IMPLEMENTASI FUZZY LOGIC UNTUK PENGENDALIAN PENYEMPROTAN HERBISIDA BERBASIS VARIABLE RATE APPLICATION (VRA)

Prototipe

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana.

Oleh :
Shaviraj Samad Shaikh
2305110047

PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

SEMARANG, TAHUN 2026

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Prototipe berjudul "**IMPLEMENTASI FUZZY LOGIC UNTUK PENGENDALIAN PENYEMPROTAN HERBISIDA BERBASIS VARIABLE RATE APPLICATION (VRA)**" yang disusun oleh

Nama	: Shaviraj Samad Shaikh
NIM	: 2305110047
Prodi/Fakultas	: Teknik Komputer/Teknik

telah disetujui untuk diajukan ke penilaian proposal prototipe.

Semarang, 25 September 2026
Pembimbing

Dr. Feddy Setio Pribadi, S.Pd., M.T.
197808222003121002

DAFTAR ISI

PERSETUJUAN PEMBIMBING ii
DAFTAR ISI iii
DAFTAR TABEL vi
DAFTAR GAMBAR vii
DAFTAR ISTILAH viii
BAB I 1
PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Prototipe 4
1.4 Manfaat Prorotipe 4
1.4.1 Bagi Penulis 4
1.4.2 Bagi Universitas Negeri Semarang 5
1.4.3 Bagi Pengelola Ruang Terbuka Hijau dan Masyarakat 5
1.4.4 Bagi Lingkungan 5
1.4.5 Bagi Industri 5
1.4.6 Bagi Perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi 5
1.4.7 Bagi Negara 5
1.5 Potensi Dampak Fungsional/Komersial 6
BAB II 8
KAJIAN PUSTAKA 8
2.1 Tinjauan Pustaka 8
2.2 Landasan Teoritik 9
2.2.1 Variable Rate Application 9
2.2.2 Citra Digital dan Ruang Warna HSV 10
2.2.3 Segmentasi Citra dan Indeks VRA 11
2.2.4 Logika Fuzzy Mamdani 12
2.2.5 Pulse Width Modulation dan Pengendalian Pompa 13
2.2.6 Debit dan Laju Aplikasi Penyemprotan 13
2.2.7 Integrasi Sistem dan Evaluasi Kinerja 14
BAB III 16

METODE PELAKSANAAN 16
3.1 Pendekatan Perancangan 16
3.2 Lokasi dan Waktu 16
3.3 Prosedur Perancangan 18
3.3.1 Analisis Kebutuhan 18
3.3.2 Perancangan Sistem 19
3.3.2.1 Desain Perangkat Keras 19
3.3.2.2 Arsitektur Perangkat Lunak 19
3.3.2.3 Perancangan Model Fuzzy 19
3.3.3 Implementasi 20
3.3.4 Pengujian 20
3.4 Teknik Perancangan 22
3.4.1 Pemilihan Komponen 22
3.4.1.1 ESP32 Dev Board 23
3.4.1.2 Driver Motor BTS7960 23
3.4.1.3 Pompa DC 12V Taffware 24
3.4.1.4 Tangki Cairan 5,5L 25
3.4.1.5 Nosel Oranye 26
3.4.1.6 Selang PE 6 mm dan 11 mm 27
3.4.1.7 Baterai dan Step-down DC–DC 28
3.4.2 Desain Fisik 30
3.4.2.1 Tata Letak Komponen 30
3.4.2.2 Material dan Sambungan 30
3.4.2.3 Teknik Desain Menggunakan Autodesk Fusion 31
3.4.3 Desain Wiring 32
3.4.3.1 Alokasi Sambungan dan Pin 32
3.4.3.2 Alokasi Sambungan dan Pin 33
3.4.4 Perancangan Model Fuzzy Logic 34
3.4.4.1 Struktur Model dan Variable 34
3.4.4.2 Fungsi Keanggotaan Masukan dan Keluaran 35
3.4.4.3 Basis Aturan dan Inferensi 36
3.4.4.4 Basis Aturan dan Inferensi 37
3.4.4.5 Simulasi dan Pemeriksaan Model 37
3.5 Teknik Uji Kelayakan Hasil 38

DAFTAR PUSTAKA 41
LAMPIRAN 44

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Perbandingan robot pemotong rumput dengan prototipe 6
Tabel 3.1 Rencana waktu pelaksanaan subsistem penyemprotan VRA 17
Tabel 3.2 Kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak subsistem VRA 18
Tabel 3.3 Spesifikasi ESP32 Dev Board 23
Tabel 3.4 Spesifikasi dan pengaturan driver BTS7960 24
Tabel 3.5 Spesifikasi pompa Taffware DP-521 25
Tabel 3.6 Spesifikasi tangki cairan 26
Tabel 3.7 Spesifikasi dan susunan nosel 27
Tabel 3.8 Spesifikasi selang PE 28
Tabel 3.9 Spesifikasi rancangan sumber daya baterai 29
Tabel 3.10 Kebutuhan spesifikasi step-down DC–DC 29
Tabel 3.11 Material rancangan fisik 31
Tabel 3.12 Alokasi sambungan subsistem penyemprotan VRA 33
Tabel 3.13 Konfigurasi model fuzzy Mamdani 34
Tabel 3.14 Parameter fungsi keanggotaan VRA dan Dosis_Pestisida 35
Tabel 3.15 Basis aturan fuzzy Mamdani 36
Tabel 3.16 Teknik uji kelayakan subsistem penyemprotan VRA 39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Contoh variasi nilai indeks pada lahan 10
Gambar 2.2 Komponen hue, saturation, dan value 11
Gambar 2.3 Ilustrasi pembentukan indeks VRA dari citra 12
Gambar 2.4 Skema integrasi subsistem penyemprotan VRA 14
Gambar 3.1 Diagram alir pendekatan prototyping iteratif 16
Gambar 3.2 Flowchart kerja subsistem penyemprotan VRA 22
Gambar 3.3 ESP32 Dev Board berbasis ESP-WROOM-32 23
Gambar 3.4 Modul driver motor BTS7960 24
Gambar 3.5 Pompa DC 12 V Taffware DP-521 25
Gambar 3.6 Tangki cairan berkapasitas nominal 5,5 L 26
Gambar 3.7 Nosel oranye dengan konektor T 26
Gambar 3.8 Selang PE sebagai saluran cairan 28
Gambar 3.9 Baterai dan modul step-down pada rancangan 29
Gambar 3.10 Visualisasi rancangan fisik subsistem penyemprotan 30
Gambar 3.11 Desain wiring subsistem penyemprotan VRA 32
Gambar 3.12 Pengaturan variabel masukan VRA pada MATLAB 34
Gambar 3.13 Pengaturan variabel keluaran Dosis_Pestisida pada MATLAB 35
Gambar 3.14 Kurva lima fungsi keanggotaan berdasarkan parameter model 36
Gambar 3.15 Lima aturan fuzzy pada model VRA_Pestisida 36
Gambar 3.16 Contoh simulasi Rule Viewer pada masukan VRA sebesar 80 38

DAFTAR ISTILAH

Istilah	Keterangan
VRA	Variable Rate Application; pengaturan tingkat aplikasi berdasarkan kondisi area.
ROI	Region of interest; bagian citra yang dianalisis.
HSV	Hue, saturation, value; komponen jenis warna, kejenuhan, dan kecerahan.
FIS	Fuzzy inference system; sistem inferensi fuzzy.
PWM	Pulse Width Modulation; pengaturan perbandingan waktu aktif sinyal.
Duty cycle	Perbandingan waktu aktif terhadap satu periode PWM.
GPIO	Pin masukan/keluaran serbaguna pada mikrokontroler.
USB serial	Komunikasi data serial melalui antarmuka USB.
Centroid	Metode defuzzifikasi berdasarkan titik pusat himpunan keluaran.
IoU	Intersection over Union; ukuran kesesuaian dua mask.
Q	Debit cairan, dinyatakan dalam mL/s pada pengujian.
R	Volume cairan per luas, dinyatakan dalam mL/m^2.
Step-down	Konverter DC–DC untuk menurunkan tegangan.

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemeliharaan ruang terbuka berumput merupakan kegiatan yang diperlukan untuk menjaga kerapian, kenyamanan, dan fungsi suatu kawasan. Area seperti lapangan olahraga, taman, lingkungan kampus, dan kawasan perumahan memerlukan pemotongan rumput secara berkala. Penggunaan mesin pemotong rumput konvensional masih membutuhkan keterlibatan operator untuk mengarahkan mesin, mengatur lintasan, menghindari halangan, dan memastikan seluruh area telah dikerjakan. Pada area yang luas, kegiatan tersebut membutuhkan waktu dan tenaga serta berpotensi menghasilkan pengulangan lintasan maupun bagian area yang belum terpotong. Kondisi ini mendorong pengembangan teknologi otomasi yang dapat membantu pelaksanaan pemeliharaan rumput secara lebih teratur dan terukur.

Salah satu lokasi yang menjadi perhatian dalam pengembangan teknologi tersebut adalah Lapangan Woodball Universitas Negeri Semarang. Lapangan ini ditetapkan sebagai lokasi studi kasus dan rencana pengujian robot pemotong rumput otonom. Berdasarkan pengukuran awal menggunakan Google Earth, luas area yang ditinjau diperkirakan sekitar 3.058 m^2 dengan bentuk batas yang tidak beraturan. Pengukuran tersebut merupakan estimasi awal yang perlu diverifikasi di lapangan. Untuk menyesuaikan pengujian dengan kemampuan prototipe, tahap awal pengujian direncanakan pada petak seluas 100 m^2 di dalam area tersebut. Karakteristik lokasi menjadi pertimbangan dalam penentuan batas operasi, penyusunan lintasan, dan evaluasi kemampuan robot.

Robot pemotong rumput otonom memerlukan kemampuan untuk mengetahui posisi, mengenali lingkungan, dan menentukan arah pergerakan. Informasi posisi saja belum cukup untuk menggambarkan keberadaan halangan di sekitar robot. Inoue dkk. (2019) mengembangkan sistem navigasi dan penghindaran halangan pada robot pemotong rumput menggunakan kamera stereo dan pembelajaran mendalam. Penelitian tersebut menunjukkan penerapan informasi visual untuk mengenali lingkungan dan mendukung pergerakan robot ketika navigasi tidak hanya mengandalkan sinyal satelit. Pendekatan ini menjadi salah satu dasar pengembangan sistem navigasi yang menggabungkan informasi posisi dengan persepsi lingkungan.

Dalam penelitian ini, navigasi dirancang dengan memanfaatkan Global Positioning System (GPS) sebagai referensi posisi global, deteksi halangan berbasis YOLOv8n, serta coverage path planning untuk menyusun lintasan cakupan area. Perencanaan lintasan diperlukan agar robot dapat mengerjakan area secara

sistematis dan mengurangi pengulangan lintasan yang tidak diperlukan. Sementara itu, informasi dari kamera digunakan untuk mengenali halangan pada jalur kerja sebagai dasar pengambilan keputusan untuk melanjutkan pergerakan, melakukan manuver, atau menghentikan operasi. Kemampuan tersebut perlu dihubungkan dengan sistem kendali gerak agar keputusan navigasi dapat diterjemahkan menjadi gerakan fisik robot.

Pengoperasian robot pada permukaan berumput juga menghadapi variasi kondisi tanah, kemiringan, kelembapan, dan traksi. Perbedaan kondisi tersebut dapat menimbulkan slip dan penyimpangan lintasan, terutama pada robot dengan penggerak sabuk rantai yang berbelok melalui perbedaan kecepatan sisi kiri dan kanan. Sathyamoorthy dkk. (2022), melalui pengembangan TerraPN, memanfaatkan informasi interaksi robot dengan medan, termasuk getaran IMU dan galat odometri, untuk mendukung navigasi pada permukaan yang memiliki karakteristik berbeda. Temuan tersebut menjadi pertimbangan bahwa kondisi medan perlu diperhatikan dalam perancangan kendali robot luar ruangan. Pada prototipe yang dikembangkan, data odometri dan Inertial Measurement Unit (IMU) dipadukan untuk membantu estimasi perpindahan serta orientasi, sedangkan kendali fuzzy Sugeno digunakan untuk mengatur respons gerak terhadap kesalahan arah dan lintasan.

Selain navigasi dan pergerakan, mekanisme pemotongan merupakan bagian utama yang menentukan kemampuan robot dalam menjalankan tugasnya. Perbedaan tinggi dan kepadatan rumput dapat menyebabkan perubahan beban pada motor pemotong. Oleh karena itu, rancangan robot perlu menyediakan mekanisme pengaturan elevasi dek pemotong agar posisi pemotongan dapat disesuaikan dengan kondisi operasi. Penelitian ini merencanakan penggunaan sensor arus sebagai umpan balik beban motor, kendali Proportional–Integral–Derivative (PID), dan aktuator linear untuk mengatur elevasi dek. Mekanisme self-locking pada aktuator dimanfaatkan untuk mempertahankan posisi dek tanpa pengaktifan motor aktuator secara terus-menerus. Kinerja pengaturan tersebut perlu dievaluasi melalui pengukuran perubahan ketinggian, respons terhadap peningkatan beban, dan konsumsi energi.

Robot juga dilengkapi fungsi penyemprotan berbasis Variable Rate Application (VRA) sebagai bagian dari pengembangan pemeliharaan vegetasi. Pendekatan ini diarahkan untuk menyesuaikan keluaran penyemprotan berdasarkan informasi kondisi area sasaran. Rahimi Azghadi dkk. (2024) menunjukkan bahwa penyemprotan robotik berbasis visi komputer pada lahan tebu dapat mengurangi penggunaan herbisida rata-rata sebesar 35% dibandingkan penyemprotan menyeluruh. Hasil tersebut memberikan dasar mengenai potensi penyemprotan terarah, meskipun kinerjanya tidak dapat langsung dianggap sama pada prototipe dan lingkungan pengujian yang berbeda. Dalam penelitian ini, indeks VRA dari

pengolahan citra diproses menggunakan fuzzy Mamdani untuk menghasilkan perintah kendali pompa melalui sinyal Pulse Width Modulation (PWM).

Penggabungan seluruh fungsi tersebut membutuhkan koordinasi antarsubsistem. Perubahan lintasan akibat halangan harus diteruskan kepada pengendali gerak, sedangkan pengoperasian pemotong dan penyemprot perlu mengikuti kondisi serta status misi robot. Pengaturan elevasi dek juga harus berlangsung tanpa menghambat pembacaan sensor maupun komunikasi antarpengendali. Dengan demikian, evaluasi robot perlu mencakup kemampuan setiap subsistem sekaligus keberhasilan integrasinya dalam menjalankan suatu misi. Pengujian dilakukan secara bertahap agar hubungan antara keputusan perangkat lunak dan respons perangkat keras dapat diperiksa.

Kontribusi utama pengembangan ini terletak pada integrasi visi komputer dan perencanaan jalur, kendali gerak dan fusi sensor, mekanisme pemotongan dan pengelolaan daya, serta penyemprotan VRA dalam satu platform robot. Perancangan juga mempertimbangkan ketersediaan komponen, kemudahan perawatan, dan batas biaya pengembangan. Kesesuaian rancangan terhadap kebutuhan pengguna perlu dibuktikan melalui pengujian pada lokasi studi kasus, sehingga penilaian terhadap prototipe didasarkan pada data kinerja yang diperoleh.

Berdasarkan permasalahan tersebut, dilakukan penelitian berjudul "Perancangan dan Implementasi Robot Pemotong Rumput Otonom dengan Sistem Navigasi Cerdas". Penelitian diarahkan untuk menghasilkan prototipe yang mampu menjalankan pemotongan rumput melalui lintasan yang direncanakan, merespons halangan, menyesuaikan kendali gerak terhadap kondisi medan, mengatur elevasi dek, dan mengendalikan penyemprotan sesuai masukan. Prototipe beserta hasil pengujiannya diharapkan menjadi dasar pengembangan teknologi otomasi pemeliharaan area berumput yang sesuai dengan kebutuhan operasional pengguna.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana pekerjaan pemeliharaan rumput dapat diselesaikan oleh robot sementara operator cukup memantau jalannya pekerjaan. Permasalahan tersebut dirinci sebagai berikut.

1. Bagaimana area berumput dapat dipotong secara merata tanpa operator terus-menerus mengarahkan robot, sekaligus tetap merespons halangan pada jalur kerja?
2. Bagaimana robot dapat mengikuti lintasan yang dituju ketika kondisi permukaan dan traksi berubah, sehingga area yang direncanakan tetap terjangkau?

3. Bagaimana tinggi pemotongan dapat disesuaikan dengan kondisi rumput tanpa menyebabkan motor pemotong terhenti akibat beban berlebih atau menggunakan daya pengatur dek secara terus-menerus?
4. Bagaimana jumlah herbisida yang disemprotkan dapat disesuaikan dengan kondisi area sasaran agar penggunaan cairan lebih terukur?
5. Bagaimana seluruh fungsi tersebut dapat bekerja bersama untuk menyelesaikan misi pada area pengujian dengan pengawasan operator dan biaya pengembangan yang terjangkau?

1.3 Tujuan Prototipe

Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan prototipe robot pemotong rumput yang mampu membantu menyelesaikan pekerjaan pemeliharaan area berumput dengan pengawasan operator. Secara khusus, prototipe ditujukan untuk:

1. Mengerjakan area uji secara sistematis dengan target cakupan sekurang-kurangnya 80% serta keberhasilan merespons halangan statis sekurang-kurangnya 80% pada skenario pengujian yang ditetapkan.
2. Mengikuti lintasan acuan pada permukaan berumput dan meningkatkan ketelitian estimasi posisi serta orientasi lokal, dengan target penurunan galat sekurang-kurangnya 20% dibandingkan penggunaan odometri saja.
3. Menyediakan sekurang-kurangnya tiga tingkat ketinggian pemotongan, mempertahankan posisi dek yang dipilih, dan merespons peningkatan beban motor agar proses pemotongan dapat berlangsung.
4. Menyesuaikan penyemprotan herbisida dengan kondisi area sasaran pada sekurang-kurangnya tiga tingkat debit, dengan galat debit aktual terhadap debit acuan tidak lebih dari 10% pada kondisi pengujian yang ditetapkan.
5. Menjalankan fungsi-fungsi tersebut sebagai satu misi dengan target keberhasilan sekurang-kurangnya 80% dari skenario uji tanpa intervensi pengendalian gerak oleh operator selama misi, serta menjaga biaya komponen dalam batas anggaran pengembangan Rp10.000.000.

1.4 Manfaat Prorotipe

1.4.1 Bagi Penulis

1. Menambah pengetahuan dan keterampilan dalam merancang serta mengintegrasikan sistem mekanik, elektronika, kendali, dan *computer vision* pada robot otonom.
2. Meningkatkan kemampuan dalam melakukan pengujian, menganalisis kinerja, dan menyelesaikan permasalahan teknis pada sistem robotika.

1.4.2 Bagi Universitas Negeri Semarang

1. Menambah pengetahuan dan keterampilan dalam merancang serta mengintegrasikan sistem mekanik, elektronika, kendali, dan *computer vision* pada robot otonom.
2. Meningkatkan kemampuan dalam melakukan pengujian, menganalisis kinerja, dan menyelesaikan permasalahan teknis pada sistem robotika.

1.4.3 Bagi Pengelola Ruang Terbuka Hijau dan Masyarakat

1. Memberikan alternatif teknologi untuk membantu pekerjaan pemotongan rumput dan penyemprotan secara otomatis.
2. Mengurangi keterlibatan langsung operator sehingga pekerjaan pemeliharaan lahan dapat dilakukan dengan lebih aman dan efisien.

1.4.4 Bagi Lingkungan

1. Mendukung penyemprotan cairan secara lebih terukur berdasarkan kondisi area yang terdeteksi oleh sistem.
2. Mengurangi potensi penggunaan herbisida secara berlebihan melalui penerapan sistem penyemprotan VRA.

1.4.5 Bagi Industri

1. Mendukung pengembangan teknologi robotika dalam negeri untuk membantu pemeliharaan ruang terbuka hijau secara lebih efisien.
2. Menjadi langkah awal menuju kemandirian pengembangan robot pemotong rumput otonom yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan dan kondisi lahan di Indonesia.

1.4.6 Bagi Perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi

1. Memberikan kontribusi terhadap penerapan GPS, *coverage path planning*, YOLOv8n, fuzzy logic, PID, dan fusi sensor pada robot pemeliharaan lahan.
2. Menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya dalam meningkatkan akurasi navigasi, efisiensi energi, kualitas pemotongan, serta ketepatan penyemprotan.

1.4.7 Bagi Negara

1. Mendukung pengembangan teknologi oleh mahasiswa Indonesia.
2. Menjadi dasar pengembangan sistem yang sesuai dengan kebutuhan pemeliharaan area berumput di dalam negeri.

1.5 Potensi Dampak Fungsional/Komersial

1. Potensi dampak fungsional: Robot berpotensi mengurangi pekerjaan manual dalam pemotongan rumput dan penyemprotan pada area pengujian. GPS dan coverage path planning membantu robot mengikuti lintasan yang terencana, sedangkan deteksi halangan dan kendali gerak mendukung penyesuaian pergerakan saat terdapat halangan statis. Elevasi dek dapat diatur sesuai tinggi pemotongan yang dibutuhkan, sementara pemantauan arus motor dan kendali PID membantu sistem merespons perubahan beban. Sistem variable rate application (VRA) berpotensi menyesuaikan debit penyemprotan berdasarkan kondisi area yang terdeteksi kamera. Dampak tersebut akan dinilai melalui pengujian cakupan area, penghindaran halangan, kinerja pemotongan, ketepatan debit, dan keberhasilan misi tanpa intervensi manual.
2. Potensi dampak komersial: Prototipe ini berpotensi dikembangkan menjadi produk pemeliharaan rumput yang menggabungkan navigasi otonom, pemotongan, dan penyemprotan sesuai kebutuhan. Calon penggunanya meliputi pengelola fasilitas kampus, lapangan olahraga, kawasan perumahan, dan penyedia jasa pemeliharaan taman. Sebagai karya yang dikembangkan dan dirakit oleh tim mahasiswa Indonesia, robot ditargetkan memiliki harga jual maksimal Rp15.000.000 per unit sehingga berpotensi menjadi alternatif yang lebih terjangkau dibandingkan beberapa produk impor pada Tabel 1.1. Kelayakan produk dan keunggulan harganya masih perlu dibuktikan melalui pengujian kinerja, keselamatan, ketahanan, serta perhitungan biaya produksi dan layanan purnajual.

Tabel 1.1 Perbandingan robot pemotong rumput komersial dengan prototipe.

Nama Produk	Gambar Produk	Harga Produk	Kelebihan	Kekurangan
Husqvarna Automower 450X NERA		Rp 98.480.000	a. Kapasitas dan jangkauan pemotongan jauh lebih luas hingga 5.000 m². b. Memiliki deteksi halangan dan pengaturan zona kerja.	a. Harga lebih mahal dibandingkan dengan prototipe. b. Tidak dilengkapi penyemprotan. c. Perangkat EPOS tidak termasuk dalam harga varian dasar.

				d. Alat jauh lebih besar dan berat dibanding prototipe sehingga tidak fleksibel dipindahkan.
Mammotion LUBA 3 AWD 1500		Rp 40.595.654	a. Menggunakan LIDAR 360° b. Sudah dilengkapi asisten berbasis AI	a. Harga lebih mahal. b. Sparepart susah dicari karena barang luar negeri. c. Maintenance sulit karena kita harus maintenance sendiri.
Segway Navimow i105		Rp 14.325.771	a. Memiliki sistem navigasi EFLS 2.0 b. Memiliki sistem Mapping dan deteksi halangan. c. Harga sedikit lebih murah dibanding target harga jual prototipe	a. Pengaturan tinggi pemotongan rumput masih manual dengan sistem bongkar pasang. b. Tidak dilengkapi penyemprotan. c. Konfigurasi mapping agak lama.

BAB II
KAJIAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Pengembangan penyemprotan *Variable Rate Application* (VRA) memerlukan keterkaitan antara pendeteksian kondisi area, penentuan tingkat penyemprotan, dan pengaturan keluaran cairan. Penelitian terdahulu berikut digunakan sebagai acuan untuk merancang dan menguji subsistem penyemprotan pada robot pemotong rumput.

Penyemprotan berdasarkan kondisi area diteliti oleh Zanin dkk. (2022) pada lahan kedelai dan jagung. Sensor digunakan untuk mengaktifkan nosel hanya pada bagian lahan yang memerlukan penyemprotan, sehingga volume pestisida yang digunakan berkurang dibandingkan penyemprotan menyeluruh. Penelitian tersebut menjadi dasar penerapan penyemprotan sesuai kondisi area. Namun, pengendaliannya terutama berupa status hidup atau mati nosel, sedangkan prototipe ini dirancang untuk menghasilkan beberapa tingkat debit.

Pengenalan sasaran melalui kamera diterapkan oleh Fan dkk. (2023) pada robot penyemprot di lahan kapas. Mereka menggunakan *deep learning* untuk mendeteksi gulma di antara tanaman. Penelitian ini menunjukkan pentingnya membedakan tanaman yang dipelihara dari gulma sebelum menentukan sasaran semprot. Pada area berumput, hasil segmentasi warna hijau berbasis HSV belum dapat langsung disebut sebagai kerapatan gulma karena rumput yang dipelihara juga berwarna hijau.

Kesesuaian antara hasil deteksi dan keluaran penyemprot diteliti oleh Raja dkk. (2023) melalui integrasi kamera dengan penyemprot *micro-jet*. Pada pengujian dalam ruangan, sistem tersebut berhasil menyemprot 98% gulma yang menjadi sasaran. Hasil ini menjadi acuan untuk memperhatikan jeda pemrosesan citra, posisi kamera dan nosel, serta gerak robot agar perubahan keluaran pompa terjadi saat nosel berada pada area yang dituju.

Evaluasi penyemprotan berbasis visi dibahas oleh Darbyshire dkk. (2023) dengan mempertimbangkan jumlah gulma yang berpotensi terkena semprotan dan luas area yang disemprot. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa ketepatan deteksi pada citra saja belum cukup untuk menggambarkan kinerja penyemprotan. Oleh karena itu, pengujian prototipe ini perlu mencakup keluaran fisik, terutama perubahan debit dan volume cairan pada berbagai kondisi masukan.

Pengendalian volume semprot menggunakan visi komputer, aturan fuzzy, PID, dan PWM dikembangkan oleh Dong dkk. (2024) pada kendaraan darat. Pengujian pada beberapa nilai *duty cycle* menunjukkan bahwa hubungan antara perintah

kendali dan keluaran semprot perlu diperiksa melalui pengukuran. Penelitian tersebut menjadi acuan pengujian pompa, meskipun susunan kendalinya berbeda. Pada prototipe ini, fuzzy Mamdani digunakan untuk mengubah indeks VRA menjadi perintah PWM pompa.

Penggunaan informasi area hijau untuk mengatur aliran herbisida diterapkan oleh Malkani dkk. (2024) pada penyemprot di antara barisan tanaman. Sistem mereka mengatur katup berdasarkan hasil pengolahan citra dan melaporkan pengurangan penggunaan herbisida dibandingkan penyemprotan dengan tingkat tetap. Pendekatan ini relevan bagi pembentukan indeks VRA, tetapi kondisi di antara barisan tanaman berbeda dari lapangan berumput. Karena itu, makna indeks citra pada prototipe perlu diperiksa berdasarkan kondisi area ujinya.

Potensi penyemprotan terarah di lapangan ditunjukkan oleh Rahimi Azghadi dkk. (2025) melalui pengujian robot di lahan tebu. Penelitian tersebut melaporkan penggunaan herbisida rata-rata 35% lebih sedikit daripada penyemprotan menyeluruh, dengan hasil pengendalian gulma yang dinilai relatif terhadap metode pembanding. Angka tersebut menggambarkan hasil pada lingkungan uji mereka dan tidak dapat dijadikan perkiraan langsung bagi prototipe ini.

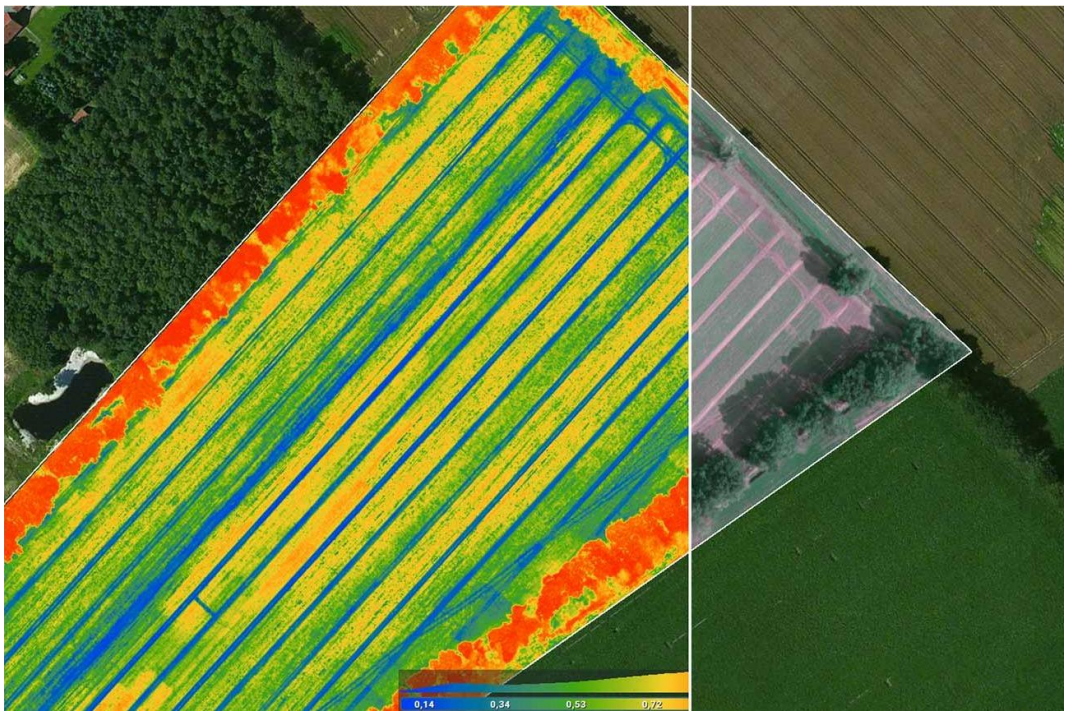
Berdasarkan penelitian tersebut, prototipe ini dirancang untuk mengintegrasikan pengolahan citra HSV, penentuan tingkat penyemprotan dengan fuzzy Mamdani, dan pengaturan pompa melalui PWM. Pengujiannya difokuskan pada kemampuan menghasilkan sekurang-kurangnya tiga tingkat penyemprotan serta mencapai galat debit aktual terhadap debit acuan tidak lebih dari 10% pada kondisi yang ditetapkan. Indeks citra, ketepatan debit, dan efektivitas herbisida merupakan hal yang berbeda sehingga hasil masing-masing perlu dinyatakan sesuai pengujian yang benar-benar dilakukan.

2.2 Landasan Teoritik

2.2.1 Variable Rate Application

Variable Rate Application (VRA) adalah pendekatan pemberian bahan dengan tingkat aplikasi yang disesuaikan menurut kondisi bagian area yang sedang dikerjakan. Pada sistem penyemprotan, penyesuaian dapat dilakukan dengan mengubah waktu aktif nosel, bukaan katup, atau debit cairan. Penerapan sensor untuk mengaktifkan penyemprotan hanya pada bagian lahan tertentu ditunjukkan oleh Zanin dkk. (2022), sedangkan pengaturan volume semprot secara variabel pada kendaraan darat ditunjukkan oleh Dong dkk. (2024). Kedua penelitian tersebut memperlihatkan bahwa informasi kondisi area perlu dihubungkan dengan aktuator penyemprotan agar keluaran cairan dapat berubah sesuai kebutuhan.

Gambar 2.1 menunjukkan contoh variasi nilai indeks pada bagian-bagian suatu lahan. Perbedaan kondisi antarbagian tersebut menjadi dasar penyesuaian tingkat penyemprotan dalam konsep VRA.

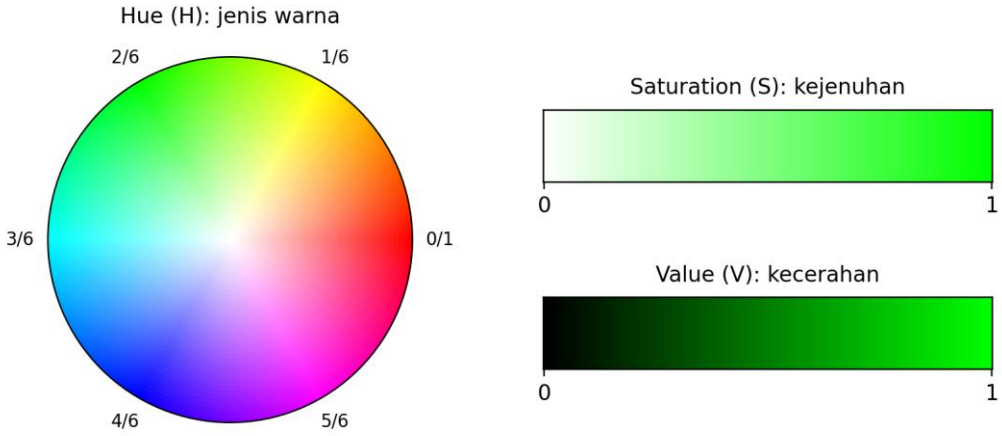


Gambar 2.1 Contoh variasi nilai indeks pada lahan

Pada prototipe ini, VRA diterapkan dengan mengubah perintah kendali pompa berdasarkan indeks yang diperoleh dari citra kamera. Keluaran sistem dinyatakan sebagai tingkat penyemprotan, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Tingkat tersebut menunjukkan perbedaan debit cairan yang dihasilkan pada kondisi pengujian tertentu. Penetapan tingkat penyemprotan perlu didasarkan pada kondisi area sasaran yang dapat dikenali oleh sistem.

2.2.2 Citra Digital dan Ruang Warna HSV

Citra digital tersusun atas piksel yang menyimpan informasi warna. Kamera menangkap citra area di depan sistem penyemprotan, kemudian citra tersebut diolah untuk memperoleh ciri visual. Salah satu ruang warna yang dapat digunakan adalah HSV, yaitu Hue, Saturation, dan Value. Hue menyatakan jenis warna, Saturation menyatakan tingkat kejenuhan warna, sedangkan Value berkaitan dengan kecerahan. Pemisahan komponen tersebut membantu pemilihan rentang warna pada proses segmentasi. Dokumentasi OpenCV (t.t.) menjelaskan penggunaan HSV dan fungsi inRange untuk membentuk mask berdasarkan rentang nilai warna. Hubungan ketiga komponen ruang warna HSV ditunjukkan pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Komponen hue, saturation, view
https://web.mit.edu/6.813/www/sp18/classes/15-color/

Apabila pengolahan dilakukan dengan OpenCV pada citra 8 bit, komponen Hue berada pada rentang 0–179, sedangkan Saturation dan Value berada pada rentang 0–255. Rentang untuk mengenali kondisi area perlu diperiksa menggunakan citra dari area pengujian. Perubahan pencahayaan, bayangan, dan warna permukaan dapat memengaruhi hasil segmentasi.

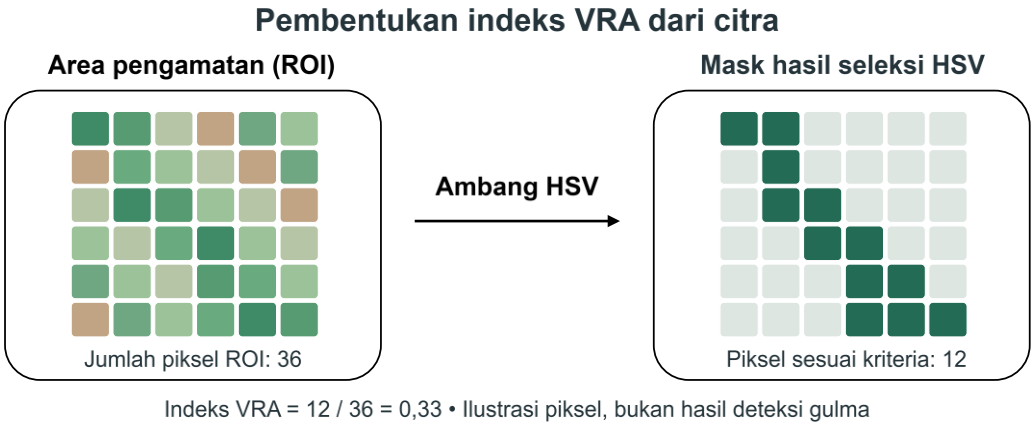
2.2.3 Segmentasi Citra dan Indeks VRA

Segmentasi citra memisahkan piksel yang memenuhi kriteria tertentu dari piksel lainnya. Pada prototipe ini, kriteria warna HSV digunakan untuk membentuk mask area yang diamati. Penghitungan dilakukan pada region of interest (ROI), yaitu bagian citra yang mewakili area kerja penyemprotan. Pemilihan ROI mencegah bagian di luar area kerja, seperti badan robot atau latar belakang, ikut memengaruhi hasil.

Indeks VRA dinyatakan sebagai perbandingan jumlah piksel yang memenuhi kriteria segmentasi terhadap seluruh piksel pada ROI:

$$I_{VRA} = \frac{N_k}{N_{ROI}}$$

Pada persamaan tersebut, I_VRA adalah indeks VRA dengan nilai 0–1, N_k adalah jumlah piksel yang memenuhi kriteria, dan N_ROI adalah jumlah piksel pada ROI. Nilai indeks yang lebih besar menunjukkan proporsi piksel sesuai kriteria yang lebih besar. Makna indeks tetap bergantung pada kriteria tersebut. Apabila kriterianya hanya warna hijau, hasilnya menggambarkan proporsi area berwarna hijau, bukan secara langsung kerapatan gulma. Rumput yang dipelihara juga dapat berwarna hijau. Karena itu, hubungan indeks dan kondisi sasaran penyemprotan perlu diperiksa pada area uji.



Gambar 2.3 Ilustrasi pembentukan indeks VRA dari citra

2.2.4 Logika Fuzzy Mamdani

Logika fuzzy mengolah masukan numerik menjadi keputusan berdasarkan kategori linguistik. Pada prototipe ini, masukan berupa indeks VRA pada rentang 0–1, sedangkan keluaran berupa perintah tingkat penyemprotan pada rentang 0–100%. Masukan dan keluaran masing-masing dibagi menjadi lima kategori, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Fungsi keanggotaan yang saling tumpang tindih memungkinkan perintah berubah secara bertahap ketika indeks berada di antara dua kategori.

Proses inferensi Mamdani meliputi fuzzifikasi, penerapan aturan, penggabungan keluaran aturan, dan defuzzifikasi. Aturan dinyatakan dalam bentuk "JIKA indeks VRA berada pada kategori tertentu, MAKA tingkat penyemprotan berada pada kategori yang ditetapkan". Hubungan antara indeks dan tingkat penyemprotan harus disesuaikan dengan makna indeks yang telah diperiksa pada area uji. Apabila indeks hanya menunjukkan proporsi warna hijau, nilainya tidak dapat langsung dianggap sebagai ukuran keberadaan gulma atau kebutuhan herbisida.

Pada sistem dengan satu masukan, kekuatan aktivasi aturan ditentukan oleh derajat keanggotaan indeks pada kategori masukan. Metode minimum digunakan untuk membatasi keluaran setiap aturan, sedangkan metode maksimum digunakan untuk menggabungkan keluaran seluruh aturan. Hasil penggabungan diubah menjadi satu nilai numerik melalui defuzzifikasi *centroid*. Menurut MathWorks (t.t.), metode *centroid* menentukan titik pusat himpunan fuzzy keluaran. Dalam perhitungan diskret, persamaannya adalah:

$$y* = \frac{\Sigma\, y_i \cdot \mu(y_i)}{\Sigma\, \mu(y_i)}$$

Pada persamaan tersebut, y* adalah keluaran tegas, y_i adalah titik pada rentang keluaran, dan μ(y_i) adalah derajat keanggotaan hasil penggabungan aturan. Nilai

y* digunakan sebagai perintah kendali, bukan sebagai debit cairan yang telah terukur. Jika masukan tidak valid, tidak ada aturan yang aktif, atau area dinyatakan tidak memerlukan penyemprotan, sistem memerintahkan pompa berhenti.

2.2.5 Pulse Width Modulation dan Pengendalian Pompa

Pulse Width Modulation (PWM) mengatur perbandingan lama sinyal aktif terhadap satu periode. Perbandingan ini disebut duty cycle dan dinyatakan sebagai:

$$D = \frac{t_{aktif}}{T} \times 100\%$$

Di sini, D adalah duty cycle, t_aktif adalah waktu aktif, dan T adalah periode PWM. ESP32 menyediakan pengaturan frekuensi dan resolusi PWM (Espressif Systems, t.t.). Pada resolusi 8 bit, perintah PWM bernilai 0–255. Keluaran fuzzy 0–100% dipetakan sebagai berikut:

$$PWM = round(\frac{y*}{100} \times 255)$$

Sinyal PWM mengendalikan pompa DC melalui driver motor BTS7960. Pada prototipe ini, driver BTS7960 menerima sinyal PWM dari ESP32 untuk mengatur kerja pompa. Nilai PWM merupakan perintah kendali, bukan ukuran debit cairan secara langsung. Debit aktual juga dipengaruhi oleh suplai listrik, karakteristik pompa, selang, dan nosel. Oleh karena itu, hubungan antara nilai PWM dan debit perlu ditentukan melalui kalibrasi pada sistem penyemprotan yang telah dirakit.

2.2.6 Debit dan Laju Aplikasi Penyemprotan

Debit merupakan volume cairan yang keluar dalam satuan waktu. Pada pengujian, debit aktual dihitung dengan menampung cairan selama waktu tertentu:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Pada persamaan tersebut, Q adalah debit, V adalah volume cairan yang tertampung, dan t adalah lama penampungan. Apabila volume diukur dalam mililiter dan waktu dalam detik, debit dinyatakan dalam mL/s. Pengukuran diulangi pada setiap tingkat PWM setelah aliran stabil agar hubungan antara perintah kendali dan debit aktual dapat diketahui.

Saat penyemprot berada pada robot bergerak, cairan yang diterima suatu area juga dipengaruhi oleh kecepatan robot dan lebar semprotan. Secara sederhana, laju aplikasi per satuan luas dinyatakan sebagai:

$$R = \frac{Q}{v \cdot b}$$

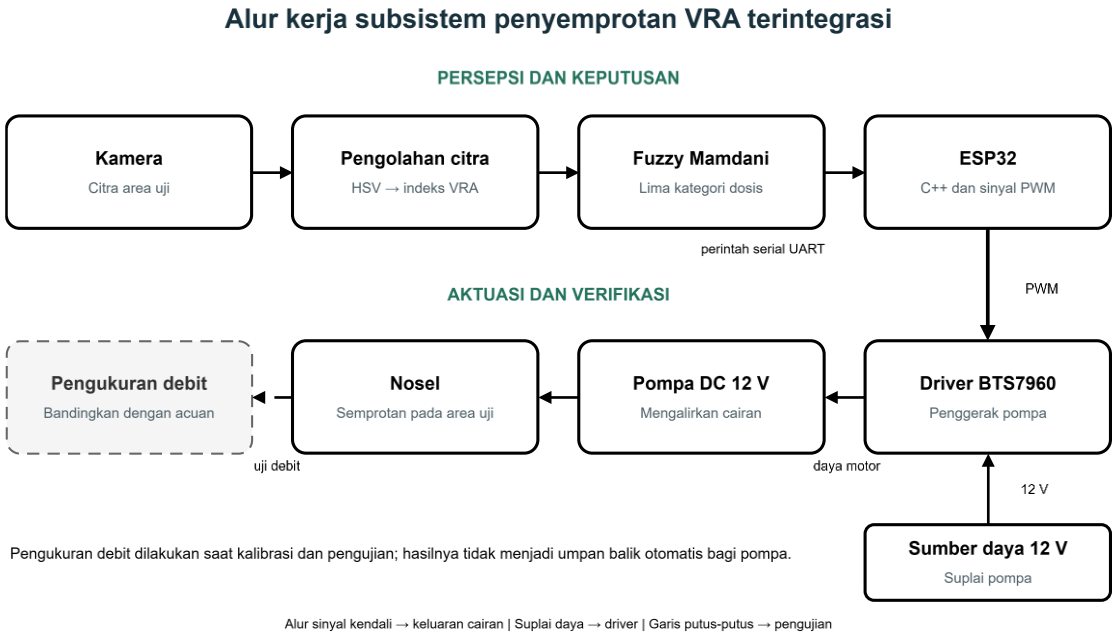
Pada persamaan tersebut, R adalah volume cairan per satuan luas, v adalah kecepatan gerak robot, dan b adalah lebar efektif semprotan. Debit yang sama dapat

menghasilkan volume per meter persegi yang berbeda apabila kecepatan robot berubah. Hubungan tersebut berlaku saat robot bergerak dan lebar semprotan telah ditentukan. Ketika robot berhenti, pompa perlu dihentikan agar cairan tidak terus terkumpul di satu tempat.

2.2.7 Integrasi Sistem dan Evaluasi Kinerja

Subsistem penyemprotan menghubungkan kamera, pengolah citra, fuzzy Mamdani, ESP32, driver BTS7960, pompa, dan nosel. Citra kamera diolah menjadi indeks VRA. Indeks tersebut digunakan untuk menghasilkan perintah tingkat penyemprotan, kemudian ESP32 mengubahnya menjadi sinyal PWM untuk mengendalikan pompa. Debit yang keluar dari nosel diukur dengan menampung volume cairan selama waktu tertentu pada tahap kalibrasi dan pengujian. Pengukuran tersebut belum menjadi umpan balik otomatis bagi pompa.

Pada robot bergerak, waktu pemrosesan citra dan jarak kamera ke nosel perlu diperhatikan agar perubahan penyemprotan terjadi pada bagian area yang diamati. Alur integrasi subsistem ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema integrasi subsistem penyemprotan VRA

Kinerja kendali debit dievaluasi dengan membandingkan debit aktual dan debit acuan pada setiap kondisi uji. Galat relatifnya dihitung menggunakan persamaan:

$$Galat\ debit\ = \frac{|Q_{aktual}\ -\ Q_{acuan}|}{Q_{acuan}} \times 100\%$$

Debit acuan harus ditetapkan dalam satuan volume per waktu melalui kalibrasi atau spesifikasi kondisi uji. Nilai keluaran fuzzy dalam persen tidak dapat langsung

digunakan sebagai debit acuan. Berdasarkan tujuan prototipe, target galat debit adalah tidak lebih dari 10% pada kondisi pengujian yang ditetapkan. Saat perintah penyemprotan nol, pemeriksaan dilakukan dengan memastikan pompa berhenti karena persamaan galat relatif tidak berlaku jika debit acuannya nol.

Volume cairan total dapat dibandingkan antara mode VRA dan penyemprotan dengan debit tetap pada luas area, kecepatan, dan kondisi uji yang setara. Perbandingan tersebut menunjukkan perubahan penggunaan cairan akibat pengaturan VRA. Hasil pengujian debit dan volume tetap perlu dibedakan dari efektivitas herbisida terhadap gulma, yang memerlukan pengamatan hasil perlakuan tersendiri.

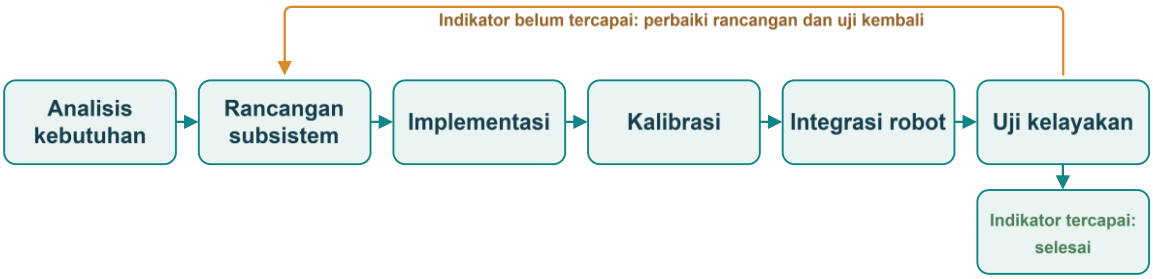
BAB III
METODE PELAKSANAAN

Pada Bab ini menjelaskan tahapan perancangan dan pengujian subsistem penyemprotan Variable Rate Application (VRA) pada robot pemotong rumput otonom. Kinerja yang diuji mencakup pengolahan citra, keputusan fuzzy Mamdani dengan lima kategori, kendali pompa, dan keluaran cairan. Setiap tahap menghasilkan data yang dapat diperiksa sebelum subsistem dipasang dan diuji pada robot.

3.1 Pendekatan Perancangan

Perancangan dan pengujian awal subsistem penyemprotan VRA dilaksanakan di Laboratorium E11, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang. Laboratorium digunakan untuk perakitan sistem kelistrikan, pemrograman pengolahan citra dan ESP32, pengujian komunikasi antarkomponen, serta kalibrasi PWM dan debit pompa menggunakan air. Setelah pengujian awal, subsistem diintegrasikan dengan robot dan diuji pada petak sekitar 100 m² di Lapangan Woodball UNNES untuk mengamati perubahan penyemprotan saat robot bergerak.

Target utama subsistem adalah menghasilkan lima kategori keputusan, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi, serta sedikitnya tiga tingkat debit aktual yang dapat dibedakan. Pada tingkat uji dengan debit acuan positif, galat debit ditargetkan tidak lebih dari 10%. Saat masukan tidak valid atau perintah penyemprotan nol, pompa harus berhenti. Lima kategori fuzzy merupakan kategori perintah; jumlahnya tidak otomatis sama dengan jumlah tingkat debit yang berhasil dihasilkan pompa.



Gambar 3.1 Diagram alir pendekatan prototyping iteratif subsistem penyemprotan VRA.

3.2 Lokasi dan Waktu

Perancangan rangkaian, pemrograman, dan kalibrasi awal direncanakan di lingkungan Program Studi Teknik Komputer Universitas Negeri Semarang. Uji integrasi luar ruang direncanakan pada petak sekitar 100 m² di Lapangan Woodball

UNNES, sebagaimana lokasi uji awal robot. Batas petak, kondisi vegetasi, izin penggunaan tempat, dan lebar semprotan efektif perlu dipastikan di lapangan sebelum pengujian. Kegiatan ini tidak mengasumsikan seluruh lapangan selesai diuji.

Waktu pelaksanaan dinyatakan sebagai rencana delapan minggu sejak perancangan dimulai. Minggu kalender dan tanggal pelaksanaan dicatat sesuai jadwal aktual ketika penelitian berlangsung. Pembagian kegiatan awal ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rencana waktu pelaksanaan subsistem penyemprotan VRA

Kegiatan dan waktu	Minggu							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Minggu 1–2 Analisis kebutuhan dan pengambilan citra awal								
Minggu 3–4 Segmentasi HSV, indeks VRA, dan pemrograman fuzzy Mamdani lima kategori								
Minggu 5–6 Perakitan ESP32, BTS7960, dan pompa serta kalibrasi PWM dan debit								
Minggu 7–8 Integrasi pada robot, uji bergerak, analisis data, dan perbaikan akhir								

Rencana waktu pada Tabel 3.1 digunakan sebagai acuan pelaksanaan selama delapan minggu. Keluaran pada setiap tahap dicatat untuk memantau kemajuan perancangan. Apabila hasil pengujian memerlukan perbaikan, waktu pelaksanaan tahap berikutnya disesuaikan dengan kondisi aktual. Berikut adalah keluaran yang dicatat.

1. **Minggu 1–2:** Daftar kebutuhan sistem, citra awal area uji, dan batas *region of interest* (ROI) dicatat.
2. **Minggu 3–4:** Hasil segmentasi HSV, nilai indeks VRA, lima kategori fuzzy Mamdani, dan keluaran perintah penyemprotan dicatat.
3. **Minggu 5–6:** Hasil perakitan, nilai PWM, debit pada setiap tingkat uji, serta daerah mati pompa dicatat sebagai data kalibrasi.

4. **Minggu 7–8:** Debit aktual, galat terhadap debit acuan, kesesuaian lokasi penyemprotan saat robot bergerak, dan volume cairan total dicatat sebagai hasil uji integrasi.

3.3 Prosedur Perancangan

Prosedur perancangan subsistem penyemprotan Variable Rate Application (VRA) mengikuti metode prototyping iteratif. Kebutuhan sistem ditetapkan sebelum perangkat dirancang dan dirakit. Setelah implementasi, hasil pengujian digunakan untuk memperbaiki rancangan yang belum memenuhi indikator, kemudian bagian tersebut diuji kembali. Pemeliharaan dilakukan agar kondisi perangkat tetap sesuai dengan kondisi saat kalibrasi.

3.3.1 Analisis Kebutuhan

Analisis kebutuhan mengidentifikasi perangkat keras dan perangkat lunak beserta fungsi masing-masing. Kebutuhan perangkat keras meliputi pengambilan citra, pemrosesan data, pengendalian pompa, penyaluran cairan, dan pengukuran debit. Perangkat lunak diperlukan untuk mengolah citra, menjalankan model fuzzy, serta memprogram pengendali. Rinciannya disajikan pada Tabel 3.2 tanpa gambar komponen.

Tabel 3.2 Kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak subsistem VRA

No.	Kebutuhan	Komponen
1	Mengambil citra area uji sebagai masukan pengolahan visual.	Kamera USB
2	Menjalankan MATLAB dan mengirim perintah kendali ke ESP32.	Komputer atau laptop pengolah citra
3	Menerima perintah serial dan membangkitkan PWM untuk kendali pompa.	ESP32
4	Menyalurkan daya pompa sesuai perintah PWM dari ESP32.	Driver motor BTS7960
5	Mengalirkan cairan dari tangki menuju nosel.	Pompa DC 12 V
6	Menyalurkan cairan melalui jalur berdiameter sesuai sambungan.	Selang PE 6 mm dan 11 mm
7	Mengeluarkan cairan pada area kerja robot.	Nosel oranye
8	Menyimpan cairan untuk sistem penyemprotan.	Tangki pestisida 5,5 L
9	Menyediakan sumber energi bagi subsistem penyemprotan.	Baterai 24v
10	Menurunkan tegangan baterai dari 24v ke 12v untuk pompa.	Modul Step-down DC-DC 24V ke 12V

11	Mengukur volume keluaran dan waktu untuk menghitung debit.	Wadah ukur dan pencatat waktu
11	Mengolah citra HSV, menghitung indeks VRA, dan menjalankan fuzzy Mamdani.	MATLAB
12	Membuat dan mengunggah program C++ penerima serial serta kendali PWM.	Arduino IDE dengan bahasa C++

Pada akhir tahap ini, fungsi komponen, kebutuhan sambungan, dan spesifikasi kelistrikan yang digunakan harus tercatat. Sumber daya, ukuran sambungan selang, serta kapasitas driver diperiksa terhadap komponen yang benar-benar dipasang sebelum sistem diberi daya.

3.3.2 Perancangan Sistem

3.3.2.1 Desain Perangkat Keras

Desain fisik menentukan posisi tangki 5,5 L, pompa, jalur selang PE, nosel, dan kamera pada robot. Posisi nosel dirancang agar jalur cairan tidak mengganggu gerak robot dan area semprotan dapat diuji. Rancangan kelistrikan menunjukkan hubungan ESP32, BTS7960, pompa DC 12 V, dan sumber daya. Nomor pin, kebutuhan catu, dan kesesuaian ukuran selang ditetapkan berdasarkan rakitan yang digunakan.

3.3.2.2 Arsitektur Perangkat Lunak

Model fuzzy Mamdani dirancang dengan satu masukan berupa indeks VRA dan satu keluaran berupa perintah penyemprotan. Masukan dan keluaran menggunakan lima kategori: sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Fungsi keanggotaan, aturan, dan defuzzifikasi centroid disusun di MATLAB. Hubungan antara indeks citra dan kebutuhan semprotan diperiksa pada area uji; warna hijau saja tidak dinyatakan sebagai bukti keberadaan gulma.

3.3.2.3 Perancangan Model Fuzzy

MATLAB dirancang untuk mengambil citra kamera, menetapkan region of interest (ROI), melakukan segmentasi HSV, dan menghitung indeks VRA pada rentang 0–1. Indeks tersebut diproses menjadi perintah tingkat penyemprotan. Perintah dikirim melalui komunikasi serial ke ESP32. Program C++ pada ESP32 memeriksa data yang diterima dan mengubah perintah 0–100% menjadi PWM 0–255. Jika masukan tidak valid atau penyemprotan dinonaktifkan, program memberikan perintah nol agar pompa berhenti.

3.3.3 Implementasi

3.3.3.1 Implementasi Perangkat Keras

ESP32, BTS7960, pompa, tangki, selang, dan nosel dirakit berdasarkan diagram wiring dan desain penempatan. Sambungan listrik diperiksa sebelum pompa dioperasikan. Jalur cairan diisi air untuk memeriksa aliran dan kemungkinan kebocoran. Susunan aktual dicatat apabila ada perubahan dari rancangan.

3.3.3.2 Implementasi Perangkat Lunak

Program MATLAB mengubah citra kamera menjadi indeks VRA dan perintah penyemprotan. Program C++ pada ESP32 menerima perintah serial, memeriksa rentang nilainya, lalu menghasilkan PWM melalui BTS7960. Nilai indeks, perintah, PWM, dan waktu penerimaan dicatat agar setiap perubahan keluaran dapat ditelusuri.

3.3.3.3 Implementasi Model

Lima himpunan keanggotaan dan aturan fuzzy Mamdani dimasukkan ke MATLAB. Nilai tegas hasil defuzzifikasi dipetakan ke rentang perintah 0–100%. Keputusan untuk menghentikan penyemprotan diterapkan secara terpisah ketika area tidak ditetapkan sebagai sasaran atau data citra tidak valid, sehingga kategori “sangat rendah” tidak otomatis disamakan dengan pompa mati.

3.3.4 Pengujian

3.3.4.1 Pengujian Perangkat Keras

1. Memeriksa sambungan dan memastikan sistem penyemprotan tidak bocor.
2. Menguji respons pompa pada beberapa tingkat PWM, termasuk memastikan pompa berhenti saat perintah nol.
3. Menampung cairan setelah aliran stabil, mencatat volume dan waktu, lalu menghitung debit. Pengukuran diulang tiga kali pada setiap tingkat PWM.
4. Menghitung rerata debit dan memastikan terdapat sedikitnya tiga rerata debit positif yang berbeda.

3.3.4.2 Pengujian Perangkat Lunak

1. Memeriksa pembentukan ROI, segmentasi HSV, dan perhitungan indeks VRA di MATLAB.
2. Membandingkan hasil segmentasi dengan penandaan warna manual pada citra uji. Perbandingan ini menilai pemisahan warna, bukan identifikasi gulma.
3. Menguji keluaran fuzzy pada masukan yang mewakili lima kategori dan membandingkannya dengan perhitungan rujukan. Target selisihnya tidak lebih dari satu poin persentase.

4. Menguji program ESP32 menggunakan perintah valid, perintah nol, dan data serial yang tidak valid.

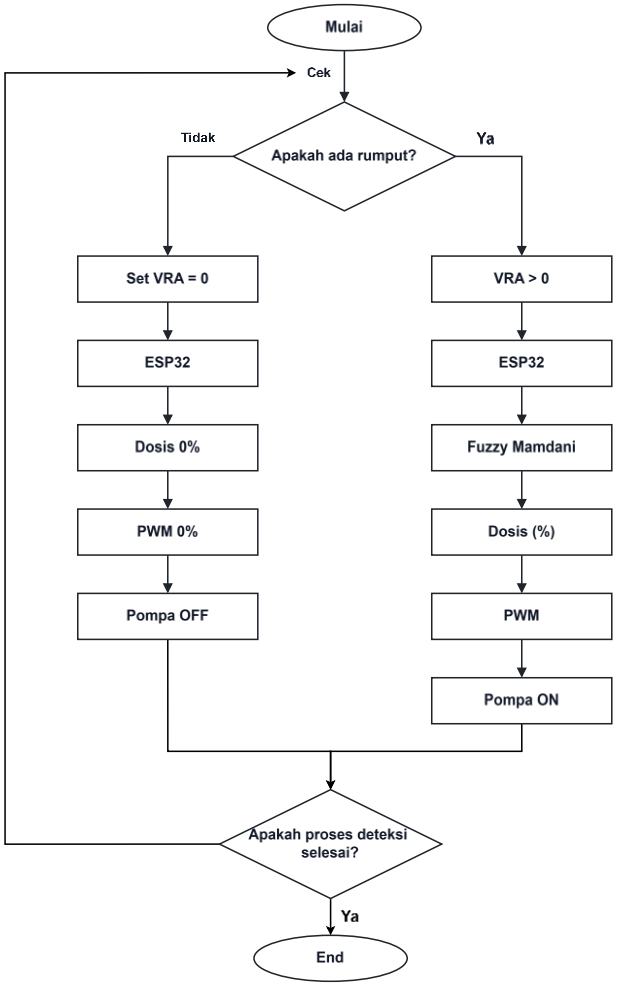
3.3.4.3 Pengujian Model dan Integrasi

1. Mengukur ulang debit aktual dan membandingkannya dengan debit acuan yang ditetapkan melalui kalibrasi terpisah.
2. Menghitung galat relatif pada tingkat dengan debit acuan positif, dengan target tidak lebih dari 10%.
3. Menguji robot bergerak pada sedikitnya 10 perpindahan kondisi petak yang ditandai. Targetnya, minimal 80% perubahan perintah terjadi pada petak yang sesuai.
4. Membandingkan volume cairan mode VRA dan mode debit tetap pada area serta kecepatan yang setara. Perbandingan volume tidak digunakan sebagai bukti efektivitas herbisida.

3.3.5 Pemeliharaan

Setelah pengujian, tangki dan jalur cairan dikosongkan sesuai prosedur penggunaan cairan, sedangkan pompa, selang, dan nosel diperiksa serta dibersihkan agar sumbatan atau kebocoran tidak memengaruhi pengujian berikutnya. Sambungan kelistrikan diperiksa sebelum sistem dihidupkan kembali. Program MATLAB, kode C++, parameter fuzzy, dan catatan kalibrasi disimpan agar pengaturan dapat dipulihkan. Jika pompa, nosel, atau selang diganti, hubungan PWM terhadap debit diukur kembali.

Alur keputusan penyemprotan dari pengambilan citra hingga kondisi pompa menyala atau berhenti ditunjukkan oleh flowchart berikut. Cabang perintah nol digunakan ketika masukan tidak valid atau area tidak ditetapkan sebagai sasaran; perintah positif diproses oleh fuzzy Mamdani dan dikirim ke ESP32.



Gambar 3.2 Flowchart kerja subsistem penyemprotan VRA

3.4 Teknik Perancangan

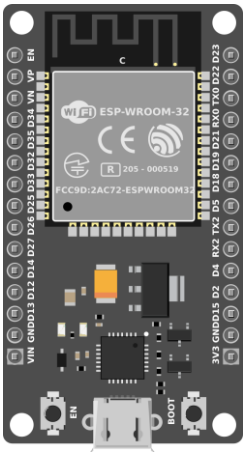
Teknik perancangan subsistem penyemprotan VRA mencakup pemilihan komponen, desain fisik, pengawatan, dan penyusunan model fuzzy Mamdani. Rancangan diarahkan untuk mengubah informasi kondisi area menjadi perintah penyemprotan melalui ESP32, driver BTS7960, dan pompa DC 12 V. Hubungan perintah kendali dengan debit aktual ditentukan melalui kalibrasi.

3.4.1 Pemilihan Komponen

Komponen dipilih berdasarkan fungsi, kesesuaian tegangan, kemudahan pemasangan, dan kebutuhan pengaturan aliran. Spesifikasi komponen dibedakan dari pengaturan yang ditetapkan dalam rancangan, seperti resolusi PWM dan susunan jalur cairan.

3.4.1.1 ESP32 Dev Board

ESP32 digunakan sebagai pengendali keluaran penyemprotan. Program C++ yang ditulis melalui Arduino IDE menerima data serial, memeriksa perintah, dan menghasilkan PWM untuk driver pompa. Modul ESP-WROOM-32 menyediakan GPIO, UART, serta pengendali PWM yang mendukung kebutuhan tersebut (Espressif Systems, t.t.-a).



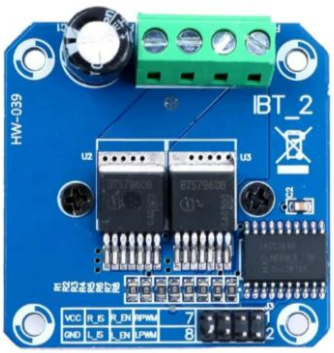
Gambar 3.3 ESP32 Dev Board berbasis ESP-WROOM-32

Tabel 3.3 Spesifikasi ESP32 Dev Board

Spesifikasi	Detail
Modul utama	ESP-WROOM-32.
Prosesor	Xtensa dual-core 32 bit, frekuensi hingga 240 MHz.
Memori modul	SRAM 520 KB dan flash SPI 4 MB.
Tegangan logika	3,3V; rentang suplai modul 3,0–3,6V.
Antarmuka yang digunakan	USB serial melalui konverter pada board dan GPIO PWM.
Pengaturan rancangan	PWM 8 bit dengan nilai perintah 0–255.

3.4.1.2 Driver Motor BTS7960

Modul BTS7960 tipe IBT-2 digunakan untuk menyalurkan daya ke pompa berdasarkan sinyal kendali ESP32. Dua IC half-bridge pada modul membentuk penggerak motor yang dapat dikendalikan melalui RPWM, LPWM, R_EN, dan L_EN. Pada prototipe ini, pompa dijalankan dalam satu arah sehingga hanya satu jalur PWM yang digunakan untuk mengatur keluaran.



Gambar 3.4 Modul driver motor BTS7960

Tabel 3.4 Spesifikasi dan pengaturan driver BTS7960

Spesifikasi	Detail
Tipe modul	IBT-2 dengan dua IC BTS7960.
Rentang suplai daya IC	5,5–27,5 V menurut datasheet BTS7960.
Suplai daya pada rancangan	12 V dari step-down, masuk melalui terminal B+ dan B−.
Pin kendali	RPWM, LPWM, R_EN, dan L_EN.
Keluaran daya	Terminal M+ dan M− menuju pompa.
Kemampuan PWM IC	Hingga 25 kHz; frekuensi kerja pompa ditetapkan melalui pengujian.
Suplai logika rancangan	3,3 V untuk varian modul dengan buffer 74HC244 seperti pada gambar.

Kelayakan driver diperiksa melalui arus, suhu, dan kestabilan pompa saat berbeban. Catu logika 3,3 V dirancang untuk varian buffer 74HC244 berdasarkan rentang suplai pada datasheet Texas Instruments (2026); kesesuaian modul aktual diperiksa sebelum dihubungkan.

3.4.1.3 Pompa DC 12V Taffware

Pompa Taffware DP-521 dipilih untuk mengalirkan cairan dari tangki ke tiga nosel. Pengaturan dilakukan melalui PWM pada driver BTS7960. Nilai debit maksimum pada label digunakan sebagai acuan komponen, sedangkan debit pada rangkaian lengkap diukur kembali setelah selang dan nosel terpasang.



Gambar 3.5 Pompa DC 12 V Taffware DP-521

Tabel 3.5 Spesifikasi pompa Taffware DP-521

Spesifikasi	Detail
Merek dan model	Taffware DP-521.
Tegangan nominal	12 V DC.
Debit maksimum pada label	3,5 L/menit.
Tekanan pada label	0,48 MPa.
Arus maksimum pada label	2,0 A.
Pengendalian pada prototipe	PWM melalui driver BTS7960.

Debit dan tekanan pada label tidak diasumsikan tercapai bersamaan. Debit total yang digunakan dalam evaluasi merupakan keluaran aktual seluruh nosel pada susunan selang dan tegangan suplai yang sama dengan kondisi operasi.

3.4.1.4 Tangki Cairan 5,5L

Tangki digunakan untuk menyimpan cairan sebelum dialirkan ke pompa. Kapasitas nominal 5,5 L dipilih untuk menyesuaikan ruang pada rangka dan kebutuhan pengujian. Tangki ditempatkan di atas pelat berlubang serta diberi pengikat agar kedudukannya tetap saat robot bergerak.



Gambar 3.6 Tangki cairan berkapasitas nominal 5,5 L

Tabel 3.6 Spesifikasi tangki cairan

Spesifikasi	Detail
Kapasitas nominal	5,5 L berdasarkan keterangan produk pada gambar.
Bentuk	Tangki mendatar dengan tutup pengisian di bagian atas.
Bahan badan	Plastik; jenis resin mengikuti tangki yang digunakan.
Saluran keluar	Konektor selang pada bagian bawah sisi tangki.
Penempatan	Bagian bawah pada tampak atas rancangan, di sisi kiri pompa.
Pemasangan	Dudukan dan pengikat pada pelat dasar rangka.

Ukuran 28 × 13 × 13 cm yang tercantum pada gambar diperlakukan sebagai ukuran acuan produk. Dimensi luar dan volume isi yang dapat digunakan diperiksa pada tangki aktual sebelum ukuran dudukan ditetapkan dalam Autodesk Fusion.

3.4.1.5 Nosel Oranye

Tiga nosel oranye dipasang pada satu jalur distribusi untuk mengeluarkan cairan di sepanjang sisi penyemprotan robot. Sambungan berbentuk T menghubungkan nosel dengan selang. Ketiga nosel menerima aliran dari pompa yang sama, sehingga perubahan PWM memengaruhi suplai ketiganya secara bersama.



Gambar 3.7 Nosel oranye dengan konektor T

Tabel 3.7 Spesifikasi dan susunan nosel

Spesifikasi	Detail
Jumlah pada rancangan	Tiga buah.
Ciri komponen	Kepala oranye dan badan konektor hitam.
Bentuk sambungan	Konektor T dengan dua sisi sambungan selang.
Susunan pemasangan	Sejajar pada satu jalur distribusi di sisi penyemprotan.
Pengaturan aliran	Bersama melalui satu pompa; tanpa aktuator pada tiap nosel.
Parameter yang dikalibrasi	Debit tiap nosel, debit total, dan lebar efektif semprotan.

Jarak antar-nosel dan ketinggian pemasangan ditentukan dari pola semprotan pada pengujian. Lebar efektif semprotan diukur pada permukaan sasaran agar dapat digunakan untuk menghitung laju aplikasi ketika robot bergerak.

3.4.1.6 Selang PE 6 mm dan 11 mm

Selang polyethylene (PE) digunakan sebagai saluran cairan antara tangki, pompa, dan nosel. Dua ukuran yang digunakan ialah 6 mm dan 11 mm. Pemilihan ruas selang mengikuti ukuran konektor aktual, sedangkan sambungan beda ukuran menggunakan adaptor yang sesuai.



Gambar 3.8 Selang PE sebagai saluran cairan

Tabel 3.8 Spesifikasi selang PE

Spesifikasi	Detail
Bahan	Polyethylene atau PE.
Ukuran yang digunakan	6 mm dan 11 mm sesuai penyebutan ukuran komponen.
Fungsi	Mengalirkan cairan dari tangki ke pompa dan jalur nosel.
Penghubung	Konektor T, adaptor, dan klem sesuai ukuran sambungan.
Penataan	Mengikuti sisi rangka dan diikat pada dudukan.
Pemeriksaan pemasangan	Kekencangan sambungan, tekukan, dan kebocoran.

Diameter dalam dan diameter luar selang diperiksa sebelum memilih konektor. Selang disusun tanpa tekukan tajam dan diberi kelonggaran secukupnya agar tidak tertarik saat komponen dilepas untuk perawatan. Seluruh jalur diuji dengan cairan uji sebelum kalibrasi debit dilakukan.

3.4.1.7 Baterai dan Step-down DC–DC

Sumber daya utama menggunakan baterai nominal 24 V. Pada rancangan pengawatan, tegangan tersebut diperoleh dari dua baterai 12 V yang disusun seri. Step-down menurunkan tegangan menjadi 12 V untuk jalur daya driver dan pompa. ESP32 memperoleh suplai 5 V melalui USB dari perangkat pengolah citra yang memiliki catu daya tersendiri.



Gambar 3.9 Baterai dan modul step-down pada rancangan

Tabel 3.9 Spesifikasi rancangan sumber daya baterai

Spesifikasi	Detail
Tegangan paket baterai	24 V nominal.
Konfigurasi pada rancangan	Dua baterai 12 V disusun seri.
Fungsi	Sumber daya utama subsistem penyemprotan.
Keluaran untuk pompa	Melalui step-down menjadi 12 V.

Tabel 3.10 Kebutuhan spesifikasi step-down DC–DC

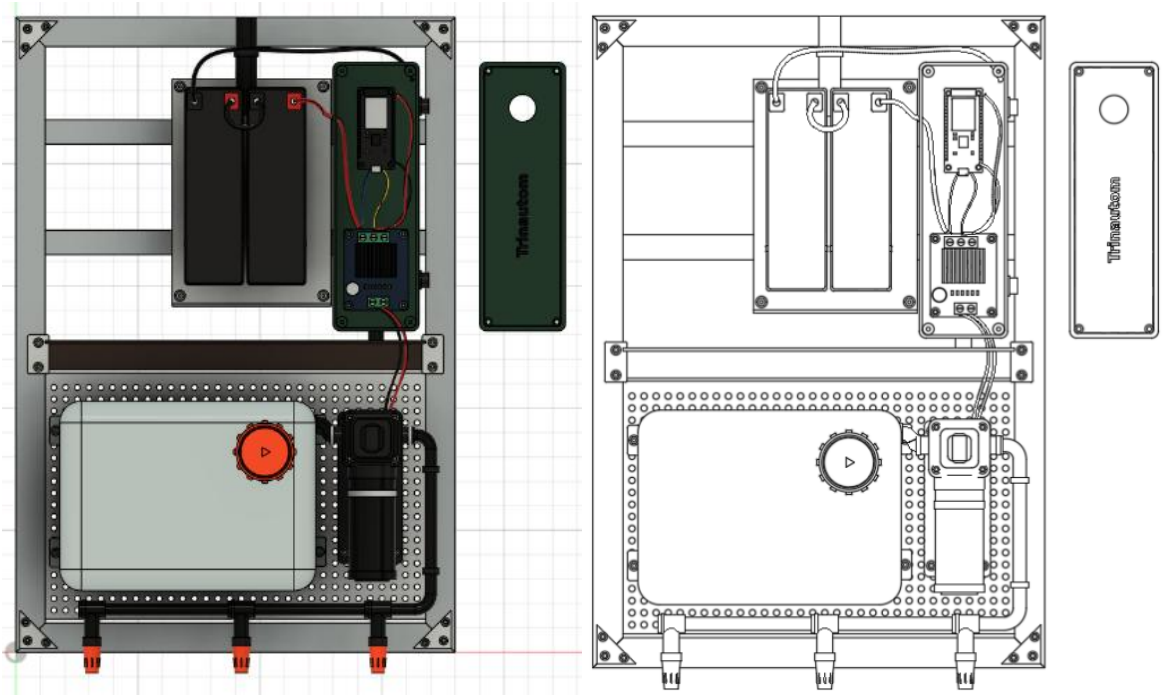
Spesifikasi	Detail
Jenis konverter	DC–DC step-down atau buck converter.
Tegangan masukan rancangan	Dari baterai 24 V; rentang masukan harus mencakup tegangan baterai saat penuh.
Tegangan keluaran rancangan	12 V DC untuk terminal daya BTS7960.
Kebutuhan arus	Memenuhi arus kerja pompa 2 A pada label serta kebutuhan arus awal yang diukur.
Dasar pemilihan akhir	Tegangan keluaran tetap stabil dan suhu modul terkendali saat pompa bekerja.

Modul digunakan untuk penurun tegangan. Kemampuan arus kontinu ditetapkan berdasarkan modul yang dipasang dan pengujian berbeban, bukan berdasarkan ukuran gambar.

3.4.2 Desain Fisik

3.4.2.1 Tata Letak Komponen

Desain fisik menggunakan rangka berukuran 65 × 45 cm. Tangki dan pompa ditempatkan pada bagian rangka yang memiliki pelat berlubang penuh, sedangkan baterai berada pada dudukan di bagian atas tampak rancangan. Kotak mikrokontroler berwarna hijau tua ditempatkan di sebelah kanan baterai untuk menampung ESP32 dan BTS7960.



Gambar 3.10 Visualisasi rancangan fisik subsistem penyemprotan

Tiga nosel dihubungkan melalui jalur distribusi yang mengikuti sisi rangka. Tutup kotak ditampilkan terpisah untuk memperlihatkan ruang komponen. Visualisasi ini menjadi acuan tata letak; dimensi rinci dan jarak antarbagian ditetapkan pada model Autodesk Fusion berdasarkan ukuran komponen aktual.

3.4.2.2 Material dan Sambungan

Material dipilih untuk menopang komponen, menyediakan tempat pengikat, dan memudahkan perawatan. Pilihan bahan struktural berikut merupakan rancangan material; ukuran penampang, ketebalan pelat, dan jenis filamen ditetapkan setelah penyesuaian terhadap rangka serta proses pembuatan yang digunakan.

Tabel 3.11 Material rancangan fisik

Bagian	Material rancangan	Fungsi
Rangka utama	Baja hollow galvanis.	Menopang seluruh komponen pada bidang 65 × 45 cm.
Batang melintang	Baja hollow dengan pelapisan cat.	Menghubungkan sisi rangka dan menopang dudukan.
Pelat dasar	Pelat baja berlubang.	Menopang tangki dan pompa serta menyediakan titik pengikat.
Kotak mikrokontroler	Termoplastik hasil cetak 3D.	Menempatkan ESP32, BTS7960, dan jalur kabel.
Dudukan dan pengikat	Braket logam, baut, mur, dan pengikat tangki.	Mempertahankan posisi komponen serta memudahkan pembongkaran.
Saluran cairan	Selang PE dan konektor yang sesuai.	Menghubungkan tangki, pompa, dan nosel.
Penahan kabel dan selang	Klem serta cable tie.	Menjaga jalur tetap rapi dan tidak tertarik.

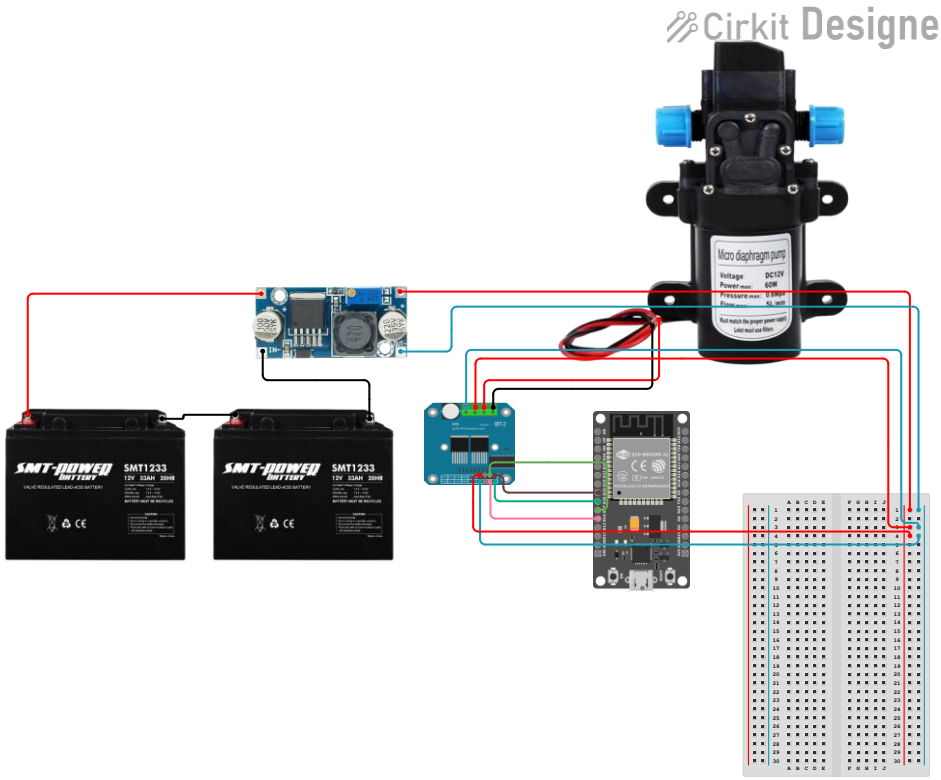
3.4.2.3 Teknik Desain Menggunakan Autodesk Fusion

Autodesk Fusion digunakan untuk membuat model tiga dimensi secara parametrik. Panjang rangka, lebar rangka, ukuran dudukan, dan jarak antarkomponen dijadikan parameter agar perubahan ukuran dapat diterapkan tanpa menggambar ulang seluruh rancangan.

1. Membuat sketsa bidang rangka berukuran 650 × 450 mm, kemudian membentuk profil dan pelat menggunakan fitur pemodelan padat.
2. Membuat setiap komponen sebagai bagian terpisah dengan ukuran dari pengukuran aktual, lalu menyusun posisinya pada rakitan.
3. Menentukan lubang pengikat, ruang konektor, jalur selang, dan akses pengisian tangki serta pelepasan tutup kotak.
4. Memeriksa kemungkinan tabrakan antarkomponen dan ruang perawatan, kemudian menyiapkan gambar kerja untuk pembuatan dudukan dan perakitan.

3.4.3 Desain Wiring

Desain wiring menghubungkan sumber daya, ESP32, driver BTS7960, dan pompa DC 12 V. Dua baterai 12 V disusun seri untuk menghasilkan tegangan nominal 24 V. Tegangan tersebut diturunkan menjadi 12 V menggunakan *step-down*, kemudian disalurkan ke jalur daya BTS7960 untuk menggerakkan pompa. ESP32 menerima perintah penyemprotan dari laptop yang menjalankan MATLAB melalui USB serial dan mengirimkan sinyal kendali ke BTS7960.



Gambar 3.11 Desain wiring subsistem penyemprotan VRA

Jalur daya pompa dipisahkan dari jalur logika kendali. ESP32 memperoleh catu daya 5 V melalui USB, sedangkan suplai logika modul BTS7960 mengikuti kebutuhan modul yang digunakan. Ground ESP32, driver, dan keluaran *step-down* dihubungkan sebagai referensi sinyal bersama. Sambungan daya pompa dipasang melalui terminal dan kabel yang sesuai dengan arus pompa.

3.4.3.1 Alokasi Sambungan dan Pin

Alokasi sambungan ditunjukkan pada Tabel 3.12. Nomor GPIO merupakan rancangan untuk program ESP32 dan harus disesuaikan dengan pin yang benar-benar digunakan saat perakitan.

Tabel 3.12 Alokasi sambungan subsistem penyemprotan VRA

Sumber	Tujuan	Fungsi
Dua baterai 12 V yang disusun seri	Masukan *step-down*	Menyediakan tegangan nominal 24 V.
Keluaran *step-down* 12 V	B+ dan B− BTS7960	Menyediakan daya untuk penggerak pompa.
M+ dan M− BTS7960	Dua terminal pompa DC 12 V	Menyalurkan daya ke pompa.
Orange Pi 4 Pro	Port USB ESP32	Mengirim perintah melalui serial dan menyediakan catu daya ESP32.
3V3 ESP32	VCC logika IBT-2	Menyediakan suplai logika 3,3 V pada varian modul yang digunakan.
GND ESP32	GND logika IBT-2	Menyamakan referensi sinyal kendali.
GPIO25 ESP32	RPWM BTS7960	Memberikan sinyal PWM untuk mengatur pompa.
GPIO26 ESP32	LPWM BTS7960	Ditetapkan LOW karena pompa dioperasikan satu arah.
GPIO27 ESP32	R_EN BTS7960	Mengaktifkan atau menonaktifkan driver.
GPIO33 ESP32	L_EN BTS7960	Mengaktifkan atau menonaktifkan driver.

3.4.3.2 Alokasi Sambungan dan Pin

MATLAB mengolah citra dan menjalankan model fuzzy Mamdani untuk menghasilkan perintah penyemprotan dalam rentang 0–100%. Perintah tersebut dikirim melalui komunikasi serial ke ESP32. Program C++ pada ESP32 mengubahnya menjadi nilai PWM 8 bit dalam rentang 0–255, kemudian mengirimkan sinyal PWM dan enable ke BTS7960.

Ketika perintah penyemprotan lebih besar dari nol, kedua pin enable diaktifkan, RPWM menerima nilai PWM, dan LPWM tetap LOW. Ketika perintah bernilai nol atau data serial tidak valid, ESP32 menetapkan PWM nol dan menonaktifkan driver agar pompa berhenti. Hubungan antara nilai PWM dan debit aktual ditentukan melalui kalibrasi. Pengukuran debit pada rancangan ini dilakukan saat kalibrasi dan pengujian, sehingga belum menjadi umpan balik otomatis bagi pompa.

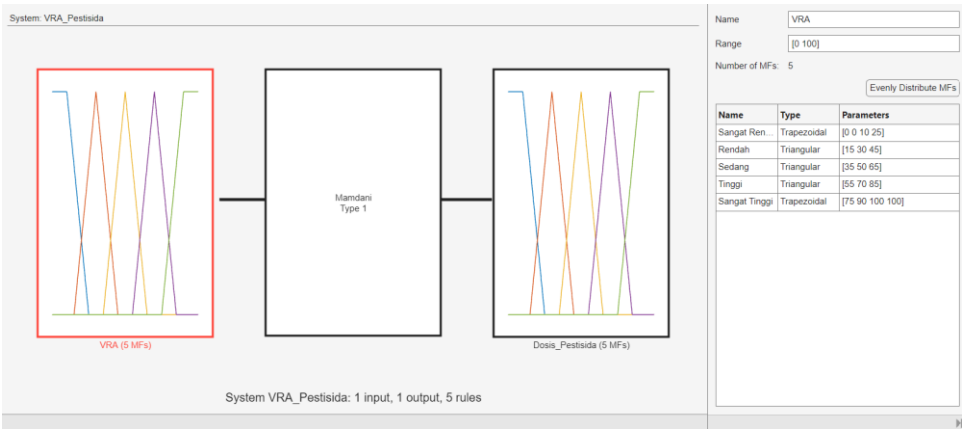
3.4.4 Perancangan Model Fuzzy Logic

3.4.4.1 Struktur Model dan Variable

Model fuzzy Mamdani disusun melalui Fuzzy Logic Designer pada MATLAB dengan nama VRA_Pestisida. Model memiliki satu masukan VRA dan satu keluaran Dosis_Pestisida. Kedua variabel menggunakan rentang 0–100 dengan lima kategori, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi.

Tabel 3.13 Konfigurasi model fuzzy Mamdani

Spesifikasi	Detail
Nama model	VRA_Pestisida.
Jenis sistem	Mamdani tipe 1.
Variabel masukan	VRA, rentang 0–100.
Variabel keluaran	Dosis_Pestisida, rentang 0–100% perintah.
Jumlah himpunan	Lima himpunan pada masukan dan lima pada keluaran.
Jumlah aturan	Lima aturan, masing-masing berbobot 1.
Metode inferensi rancangan	Implikasi minimum, agregasi maksimum, dan defuzzifikasi centroid.



Gambar 3.12 Pengaturan variabel masukan VRA pada MATLAB

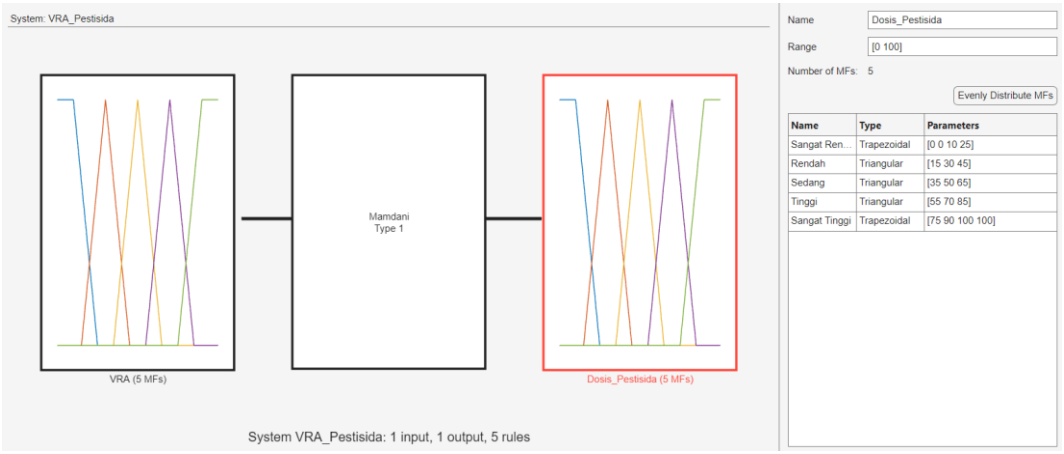
Masukan VRA diperoleh dari pengolahan citra pada ROI melalui segmentasi HSV. Jika keluaran pengolahan citra masih berupa indeks ternormalisasi 0–1, nilainya dikalikan 100 sebelum masuk ke model. Indeks berbasis warna menggambarkan kondisi visual yang didefinisikan dalam pengujian dan tidak langsung dianggap sebagai jumlah gulma atau kebutuhan herbisida.

3.4.4.2 Fungsi Keanggotaan Masukan dan Keluaran

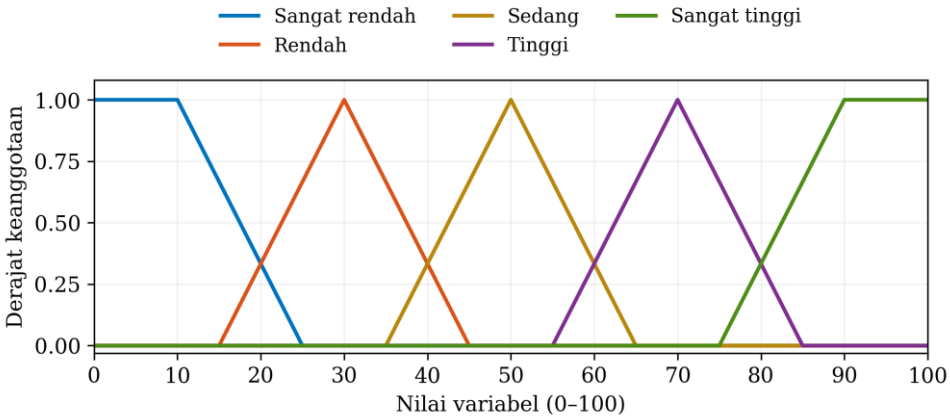
Kategori sangat rendah dan sangat tinggi menggunakan fungsi trapesium, sedangkan rendah, sedang, dan tinggi menggunakan fungsi segitiga. Parameter masukan dan keluaran dibuat sama sesuai pengaturan MATLAB. Tumpang tindih antarhimpunan memungkinkan dua aturan aktif pada satu nilai masukan.

Tabel 3.14 Parameter fungsi keanggotaan VRA dan Dosis_Pestisida

Kategori	Fungsi	Parameter masukan	Parameter keluaran
Sangat rendah	Trapesium	[0 0 10 25]	[0 0 10 25]
Rendah	Segitiga	[15 30 45]	[15 30 45]
Sedang	Segitiga	[35 50 65]	[35 50 65]
Tinggi	Segitiga	[55 70 85]	[55 70 85]
Sangat tinggi	Trapesium	[75 90 100 100]	[75 90 100 100]



Gambar 3.13 Pengaturan variabel keluaran Dosis_Pestisida pada MATLAB



Gambar 3.14 Kurva lima fungsi keanggotaan berdasarkan parameter model

Parameter segitiga menyatakan titik awal, puncak, dan akhir himpunan. Parameter trapesium menyatakan titik awal, awal puncak datar, akhir puncak datar, dan akhir himpunan. Kurva yang sama digunakan pada masukan dan keluaran, tetapi makna kedua variabel berbeda.

3.4.4.3 Basis Aturan dan Inferensi

Basis aturan menghubungkan kenaikan kategori indeks VRA dengan kenaikan kategori perintah penyemprotan. Hubungan ini merupakan rancangan kendali yang dievaluasi pada kondisi area uji. Nama Dosis_Pestisida dipertahankan sesuai model MATLAB, dengan makna operasional sebagai persentase perintah keluaran, bukan konsentrasi campuran herbisida.

	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

Gambar 3.15 Lima aturan fuzzy pada model VRA_Pestisida

Tabel 3.15 Basis aturan fuzzy Mamdani

Aturan	Kondisi masukan VRA	Keluaran Dosis_Pestisida	Bobot
1	Sangat rendah	Sangat rendah	1
2	Rendah	Rendah	1
3	Sedang	Sedang	1
4	Tinggi	Tinggi	1
5	Sangat tinggi	Sangat tinggi	1

Derajat aktivasi masing-masing aturan ditentukan dari fungsi keanggotaan masukan. Implikasi minimum membatasi himpunan keluaran sesuai derajat aktivasi tersebut, kemudian agregasi maksimum menggabungkan keluaran seluruh aturan. Nilai tegas diperoleh menggunakan centroid sesuai konfigurasi Mamdani pada MATLAB (MathWorks, t.t.).

3.4.4.4 Basis Aturan dan Inferensi

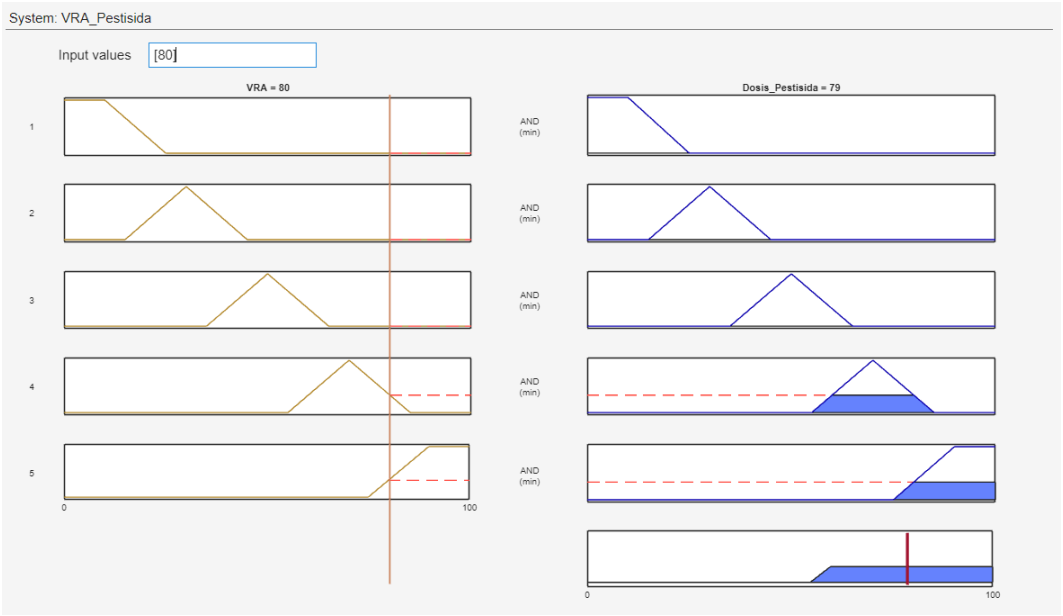
Keluaran tegas d dalam rentang 0–100% dipetakan ke perintah PWM 8 bit. Pemetaan awal dinyatakan sebagai berikut, kemudian hubungan PWM terhadap debit ditetapkan melalui kalibrasi.

$$PWM = round(\frac{255 \times d}{100})$$

Kategori sangat rendah tetap merupakan himpunan keluaran positif. Oleh karena itu, perintah pompa mati diterapkan di luar inferensi ketika tidak ada sasaran, indeks bernilai nol, data tidak valid, atau robot berhenti. Pada kondisi tersebut, PWM diatur nol dan driver dinonaktifkan. Lima kategori fuzzy menghasilkan keluaran tegas yang dapat berubah kontinu; kelimanya tidak langsung berarti lima debit tetap.

3.4.4.5 Simulasi dan Pemeriksaan Model

Rule Viewer digunakan untuk memeriksa aturan yang aktif dan hasil defuzzifikasi. Pada contoh masukan VRA sebesar 80, kategori tinggi dan sangat tinggi sama-sama aktif. Tampilan MATLAB menunjukkan keluaran Dosis_Pestisida sekitar 79%, seperti pada gambar berikut.



Gambar 3.16 Contoh simulasi Rule Viewer pada masukan VRA sebesar 80

Dari parameter fungsi keanggotaan, derajat keanggotaan tinggi adalah (85 − 80)/(85 − 70) = 1/3 dan sangat tinggi adalah (80 − 75)/(90 − 75) = 1/3. Keluaran kedua aturan dipotong pada derajat tersebut, digabungkan, kemudian dihitung centroid-nya. Angka 79% pada tampilan merupakan pembulatan hasil simulasi, bukan hasil pengukuran debit pompa.

Pemeriksaan model dilakukan pada nilai yang mewakili lima kategori serta titik tumpang tindih. Keluaran MATLAB dibandingkan dengan perhitungan rujukan, dengan target selisih tidak lebih dari satu poin persentase. Selanjutnya, perintah keluaran diuji pada pompa untuk memperoleh hubungan PWM dan debit aktual. Jika model dijalankan ulang dalam C++, parameter dan metode inferensinya dibuat sama dengan model MATLAB.

Kelima kategori digunakan pada perancangan model, sedangkan keberhasilan keluaran fisik mengikuti indikator prototipe: menghasilkan sekurang-kurangnya tiga rerata debit positif yang berbeda dan mencapai galat debit tidak lebih dari 10% terhadap acuan pada kondisi uji. Pengujian debit tetap dipisahkan dari pengujian efektivitas herbisida.

3.5 Teknik Uji Kelayakan Hasil

Uji kelayakan dilakukan untuk menilai pengolahan citra, keputusan fuzzy, kendali pompa, dan kerja sistem saat robot bergerak. Pengujian penyemprotan menggunakan air sebagai cairan uji. Setiap pengukuran dicatat bersama kondisi pengujian, nilai indeks VRA, keluaran fuzzy, nilai PWM, dan hasil pengamatan agar penyebab ketidaksesuaian dapat ditelusuri.

Tabel 3.16 Teknik uji kelayakan subsistem penyemprotan VRA

Aspek uji	Pelaksanaan dan data	Indikator kelayakan
Kelistrikan dan jalur cairan	Periksa catu 12 V saat berbeban, polaritas, sambungan, dan kebocoran. Catat arus serta suhu driver.	Pompa dapat bekerja sesuai perintah, tidak bocor, dan tidak terjadi pemutusan atau reset tak diinginkan.
Mask HSV	Uji minimal 30 citra dengan penandaan manual piksel warna; mencakup kondisi terang dan teduh.	Rerata IoU minimal 80% sebagai target segmentasi warna.
Model fuzzy	Uji 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, dan 100; bandingkan dengan centroid rujukan.	Selisih keluaran maksimal 1 poin persentase; semua titik memiliki aturan aktif.
Serial dan perintah berhenti	Uji perintah valid, nol, luar rentang, teks rusak, dan putus komunikasi; masing-masing minimal 3 kali.	Perintah valid diterapkan; kondisi tidak valid menghasilkan PWM 0 dan driver nonaktif.
Keluaran debit	Uji beberapa PWM; tampung cairan setelah aliran stabil selama durasi tetap, ulangi 3 kali tiap tingkat.	Sedikitnya 3 rerata debit positif dapat dibedakan melampaui resolusi pengukuran.
Galat debit	Ukur ulang pada sesi terpisah; bandingkan rerata aktual dan acuan positif.	Galat relatif rerata maksimal 10% pada setiap tingkat yang dinyatakan lulus.
Integrasi bergerak	Amati minimal 10 perpindahan kondisi pada petak bertanda; catat lokasi nosel saat perintah berubah.	Minimal 80% perubahan perintah terjadi pada petak yang sesuai.
Penggunaan cairan	Bandingkan VRA dan debit tetap pada area, kecepatan, serta susunan nosel setara; minimal 3 pengulangan.	Volume total dan persentase perubahan dilaporkan, termasuk bila tidak terjadi pengurangan.

Debit pada setiap pengukuran dihitung dengan membagi volume cairan yang tertampung dengan waktu penampungan, yaitu $\boldsymbol{Q} = \frac{\boldsymbol{v}}{\boldsymbol{t}}$. Debit acuan ditetapkan dari kalibrasi, sedangkan debit aktual diperoleh dari pengukuran ulang yang terpisah. Untuk debit acuan yang lebih besar dari nol, galat relatif dihitung sebagai

$$\left|\frac{Q_{aktual} - Q_{acuan}}{Q_{acuan}}\right| \times 100\%$$

Persamaan tersebut tidak digunakan pada perintah nol; kondisi itu dinilai dengan memeriksa apakah pompa berhenti.

Keberhasilan pengujian robot bergerak dihitung dari jumlah perpindahan yang menghasilkan perubahan perintah pada petak yang sesuai, dibagi jumlah seluruh perpindahan yang diuji, lalu dikalikan 100%. Perbandingan volume mode VRA dan debit tetap menunjukkan penggunaan cairan pada kondisi uji. Pengujian ini belum digunakan untuk menyimpulkan efektivitas herbisida terhadap gulma karena hasil perlakuan pada gulma tidak diukur.

DAFTAR PUSTAKA

Inoue, K., Kaizu, Y., Igarashi, S., & Imou, K. (2019). The development of autonomous navigation and obstacle avoidance for a robotic mower using machine vision technique. *IFAC-PapersOnLine, 52*(30), 173–177. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.517

OpenCV. (t.t.). *Thresholding operations using inRange*. Diakses pada 3 Oktober 2026, dari https://docs.opencv.org/4.x/da/d97/tutorial_threshold_inRange.html

Arduino. (2022, September 14). *It's here: Please welcome Arduino IDE 2.0*. https://blog.arduino.cc/2022/09/14/its-here-please-welcome-arduino-ide-2-0/

Darbyshire, M., Salazar-Gomez, A., Gao, J., Sklar, E. I., & Parsons, S. (2023). Towards practical object detection for weed spraying in precision agriculture. *Frontiers in Plant Science, 14*, 1183277. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1183277

Deere & Company. (2022). *2022 sustainability report*. https://www.deere.com/assets/pdfs/common/our-company/sustainability/sustainability-report-2022.pdf

Dong, H., Shen, J., Yu, Z., Lu, X., Liu, F., & Kong, W. (2024). Low-cost plant-protection unmanned ground vehicle system for variable weeding using machine vision. *Sensors, 24*(4), 1287. https://doi.org/10.3390/s24041287

Ecorobotix. (2023, May 9). *Ecorobotix raises $52M in new funding* [Press release]. https://ecorobotix.com/en-us/blog/ecorobotix-raises-52m-in-new-funding/

Espressif Systems. (2026). *ESP32-WROOM-32 datasheet* (Version 3.8). https://documentation.espressif.com/esp32-wroom-32_datasheet_en.html

Fan, X., Chai, X., Zhou, J., & Sun, T. (2023). Deep learning based weed detection and target spraying robot system at seedling stage of cotton field. *Computers and Electronics in Agriculture, 214*, 108317. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108317

Jin, X., Bagavathiannan, M., Maity, A., Chen, Y., & Yu, J. (2022). Deep learning for detecting herbicide weed control spectrum in turfgrass. *Plant Methods, 18*, 94. https://doi.org/10.1186/s13007-022-00929-4

Luo, Y., He, X., Shi, H., Yang, S. X., Song, L., & Li, P. (2025). Design and development of a precision spraying control system for orchards based on machine vision detection. *Sensors, 25*(12), 3799. https://doi.org/10.3390/s25123799

Malkani, P., Mani, I., Sahoo, P. K., Parray, R. A., Swain, S. S., Asha, K. R., Dharmender, Chowdhury, M., Rathod, S. K., Al-Qahtani, W. H., Salem, A., Elbeltagi, A., & Elwakeel, A. E. (2024). Development and evaluation of a sensor enabled smart herbicide applicator for inter row crops. *Smart Agricultural Technology, 9*, 100649. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100649

MathWorks. (2026a). *mamfis: Mamdani fuzzy inference system* (R2026b documentation). https://www.mathworks.com/help/fuzzy/mamfis.html

MathWorks. (2026b). *rgb2hsv: Convert RGB colors to HSV* (R2026b documentation). https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rgb2hsv.html

Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2020). *Software engineering: A practitioner's approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.

Rahimi Azghadi, M., Olsen, A., Wood, J., Saleh, A., Calvert, B., Granshaw, T., Fillols, E., & Philippa, B. (2025). Precision robotic spot-spraying: Reducing herbicide use and enhancing environmental outcomes in sugarcane. *Computers and Electronics in Agriculture, 235*, 110365. https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110365

Raja, R., Slaughter, D. C., Fennimore, S. A., & Siemens, M. C. (2023). Real-time control of high-resolution micro-jet sprayer integrated with machine vision for precision weed control. *Biosystems Engineering, 228*, 31–48. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.02.006

Sathyamoorthy, A. J., Weerakoon, K., Guan, T., Liang, J., & Manocha, D. (2022). TerraPN: Unstructured terrain navigation using online self-supervised learning. In *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 7197–7204). IEEE. https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981942

Skoczeń, M., Ochman, M., Spyra, K., Nikodem, M., Krata, D., Panek, M., & Pawłowski, A. (2021). Obstacle detection system for agricultural mobile robot application using RGB-D cameras. *Sensors, 21*(16), 5292. https://doi.org/10.3390/s21165292

Szeliski, R. (2022). *Computer vision: Algorithms and applications* (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-9

Texas Instruments. (2026). *SNx4HC244 octal buffers and line drivers with 3-state outputs* (Rev. I, SCLS130I). https://www.ti.com/lit/gpn/sn74hc244

Villette, S., Maillot, T., Guillemin, J.-P., & Douzals, J.-P. (2022). Assessment of nozzle control strategies in weed spot spraying to reduce herbicide use and avoid under- or over-application. *Biosystems Engineering, 219*, 68–84. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.04.012

Zanin, A. R. A., Neves, D. C., Teodoro, L. P. R., da Silva Júnior, C. A., da Silva, S. P., Teodoro, P. E., & Baio, F. H. R. (2022). Reduction of pesticide application via real-time precision spraying. *Scientific Reports, 12*, 5638. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09607-w

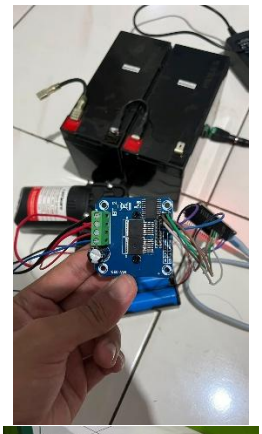
Zhang, M., Li, X., Wang, L., Jin, L., & Wang, S. (2024). A path planning system for orchard mower based on improved A* algorithm. *Agronomy, 14*(2), 391. https://doi.org/10.3390/agronomy14020391

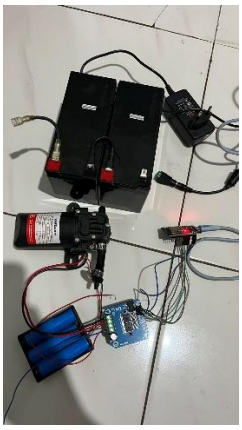
LAMPIRAN

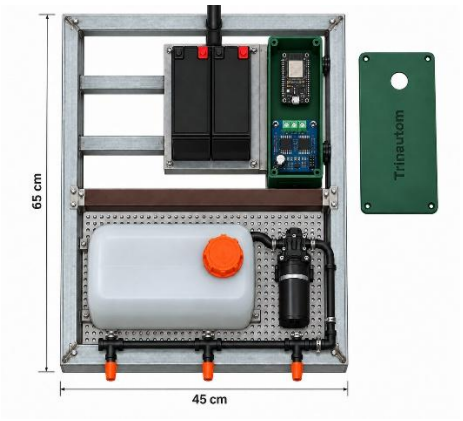
Lampiran 1: Biodata Penulis

Nama Lengkap	:	Shaviraj Samad Shaikh
Nomor Induk Mahasiswa	:	2305110047
Tempat, Tanggal Lahir	:	Batang, 15 Agustus 2004
Program Studi	:	Teknik Komputer (S1)
Fakultas	:	Fakultas Teknik
Perguruan Tinggi	:	Universitas Negeri Semarang (UNNES)
Alamat Surel (Email)	:	Samadshaviraj2@students.unnes.ac.id

Lampiran 2: Draf Karya / Sketsa / Lembar Kerja Prototipe









Lampiran 3: Surat Keputusan / Lembar Penugasan Dosen Pembimbing

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
FAKULTAS TEKNIK

Gedung Dekanat, Kampus Sekaran,
Gunungpati, Semarang 50229.
Telepon: 0248508101
Laman: http://ft.unnes.ac.id, surel:
ft@mail.unnes.ac.id

KEPUTUSAN
DEKAN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
Nomor: B/947/UN37.1.5/TD.06/2026
Tentang
PENETAPAN DOSEN PEMBIMBING SKRIPSI/TUGAS AKHIR SEMESTER GASAL/GENAP TAHUN AKADEMIK 2026/2027

Menimbang : Bahwa untuk memperlancar mahasiswa Prodi Teknik Komputer, S1 Fakultas Teknik membuat Skripsi/Tugas Akhir, maka perlu menetapkan Dosen-dosen Prodi Teknik Komputer, S1 Fakultas Teknik UNNES untuk menjadi pembimbing.

Mengingat :
1. Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional;
2. Peraturan Pemerintah Nomor 4 Tahun 2014 tentang Penyelenggaraan Pendidikan Tinggi dan Pengelolaan Perguruan Tinggi;
3. Peraturan Pemerintah Nomor 36 Tahun 2022 tentang Perguruan Tinggi Negeri Badan Hukum Universitas Negeri Semarang;
4. Peraturan Rektor Universitas Negeri Semarang Nomor 88 Tahun 2024 tentang Panduan Tugas Akhir Sarjana dan Diploma Universitas Negeri Semarang;

Menimbang : Usulan Koordinator Prodi Teknik Komputer, S1 Tanggal 1 September 2026

MEMUTUSKAN

Menetapkan :

PERTAMA : Menunjuk dan menugaskan kepada:

Nama	: Dr. Feddy Setio Pribadi, S.Pd., M.T.
NIP	: 197808222003121002
Pangkat/Golongan	: Penata Tk. I - III/d
Jabatan Akademik	: Lektor
Sebagai Pembimbing	

Untuk membimbing mahasiswa penyusun skripsi/Tugas Akhir :

Nama	: SHAVIRAJ SAMAD SHAIKH
NIM	: 2305110047
Prodi	: Teknik Komputer, S1
Topik	: Perancangan dan Implementasi Robot Pemotong Rumput Otonom dengan Sistem Navigasi Cerdas untuk Pemeliharaan Halaman Rumah.

KEDUA : Keputusan ini mulai berlaku sejak tanggal ditetapkan.

DITETAPKAN DI : SEMARANG
PADA TANGGAL : 1 September 2026
DEKAN

Prof. Dr. Wirawan Sumbodo, M.T.
NIP 196601051990021002

Tembusan
1. WD Bid. Akademik dan Mawa
2. Ketua Prodi
3. Pertinggal

2305110047

Dokumen ini telah ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh Balai Besar Sertifikasi Elektronik (BSrE), BSSN.