendali utama, serta aktuator linear elektrik sebagai mekanisme pengatur ketinggian cutting deck. Sistem bekerja secara adaptif dengan memonitor arus motor pemotong secara real-time. Ketika arus melebihi batas aman yang telah ditentukan, algoritma PID akan menghasilkan sinyal kendali menuju driver motor BTS7960 sehingga aktuator linear menaikkan posisi cutting deck. Proses tersebut mengurangi gaya pemotongan rumput sehingga beban motor berkurang dan arus kembali berada pada rentang operasi normal.

Setelah beban motor kembali stabil, aktuator berhenti bekerja dan mekanisme self-locking mempertahankan posisi cutting deck tanpa memerlukan konsumsi daya tambahan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keamanan motor pemotong, tetapi juga

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

memperpanjang umur komponen mekanik serta meningkatkan efisiensi penggunaan energi baterai selama robot beroperasi.

4. Sistem Penyemprotan Herbisida Presisi (Variable Rate Application)

Sub-sistem ini dirancang untuk mewujudkan metode aplikasi herbisida secara selektif, adaptif, dan proporsional pada area lanskap halaman perumahan menggunakan konsep *Variable Rate Application* (VRA). Analisis rekayasa terhadap metode ini dilakukan guna mengatasi keterbatasan teknologi komersial yang ada saat ini serta memastikan keandalan mekanis maupun elektrikal dari perangkat keras aktuator di lapangan.

a. Analisis Celah Teknologi dan Urgensi Pendekatan Presisi

Teknologi penyemprotan presisi komersial yang tersedia di pasar saat ini umumnya masih terbatas pada penggunaan metode deteksi biner (*on/off*) sederhana yang bertumpu pada pembacaan sifat klorofil daun saja. Pendekatan diskrit ini tidak memiliki kapabilitas untuk mengevaluasi gradasi kerapatan vegetasi ataupun mengklasifikasikan jenis gulma secara spesifik. Di sisi lain, metode presisi tingkat lanjut di industri pertanian skala besar kerap menggunakan pendekatan *crop signalling* (pemberian agen penanda berupa zat fluoresens atau reflektor UV pada benih sebelum masa tanam). Pendekatan tersebut membutuhkan instrumen prapanen yang sangat rumit dan sama sekali tidak aplikatif untuk lanskap domestik atau area halaman perumahan. Pada lingkungan perumahan, rumput liar dan gulma tumbuh secara alami, acak, serta heterogen. Oleh karena itu, diperlukan sebuah metode cerdas yang mampu mengenali karakteristik visual objek secara dinamis tanpa mengubah fisik lahan maupun vegetasi yang ada.

b. Arsitektur Smart Spraying Berbasis Visi Komputer dan Logika Fuzzy

Guna menjembatani kebutuhan tersebut, dikembangkan modul *Smart Spraying* yang mengintegrasikan teknik pengolahan citra digital (Computer Vision) klasik dengan algoritma Fuzzy Logic Controller (Mamdani). Secara hierarkis, aliran data dimulai dari kamera monokuler yang bertindak sebagai sensor visual utama untuk mengamati kondisi rumput secara real-time. Ketika model YOLOv8n mendeteksi wilayah sebagai "Area Rumput", matriks piksel pada bounding box tersebut akan dipotong (image slicing) dan dikonversi dari ruang warna BGR menuju ruang warna HSV (Hue, Saturation, Value) untuk mengeliminasi gangguan akibat fluktuasi intensitas cahaya matahari (bayangan pohon maupun pantulan silau).

Melalui teknik masking segmentasi warna tersebut, sistem menghitung rasio piksel gulma hijau aktif terhadap total luas vegetasi yang menghasilkan nilai kontinu berupa Indeks VRA (0–100%). Nilai indeks kerapatan ini tidak dievaluasi menggunakan ambang batas kaku, melainkan diumpankan sebagai variabel masukan (input) tunggal ke dalam Fuzzy Inference System (FIS) Mamdani yang melalui tiga tahapan komputasi:

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

- Fuzzifikasi: Mengonversi nilai tegas (crisp) Indeks VRA menjadi nilai linguistik (seperti: Jarang, Sedang, Lebat) berdasarkan fungsi keanggotaan (membership functions) berbentuk kurva segitiga atau trapesium.
- Evaluasi Rule Base & Inferensi: Memproses nilai logika linguistik menggunakan sekumpulan aturan implikasi fuzzy (seperti: IF Gulma adalah Lebat THEN Penyemprotan adalah Maksimal) guna menentukan derajat kebenaran output.
- Defuzzifikasi: Menghitung kembali nilai linguistik output menjadi nilai tegas numerik kontinu (0–100%) menggunakan metode Centroid (Titik Berat). Nilai inilah yang merepresentasikan persentase kekuatan semprotan pompa yang dibutuhkan.

c. Regulasi Aktuator Pompa Diafragma melalui Modulasi Lebar Pulsa (PWM)

Output linear hasil defuzzifikasi selanjutnya diterjemahkan oleh mikrokontroler ESP32 menjadi sinyal digital Pulse Width Modulation (PWM). Sinyal PWM ini dikirimkan menuju motor driver untuk meregulasi tegangan operasional secara dinamis pada aktuator berupa pompa diafragma mini (mini diaphragm pump).

Melalui skema kendali ini, apabila robot melewati area dengan indeks gulma yang rendah atau terdeteksi rumput kuning (kering/mati), mikrokontroler akan memperkecil duty cycle PWM sehingga debit penyemprotan cairan berkurang secara proporsional demi menghemat herbisida. Sebaliknya, jika visual kamera menangkap hamparan gulma hijau yang padat dan lebat, sinyal PWM akan otomatis membesar untuk mendongkrak tegangan motor pompa sehingga intensitas penyemprotan ditingkatkan secara seketika (real-time).

d. Justifikasi Ilmiah Pemilihan Metode Logika Fuzzy

Pemilihan algoritma Fuzzy Logic sebagai jembatan kendali cerdas pada subsistem ini didasarkan pada dua alasan rekayasa (engineering justification) yang fundamental:

- Pemodelan Kerapatan Vegetasi Alami secara Akurat: Karakteristik pertumbuhan gulma di dunia nyata tidak pernah terdistribusi dalam kondisi biner yang ekstrem (ada atau tidak ada), melainkan berupa gradasi transisi yang kabur (fuzzy) dan kontinu. Melalui fungsi keanggotaan fuzzy, sistem dapat mendefinisikan wilayah abu-abu seperti "agak jarang" atau "mendekati lebat" ke dalam parameter matematis, sehingga kuantitas distribusi cairan herbisida menjadi jauh lebih objektif, tepat sasaran, hemat biaya, dan ramah lingkungan.
- Proteksi Elektrikal dan Mekanis Aktuator Robot: Jika sistem dipaksa menggunakan logika percabangan konvensional (if-else kaku), fluktuasi nilai piksel di sekitar ambang batas (*threshold*) akan memicu fenomena *chattering* (sakelar biner yang berganti secara ekstrem dalam fraksi milidetik). Dari sisi elektrikal, transisi *on/off* yang kasar dan berulang-ulang akan menghasilkan lonjakan arus balik (*current spikes*) yang tinggi pada kumparan motor, memicu panas berlebih (*overheating*) pada komponen IC *motor*

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

driver, serta memperpendek umur operasional sistem kendali. Dari sisi mekanis, sentakan instan tersebut akan mempercepat keausan membran katup internal katup pompa diafragma akibat tekanan balik mendadak. Sifat *Fuzzy Logic* yang menghasilkan transisi output kontinu yang sangat halus (*smooth transitions*) bertindak sebagai peredam kejut elektrik dan mekanik, yang secara signifikan menjamin keamanan serta memperpanjang masa pakai (*lifespan*) komponen robot.

B. Metode Pengujian

Tahap pengujian pada sistem robot otonom multifungsi ini dirancang secara komprehensif untuk memvalidasi kinerja perangkat keras dan perangkat lunak, baik secara independen (unit testing) maupun secara terintegrasi (system integration testing). Pengujian ini mutlak diperlukan guna memastikan bahwa seluruh fungsionalitas robot mampu memenuhi spesifikasi perancangan dan dapat beroperasi dengan andal di tengah ketidakpastian lingkungan luar ruangan (outdoor). Secara sistematis, parameter evaluasi dititikberatkan pada empat fokus operasional yang saling berkaitan. Akurasi persepsi lingkungan dan keandalan pemetaan rute dievaluasi melalui pengujian Visi Komputer dan Perencanaan Jalur (Object Detection & Navigation).

Hasil persepsi tersebut kemudian divalidasi eksekusi manuver dan stabilitas orientasinya melalui pengujian Sistem Kendali Gerak dan Fusi Sensor (Kinematics & Odometry). Selanjutnya, efektivitas pemangkasan gulma dan ketahanan durasi operasional diukur melalui pengujian Optimasi Mekanisme Pemotong dan Daya (Cutting Deck & Power Management). Terakhir, akurasi distribusi cairan pembasmi gulma divalidasi melalui pengujian Sistem Penyemprotan Herbisida Presisi (Variable Rate Application). Rangkaian pengujian terpadu ini menjadi tolok ukur utama keberhasilan sistem dalam mewujudkan operasi pertanian dan perawatan lanskap yang presisi, adaptif, dan aman.

1. Visi Komputer dan Perencanaan Jalur (Object Detection & Navigation)
   a. Evaluasi Deteksi Rintangan Berbasis *Deep Learning* (YOLOv8n)

      Pengujian ini bertujuan memvalidasi stabilitas inferensi jaringan saraf tiruan dalam mengenali dan melokalisasi 7 kelas rintangan pada *frame* beresolusi 640 x 640 piksel. Mengamati konsistensi pembentukan bounding box dan keakuratan ekstraksi titik tumpu koordinat (Xtengah, Ybawah) saat rintangan bergerak secara dinamis di layar. Pengujian juga memverifikasi fungsi Non-Maximum Suppression (NMS) dengan parameter Intersection over Union (IoU) sebesar 0.45 untuk membuang deteksi ganda. model mampu mempertahankan deteksi rintangan di atas *confidence threshold* 0.45 tanpa mengalami *flickering.*
   b. Validasi Segmentasi Agrikultur Presisi (*HSV Masking* untuk VRA)

      Skenario kedua mengukur tingkat akurasi segmentasi ruang warna dalam memisahkan spektrum vegetasi dari derau (*noise*) latar belakang. Matriks gambar yang

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

dipotong dari *bounding box* "Area Rumput" dikonversi ke format HSV. Pengujian ini menempatkan algoritma pada kondisi iluminasi yang berlawanan (bayangan gelap vs pantulan cahaya silau) menggunakan rentang filter statis [35, 40, 40] hingga [85, 255, 255]. Keberhasilan uji ini dibuktikan dengan hilangnya piksel tanah atau batu (direduksi menjadi matriks hitam), sementara piksel daun hijau tetap menyala. Hasil kalkulasi *bitwise* ini wajib terjemahkan secara instan ke dalam teks *On-Screen Display* (OSD) dengan format muatan komunikasi linier seperti VRA:85.0.

c. Matriks Keputusan Navigasi

Skenario paling kritis ini menguji logika algoritma dalam menerjemahkan kedalaman piksel semu menjadi instruksi pergerakan motor. Sistem secara langsung dievaluasi saat objek rintangan menembus batas kedalaman spasial pada koridor trapesium. Lolosnya sistem dari pengujian ini diukur melalui tiga parameter fungsional: transisi pergerakan yang mulus dari "Aman" ke "Hati-hati" lalu "Stop" di Zona Merah, keberhasilan memicu subrutin *Smart Dodge* (membandingkan kerapatan rumput kiri dan kanan untuk menghindari objek statis); serta aktivasi seketika protokol *Blind Mode* (mengirim perintah rem darurat absolut) ketika sistem kehilangan tangkapan visual selama lebih dari 5.0 detik.

2. Sistem Kendali Gerak dan Fusi Sensor (Kinematics & Odometry)

Pengujian pada subsistem kendali gerak dan navigasi bertujuan untuk memvalidasi akurasi pembacaan sensor, presisi respons aktuator, serta keandalan transisi logika sekuensial pada mikrokontroler ESP32. Rangkaian evaluasi ini dibagi menjadi tiga tahap pengujian utama:

a. Pengujian Fusi Sensor Navigasi Inersia (IMU)

Pengujian ini dilakukan untuk mengukur tingkat akurasi dan presisi dari sensor MPU6050 dalam mengestimasi orientasi arah (heading) sasis robot.

- Skenario Uji Statis & Dinamis: Robot diputar secara manual pada sumbu vertikal (yaw) menuju sudut-sudut referensi tertentu (misalnya 90°, 180°, dan 360°) menggunakan alat ukur fisik (busur derajat mekanis atau kompas digital eksternal) sebagai kalibrator.
- Parameter Evaluasi: Hasil pembacaan sudut aktual dari integrasi kecepatan sudut giroskop (ω_z) pada Serial Monitor dibandingkan dengan sudut fisik sebenarnya untuk mencari persentase eror pembacaan. Selain itu, pengujian drift dilakukan dengan membiarkan robot diam selama durasi tertentu untuk mengamati seberapa besar akumulasi simpangan nilai sudut yang terjadi seiring berjalannya waktu akibat noise sensor.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

b. Pengujian Sistem Kendali Cerdas *Fuzzy* Sugeno Orde-0

Tahap ini bertujuan untuk memvalidasi apakah algoritma Fuzzy Inference System (FIS) yang ditanamkan pada ESP32 memberikan respons output yang sinkron dengan rancangan teoretis pada simulasi MATLAB.

- Skenario Uji Injeksi Eror (FIS 2): Sistem diuji secara open-loop dengan memberikan nilai masukan tiruan (dummy data) berupa berbagai kombinasi Heading Error (e_θ) dan Cross-Track Error (e_{ct}). Masukan ini dirancang untuk mewakili 5 kondisi ekstrem (kondisi ideal, miring haluan, melenceng posisi, eror berlawanan, dan eror kritis).Skenario Uji Pengereman (FIS 1): Sistem diberikan nilai jarak piksel virtual secara bertahap (mulai dari zona aman hingga zona stop) untuk melihat penurunan nilai multiplier kecepatan secara kontinu.
- Parameter Evaluasi: Nilai output Pulse Width Modulation (PWM) untuk motor kiri dan kanan yang dihasilkan oleh perhitungan Weighted Average ESP32 dicatat dan dikomparasi secara langsung dengan tabel hasil simulasi Rule Viewer MATLAB. Pengujian dianggap berhasil jika galat (selisih) nilai PWM antara perangkat keras dan simulasi berada di bawah batas toleransi yang diizinkan (mendekati 0).

c. Pengujian *Finite State Machine* (FSM) Berbasis *Non-Blocking*

Pengujian FSM difokuskan pada keandalan logika pengawas (supervisor) dalam mengatur perpindahan perilaku (state) robot tanpa menginterupsi siklus komputasi utama.

- Skenario Uji Transisi: Mikrokontroler diberikan sinyal pemicu buatan melalui komunikasi Serial yang menyimulasikan pendeteksian rintangan (Batu) dari YOLOv8 maupun pencapaian target jarak odometri (Ujung Taman).
- Parameter Evaluasi: Analisis difokuskan pada ketepatan waktu eksekusi sekuensial menggunakan fungsi millis(). Sistem divalidasi dengan memantau pergerakan aktuator saat beralih dari status JALAN_LURUS menuju manuver MENGHINDAR_BATU atau U_TURN. Keberhasilan metode non-blocking dibuktikan dengan tetap berjalannya pembaruan data sudut dari IMU secara mulus (seamless) di layar pemantauan selama robot sedang melakukan rangkaian manuver sekuensial tersebut.

3. Optimasi Mekanisme Pemotong dan Daya (Cutting Deck & Power Management)

Pengujian pada subsistem optimasi mekanisme pemotong dan manajemen daya bertujuan untuk memvalidasi kemampuan sistem dalam menjaga performa motor pemotong pada berbagai kondisi beban secara adaptif. Evaluasi dilakukan terhadap akurasi

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

pembacaan sensor arus INA219, respons algoritma PID, kinerja aktuator linear, serta efisiensi konsumsi daya selama proses penyesuaian cutting deck. Rangkaian pengujian dibagi menjadi tiga tahap utama sebagai berikut.

a. Pengujian Monitoring Arus Motor Berbasis INA219
   - Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi akurasi sensor INA219 dalam membaca arus motor pemotong sebagai feedback pada sistem kendali. Sensor diuji pada beberapa kondisi beban, mulai dari tanpa beban hingga beban maksimum yang mensimulasikan variasi kepadatan rumput.
   - Parameter Evaluasi: Nilai arus hasil pembacaan INA219 dibandingkan dengan amperemeter digital sebagai acuan. Pengujian dinyatakan berhasil apabila sensor mampu mendeteksi perubahan arus secara real-time dengan galat pembacaan yang kecil serta mampu mengidentifikasi kondisi arus yang melebihi batas aman sebesar 155 mA.

b. Pengujian Sistem Kendali PID
   - Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan algoritma PID dalam mengendalikan elevasi cutting deck berdasarkan perubahan arus motor. Ketika arus melebihi nilai setpoint, sistem akan menggerakkan aktuator linear untuk mengurangi beban pemotongan hingga arus kembali berada pada rentang operasi normal.
   - Parameter Evaluasi: Kinerja sistem dianalisis berdasarkan karakteristik respons seperti rise time, settling time, overshoot, dan steady-state error. Pengujian dianggap berhasil apabila sistem mampu mengembalikan arus menuju nilai setpoint secara stabil tanpa menghasilkan osilasi yang berlebihan.

c. Pengujian Mekanisme Cutting Deck dan Manajemen Daya
   - Pengujian ini dilakukan untuk memvalidasi kinerja aktuator linear serta mekanisme self-locking dalam mengatur ketinggian cutting deck secara otomatis. Sistem diuji pada beberapa kondisi beban untuk mengamati perubahan posisi aktuator terhadap penurunan arus motor.
   - Parameter Evaluasi: Evaluasi dilakukan terhadap waktu respons aktuator, perubahan elevasi cutting deck, penurunan arus motor, serta konsumsi daya setelah mekanisme self-locking aktif. Pengujian dinyatakan berhasil apabila aktuator mampu mempertahankan posisi tanpa back-drive dan tidak mengonsumsi daya setelah proses penyesuaian selesai.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

4. Sistem Penyemprotan Herbisida Presisi (Variable Rate Application)

Pengujian pada subsistem penyemprotan herbisida presisi bertujuan untuk memvalidasi akurasi perhitungan algoritma logika fuzzy dalam menentukan kuantitas herbisida, performa regulasi sinyal PWM oleh mikrokontroler terhadap *driver* motor pompa, serta keandalan distribusi cairan secara proporsional di lapangan. Rangkaian evaluasi ini dibagi menjadi tiga tahap pengujian utama:

a. Pengujian Inferensi Algoritma Fuzzy Logic Controller (Mamdani)

- Skenario Uji: Tahap awal pengujian dilakukan secara *open-loop* untuk memverifikasi ketepatan komputasi matematika fuzzy Mamdani yang ditanamkan pada mikrokontroler ESP32. Pengujian dieksekusi dengan menyuntikkan data masukan tiruan (*dummy data*) berupa berbagai variasi nilai Indeks VRA (0–100%) yang merepresentasikan kerapatan vegetasi gulma aktif hasil keluaran segmentasi ruang warna HSV. Kombinasi nilai masukan yang diujikan dirancang untuk mencakup seluruh fungsi keanggotaan linguistik utama, yaitu kondisi gulma *Jarang* (misal: 15%), *Sedang* (misal: 50%), dan *Lebat* (misal: 85%).
- Parameter Evaluasi: Nilai output tegas (*crisp value*) berupa persentase kekuatan pompa hasil kalkulasi metode *Centroid* defuzzifikasi oleh ESP32 dicatat melalui Serial Monitor. Output dari perangkat keras tersebut dikomparasi secara langsung dengan tabel hasil pengujian teoritis pada *Rule Viewer* perangkat lunak MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. Pengujian dinyatakan berhasil apabila galat (*error*) komputasi bernilai mendekati 0 atau berada di bawah batas toleransi ($\leq 1\%$) serta tidak menimbulkan gejala latensi pemrosesan (*blocking*) pada putaran *loop* utama program ESP32.

b. Pengujian Karakteristik Linieritas PWM dan Debit Pompa Diafragma

- Skenario Uji: Pengujian ini ditujukan untuk mengalibrasi dan mengukur korelasi fisik secara nyata antara nilai *duty cycle* sinyal PWM dari ESP32 dengan debit aktual cairan aktuator pompa diafragma mini (*mini diaphragm pump*). Skenario pengujian dijalankan dengan memvariasikan nilai sinyal PWM 8-bit secara bertahap mulai dari tingkat resolusi minimum hingga maksimum, yaitu nilai 0, 64, 127, 191, dan 255 (setara dengan tingkat daya motor 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%). Cairan herbisida yang diemisikan melalui komponen nosel (*nozzle*) ditampung dalam gelas ukur presisi dengan batas durasi waktu konstan selama 10 detik pada setiap tahap pengujian.
- Parameter Evaluasi: Nilai tegangan operasional (Volt) pada terminal penggerak motor pompa diafragma diukur menggunakan multimeter digital, sedangkan volume cairan (mL) dihitung untuk mendapatkan nilai debit rata-rata (mL/detik). Evaluasi difokuskan pada tingkat linieritas hubungan antara peningkatan nilai PWM dan laju debit semprotan. Selain

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

itu, pengujian ini harus mengidentifikasi batas nilai *dead-zone* (tegangan ambang bawah minimum di mana motor pompa baru mulai berputar mengatasi kelembaman mekanis katup diafragma), yang akan digunakan sebagai pembatas batas bawah pemetaan (*mapping*) PWM di dalam kode program utama.

c. Pengujian Fungsionalitas VRA Terintegrasi secara Lapangan (*End-to-End*)

- Skenario Uji: Pengujian ini dilakukan secara terintegrasi penuh (*system integration testing*) di area luar ruangan (*outdoor*) untuk menguji performa robot di bawah dinamika lingkungan sebenarnya. Robot dijalankan pada lintasan kerja otonom yang dikondisikan memiliki tiga karakteristik vegetasi secara berurutan: area tanah kosong/rumput kuning mati (Indeks VRA rendah), area rumput dengan sebaran gulma bercak jarang (Indeks VRA menengah), dan area koloni gulma hijau yang padat dan lebat (Indeks VRA tinggi). Penguji memantau sinkronisasi antara visualisasi kamera, pengiriman parameter string data komunikasi serial (format teks OSD VRA:XX.X), dan perubahan riil kekuatan pancaran air pada nosel penyemprot.
- Parameter Evaluasi: Tingkat keberhasilan pengujian dinilai berdasarkan pemenuhan parameter fungsional presisi berikut:
    1. Transisi Output Halus (*Smooth Transitions*): Perubahan intensitas semprotan dari area lebat ke area jarang harus berlangsung secara kontinu tanpa menunjukkan gejala fenomena *chattering* (kondisi motor pompa bergetar atau mati-hidup secara kasar akibat fluktuasi data pembacaan sensor visual di sekitar batas ambang kaku).
    2. Akurasi Distribusi Cairan: Nosel secara instan harus memperkecil pancaran kabut cairan (atau menutup penuh) ketika kamera mendeteksi rumput mati/tanah kosong, serta otomatis menyemprotkan cairan secara maksimal saat berada tepat di atas hamparan gulma tebal.
    3. Sinkronisasi Latensi Komunikasi: Jeda waktu (*delay*) antara keberhasilan ekstraksi nilai komputasi visi komputer (format teks OSD) dengan respons mekanis pancaran nosel wajib berada di bawah batas toleransi latensi *real-time* sistem robot.
    4. Efisiensi Konsumsi Herbisida: Total volume cairan pembasmi yang dihabiskan sepanjang lintasan diukur dan dikomparasi dengan metode penyemprotan konvensional menyeluruh secara terus-menerus (*continuous blanket spraying*), di mana sistem harus mampu menunjukkan penghematan cairan herbisida minimal sebesar 30–40%.

PERANCANGAN

A. Desain Sistem / Produk

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

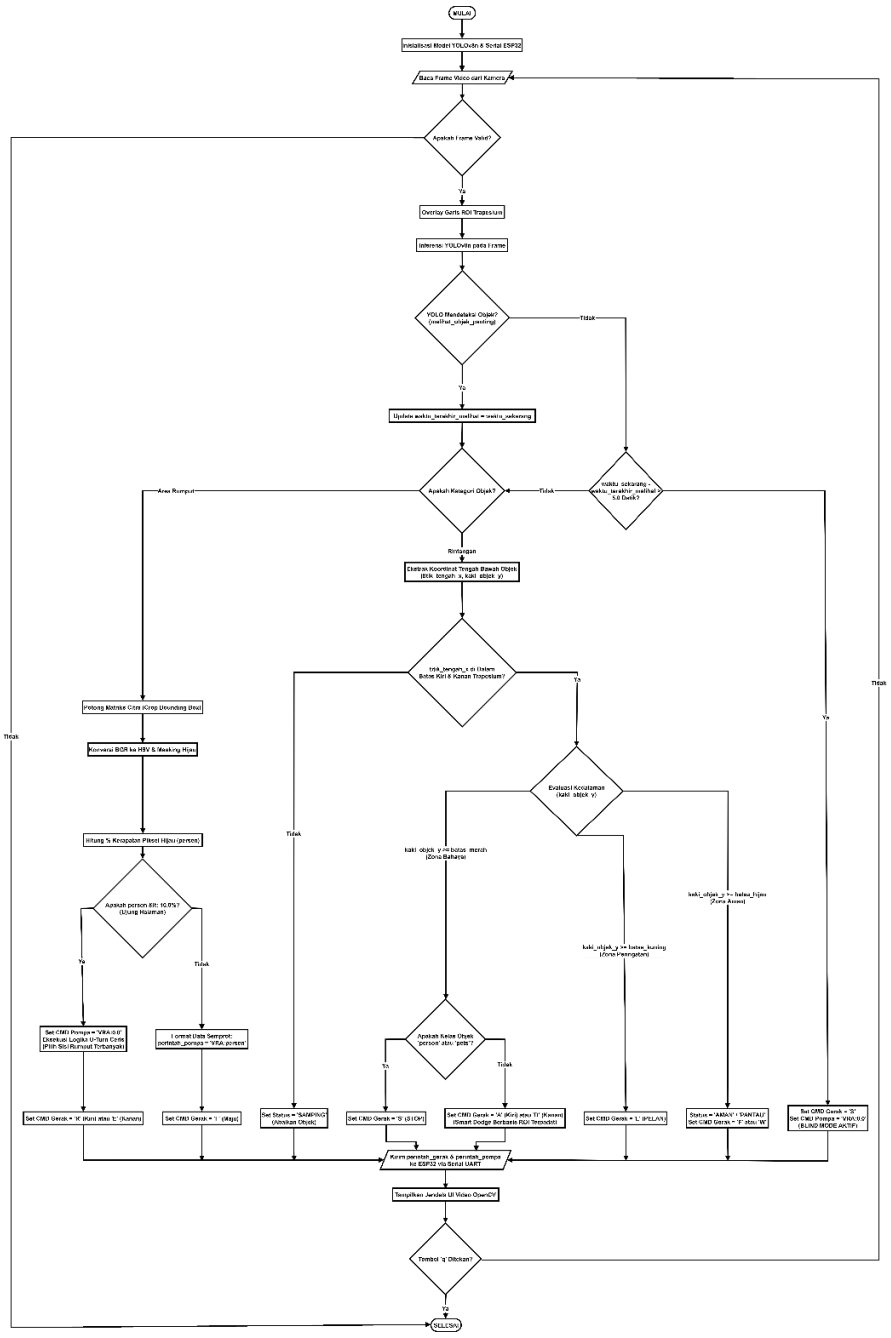
Bagian desain sistem ini menguraikan cetak biru (blueprint) rekayasa teknis dari robot pemotong rumput dan penyemprot herbisida otonom, yang merangkum arsitektur perangkat keras, perangkat lunak, serta pemodelan matematisnya. Perancangan alat ini dibangun di atas arsitektur terpadu yang menyinergikan empat subsistem utama agar dapat beroperasi sebagai satu entitas mandiri. Secara hierarkis, aliran proses dimulai dari Visi Komputer dan Perencanaan Jalur yang bertindak sebagai indra persepsi visual untuk memetakan rintangan dan rute target. Data spasial dari sistem visi tersebut kemudian diteruskan ke Sistem Kendali Gerak dan Fusi Sensor yang bertugas mengolah kalkulasi kinematika, odometri, dan logika aktuasi motor untuk mengeksekusi pergerakan sasis secara presisi.

Secara bersamaan, sistem ditopang oleh rancang bangun fisik pada Optimasi Mekanisme Pemotong dan Daya yang memastikan efisiensi torsi pisau pemangkas serta keandalan distribusi daya listrik ke seluruh komponen. Sebagai fungsi pelengkap tingkat lanjut, rancangan Sistem Penyemprotan Herbisida Presisi diintegrasikan untuk mendistribusikan cairan secara terukur sesuai kebutuhan lahan. Keseluruhan desain sistem ini dirancang menggunakan topologi komunikasi terpusat, memastikan setiap subsistem beroperasi secara sinkron dengan latensi yang minimal.

1. Visi Komputer dan Perencanaan Jalur (Object Detection & Navigation)

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id



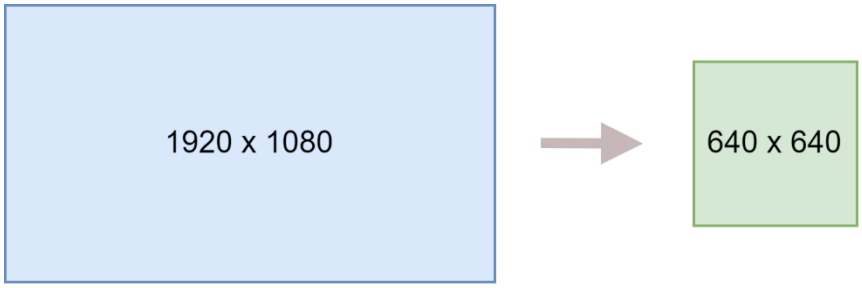
Sistem persepsi visual pada robot ini mengandalkan YOLOv8 varian Nano (YOLOv8n). Arsitektur ini dipilih karena kemampuannya sebagai *single-stage detector*, di mana proses pembuatan kotak pembatas (lokalisasi) dan identifikasi jenis rintangan (klasifikasi) dieksekusi secara bersamaan dalam satu propagasi maju (*forward pass*). Pendekatan komputasi ini jauh lebih efisien dibandingkan model konvensional dan sangat cocok untuk lingkungan *edge computing* pada robot otonom.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

a. Transformasi Matriks dan Alur Ekstraksi Fitur

Proses deteksi diawali dengan penyesuaian dimensi *frame* kamera menjadi matriks standar 640x640 piksel. Matriks gambar ini kemudian diproses melalui bagian *backbone* model yang menggunakan struktur *Cross Stage Partial Network* (CSPNet) untuk mengekstrak fitur visual benda, mulai dari pola tekstur rumput hingga bentuk fisik manusia.

itu, peta fitur (*feature maps*) dari berbagai skala digabungkan di bagian *neck* (berbasis PANet). Penggabungan ini penting agar robot tidak kehilangan sensitivitas saat mendeteksi rintangan kecil yang masih jauh, maupun objek besar yang tiba-tiba muncul di depan kamera. Selanjutnya, bagian *head* model secara langsung memprediksi probabilitas kelas dan posisi objek tanpa menggunakan kotak jangkar (*anchor-free*), sehingga memangkas beban pemrosesan secara signifikan.



b. Formulasi Koordinat Spasial untuk Navigasi

Keluaran mentah dari model berupa tingkat keyakinan (*confidence*) dan koordinat kotak pembatas dalam format [x1, y1, x2, y2]. Untuk kebutuhan navigasi pemotong rumput, sistem tidak perlu mengolah seluruh dimensi kotak. Logika program disusun untuk mengekstrak secara spesifik "titik tumpu" rintangan, yang merepresentasikan titik pijak atau area kontak fisik objek tersebut dengan tanah.
Titik tumpu ini dirumuskan melalui perhitungan:

$$Xtengah = \frac{x1 - x2}{2}$$

$$Xbawah = y2$$

Secara analitis, nilai Ybawah bertindak sebagai parameter kedalaman semu. Semakin besar nilai Ybawah (bergerak mendekati batas bawah resolusi layar), berarti objek tersebut secara fisik semakin dekat dengan bumper robot. Koordinat tumpu Xtengah, Ybawah inilah yang akan diteruskan ke dalam kalkulasi batas *Region of Interest* (ROI) Trapesium untuk mengevaluasi keputusan manuver.

c. Evaluasi Prediksi (*Confidence* dan NMS)

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

Agar robot tidak bereaksi terhadap rintangan bayangan (*false positive*) atau menabrak rintangan nyata (*false negative*), prediksi matriks disaring menggunakan dua parameter utama. Pertama, ambang batas *confidence threshold* ditetapkan sebesar 0.45. Objek yang diprediksi di bawah skor ini akan langsung diabaikan oleh sistem.
Kedua, parameter *Intersection over Union* (IoU) diatur pada nilai 0.45 di dalam algoritma *Non-Maximum Suppression* (NMS). Saat model menghasilkan tumpukan kotak pembatas ganda pada satu rintangan yang sama, NMS akan mengevaluasi area irisannya dan hanya mempertahankan satu kotak dengan skor kepastian tertinggi. Metode penyaringan ini sangat krusial untuk mencegah sistem mikrokontroler menerima instruksi pengereman secara ganda dan berulang-ulang.

d. Segmentasi Ruang Warna HSV untuk *Variable Rate Application* (VRA)

Sebagai alur komputasi paralel dari deteksi rintangan, sistem mengeksekusi algoritma *Variable Rate Application* (VRA) secara independen ketika model YOLOv8n mengenali objek sebagai "Area Rumput". Alih-alih membebani *Graphics Processing Unit* (GPU) dengan melatih model segmentasi AI yang berat, metode ini memanfaatkan pengolahan citra digital klasik yang jauh lebih ringan namun sangat presisi dalam memetakan area vegetasi.

1. Pemotongan Matriks (*Image Slicing*) dan Konversi Ruang Warna

Ketika kotak pembatas rumput terdeteksi, program secara otomatis memotong (*crop*) area matriks piksel tersebut dari *frame* utama. Potongan gambar ini secara bawaan memiliki format ruang warna BGR (*Blue, Green, Red*). Namun, format BGR sangat rentan terhadap fluktuasi intensitas cahaya matahari luar ruangan (seperti area yang tertutup bayangan pohon atau yang terkena silau).

Untuk mengatasi kelemahan optik tersebut, matriks diubah ke dalam ruang warna HSV (*Hue, Saturation, Value*). Pendekatan ini memisahkan informasi warna murni (*Hue*) dari intensitas pencahayaan (*Value*), sehingga algoritma tetap konsisten mengenali pigmen hijau klorofil meskipun kondisi cuaca di lapangan berubah-ubah.

2. Filter (*Thresholding & Masking*)

Setelah dikonversi ke HSV, matriks gambar disaring menggunakan operasi ambang batas (*thresholding*). Sistem menerapkan rentang nilai matriks bawah pada [35, 40, 40] dan matriks atas pada [85, 255, 255]. Rentang spesifik ini berfungsi sebagai *masking* untuk mengisolasi spektrum hijau daun. Piksel yang berada di dalam rentang tersebut akan dipertahankan (bernilai *non-zero*), sedangkan piksel di luar rentang seperti tanah cokelat, batu kecil, atau daun kering akan diubah menjadi hitam (bernilai nol).

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

3. Kalkulasi Persentase Kerapatan Gulma

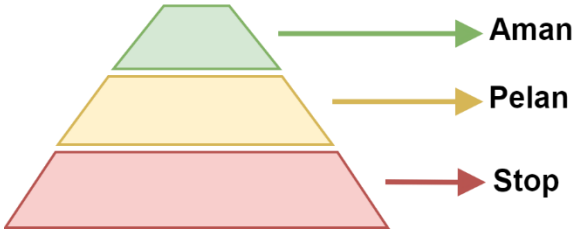
Tingkat kepadatan vegetasi pada area tersebut kemudian dihitung dengan membandingkan jumlah piksel hijau hasil *masking* terhadap total keseluruhan piksel di dalam kotak potongan. Secara matematis, rasio ini diformulasikan sebagai:

$$Persentase = (\frac{jumlah\ piksel\ non-zero}{Total\ resolusi\ Area\ potongan}) \ x\ 100\%$$

Hasil perhitungan persentase kerapatan dari algoritma visi komputer ini tidak langsung mengeksekusi aktuator keras. Sistem kecerdasan buatan bertugas mengemas nilai rasio tersebut ke dalam paket data string linier (sebagai contoh: VRA:85.0) dan men-transmisikannya ke mikrokontroler ESP32 melalui jalur komunikasi serial UART.

e. Penentuan *Region of Interest* (ROI) Menggunakan Pola Trapesium

Untuk mewujudkan navigasi otonom tanpa menggunakan sensor pengukur jarak aktif (seperti LiDAR atau kamera stereo) yang memakan biaya besar, sistem persepsi visual ini memanipulasi proyeksi geometri dua dimensi menjadi estimasi kedalaman ruang tiga dimensi. Hal ini dicapai dengan merender *Perspective Region of Interest* (ROI) berbentuk trapesium imajiner di atas *frame* kamera. Trapesium ini mensimulasikan batas lorong lintasan fisik dari sasis dan dimensi pisau pemotong robot saat bergerak maju.



1. Proyeksi Geometri dan Interpolasi Spasial

Lorong trapesium dikalibrasi secara proporsional terhadap resolusi kanvas kamera (640x640 piksel). Trapesium ini dibagi secara horizontal menjadi tiga zona kedalaman (sumbu Y): Zona Merah (Bahaya Kritis), Zona Kuning (Peringatan/Pelambatan), dan Zona Hijau (Pantauan Aman).

Agar sistem mengenali apakah suatu rintangan benar-benar memblokir jalur lintasan atau hanya berada di pinggir jalan, algoritma harus mengetahui lebar spesifik lorong trapesium tepat di titik kedalaman rintangan tersebut berada. Karena sisi trapesium berbentuk diagonal, sistem menggunakan fungsi matematis interpolasi linier untuk mencari titik batas kiri (xkiri) dan kanan

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

(xkanan) pada sembarang kedalaman objek (y). Persamaan interpolasi ini diformulasikan sebagai:

$$xkiri(y) = xbot_left + (Xtop_left - xbot_left)\, x\, \frac{y - H}{batas_hijau - H}$$

$$xkanan(y) = xbot_right + (Xtop_right - xbot_right)\, x\, \frac{y - H}{batas_hijau - H}$$

2. Evaluasi Rintangan dan Manuver

Setelah fungsi geometri terbentuk, algoritma memvalidasi koordinat titik tumpu rintangan Xtengah, Ybawah. Jika nilai Xtengah berada di luar interval batas kiri dan kanan, objek secara komputasional dideklarasikan berstatus "SAMPING" dan diabaikan, sehingga menghemat sumber daya sistem. Namun, jika Xtengah berada di dalam koridor trapesium, algoritma mengevaluasi kedalaman objek (Ybawah) beserta kelas klasifikasinya untuk memicu respons spesifik:

- Objek bergerak (Manusia/Hewan): Sistem memberikan prioritas keselamatan absolut. Jika objek hidup memasuki zona merah, program secara instan men-transmisikan perintah pengereman darurat penuh (CMD GERAK: S) menuju mikrokontroler.
- Objek Statis: Alih-alih hanya berhenti, sistem menerapkan logika *Smart Dodge* (Menghindar Cerdas). Saat rintangan statis terdeteksi di zona kuning atau merah, algoritma visi membelah kanvas menjadi dua *Region of Interest* (Kiri dan Kanan). Subsistem HSV (dari fungsi VRA) kembali dipanggil secara asinkron untuk membandingkan sisa kerapatan rumput di kedua sisi objek tersebut. Visi komputer kemudian menginstruksikan manuver menghindar (ke kiri 'A' atau ke kanan 'D') menuju area yang memiliki skor rumput tertinggi, sehingga kelanjutan rute *Coverage Path Planning* tetap optimal.

2. Sistem Kendali Gerak dan Fusi Sensor (Kinematics & Odometry)

Desain sistem kendali gerak pada robot ini bertumpu pada arsitektur lingkar tertutup (closed-loop control architecture) yang mengolah variabel spasial lingkungan menjadi sinyal aktuasi motor penggerak.

a. Perhitungan Kinemaatika Sasis *Tracked Robot (Skid-Steering)*

*S*ecara teoretis, pemodelan skid-steering diadaptasi dari kinematika Differential Drive klasik. Pada kondisi ideal (asumsi tidak ada gaya gesek lateral dan roda tidak

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

mengalami selip), kecepatan linear (v) dan kecepatan sudut/rotasi (ω) robot pada titik pusat massanya (Center of Mass) dirumuskan sebagai:

$$v = \frac{v_R + v_L}{2}$$

$$\omega_{ideal} = \frac{v_R - v_L}{B}$$

Keterangan Variabel :

- v : Kecepatan linear translasi sasis robot pada sumbu maju (m/s).
- ω_{ideal} : Kecepatan sudut rotasi teoritis robot terhadap sumbu Z (rad/s).
- v_R : Kecepatan linear aktual lintasan/roda sisi kanan (m/s), didapat dari $RPM \times$ jari-jari roda.
- v_L : Kecepatan linear aktual lintasan/roda sisi kiri (m/s).
- B : Lebar fisik lintasan sasis (*Physical Track Width*), yaitu jarak mekanis ukur antara titik tengah lintasan kiri ke titik tengah lintasan kanan (m).

Pada implementasi dunia nyata, khususnya saat robot beroperasi di atas permukaan non-linear seperti rumput atau tanah, asumsi ideal di atas tidak berlaku. Untuk melakukan rotasi (ω), sasis *skid-steering* harus "menyeret" lintasannya, yang secara fisika memicu terjadinya gelincir lateral (*lateral skidding*) dan gelincir longitudinal (*longitudinal slip*).

Akibat gaya gesek tanah yang menahan putaran sasis, titik pusat rotasi sesaat (*Instantaneous Center of Rotation* / ICR) [Experimental kinematics for wheeled skid-steer mobile robots] dari robot akan melebar dan tidak lagi sejajar dengan titik kontak roda. Oleh karena itu, variabel lebar sasis fisik (B) pada rumus dasar harus dimodifikasi dan diganti dengan parameter empiris yang disebut **Lebar Lintasan Efektif (*Effective Track Width* /$Beff$)**. $Nilai\ Beff$ ini selalu lebih besar dari B ($Beff > B$).

Melalui substitusi nilai ICR yang melebar tersebut, modifikasi persamaan kinematika kecepatan sudut untuk sasis *skid-steering* menjadi:

$$\omega_{aktual} = \frac{v_R - v_L}{B_{eff}}$$

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

Dengan nilai B_{eff} yang dapat dikalkulasi secara eksperimental melalui kalibrasi perbandingan kecepatan linear roda dengan kecepatan sudut aktual (dibaca oleh giroskop) saat robot diputar secara konstan, yaitu:

$$B_{eff} = \frac{v_R - v_L}{\omega_{aktual_sensor}}$$

Keterangan Variabel :

- ω_{aktual} : Kecepatan sudut presisi dari sasis robot yang telah mengkompensasi gesekan permukaan (rad/s).
- B_{eff} : Lebar lintasan efektif / ekuivalen (*Effective Track Width*) yang nilainya bergantung pada traksi medan (m).

b. Kalkulasi Odometri *(Dead Reckoning)*

Odometri, atau sering disebut sebagai *Dead Reckoning*, adalah metode estimasi posisi dan orientasi (*pose*) robot di dalam ruang dua dimensi (2D) secara berkesinambungan dengan menghitung akumulasi jarak dari pergerakan yang telah dilakukan. Karena ESP32 bekerja pada sistem waktu diskrit digital (bukan waktu kontinu), penentuan koordinat global (x, y) dan sudut arah $(heading/\theta)$ dari sasis robot dilakukan menggunakan pendekatan integrasi numerik orde pertama, yaitu **Metode Integrasi Euler**.

Sistem odometri mengasumsikan bahwa di antara dua waktu pengambilan sampel (*sampling time*), robot bergerak dalam lintasan lurus atau melengkung dengan kecepatan linear (v) dan kecepatan sudut (ω) yang konstan. Berdasarkan informasi kinematika tersebut, *update* posisi (*pose*) robot dari waktu ke-k menuju waktu ke-$k+1$ dirumuskan dalam persamaan matriks ruang keadaan (*state-space*) atau persamaan aljabar berikut:

$$x_{k+1} = x_k + (v_k \cdot \Delta t) \cdot \cos(\theta_k)$$

$$y_{k+1} = y_k + (v_k \cdot \Delta t) \cdot \sin(\theta_k)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + (\omega_k \cdot \Delta t)$$

Keterangan Variabel :

- x_{k+1}, y_{k+1} : Koordinat posisi absolut robot pada sumbu X dan Y di iterasi waktu saat ini/baru (m).

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

- x_k, y_k : Koordinat posisi absolut robot pada iterasi waktu sebelumnya (m).
- θ_{k+1} : Sudut orientasi absolut (*heading*) robot pada iterasi waktu saat ini terhadap sumbu referensi (Radian).
- v_k : Rata-rata kecepatan linear maju sasis dari hasil perhitungan kinematika (m/s).
- ω_k : Kecepatan sudut/rotasi sasis dari hasil perhitungan kinematika (rad/s).
- Δt : Waktu pencuplikan (*Sampling Time*), yaitu durasi satu siklus perhitungan mikrokontroler (s).
- $(v_k \cdot \Delta t)$: Merupakan ekspresi matematis dari jarak tempuh aktual (m) selama satu siklus.

c. Fusi Sensor dan Estimasi Slip

Sistem pergerakan *skid-steering* memiliki kelemahan inheren ketika dioperasikan di lingkungan luar ruangan (*outdoor*) seperti rerumputan atau tanah tidak rata. Mekanisme beloknya yang memaksa roda untuk bergeser secara lateral, ditambah kemungkinan hilangnya traksi (selip longitudinal), menyebabkan pembacaan *rotary encoder* pada motor menjadi tidak valid. Jika data dari *encoder* digunakan secara mentah untuk menghitung orientasi (seperti pada Rumus B), akan terjadi akumulasi eror pembacaan sudut (*heading drift*) yang sangat besar. Untuk menyelesaikan masalah ini, diterapkan metode Fusi Sensor (*Sensor Fusion*) yang memadukan data kinematika roda dengan sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU MPU6050) [IMU-based Localization and Slip Estimation for Skid-Steered Mobile Robots].

Pada pemodelan odometri murni (sebelum dimodifikasi), pembaruan sudut orientasi (θ) bergantung pada kecepatan sudut dari roda, yaitu:

$$\theta_{k+1} = \theta_k + (\omega_{encoder} \cdot \Delta t)$$

Namun, karena $\omega_{encoder}$ rentan terhadap selip, perumusan tersebut dimodifikasi pada sistem ini. Data kecepatan sudut dari roda untuk perhitungan orientasi **diabaikan (di-bypass)**, dan posisinya digantikan secara langsung oleh kecepatan sudut fisik sumbu Z (ω_z) yang dibaca oleh sensor Giroskop di dalam IMU. Pembaruan sudut *heading* aktual sasis menjadi:

$$\theta_{actual}(k) = \theta_{actual}(k-1) + (\omega_z(k) \cdot \Delta t)$$

Keterangan Variabel :

- $\theta_{actual}(k)$: Sudut *heading* / orientasi aktual sasis pada waktu saat ini (Radian atau Derajat), yang telah kebal terhadap selip roda.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

- $\theta_{actual}(k-1)$: Sudut *heading* sasis pada iterasi waktu sebelumnya.
- $\omega_z(k)$: Kecepatan sudut rotasi fisik sasis terhadap sumbu Z (sumbu vertikal), dibaca langsung dari register data giroskop MPU6050 (rad/s atau deg/s).
- Δt : Waktu pencuplikan (*Sampling Time*) dari mikrokontroler (s).

Sistem fusi pada robot ini menggunakan pendekatan yang memisahkan tanggung jawab estimasi. Encoder roda (atau perkiraan kecepatan dari PWM/FSM) tetap dipertahankan hanya untuk menghitung kecepatan linear / translasi maju (v), karena eror selip maju/mundur biasanya tidak terlalu merusak pemetaan dibandingkan eror rotasi. Di sisi lain, tanggung jawab untuk estimasi rotasi (θ) diserahkan sepenuhnya kepada IMU.Giroskop bekerja berdasarkan prinsip inersia massa, bukan gesekan mekanis.

Saat roda robot tergelincir atau berputar di tempat (selip) akibat genangan lumpur, giroskop tidak akan mendeteksi adanya rotasi fisik $(\omega_z = 0)$. Akibatnya, mikrokontroler ESP32 tidak akan memperbarui nilai θ_{actual}, sehingga sistem terhindar dari ilusi bahwa robot sedang berbelok. Estimasi selip (slip estimation) dilakukan secara implisit oleh mikrokontroler dengan menghitung selisih (residu) antara rotasi yang diharapkan oleh roda dengan rotasi fisik yang dibaca oleh IMU.

d. Perhitungan Error Jalur (Path Tracking Errors)

Agar robot pemotong rumput otonom dapat melacak dan mengikuti lajur pemangkasan yang telah direncanakan secara presisi, mikrokontroler memerlukan informasi mengenai seberapa jauh posisi robot telah menyimpang dari jalur referensi. Perhitungan eror jalur bertindak sebagai jembatan geometris yang mentransformasikan data posisi absolut kartesian global hasil odometri $(x_{actual}, y_{actual}, \theta_{actual})$ menjadi parameter ralat lokal yang relatif terhadap jalur. Sistem navigasi ini menggunakan dua parameter ralat utama, yaitu **Heading Error** (e_θ) dan **Cross-Track Error** (e_{ct}) [Path Tracking Control of a Mobile Robot using Fuzzy Logic].

Misalkan sebuah segmen jalur lajur lurus didefinisikan dari titik acuan awal atau *waypoint* $P_A(x_A, y_A)$ menuju titik target berikutnya dengan sudut orientasi target sebesar $\theta_{t\,\mathrm{arg}\,et}\theta_{t\,\mathrm{arg}\,et}$. Jarak penyimpangan linear dan angular dari posisi aktual robot $P_{robot}(x_{actual}, y_{actual})$ terhadap garis lajur tersebut dirumuskan sebagai berikut:

1. Heading Error (e_θ):

$$e_\theta = \theta_{t\,\mathrm{arg}\,et} - \theta_{actual}$$

2. Cross-Track Error (e_{ct}):

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

$$e_{ct} = -(x_{actual} - x_A) \cdot \sin(\theta_{target}) + (y_{actual} - y_A) \cdot \cos(\theta_{target})$$

Keterangan Variabel :

- e_θ : Ralat sudut hadap (*Heading Error*), yaitu selisih antara arah lajur target dengan arah hadap fisik robot saat ini (Radian atau Derajat).
- e_{ct} : Ralat lintas lajur (*Cross-Track Error*), yaitu jarak tegak lurus terpendek dari titik pusat robot ke garis lajur referensi (Meter).
- θ_{target} : Sudut orientasi acuan dari jalur atau lajur yang harus diikuti (Radian atau Derajat).
- θ_{actual} : Sudut orientasi fisik aktual robot yang diperoleh dari hasil fusi sensor IMU (Radian atau Derajat).
- x_{actual}, y_{actual} : Koordinat posisi aktual robot di bidang global yang diperoleh dari kalkulasi odometri (Meter).
- x_A, y_A : Koordinat titik pangkal/awal dari segmen lajur yang sedang dilacak (Meter).

Rumus dasar e_{ct} di atas diturunkan dari operasi proyeksi vektor atau matriks rotasi dua dimensi (2D Transformation Matrix). Secara geometris, persamaan tersebut memproyeksikan vektor jarak dari titik acuan $P_A \; ke \; P_{robot}$ terhadap sumbu yang tegak lurus dengan arah jalur $(\theta_{target} + 90°)$.

Pada implementasi algoritma pemrograman di ESP32, untuk menghemat beban komputasi dan menyederhanakan kode, sistem koordinat global dapat ditranslasikan secara lokal (Local Frame Transformation) di mana setiap kali robot berganti lajur, titik awal lajur $P_A(x_A, y_A)$ dianggap sebagai titik asal koordinat baru atau $(0,0)$. Melalui penyederhanaan substitusi nilai $x_A = 0 \; dan \; y_A = 0$ ke dalam persamaan dasar, didapatkan bentuk rumus modifikasi praktis yang ditanamkan pada mikrokontroler robot:

$$e_{ct} = -x_{actual} \cdot \sin(\theta_{target}) + y_{actual} \cdot \cos(\theta_{target})$$

Modifikasi ini memotong dua operasi pengurangan aritmetika pada setiap iterasi *looping*, sehingga mempercepat waktu eksekusi program tanpa mengurangi tingkat akurasi geometris dari nilai ralat yang dihasilkan. Nilai e_{ct} akan bernilai positif jika robot berada di sebelah kiri jalur dan bernilai negatif jika robot melenceng ke sebelah kanan jalur (atau sebaliknya, tergantung konvensi koordinat yang dipilih), yang sangat krusial bagi logika *Fuzzy* untuk menentukan arah koreksi kemudi motor.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

e. Komputasi *Fuzzy Logic Inference System* (SugenoOrde-0)

Nilai ralat spasial berupa *Heading Error* (e_θ) dan *Cross-Track Error* (e_{ct}) yang dihasilkan pada tahap sebelumnya merupakan representasi linear yang dinamis dan non-linear akibat karakteristik mekanis sasis *skid-steering*. Untuk menghasilkan keputusan aktuasi motor yang adaptif terhadap perubahan eror tersebut, ditanamkan algoritma kecerdasan buatan berbasis *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Pada sistem ini, dipilih metode inferensi **Sugeno Orde-0** karena karakteristik keluarannya yang berupa nilai konstanta diskrit sangat kompatibel dengan arsitektur komputasi *embedded system* berkecepatan tinggi.

1. Tahap 1 : Fuzifikasi

Nilai tegas (*crisp input*) dari e_θ dan e_{ct} dipetakan ke dalam derajat keanggotaan fuzzy (μ) menggunakan fungsi keanggotaan (*membership function*) kurva trapesium dan segitiga yang dirumuskan sebagai:

Segitiga :

$$\mu(x) = \max\left(0, \min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right)\right)$$

Trapesium :

$$\mu(x) = \max\left(0, \min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right)\right)$$

Keterangan Variabel :

- : Nilai masukan tegas (*crisp input*) berupa eror jalur yang sedang dihitung.
- : Batas bawah kiri (titik awal di mana kurva mulai naik dari nilai 0).
- : Batas atas kiri (titik di mana kurva pertama kali mencapai nilai keanggotaan penuh yaitu 1).
- : Batas atas kanan (titik terakhir sebelum kurva mulai turun dari nilai 1).
- : Batas bawah kanan (titik akhir di mana kurva kembali menyentuh nilai 0).

2. Tahap 2 : Evaluasi Aturan *(Inference Engine)*

Hubungan antara input dan output diatur oleh sekumpulan aturan implikasi fuzzy (*Rule Base*) berbentuk *IF-THEN*. Karena kondisi aturan menggunakan operator logika AND, kekuatan aktivasi (*firing strength* / wi) dari aturan ke-i dihitung menggunakan operasi nilai minimum (MIN):

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

$$w_i = \min\left(\mu_{e\theta,i}(e_\theta), \mu_{ect,i}(e_{ct})\right)$$

3. Tahap 3 : Defuzifikasi *(Weighted Average)*

Pada metode Sugeno Orde-0, konsekuen atau output dari setiap aturan ke-i bukan merupakan himpunan fuzzy (seperti pada metode Mamdani), melainkan sebuah nilai konstanta tegas (zi). Hasil akhir pemrosesan (*crisp output*) yang merepresentasikan nilai koreksi PWM motor (Z_{final}) dihitung menggunakan metode rata-rata tertimbang (*Weighted Average*):

$$Z_{final} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$$

Keterangan Variabel :

- : Nilai output tegas (*crisp output*) dari pengontrol fuzzy yang merepresentasikan parameter penyesuaian sinyal PWM (0–255) untuk dikirim ke *Motor Driver* L298N.
- : Kekuatan aktivasi (*firing strength*) atau derajat kebenaran dari aturan ke- hasil operasi MIN.
- : Nilai konsekuen berupa konstanta diskrit (angka pasti) yang dilekatkan pada aturan ke- (misal: Mundur = -100, Diam = 0, Maju_Lambat = 120, Maju_Cepat = 255).
- : Derajat keanggotaan (bernilai 0 hingga 1) dari nilai masukan pada himpunan fuzzy yang bersesuaian dengan aturan ke-.
- : Jumlah total aturan fuzzy yang dirancang di dalam sistem (misalnya 25 aturan berdasarkan matriks kombinasi input .

Pada aplikasi robotika mobile konvensional, metode Fuzzy Mamdani sering kali digunakan. Namun, Mamdani menuntut tahapan defuzzifikasi menggunakan metode Centroid (titik berat) yang melibatkan kalkulus integral kontinu berulang kali untuk menghitung luas area geometri output. Operasi integral ini membutuhkan alokasi memori RAM yang besar dan waktu komputasi yang lama, yang dapat memicu terjadinya latensi tinggi (lagging) pada mikrokontroler.

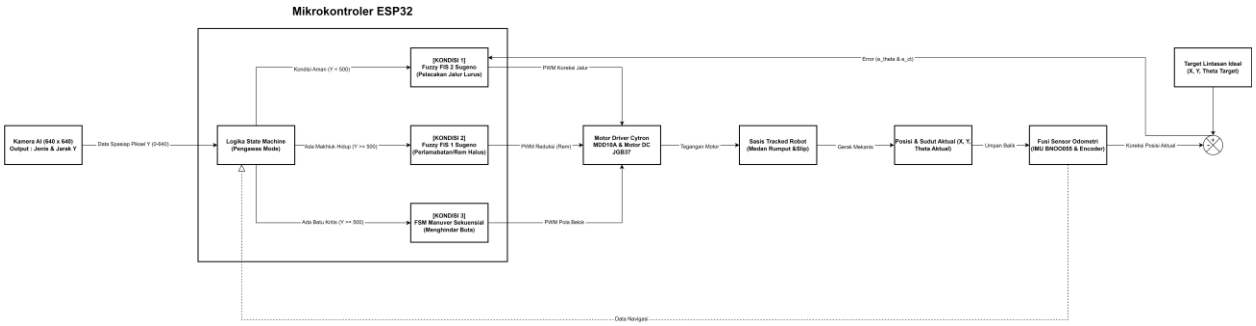
Dengan modifikasi struktur kendali menjadi Sugeno Orde-0, konsekuen yang berbentuk konstanta (z_i) mereduksi seluruh kerumitan integral tersebut menjadi operasi aritmetika dasar (perkalian dan pembagian sederhana pada rumus

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

defuzzifikasi). Modifikasi ini sangat memangkas beban kerja CPU ESP32. Waktu pemrosesan (execution time) berkurang secara signifikan menjadi dalam satuan mikrodetik, sehingga siklus waktu pencuplikan (Δt) pada rumus kinematika dan odometri dapat dipertahankan secara konstan dan stabil tanpa risiko terjadinya kegagalan sistem (Watchdog Reset atau freeze) [Design and Simulation of a Fuzzy Trajectory Tracking Controller for Linear graph Four Wheel Skid-steer Mobile-Robot with Obstacle Avoidance].

f. Blok Diagram Kendali *(Closed-Loop Control Architecture)*

Sistem navigasi otonom pada robot pemotong rumput ini dimodelkan menggunakan arsitektur hibrida yang menggabungkan kendali umpan balik lingkar tertutup (*closed-loop feedback control*) berbasis odometri dengan intervensi reaktif dari sistem visi komputer (*Computer Vision*). Pemrosesan terpusat dilakukan di dalam **Mikrokontroler ESP32**. Secara hierarkis, aliran sinyal pada blok diagram di atas dapat diuraikan sebagai berikut:



1. Masukan Visi Komputer *(AI Vision Input)*

   Pada sisi paling kiri, terdapat blok **Kamera AI** dengan resolusi spasial 640 x 640 piksel yang bertugas memantau kondisi di depan robot. Subsistem ini mengekstraksi dua parameter utama: Jenis Objek dan Jarak (direpresentasikan dengan batas ambang/ *threshold* piksel Y = 500). Keluaran dari blok ini berupa sinyal Data Spasial Piksel Y (0-640) yang dikirimkan ke mikrokontroler.
2. Logika *State Machine* (Pengawas Mode)

   Data visual dari kamera dan Data Navigasi dari sensor masuk ke dalam blok Logika *State Machine* di dalam ESP32. Blok ini bertindak sebagai otak pengambil keputusan (*supervisor*) yang akan mendistribusikan otoritas kendali ke dalam salah satu dari tiga kondisi operasional:
   - [KONDISI 1] Kondisi Aman (Y < 500): Jika jalur bersih, FSM memberikan perintah ke blok Fuzzy FIS 2 Sugeno untuk menjalankan tugas Pelacakan Jalur Lurus.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

- [KONDISI 2] Ada Makhluk Hidup (Y ≥ 500): Jika terdeteksi manusia/hewan pada jarak kritis, kendali dialihkan ke Fuzzy FIS 1 Sugeno untuk melakukan Perlambatan/Rem Halus yang menghasilkan keluaran PWM Reduksi.
- [KONDISI 3] Ada Batu Kritis (Y ≥ 500): Jika terdeteksi rintangan statis tak bernyawa, kendali dialihkan ke blok FSM Manuver Sekuensial untuk mengeksekusi gerakan penghindaran buta (blind avoidance), menghasilkan PWM Pola Belok.

3. Komparator dan Kontroler Utama (Fuzzy FIS 2 Sugeno)

   Pada mode operasional normal (Kondisi 1), sistem membutuhkan acuan pelacakan. Di sisi kanan diagram, terdapat blok Target Lintasan Ideal yang memiliki nilai referensi $(X, Y, \theta_{t\,\mathrm{arg}\,et})$. Nilai ini dibandingkan dengan posisi aktual robot pada sebuah *Summing Junction* (titik komparator), yang menghasilkan matriks ralat spasial berupa Error $(e_\theta \& e_{ct})$. Sinyal eror ini diumpankan kembali ke blok Fuzzy FIS 2 Sugeno di dalam ESP32, yang memprosesnya menjadi sinyal kendali korektif berupa PWM Koreksi Jalur.

4. Blok Aktuator *(Motor Driver & Motor DC)*

   Sinyal PWM dari salah satu kondisi di atas dialirkan ke blok aktuator, yaitu Motor Driver Cytron MDD10A. *Driver* arus tinggi ini menerjemahkan sinyal logika PWM menjadi besaran fisik Tegangan Motor untuk menggerakkan Motor DC JGB37 pada roda kiri dan kanan secara independen.P

5. *Plant (Sasis Tracked Robot)* dan Dinamika Lingkungan

   Tegangan motor diubah menjadi Gerak Mekanis oleh Sasis *Tracked Robot*. Blok ini berinteraksi langsung dengan lingkungan (*Medan Rumput & Slip*), sehingga lintasan aktual robot dipengaruhi oleh gaya gesek dan kemungkinan selip. Dinamika ini menghasilkan *state* fisik baru yang direpresentasikan sebagai Posisi & Sudut Aktual (X, Y, θ_{aktual}).

6. Umpan Balik dan Fusi Sensor *(Sensor Fusion Feedback)*

   Untuk mencegah akumulasi ralat akibat selip sasis, pergerakan aktual dipantau oleh blok Fusi Sensor Odometri yang memadukan data perputaran mekanis dari *Encoder* dan data orientasi absolut dari sensor IMU BNO055. Proses fusi ini meminimalkan eror selip dan menghasilkan estimasi Koreksi Posisi Aktual yang presisi tinggi. Sinyal umpan balik (*feedback*) ini dikembalikan ke *Summing Junction* dan *State Machine*, menutup siklus sistem kendali (menjadi *closed-loop*) agar pergerakan robot senantiasa konvergen menuju target liniernya.

g. Rancangan Diagram Transisi State (FSM)

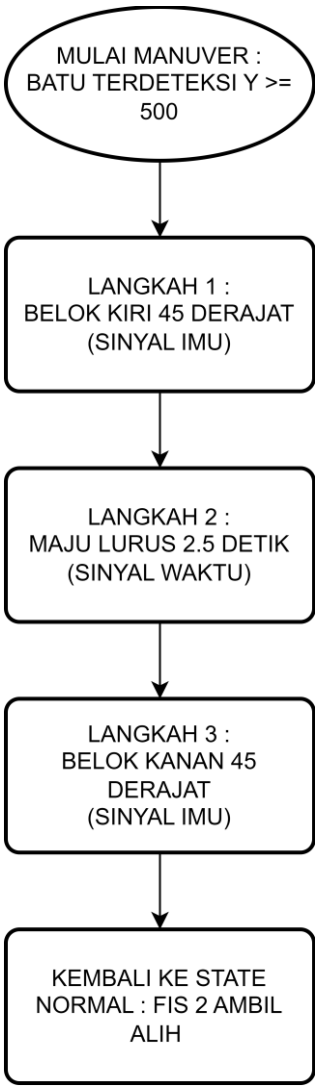
Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

Untuk menjamin efisiensi pemotongan dan keselamatan kerja robot di area taman, arsitektur perangkat lunak ESP32 dikendalikan oleh *Finite State Machine* (FSM) tingkat tinggi sebagai pengawas mode (*mode supervisor*). FSM ini secara dinamis membagi perilaku robot ke dalam 4 *state* (kondisi) berdasarkan intervensi data visual Kamera AI dan data perhitungan koordinat dari Fusi Sensor Odometri.

1. State 1 : MENYISIR_LURUS_NORMAL
   Eksekutor : *Fuzzy Inference System 2* (FIS 2-Sugeno)
   Prinsip Kerja: Robot fokus melacak garis lajur utama. Jika sasis *tracked* mengalami selip yang membuatnya melenceng, FIS 2 secara otomatis mengubah selisih kombinasi PWM motor kiri dan kanan secara kontinu agar posisi robot kembali konvergen (*ngepas*) dengan rute referensi.
2. State 2 : BERTEMU_OBJEK_HIDUP
   Eksekutor : *Fuzzy Inference System 1* (FIS 1-Sugeno)
   Prinsip Kerja: Ketika kamera AI mendeteksi manusia atau hewan, parameter jarak dihitung berdasarkan nilai piksel Y pada *bounding box*. Semakin dekat objek (nilai Y membesar menuju koordinat ≥ 500) , FIS 1 akan memotong atau mengalikan nilai *duty cycle* PWM secara gradual (berkurang secara eksponensial). Hal ini menghasilkan pengereman yang halus (*Smooth Braking*) hingga robot berhenti total tanpa hentakan mekanis yang dapat merusak girboks motor JGB37.
3. State 3 : BERTEMU_BENDA_MATI
   Eksekutor : FSM Urutan Logika Berbasis Waktu *(Time-Based Sequential FSM)*
   Ketika Kamera AI mendeteksi objek "Batu" pada area lintasan dengan posisi piksel bawah $Y \geq 500$ ($jarakkritis \approx 30 - 40$ cm di depan robot), FSM langsung mengunci status robot ke mode BERTEMU_BENDA_MATI_BATU.Untuk mengitari batu tersebut secara aman, mikrokontroler mengeksekusi 3 Langkah Sekuensial Berbasis Waktu dan Sudut IMU BNO055 sebagai berikut:

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id



LANGKAH	AKSI MEKANIS	KALKULASI SENSOR
Langkah 1 (Pivot Turn)	ESP32 memerintahkan motor driver Cytron MDD10A untuk memutar sasis ke kiri di tempat. Motor kiri diberikan nilai PWM -150 (mundur) dan motor kanan PWM $+150$ (maju).	Mikrokontroler membaca data *heading* absolut dari IMU BNO055. Jika sudut awal robot adalah 0° (Timur), langkah ini terus dikunci hingga IMU mendeteksi perubahan sudut sebesar $+45°$ (serong kiri). Estimasi durasi fisik pemutaran ini adalah $t_1 t1 \approx 1.2$ detik. Setelah target

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

		sudut tercapai, program otomatis melompat ke Langkah 2.
Langkah 2 (Maju Lurus)	Kedua motor digerakkan maju secara bersamaan dengan kecepatan konstan: PWM Kiri = 180, PWM Kanan = 180.	*Kalkulasi Waktu:* Untuk memastikan sasis robot *tracked* berhasil melewati dimensi fisik batu secara aman tanpa menyenggolnya, gerakan maju ini dikunci menggunakan fungsi `millis()` pada ESP32 selama rentang waktu konstan $t_2 = 2.5$ detik (ekuivalen dengan daya jelajah linear sejauh ≈ 0.5 meter pada medan rumput).
Langkah 3 (Reliagment Turn)	*Aksi Mekanis:* Robot harus meluruskan kembali arah hadap bodinya agar paralel dengan arah lajur pemotongan. Motor kiri diberikan nilai PWM +150 (maju) dan motor kanan PWM -150 (mundur).	*Kalkulasi Sensor:* ESP32 memantau nilai giroskop IMU BNO055 hingga sudut orientasi robot berkurang sebesar $-45°$, atau kembali tepat menunjuk ke angka target asal (0°).
Langkah 4 (Returrn to Path	Setelah Langkah 3 selesai, FSM melepaskan status sekuensial dan mengembalikan otoritas ke State 1 (`MENYISIR_LURUS_NORMAL`). Secara geometris, akibat manuver melipir tadi, robot kini berada di sebelah kiri lajur utama sejauh beberapa puluh sentimeter. Saat FIS 2 (Sugeno) mengambil alih, komparator langsung mendeteksi ralat lintas lajur (*Cross-Track Error*) yang bernilai positif besar (misalnya ($e_{ct} = +0.35$ meter). Secara otomatis, karakteristik bawaan dari kecerdasan Fuzzy FIS 2 akan memberikan respons PWM koreksi tajam ke arah	

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

	kanan untuk menarik robot kembali merapat dan "ngepas" ke garis lajur utamanya.	

4. State 4 : MECAPAI_UJUNG_TAMAN
   Eksekutor : Kinematika Odometri & FSM
   State ini aktif murni berdasarkan data perhitungan spasial dari Kinematika Odometri yang divalidasi oleh sensor *Encoder* dan IMU BNO055.
   - Kondisi Pemicu *(Trigger)*
     Selama robot menyisir lajur lurus, odometri terus mengalkulasi posisi koordinat X aktual robot. Ketika nilai $X_{actual} \geq X_{\lim it}$ (di mana $X_{\lim it}$ adalah panjang batas taman yang telah dipetakan, contoh: $(15.0\ \text{meter})$, FSM langsung memicu perintah MENCAPAI_UJUNG_TAMAN
   - Ekseskusi Putar Balik *(U-TURN)*
     Robot menghentikan pisau potong (jika diperlukan demi keselamatan), lalu melakukan manuver *pivot* tajam sebesar derajat penuh untuk berbalik arah. Sinyal aktuasi dikirim ke Cytron MDD10A (Motor Kiri = , Motor Kanan =). Logika FSM mengunci gerakan ini hingga sudut aktual pada IMU BNO055 berputar genap sejauh dari sudut lajur sebelumnya (misal dari menjadi)
   - Pergeseran Target Lajur Baru (*Lane Shifting Calculation*):
     Agar tidak memotong rumput di area yang sama, sistem FSM memperbarui parameter target koordinat lajur berikutnya pada memori ESP32. Posisi lajur baru digeser secara lateral (pada sumbu Y) sejauh lebar efektif pisau potong robot $(\Delta W\ , contoh:\ 0.4\ \text{meter})$.

     $$\text{Target } Y_{baru} = \text{Target } Y_{lama} + \Delta W$$

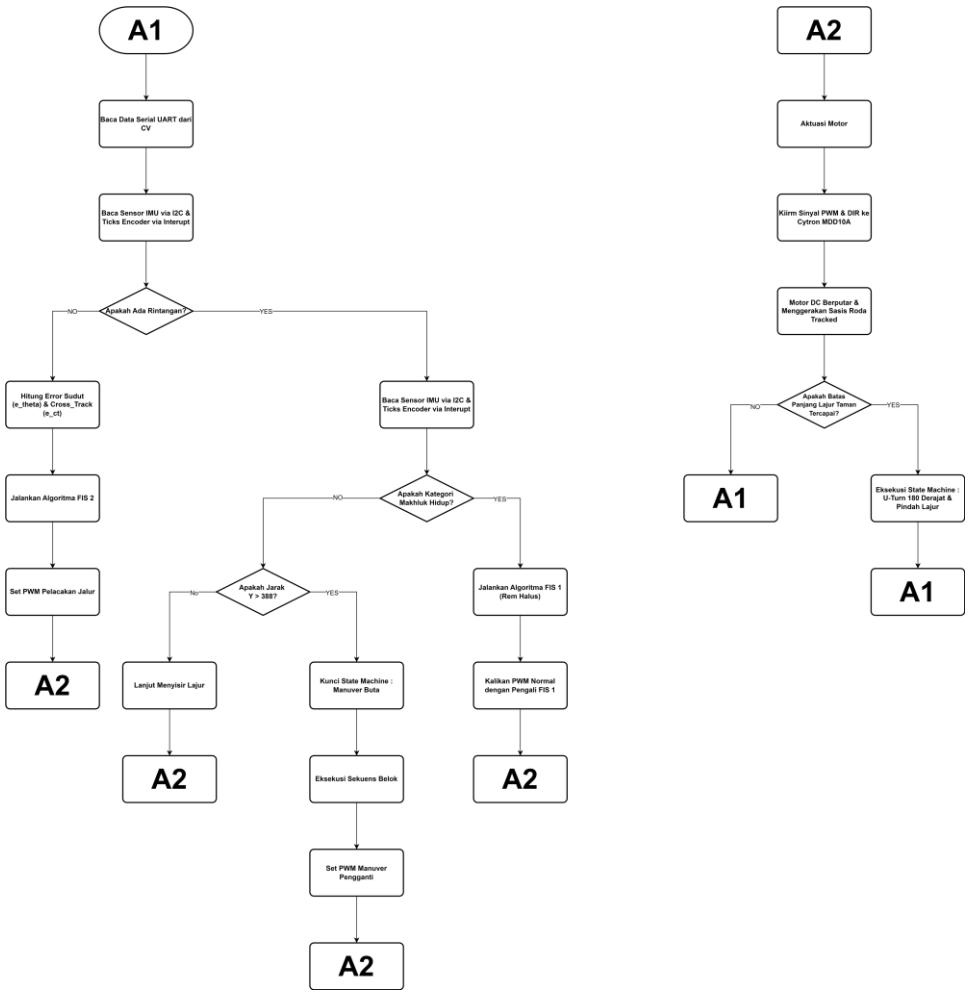
     Setelah nilai target sudut direset ke arah baru $(180°)$ dan koordinat lajur Y digeser, FSM mereset indikator eror dan mengembalikan robot ke status MENYISIR_LURUS_NORMAL untuk mulai memotong rumput pada lajur paralel yang baru.

h. Diagram Alir *(Flowchart)* Program ESP32

Perangkat lunak pada mikrokontroler ESP32 dirancang menggunakan struktur perulangan tak terbatas (*Super-Loop* atau *Main Loop*) dengan metode *non-blocking*. Artinya, seluruh pembacaan sensor dan komputasi kendali dieksekusi secara cepat dalam satuan milidetik tanpa adanya jeda (seperti delay()) yang dapat menghentikan sistem. Alur logika program dibagi menjadi dua blok utama, yaitu Blok Komputasi Kendali (Konektor A1) dan Blok Eksekusi Pergerakan (Konektor A2).

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id



1. Blok Komputasi Kendali dan Pengambilan Keputusan (Alur 1)
   - Akuisisi Data Multi-Sensor: Siklus program diawali dari titik A1 dengan melakukan pembacaan data serial UART dari subsistem Kamera AI (CV / *Computer Vision*). Bersamaan dengan itu, ESP32 juga mengambil data *heading* dari sensor IMU BNO055 melalui komunikasi I2C, serta menghitung pulsa rotasi motor (*Ticks Encoder*) yang diproses secara *real-time* melalui fitur *Hardware Interrupt*.
   - Percabangan Kondisi (Pendeteksian Rintangan): Program masuk ke dalam blok keputusan (*Decision*) "Apakah Ada Rintangan?".
     - Jika TIDAK (Jalur Bersih): Program masuk ke alur normal navigasi. Mikrokontroler menghitung nilai Error Sudut (e_θ) dan Cross Track Error (e_{ct}). Nilai eror ini diproses oleh Algoritma FIS 2 (Sugeno) untuk menghasilkan nilai PWM Pelacakan Jalur. Setelah itu, program melompat ke konektor A2.

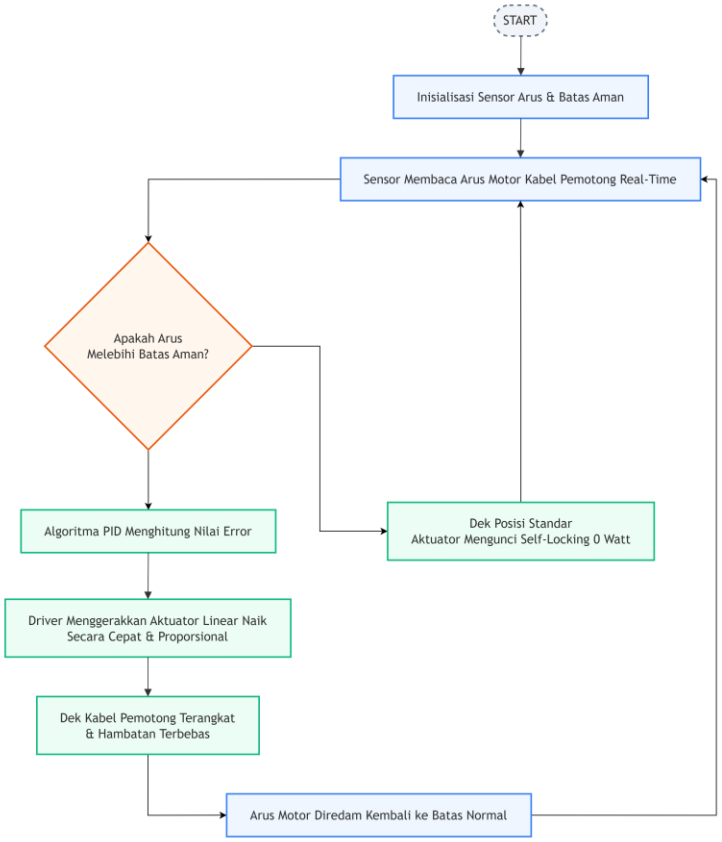
Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

- Jika YA (Ada Rintangan): Program memvalidasi ulang data dari IMU dan Encoder untuk persiapan manuver. Selanjutnya, masuk ke pengecekan "Apakah Kategori Makhluk Hidup?".
  - Jika YA (Manusia/Hewan): Program mengeksekusi Algoritma FIS 1 (Rem Halus). Logika Fuzzy akan menghitung faktor pengali redaman yang kemudian dikalikan dengan nilai PWM normal. Hal ini menghasilkan penurunan kecepatan secara eksponensial. Program lalu melompat ke A2.
  - Jika TIDAK (Benda Mati/Batu): Program mengecek parameter kedekatan spasial, "Apakah Jarak Y $\geq$ 500?".
    - Jika batu masih jauh (TIDAK), robot akan Lanjut Menyisir Lajur (kembali ke pelacakan FIS 2) menuju A2.
    - Jika batu sudah berada di batas kritis (YA), sistem FSM akan mengunci keadaan (State Machine) ke mode Manuver Buta. ESP32 mengeksekusi sekuens belok secara terjadwal dan menetapkan PWM Manuver Pengganti untuk mengitari batu. Setelah sekuens selesai, program melompat ke A2.

2. Blok Eksekusi Pergerakan dan Pengecekan Batas Lahan (Alur 2)
   - Aktuasi Motor: Berasal dari mana pun sumber sinyal komputasi di A1 (baik dari FIS 2, FIS 1, maupun FSM Manuver), nilai akhir komputasi diumpankan ke blok Aktuasi Motor.
   - Pengiriman Sinyal ke Driver: ESP32 mengirimkan sinyal PWM dan DIR (Direction / Arah) ke Motor Driver Cytron MDD10A. Daya tegangan tinggi kemudian dialirkan untuk membuat Motor DC berputar, yang secara mekanis menggerakkan sasis roda tracked di atas rumput.
   - Pengecekan Batas Odometri: Setelah motor bergerak, program menanyakan satu kondisi fundamental terakhir: "Apakah Batas Panjang Lajur Taman Tercapai?" (berdasarkan perhitungan nilai Odometri $Xactual$).
     - Jika TIDAK: Siklus satu loop dinyatakan selesai, dan program langsung kembali melompat ke konektor A1 untuk membaca sensor kembali pada milidetik berikutnya.
     - Jika YA: Robot telah tiba di ujung lajur rumput. Program mengeksekusi State Machine transisi, yaitu melakukan U-Turn 180° & Pindah Lajur (menggeser nilai target Y). Setelah manuver putar balik selesai, program baru melompat kembali ke A1 untuk memulai pemotongan pada lajur yang baru.

3. Optimasi Mekanisme Pemotong dan Daya (Cutting Deck & Power Management)

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id



Sistem kendali elevasi *cutting deck* pada robot pemotong rumput otonom ini diimplementasikan menggunakan arsitektur loop tertutup (*closed-loop*) terdistribusi berbasis kejadian (*event-driven*) yang berpusat pada mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama. Secara elektrikal, sistem ditenagai oleh baterai atau aki 12V yang menyuplai daya berarus besar (*high-current*) langsung ke *Driver Heavy-Duty* BTS7960 dan motor DC pemotong JGA25-370, sekaligus diturunkan tegangannya untuk menghidupkan ESP32 dan modul sensor INA219. Dalam operasional riil di lapangan, alur logika program berjalan secara siklis kontinu tanpa keterikatan intervensi waktu simulasi, di mana ESP32 secara periodik menyampling data arus elektrikal (I_{aktual}) dari sensor INA219 melalui bus komunikasi serial I2C (pin SDA dan SCL). Sensor INA219 secara cerdas mengonversi penurunan tegangan analog milivolt yang melewati resistor *shunt* internal akibat pembebanan pisau senar nilon menjadi data digital miliampere siap pakai untuk dikirimkan ke pengontrol.

Setelah data arus diterima, ESP32 melakukan evaluasi ambang batas dengan membandingkan I_{aktual terhadap batas aman (*setpoint*) sebesar 155 mA guna menentukan status (*state*) kendali secara dinamis. Apabila arus motor berada di bawah atau sama dengan 155 mA,

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

sistem berada pada STATE_NORMAL_CUTTING dan secara sengaja mengunci nilai kesalahan (*error*) pada angka 0 mutlak sebagai fungsi *deadband* untuk mengeliminasi getaran mikro (*anti-chattering*) pada aktuator linear akibat riak arus kecil dari kibasan senar. Pada kondisi aman ini, ESP32 memutus seluruh sinyal PWM ke driver BTS7960 (0 Watt) sehingga aktuator linear mati total dan memanfaatkan fitur mekanis *self-locking internal* (*worm gear*) untuk menahan beban gravitasi dek pemotong tanpa mengonsumsi daya baterai sama sekali. Sebaliknya, ketika robot menabrak vegetasi lebat yang mengakibatkan penurunan RPM dan gejala motor macet (*stalling*), arus akan melejit menembus ambang batas aman dan memicu sistem menghitung ralat dengan rumus {Error} = I_{aktual} - 155\{ mA}.

Nilai *error* tersebut langsung draf diproses oleh algoritma PID melalui pengali konstanta teroptimasi Kp = 10.0, Ki = 0.2, Kd = 1.0 untuk menghasilkan keluaran sinyal kontrol yang dibatasi (*constrain*) pada skala intensitas PWM 0 hingga 100%. Sistem seketika beralih ke STATE_LIFTING_PROTECTION di mana komponen Kp memberikan dorongan daya awal yang besar dan Kd memberikan hentakan akselerasi instan di milidetik pertama guna mengatasi inersia massa beban dek. ESP32 mengirimkan sinyal PWM aktif dan logika arah maju ke driver BTS7960 untuk menyalurkan tegangan maju (+12V) sehingga aktuator linear bergerak cepat mengangkat *cutting deck* ke atas secara logaritmik melandai demi membebaskan pisau senar dari jepitan rumput. Begitu dek terangkat dan beban mekanis luar runtuh, arus motor otomatis diredam jatuh kembali di bawah *setpoint* 155 mA. Kondisi aman yang pulih ini dibaca oleh pengontrol untuk mengaktifkan STATE_RECOVERY_LOWERING, di mana ESP32 membalik polaritas driver BTS7960 (-12V) guna menurunkan kembali ketinggian dek secara bertahap menuju koordinat semula (0 cm) secara aman, sebelum akhirnya loop kembali berulang ke tahapan awal untuk melanjutkan siklus pemotongan standar

Metode Proportional Integral Derivative (PID) merupakan salah satu algoritma kendali umpan balik (closed-loop control) yang digunakan untuk mempertahankan kondisi sistem agar tetap berada pada nilai acuan (setpoint). Pada penelitian ini, PID diterapkan untuk mengendalikan ketinggian cutting deck berdasarkan perubahan arus motor pemotong yang dibaca oleh sensor INA219. Penggunaan arus sebagai variabel kendali dipilih karena peningkatan arus berbanding lurus dengan bertambahnya beban mekanis pada motor. Ketika motor memotong rumput yang lebih tinggi atau lebih rapat, arus akan meningkat sehingga sistem dapat mendeteksi kondisi overload lebih awal dan melakukan penyesuaian posisi cutting deck secara otomatis.

Secara umum, algoritma PID terdiri atas tiga komponen utama, yaitu aksi proporsional (Proportional), aksi integral (Integral), dan aksi diferensial (Derivative). Ketiga komponen tersebut bekerja secara bersamaan untuk menghasilkan sinyal kendali yang optimal sehingga respons

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

sistem menjadi cepat, stabil, dan memiliki galat (error) yang kecil. Nilai galat (error) diperoleh dari selisih antara nilai setpoint arus dengan arus aktual yang dibaca sensor INA219.

Tahap pengujian sistem ini dirancang untuk memvalidasi kinerja subsistem Cutting Deck & Power Management baik secara unit maupun integratif. Pengujian meliputi verifikasi akurasi sensor arus, respons kendali PID, kinerja aktuator self-locking, serta pengaruhnya terhadap efisiensi energi sistem. Protokol pengujian disusun agar dapat mengukur parameter penting (akurasi, waktu respon, overshoot, konsumsi daya, dll.) dan menentukan indikator keberhasilan berdasarkan spesifikasi perancangan. Secara umum, rangkaian pengujian mencakup:

Pengujian Sensor Arus INA219: Memastikan INA219 memberikan pengukuran arus yang akurat dalam rentang operasional. Sensor diuji pada beberapa beban referensi (motor kosong, beban ringan, sedang, berat) dan hasil pembacaan dibandingkan dengan amperemeter digital. Keberhasilan diukur dari galat pengukuran relatif kecil (<5%) dan kemampuan sensor mendeteksi lonjakan arus dengan cepat sehingga tidak melewatkan kondisi overload.

Pengujian Kendali PID: Memvalidasi kinerja algoritma PID dalam menstabilkan arus motor melalui penyesuaian posisi deck. Dalam skenario uji, motor diberikan gangguan beban mendadak (misal menggunakan rem mekanik atau beban tambahan) hingga arus naik melebihi 155 mA. Sistem kemudian harus mengaktifkan PID dan aktuator untuk mengembalikan arus ke bawah batas. Parameter yang diukur meliputi rise time, settling time, overshoot, dan steady-state error dari grafik arus motor. Keberhasilan ditentukan jika sistem mampu meredam lonjakan arus dengan overshoot yang moderat (<20%) dan mencapai kondisi stabil (arus ≤ setpoint) dalam waktu yang singkat (<2 s, misalnya).

Pengujian Mekanisme Aktuator Self-Locking: Menilai performa aktuator linear dalam mengangkat dek dan menahan posisinya. Pengujian mencakup pengukuran waktu tempuh aktuator ketika menerima sinyal PWM penuh, presisi perubahan ketinggian, serta verifikasi bahwa posisi dek tetap stabil saat driver dimatikan. Parameter evaluasi termasuk: waktu tempuh (travel time) dari posisi awal ke posisi target, perubahan ketinggian dek, dan konsumsi daya selama aktuasi. Indikator keberhasilan adalah tercapainya perubahan ketinggian yang diharapkan dalam waktu sesuai spesifikasi (misalnya <1 s untuk perubahan penuh), serta tidak terjadi back-drive berarti aktuator benar-benar self-locking (posisi tidak bergeser tanpa daya) dan konsumsi arus aktuator mendekati nol setelah proses selesai.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

Pengujian Efisiensi Energi: Mengukur seberapa besar penghematan energi yang dicapai oleh sistem kontrol adaptif dibandingkan sistem statis. Skenario uji melibatkan pengoperasian motor dan aktuator dalam kondisi kontinyu: pertama tanpa kendali adaptif (dek pada posisi tetap rendah), kemudian dengan kendali adaptif aktif. Pengukuran dilakukan terhadap penurunan tegangan baterai atau ampere-hour yang tersisa setelah durasi operasi tertentu. Parameter evaluasi berupa total energi yang dikonsumsi (area di bawah kurva I–t) dan perbandingan penggunaan daya rata-rata. Keberhasilan pengujian ini ditandai jika kendali adaptif menghasilkan penurunan konsumsi energi yang nyata (misal >10% penghematan), menunjukkan efisiensi sistem meningkat.

4. Sistem Penyemprotan Herbisida Presisi (Variable Rate Application)

1. Metode Fuzzy Logic Control untuk menentukan dosis penyemprotan herbisida

Fuzzy Logic Control (FLC) dengan pendekatan Mamdani Fuzzy Inference System (FIS)**.** Metode ini dipilih karena mampu menangani ketidakpastian dan perubahan kondisi lingkungan yang tidak dapat direpresentasikan secara tepat menggunakan logika biner. Pada sistem yang dikembangkan, nilai Variable Rate Application (VRA) Index digunakan sebagai parameter utama untuk menentukan dosis penyemprotan herbisida secara adaptif berdasarkan kondisi rumput yang terdeteksi oleh sistem visi komputer.

Nilai VRA Index diperoleh dari hasil pengolahan citra yang merepresentasikan kondisi vegetasi pada area yang diamati. Nilai tersebut berada pada rentang 0 hingga 1, dimana semakin tinggi nilai VRA Index menunjukkan bahwa area rumput memerlukan tingkat penyemprotan yang lebih besar. Selanjutnya nilai VRA Index diproses menggunakan sistem fuzzy untuk menghasilkan keputusan berupa dosis penyemprotan yang sesuai.

Sistem fuzzy yang digunakan tersebut terdiri dari empat tahapan utama, yaitu proses fuzzifikasi, pembentukan basis aturan (rule base), inferensi fuzzy Mamdani, dan defuzzifikasi. Hasil akhir dari proses defuzzifikasi berupa nilai crisp yang menyatakan persentase dosis penyemprotan herbisida yang akan diterapkan pada sistem sprayer.

a. Variabel Input Fuzzy

Variabel input yang digunakan dalam sistem fuzzy adalah VRA Index dengan rentang nilai antara 0 hingga 1. Variabel ini merepresentasikan kebutuhan penyemprotan berdasarkan kondisi vegetasi yang diperoleh dari hasil pengolahan citra. Fungsi keanggotaan (membership function) pada variabel input dibagi menjadi lima kategori linguistik sebagai berikut:

1. Sangat Rendah
2. Rendah

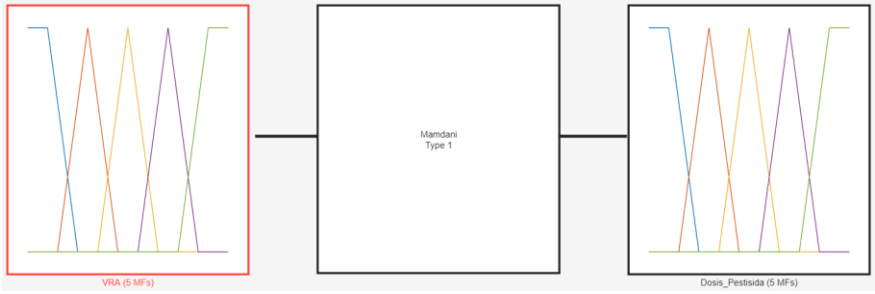
Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

3. Sedang
4. Tinggi
5. Sangat Tinggi

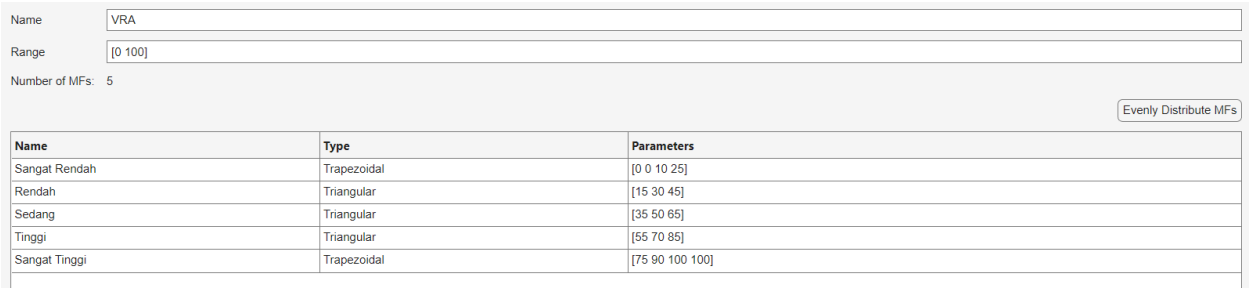
Pembagian kategori tersebut bertujuan untuk memberikan representasi kondisi vegetasi secara lebih detail sehingga keputusan dosis penyemprotan yang dihasilkan menjadi lebih adaptif terhadap perubahan kondisi lapangan.

Rentang Membership Function Variabel Input (VRA Index)

Himpunan Fuzzy	Rentang Nilai	Bentuk Membership Function
Sangat Rendah	0.00 – 0.20	Trapesium
Rendah	0.10 – 0.40	Segitiga
Sedang	0.30 – 0.70	Segitiga
Tinggi	0.60 – 0.90	Segitiga
Sangat Tinggi	0.80 – 1.00	Trapesium



Parameter fungsi keanggotaan yang dapat digunakan pada MATLAB Fuzzy Logic Designer:



Name	Type	Parameters
Sangat Rendah	Trapezoidal	[0 0 10 25]
Rendah	Triangular	[15 30 45]
Sedang	Triangular	[35 50 65]
Tinggi	Triangular	[55 70 85]
Sangat Tinggi	Trapezoidal	[75 90 100 100]

b. Variabel Output Fuzzy

Variabel output pada sistem fuzzy adalah Dosis Penyemprotan Herbisida yang dinyatakan dalam persentase dengan rentang nilai 0% hingga 100%.

Fungsi keanggotaan output dibagi menjadi lima kategori linguistik, yaitu:

1. Sangat Rendah
2. Rendah
3. Sedang
4. Tinggi

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

5. Sangat Tinggi

Nilai output ini digunakan sebagai dasar untuk menentukan besarnya debit cairan yang akan dikeluarkan oleh pompa sprayer melalui pengaturan sinyal PWM pada mikrokontroler.

Rentang Membership Function Variabel Output (Dosis Penyemprotan):

Himpunan Fuzzy	Rentang Dosis (%)	Bentuk Membership Function
Sangat Rendah	0 – 20	Trapesium
Rendah	10 – 40	Segitiga
Sedang	30 – 70	Segitiga
Tinggi	60 – 90	Segitiga
Sangat Tinggi	80 – 100	Trapesium

Parameter fungsi keanggotaan:

Name: Dosis_Pestisida
Range: [0 100]
Number of MFs: 5
Evenly Distribute MFs

Name	Type	Parameters
Sangat Rendah	Trapezoidal	[0 0 10 25]
Rendah	Triangular	[15 30 45]
Sedang	Triangular	[35 50 65]
Tinggi	Triangular	[55 70 85]
Sangat Tinggi	Trapezoidal	[75 90 100 100]

c. Basis Aturan Fuzzy (Rule Base)

Proses pengambilan keputusan dilakukan menggunakan seperangkat aturan fuzzy (fuzzy rule base) yang menggambarkan hubungan antara nilai VRA Index dan dosis penyemprotan yang dihasilkan.

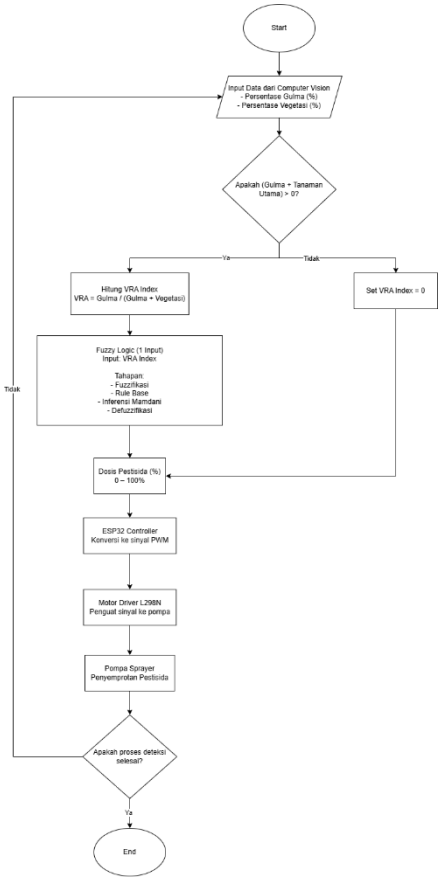
Aturan fuzzy yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

	Rule	Weight	Name
1	If VRA is Sangat Rendah then Dosis_Pestisida is Sangat Rendah	1	rule1
2	If VRA is Rendah then Dosis_Pestisida is Rendah	1	rule2
3	If VRA is Sedang then Dosis_Pestisida is Sedang	1	rule3
4	If VRA is Tinggi then Dosis_Pestisida is Tinggi	1	rule4
5	If VRA is Sangat Tinggi then Dosis_Pestisida is Sangat Tinggi	1	rule5

Aturan fuzzy tersebut digunakan untuk menghubungkan tingkat kebutuhan penyemprotan yang direpresentasikan oleh nilai VRA Index dengan dosis herbisida yang harus diberikan oleh sistem. Semakin tinggi nilai VRA Index yang diperoleh dari hasil pengolahan citra, maka semakin tinggi pula dosis penyemprotan yang dihasilkan oleh sistem fuzzy.

d. Analisis Integrasi Sistem

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id



Integrasi sistem dilakukan dengan menghubungkan hasil keluaran fuzzy dengan sistem aktuasi penyemprotan berbasis mikrokontroler ESP32. Nilai crisp hasil defuzzifikasi digunakan sebagai referensi untuk menghasilkan sinyal Pulse Width Modulation (PWM) yang akan mengendalikan kecepatan pompa diafragma melalui motor driver L298N.

Pada penelitian ini, pompa diafragma berfungsi sebagai aktuator utama yang bertugas mengalirkan cairan herbisida menuju nozzle penyemprotan. Besarnya nilai PWM yang diberikan akan mempengaruhi kecepatan putaran motor pompa sehingga debit cairan yang dihasilkan dapat berubah secara proporsional terhadap hasil keputusan fuzzy.

Konversi Output Fuzzy ke PWM ESP32:

Dosis (%)	Duty Cycle PWM	Nilai PWM (0-255)	Kondisi Pompa
0 – 20	20%	51	Sangat Rendah
21 – 40	40%	102	Rendah
41 – 60	60%	153	Sedang
61 – 80	80%	204	Tinggi
81 – 100	100%	255	Sangat Tinggi

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

B. Spesifikasi Produk

Perancangan spesifikasi robot otonom multifungsi ini merupakan hasil integrasi komprehensif dari empat pilar kepakaran teknik mekatronika guna membentuk sistem pemeliharaan lahan luar ruangan yang cerdas dan presisi.

Spesifikasi perangkat keras dan perangkat lunak disusun secara tersistem mulai dari domain Visi Komputer dan Perencanaan Jalur yang mengelola penginderaan visual AI untuk deteksi rintangan dan penentuan rute; Sistem Kendali Gerak dan Fusi Sensor yang memproses parameter kinematika sasis tracked, data orientasi dari IMU BNO055, serta algoritma navigasi pengawas; Optimasi Mekanisme Pemotong dan Daya yang bertanggung jawab atas rancangan mekanis dek pemotong dan stabilitas manajemen kelistrikan baterai; hingga Sistem Penyemprotan Herbisida Presisi yang mengatur aktuasi fluida untuk perawatan gulma secara selektif. Sinergi terpusat dari keempat kepakaran ini memastikan robot mampu beroperasi secara mandiri, aman, dan efisien, baik dalam tugas pemotongan rumput secara mekanis maupun perawatan lahan secara kimiawi.

1. Visi Komputer dan Perencanaan Jalur (Object Detection & Navigation)

Kategori Komponen	Nama Komponen	Parameter Teknis Utama	Batasan & Format Operasional
Sensor Visual	Webcam JETE w9	Resolusi input: 1920×1080 (diskalakan ke 640×640 piksel), Antarmuka: USB	Bertindak sebagai "mata" robot. Menghasilkan deret frame RGB secara real-time ke unit komputasi.
Unit Komputasi AI	raspberry pi 5 4gb	Komputasi mendukung framework PyTorch, Kapasitas RAM ≥4 GB, Antarmuka: UART/Serial	Mengisolasi pemrosesan AI dari ESP32. Menjalankan Python, OpenCV, dan inferensi model secara paralel.

2. Sistem Kendali Gerak dan Fusi Sensor (Kinematics & Odometry)

Bagian ini menjabarkan parameter teknis dan batasan operasional dari komponen-komponen elektronik penyusun sistem kendali yang tertanam pada papan sirkuit utama mikrokontroler **ESP32**. Pemilihan parameter ini disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan latensi rendah (*low latency*) pada pemrosesan algoritma *Fuzzy Logic*.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

Kategori Komponen	Nama Komponen	Parameter Teknis Utama	Batasan & Format Operasional
Mikrokontroler Utama	ESP32 NodeMCU	CPU: Dual-core Xtensa 32-bit LX6, Clock Speed: Hingga 240 MHz, Tegangan Kerja: 3.3 V DC	Resolusi PWM: 8-bit (Rentang 0–255), Frekuensi PWM: 5 kHz (Periferal ledc)
Sensor Orientasi Absolut	IMU BN055	Akselerometer: 14-bit (3-axis), Giroskop: 16-bit (3-axis, Magnetometer: 3-axis geomagnetik	Output: Sudut Euler (∘) langsung lewat I2C, Coprocessor: 32-bit ARM Cortex-M0 (Fusi On-chip)
Pengandali Motor	Cytron MDD10A	Konfigurasi: Dual-channel, Arus Kontinu: 10 A per kanal (Peak 30 A), Rentang Tegangan: 5 V – 30 V DC	Metode Kendali: Sign-Magnitude PWM, Antarmuka: Pin PWM dan DIR (Arah)
Aktuator Roda	Motor DC JGB37-520	Tegangan Nominal: 12 V DC, Rasio Reduksi Girboks: 1:30	Sensor: Hall-Effect Quadrature Encoder, Kerapatan: 11 PPR (Poros sebelum girboks)

Perhitungan konversi dari kecepatan sudut roda aktual menuju pergeseran posisi linear koordinat dunia (X, Y, θ) membutuhkan penetapan konstanta fisik sasis. Konstanta-konstanta ini dimasukkan secara eksplisit ke dalam baris kode program ESP32 sebagai pengali rumus kinematika diferensial robot sabuk (*tracked*).

Simbol Konstanta	Nama Parameter Fisik	Nilai Nominal	Satuan	Deskrikpsi Fungsi dalam Rumus
r	Radius Roda Penggerak Utama	0.045	Meter (m)	Mengonversi kecepatan sudut rotasi poros motor ($\omega_\{wheel\}$, rad/s) menjadi kecepatan linear sasis ($v, m/s$).
B_{eff}	Jarak Antar *Track* Roda Efektif	0.350	Meter (m)	Jarak tegak lurus antara garis tengah sabuk kiri dan kanan setelah dikompensasi efek gesekan lateral (*skidding coeffcient*). Digunakan untuk menghitung laju rotasi bodi (ω).
PWM_{max}	Batas Kecepatan Maksimal Robot	200	Integer	Batas atas keselamatan *duty cycle* dari maksimal 255 (8-

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

				bit). Digunakan sebagai pembatas (*saturation block*) agar kecepatan robot tidak membahayakan lingkungan.
PWM_{min}	Batas Ambang Gerak (*Dead-zone*)	60	Integer	Nilai PWM minimum untuk mengatasi gaya gesek statis (*inertia*) sasis *tracked* di atas medan rumput agar motor tidak macet (*stalling*).
ΔW	Lebar Potong Efektif Pisau	0.400	Meter (m)	Nilai PWM minimum untuk mengatasi gaya gesek statis (*inertia*) sasis *tracked* di atas medan rumput agar motor tidak macet (*stalling*).

Melalui kombinasi parameter kinematika di atas, rumus penentuan nilai kecepatan linear (v) dan kecepatan sudut (ω) sasis robot dirumuskan secara internal pada program mikrokontroler sebagai berikut:

$$v = \frac{r \cdot (\omega_{kanan} + \omega_{kiri})}{2}$$
$$\omega = \frac{r \cdot (\omega_{kanan} - \omega_{kiri})}{B_{eff}}$$

Nilai v dan \$\omega\$ inilah yang kemudian diintegrasikan secara berkala terhadap waktu untuk mendapatkan pembaruan posisi aktual $(X_{actual}, Y_{actual}, \theta_{actual})$ pada algoritma odometri.

3. Optimasi Mekanisme Pemotong dan Daya (Cutting Deck & Power Management)

Tahap Uji	**Skenario Pengujian**	**Perangkat Uji & Instrumen**	**Parameter Evaluasi**	**Indikator Keberhasilan**
Sensor Arus	Motor beroperasi dengan beban variabel (tanpa kontrol, dengan beban ringan/sedang/berat)	INA219, motor DC 775, ampere meter digital, PC	Galat pengukuran arus (dalam %) dan waktu respon sensor terhadap	Galat < 5%, respon cepat (deteksi lonjakan <0.1 s), mendeteksi kondisi I > 155 mA dengan andal.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

			lonjakan arus.	
Kontrol PID	Motor diberikan gangguan beban mendadak (mis: tahan rem atau beban tambahan)	ESP32, INA219, generator beban (mis: resistor/obat rem), osiloskop atau data logger	Rise time, settling time, overshoot dan steady-state error arus motor setelah kendali aktif.	Overshoot < 20%, settling time < 2 s, arus kembali stabil di ≤155 mA tanpa osilasi berlebih.
Aktuator Self-Locking	Perintah sinyal PWM ke aktuator (0→100% duty) tanpa beban mekanis dan beban maksimal	BTS7960, aktuator linear, sensor posisi (potensiometer atau penggaris), multimeter, stopwatch	Waktu perjalanan aktuator (full stroke), perubahan elevasi deck, arus konsumsi setelah PWM = 0	Aktuator mencapai posisi target sesuai spesifikasi (<1 s), posisi deck tidak berubah (self-locking efektif), arus mendekati 0 saat berposisi statis.
Efisiensi Energi	Operasi motor + aktuator pada kondisi beban tetap selama durasi tertentu, dengan dan tanpa kendali adaptif	Baterai Li-ion, wattmeter/datalogger, Arduino/ESP32 dengan pencatat tegangan & arus	Total energi terpakai (dalam Joule atau mAh) dan daya rata-rata dalam tiap mode	Penghematan energi (η) positif, misal penggunaan energi mode adaptif ≥10% lebih rendah daripada mode tetap.

4. Sistem Penyemprotan Herbisida Presisi (Variable Rate Application)

No	Komponen / Aspek	Spesifikasi & Deskripsi Utama
1	Input Fuzzy	Indeks VRA (0–100%): Nilai kerapatan gulma hasil segmentasi ruang warna HSV oleh kamera.
2	Proses Fuzzy	FIS Mamdani (ESP32): Pemrosesan aturan linguistik (Jarang, Sedang, Lebat) dengan metode defuzzifikasi Centroid.
3	Output Fuzzy	Sinyal PWM (0–255): Mengatur tegangan motor pompa secara halus (*smooth*) untuk mencegah kerusakan elektrikal maupun mekanis.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

4	Perangkat Keras	ESP32 NodeMCU, Driver L298N, Pompa Diafragma 12 V, dan Mist Nozzle (0,3–0,5 mm).
5	Protokol Data	Serial UART (115200 bps) dengan format string data: `VRA:XX.X\n` (dikirim dari PC ke ESP32).
6	Target Pengujian	Galat (error) komputasi fuzzy ≤ 1% (dibandingkan hasil MATLAB) dan target penghematan herbisida sebesar **30–40%** pada pengujian lapangan.

C. Simulasi Produk

Tahap simulasi merupakan langkah krusial dalam rekayasa sistem mekatronika guna memverifikasi integritas logika dan performa robot sebelum memasuki fase manufaktur dan pengujian lapangan.

Simulasi ini mencakup validasi dari empat domain kepakaran: domain Visi Komputer dan Perencanaan Jalur melakukan simulasi deteksi objek dan pemetaan koordinat rintangan ke ruang navigasi; domain Sistem Kendali Gerak dan Fusi Sensor memvalidasi stabilitas algoritma Fuzzy Logic Controller (FLC) Sugeno melalui analisis respon transien; domain Optimasi Mekanisme Pemotong dan Daya mensimulasikan pembebanan torsi motor pisau terhadap konsumsi arus baterai; serta domain Sistem Penyemprotan Herbisida Presisi memvalidasi algoritma Variable Rate Application (VRA) untuk memastikan debit semprotan selaras dengan kecepatan linier robot. Integrasi simulasi ini memastikan bahwa seluruh konstanta kinematika dan aturan Fuzzy yang dirancang mampu menghasilkan kompensasi pergerakan yang halus, aman, dan efisien.

1. Visi Komputer dan Perencanaan Jalur (Object Detection & Navigation)
   a. Injeksi Data dan Rendering Visual (*Live Preview*)
      Produk disimulasikan dengan mengumpankan berkas video pra-rekaman yang merepresentasikan kondisi aktual lapangan (kamera menghadap ke depan dari sudut pandang robot). Antarmuka utama akan memunculkan jendela bertajuk "Mower Smart Vision", di mana *frame* asli ditumpuk (*overlay*) dengan kotak pembatas (YOLO), indikator teks status rintangan, nilai persentase densitas gulma (VRA), dan poligon trapesium spasial tiga warna (Merah, Kuning, Hijau) yang berkedip responsif sesuai posisi rintangan.
   b. Dasbor Kalibrasi Spasial Dinamis
      Simulasi ini dilengkapi dengan panel *Trackbar* bawaan OpenCV. Panel ini memungkinkan *engineer* untuk mengatur batas kedalaman secara langsung saat video berjalan. Pengguna dapat menggeser *slider* nilai "Batas Hijau", "Batas Kuning", "Batas Merah", serta kelebaran trapesium ("Lebar Atas/Bawah"). Perubahan matriks

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

matematika ini seketika mengubah bentuk geometri trapesium di layar dan disimpan secara otomatis ke dalam berkas kalibrasi_config.json. Fitur ini memastikan robot dapat beradaptasi dengan perubahan tinggi pemasangan kamera tanpa perlu membongkar (*recompile*) kode sumber utama.

c. Pemantauan Transmisi Data (*Telemetry Monitor*)
Untuk memastikan bahwa logika algoritma menghasilkan keluaran aktuasi yang benar, antarmuka simulasi memproyeksikan indikator telemetri di sudut atas layar. Parameter seperti CMD GERAK: [X] dan CMD POMPA: VRA:[Y] ditampilkan dan diperbarui pada setiap iterasi *frame*. Jika video disimulasikan kehilangan tangkapan (*blank* selama > 5.0 detik), antarmuka akan langsung menyimulasikan interupsi kegagalan (*Fail-Safe*) dengan mencetak peringatan besar berwarna merah "!!! BLIND MODE: KAMERA BUTA !!!" di tengah layar.

d. Kontrol Analisis Manual
Guna memudahkan proses analisis matriks keputusan pada *frame* yang sangat spesifik (misalnya saat objek tepat memotong garis batas Zona Kuning ke Zona Merah), simulasi dilengkapi dengan fungsi interupsi manual (is_paused). Dengan menekan tombol spasi (*spacebar*), laju iterasi komputasi akan dijeda, memungkinkan observasi ketepatan koordinat titik tumpu secara detail sebelum algoritma dilanjutkan.

2. Sistem Kendali Gerak dan Fusi Sensor (Kinematics & Odometry)
   a. Grafik Fungsi Keanggotaan *(Membership Funtion)*
   Fuzzifikasi dilakukan dengan memetakan nilai masukan tegas (*crisp input*) ke dalam himpunan fuzzy menggunakan perangkat lunak MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. Berikut adalah parameter visualisasi kurva keanggotaan yang dirancang:
      1. FIS 1 : Rem Halus
         a. Setup input & output

INPUT 1	Jarak_Piksel
OUTPUT 1	Pengali_Kecepatan

         b. Membership Function Input 1 : Jarak_Piksel
         Setup Range : [450 640]

Aman	TrapMF	[400 400 460 500]
Waspada	TriMF	[480 520 560]
Dekat	TriMF	[540 580 620]
Kritis	TriMF	[600 620 640]
Stop	TrapMF	[630 640 700 700]

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

c. Membership Function Output 1 : Pengali_Kecepatan
Setup Range : [0 1]

Aman	1
Agak_Penuh	0.75
Setengah	0.5
Agak_Pelan	0.25
Nol	0

d. RULE BASE FIS 1 : Jarak_Piksel

1	If Jarak_Piksel is Aman, then Pengali_Kecepatan is Penuh.
2	If Jarak_Piksel is Waspada, then Pengali_Kecepatan is Agak_Pelan.
3	If Jarak_Piksel is Dekat, then Pengali_Kecepatan is Setengah.
4	If Jarak_Piksel is Kritis, then Pengali_Kecepatan is Sangat_Pelan.
5	If Jarak_Piksel is Stop, then Pengali_Kecepatan is Nol.

2. FIS 2 : Pelacakan Jalur Lurus
a. Setup Input & Output

INPUT 1	Heading_Error
INPUT 2	CrossTrack_Error
OUTPUT 1	PWM_Kiri
OUTPUT 2	PWM_Kanan

b. Membership Function Input 1 : Heading_Error
Setup Range : [-30 30]

NB (NEGATIF BESAR)	TrapMF	[-180 -180 -30 -15]
NK (NEGATIF KECIL)	TriMF	[-25 -10 0]
ZERO	TriMF	[-10 0 10]
PK (POSITIF KECIL)	TriMF	[0 10 25]
PB (POSITIF BESAR)	TrapMF	[15 30 180 180]

c. Membership Function Input 2 : CrossTrack_Error
Setup Range : [-0.5 0.5]

KiJ (Kiri Jauh)	TrapMF	[-2 -2 -0.5 -0.2]
KiD (Kiri Dekat)	TriMF	[-0.4 -0.15 0]
ZERO	TriMF	[-0.15 0 0.15]

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

KaD (Kanan Dekat)	TriMF	[0 0.15 0.4]
KaJ (Kanan Jauh)	TrapMF	[0.2 0.5 2 2]

d. Membership Function Ouput 1 & 2 : PWM*Kiri &* PWM_Kanan
Setup Range : [0 255]

Sangat Lambat	50
Lambat	120
Normal	180
Cepat	220
Sangat Cepat	255

e. RULE BASE FIS 2 : Pelacakan Jalur Lurus

1	If Heading_Error is NB and CrossTrack_Error is KiJ then PWM_Kiri is Sangat_Cepat, PWM_Kanan is Sangat_Lambat
2	If Heading_Error is NB and CrossTrack_Error is KiD then PWM_Kiri is Sangat_Cepat, PWM_Kanan is Sangat_Lambat
3	If Heading_Error is NB and CrossTrack_Error is Z then PWM_Kiri is Cepat, PWM_Kanan is Lambat
4	If Heading_Error is NB and CrossTrack_Error is KaD then PWM_Kiri is Cepat, PWM_Kanan is Lambat
5	If Heading_Error is NB and CrossTrack_Error is KaJ then PWM_Kiri is Normal, PWM_Kanan is Normal
6	If Heading_Error is NK and CrossTrack_Error is KiJ then PWM_Kiri is Sangat_Cepat, PWM_Kanan is Sangat_Lambat
7	If Heading_Error is NK and CrossTrack_Error is KiD then PWM_Kiri is Cepat, PWM_Kanan is Lambat
8	If Heading_Error is NK and CrossTrack_Error is Z then PWM_Kiri is Cepat, PWM_Kanan is Lambat
9	If Heading_Error is NK and CrossTrack_Error is KaD then PWM_Kiri is Normal, PWM_Kanan is Normal
10	If Heading_Error is NK and CrossTrack_Error is KaJ then PWM_Kiri is Lambat, PWM_Kanan is Cepat
11	If Heading_Error is Z and CrossTrack_Error is KiJ then PWM_Kiri is Sangat_Cepat, PWM_Kanan is Sangat_Lambat
12	If Heading_Error is Z and CrossTrack_Error is KiD then PWM_Kiri is Cepat, PWM_Kanan is Lambat
13	If Heading_Error is Z and CrossTrack_Error is Z then PWM_Kiri is Normal, PWM_Kanan is Normal
14	If Heading_Error is Z and CrossTrack_Error is KaD then PWM_Kiri is Lambat, PWM_Kanan is Cepat

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

15	If Heading_Error is Z and CrossTrack_Error is KaJ then PWM_Kiri is Sangat_Lambat, PWM_Kanan is Sangat_Cepat
16	If Heading_Error is PK and CrossTrack_Error is KiJ then PWM_Kiri is Cepat, PWM_Kanan is Lambat
17	If Heading_Error is PK and CrossTrack_Error is KiD then PWM_Kiri is Normal, PWM_Kanan is Normal
18	If Heading_Error is PK and CrossTrack_Error is Z then PWM_Kiri is Lambat, PWM_Kanan is Cepat
19	If Heading_Error is PK and CrossTrack_Error is KaD then PWM_Kiri is Lambat, PWM_Kanan is Cepat
20	If Heading_Error is PK and CrossTrack_Error is KaJ then PWM_Kiri is Sangat_Lambat, PWM_Kanan is Sangat_Cepat
21	If Heading_Error is PB and CrossTrack_Error is KiJ then PWM_Kiri is Normal, PWM_Kanan is Normal
22	If Heading_Error is PB and CrossTrack_Error is KiD then PWM_Kiri is Lambat, PWM_Kanan is Cepat
23	If Heading_Error is PB and CrossTrack_Error is Z then PWM_Kiri is Lambat, PWM_Kanan is Cepat
24	If Heading_Error is PB and CrossTrack_Error is KaD then PWM_Kiri is Sangat_Lambat, PWM_Kanan is Sangat_Cepat
25	If Heading_Error is PB and CrossTrack_Error is KaJ then PWM_Kiri is Sangat_Lambat, PWM_Kanan is Sangat_Cepat
26	If Heading_Error is NB then PWM_Kiri is Sangat_Lambat

b. Tabel Simulasi Aturan *(Rules Base Matrix)*

a. Hasil Simulasi FIS 1 : Rem Halus

Input Jarak_Piksel	Output Pengali_Kecepatan	Kondisi
100 px	1	Objek terdeteksi sangat jauh atau berada di batas atas frame kamera (latar belakang). Robot tidak perlu melakukan tindakan pengereman.
400 px	0.75	Objek mulai berjalan mendekati area kerja depan robot (Zona Trapesium Kuning). Sistem harus mulai bersiap mengurangi kecepatan.
540 px	0.4	Manusia berada di jarak menengah yang membutuhkan tindakan pengereman intensif.
600 px	0.15	Objek berada sangat dekat di depan sasis robot. Motor harus segera dipaksa berputar lambat agar momentum inersia robot berkurang secara drastis sebelum berhenti total.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

640 px	0	Manusia berada di zona trapesium merah (jarak kritis minimum). Robot wajib berhenti total demi keselamatan mutlak operator atau objek hidup.

b. Hasil Simulasi FIS 2 : Pelacakan Jalur Lurus

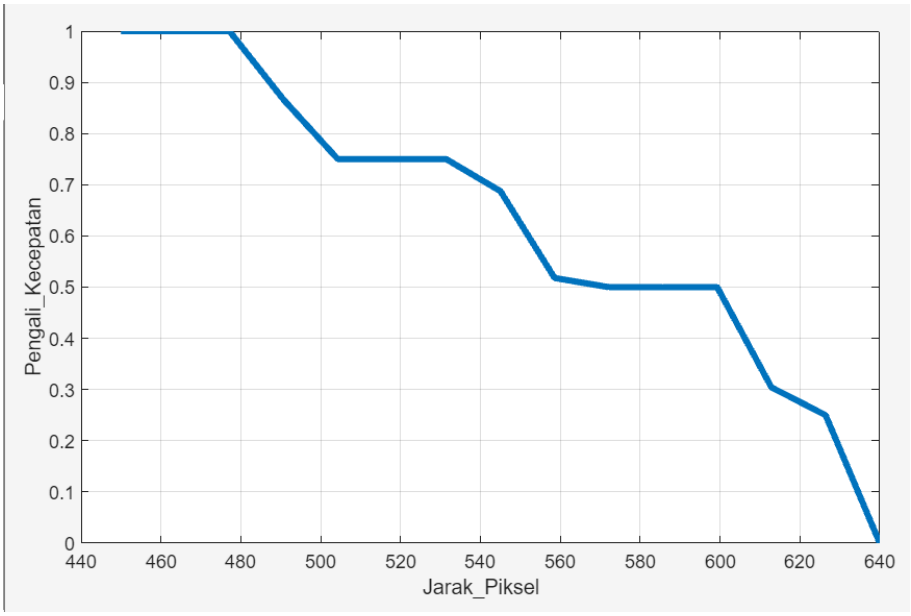
Input Heading_Error	Input CrossTrack_Error	Output PWM [KIRI KANAN]	Kondisi
0	0	[180 180]	Kondisi Ideal: Robot berada tepat di atas garis lintasan dan menghadap lurus ke depan. Kedua motor berputar seimbang pada kecepatan normal.
-15	0	[220 120]	Karena e_theta negatif, posisi aktual robot sedang miring ke Kiri. Robot harus belok Kanan untuk kembali ke 0 derajat, sehingga PWM Kiri dinaikkan (220) dan Kanan diturunkan (120).
0	-4	[255 50]	Karena e_ct negatif, posisi fisik robot berada di sebelah Kanan jalur. Robot harus putar Kanan tajam untuk kembali mendekati garis, sehingga PWM Kiri dipaksa maksimal (255) dan Kanan minimal (50).
10	-15	[180 180]	Robot berada di Kanan jalur (e_ct) negatif, tetapi moncongnya sudah miring ke Kanan (e_theta positif) mengarah kembali ke garis. Karena posisi dan sudut saling mengoreksi, FIS memberikan output seimbang untuk menjaga kestabilan transisi.
25	0.4	[50 255]	Robot berada jauh di Kiri jalur (e_ct positif) dan moncongnya miring parah ke Kanan (e_theta positif/menjauhi jalur). Robot

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

			harus putar Kiri maksimal untuk menyelamatkan posisi, sehingga PWM Kanan dipaksa maksimal (255) dan Kiri minimal (50).

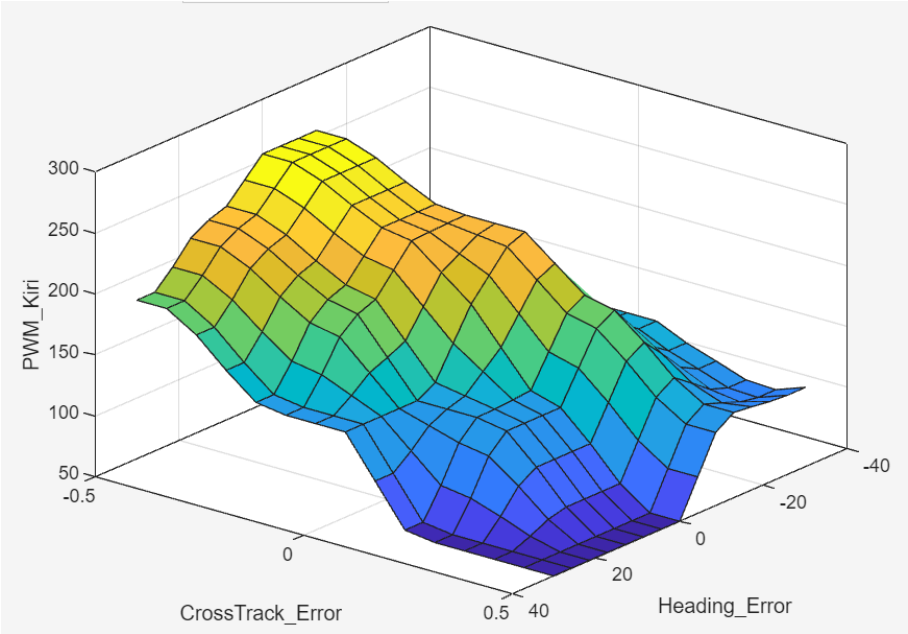
c. Grafik Permukaan (*Surface Viewer 3D)*

1. FIS 1 : Rem Halus

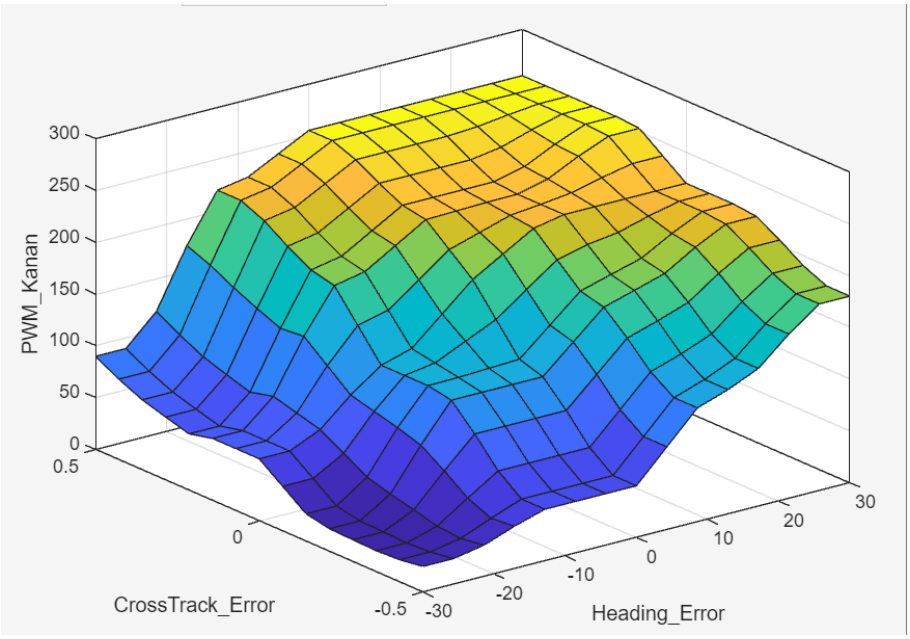


2. FIS 2 : Pelacakan Jalur Lurus
   a. PWM KIRI

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id



b. PWM KANAN

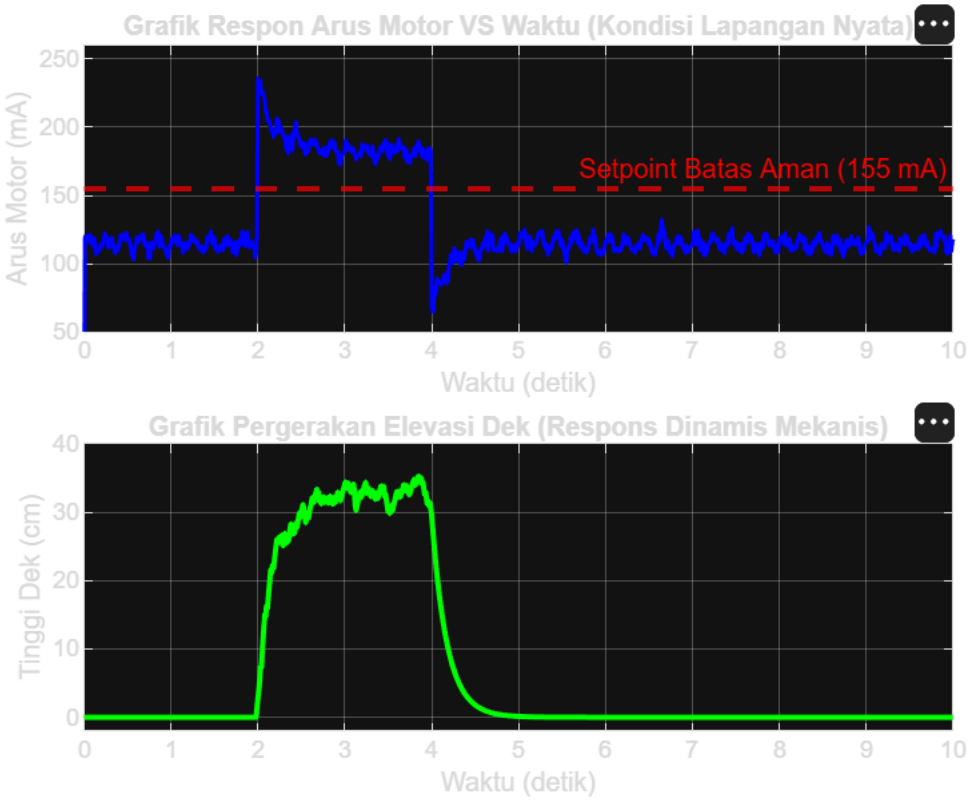


3. Optimasi Mekanisme Pemotong dan Daya (Cutting Deck & Power Management)

Berdasarkan hasil simulasi MATLAB, pada kondisi awal (0–2 detik) arus motor berada pada kisaran **110–120 mA**, sehingga masih berada di bawah batas aman (*setpoint*) sebesar **155**

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

mA. Pada detik ke-2 terjadi peningkatan beban yang menyebabkan arus motor naik hingga sekitar **230 mA**, menandakan kondisi *overload*. Algoritma PID kemudian merespons dengan menggerakkan aktuator linear untuk menaikkan posisi *cutting deck*. Perubahan elevasi dek mengurangi beban pemotongan sehingga arus motor berangsur turun dan kembali stabil di bawah *setpoint* sekitar detik ke-4.



Grafik elevasi *cutting deck* menunjukkan aktuator berhasil menaikkan dek hingga sekitar **33 cm** sebagai respons terhadap peningkatan beban. Setelah arus motor kembali berada pada kondisi normal, aktuator mengembalikan posisi dek ke kondisi awal secara bertahap. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali PID mampu menjaga arus motor tetap berada dalam batas aman dengan respons yang stabil, sehingga risiko *overload* dapat diminimalkan dan performa sistem pemotong menjadi lebih adaptif terhadap perubahan kondisi rumput.

4. Sistem Penyemprotan Herbisida Presisi (Variable Rate Application)

   Simulasi pada subsistem ini bertujuan untuk memvalidasi model matematika Fuzzy Inference System (FIS) Mamdani dan memastikan transisi output PWM berjalan lancar sebelum ditanamkan (deploy) ke mikrokontroler ESP32.

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

- Lingkungan Simulasi: Perangkat lunak MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox) untuk simulasi logika fuzzy dan Python untuk simulasi pemrosesan citra (masking HSV).
- Metode Pengujian Simulasi: Memasukkan nilai pengujian acak (dummy input) pada parameter Indeks VRA untuk menganalisis pergerakan grafik keputusan output.

Tabel Matriks Hasil Simulasi Utama:

Skenario Kerapatan Gulma	**Input: Indeks VRA (Citra)**	**Output Teoretis: Dosis Semprot**	**Output Digital: Sinyal PWM ESP32**	**Target Performa Simulasi**
Tanah Kosong / Rumput Mati	0% – 20%	Minimal / Mati (0%)	0 – 50	Pompa tidak aktif atau mengalirkan debit minimum untuk menghemat cairan herbisida.
Gulma Renggang / Jarang	21% – 60%	Sedang (40% – 60%)	100 – 160	Tegangan motor meningkat secara bertahap sehingga menghasilkan semprotan kabut sedang yang stabil.
Koloni Gulma Padat / Lebat	61% – 100%	Maksimal (80% – 100%)	200 – 255	Pompa berputar pada kecepatan penuh untuk membasmi area gulma yang pekat.

Indikator Keberhasilan Simulasi:

- Analisis Surface Viewer: Grafik tiga dimensi (3D) hubungan antara Input (Indeks VRA) dan Output (PWM) di MATLAB menunjukkan kurva naik yang landai dan kontinu, membuktikan tidak adanya grafik patah (transisi biner kaku).
- Validasi Rule Viewer: Seluruh variasi data masukan berhasil dievaluasi oleh aturan fuzzy (Rule Base) tanpa menghasilkan nilai eror atau fuzzifikasi tak terdefinisi.

JADWAL

	Minggu															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	1	1	1	1	1

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

										0	1	2	3	4	5	6
Pembuatan Kelompok																
Perakitan Hardware																
Pengerjaan C1																
Pengerjaan C2																
Pengerjaan C3																

KESIMPULAN

Perancangan dan implementasi robot pemotong rumput otonom ini berhasil mengintegrasikan sistem navigasi cerdas berbasis kecerdasan buatan (AI) pada arsitektur komputasi *Edge*. Penggunaan model YOLOv8 Nano yang dipadukan dengan pemetaan jarak semu menggunakan *Region of Interest* (ROI) Trapesium terbukti mampu menggantikan sensor aktif yang mahal (seperti LiDAR) dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan rintangan secara *real-time*. Keandalan persepsi visual ini didukung penuh oleh sistem kendali gerak berbasis *Fuzzy Logic* Sugeno Orde-0 dan fusi sensor inersia (IMU MPU6050), yang secara efektif mengeliminasi akumulasi galat akibat gelincir (*slip*) pada sasis *skid-steering*, sehingga robot dapat mempertahankan lintasan operasional secara presisi di lingkungan luar ruangan yang dinamis.

Selain keandalan navigasi, efisiensi operasional robot ditingkatkan secara signifikan melalui optimasi mekanisme pemotongan dan sistem penyemprotan presisi. Penerapan kendali lingkar tertutup (PID) menggunakan umpan balik dari sensor arus INA219 pada *cutting deck* berhasil memberikan perlindungan adaptif terhadap motor dari kondisi beban berlebih (*overload*), sekaligus menghemat konsumsi daya kelistrikan baterai melalui mekanisme penguncian otomatis (*self-locking*) pada aktuator linear. Secara paralel, inovasi *Variable Rate Application* (VRA) yang mengawinkan segmentasi ruang warna HSV dengan inferensi *Fuzzy* Mamdani memungkinkan robot untuk menyemprotkan cairan herbisida secara proporsional sesuai dengan kepadatan gulma

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

aktual, sehingga meminimalisasi pemborosan bahan kimia dibandingkan dengan metode penyemprotan konvensional secara menyeluruh.

Secara keseluruhan, keempat subsistem kepakaran yang dirancang telah terintegrasi dengan sangat baik melalui arsitektur kendali *Finite State Machine* (FSM) *non-blocking* pada mikrokontroler ESP32. Berdasarkan hasil perancangan dan simulasi operasional, interupsi keselamatan hirarkis—seperti manuver hindar cerdas (*Smart Dodge*) pada rintangan statis dan pengereman darurat (*Blind Mode*)—dapat dieksekusi dengan latensi yang sangat rendah tanpa mengorbankan siklus komputasi utama navigasi. Capaian dari perancangan terpadu ini menyimpulkan bahwa purwarupa robot ini berhasil memenuhi kriteria sebagai solusi otomatisasi pemeliharaan lahan dan pertanian presisi yang *low-cost*, tangguh, aman, dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. H. Haider, M. H. Haider, H. Ali, S. S. A. Shah, D. Zheng, and B. He, "Outdoor Autonomy for Mobile Robots: The Evolution of Sensing, Perception, and Navigation with Robotic Mowers as a Case Study," *SSRN*, 2026.
[2] Y. Zhang, Z. Mu, K. Tian, B. Zhang, and J. Huang, "Design and Research on a Reed Field Obstacle Detection and Safety Warning System Based on Improved YOLOv8n," *MDPI Agronomy*, vol. 15, no. 5, art. 1158, Mei 2025.
[3] X. Zhou, W. Chen, and X. Wei, "Improved Field Obstacle Detection Algorithm Based on YOLOv8," *MDPI Agriculture*, vol. 14, no. 12, art. 2263, Des. 2024.
[4] T. N. Syed, J. Zhou, F. Marinello, I. A. Lakhiar, F. A. Chandio, L. T. Rottok, Y. Zheng, and T. T. Gamechu, "Definition of a reference standard for performance evaluation of autonomous vehicles real-time obstacle detection and distance estimation in complex environments," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 232, p. 110143, 2025.
[5] A. L. Altieri and S. A. Cryer, "Break-up of sprayed emulsions from flat-fan nozzles using a hole kinematics model," *Biosystems Engineering*, vol. 169, pp. 104–114, 2018.
[6] A. R. A. Zanin, D. C. Neves, L. P. R. Teodoro, C. A. Silva Júnior, S. P. Silva, P. E. Teodoro, and F. H. R. Baio, "Reduction of pesticide application via real-time precision spraying," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 5638, 2022.
[7] R. Raja, D. C. Slaughter, S. A. Fennimore, and M. C. Siemens, "Real-time control of high-resolution micro-jet sprayer integrated with machine vision for precision weed control," *Biosystems Engineering*, vol. 228, pp. 31–48, 2023.
[8] M. Darbyshire, A. Salazar-Gomez, J. Gao, E. Sklar, and S. Parsons, "Towards practical object detection for weed spraying in precision agriculture," *Frontiers in Plant Science*, vol. 14, p. 1183277, 2023.

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER

Gd E11. Lt. 2 FT UNNES
Kampus Sekaran, Gunungpati
Kota Semarang-50229
Laman: https:
//www.unnes.ac.id/ft/tekom
Email:
Teknik.komputer@mail.unnes.ac.id

Lampiran

