PERANCANGAN KENDALI ADAPTIF DAN AKTUATOR SELF-LOCKING UNTUK EFISIENSI DAYA DAN PROTEKSI STALLING PADA SUBSISTEM ELEVASI DEK ROBOT PEMOTONG RUMPUT

Prototipe

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana.

Oleh :
Maulana Fathurahman
2305110022

PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
SEMARANG, TAHUN 2026

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Prototipe berjudul **"PERANCANGAN KENDALI ADAPTIF DAN AKTUATOR SELF-LOCKING UNTUK EFISIENSI DAYA DAN PROTEKSI STALLING PADA SUBSISTEM ELEVASI DEK ROBOT PEMOTONG RUMPUT"** yang disusun oleh

Nama : Maulana Fathurahman
NIM : 2305110022
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

DAFTAR ISI II
DAFTAR TABEL IV
DAFTAR GAMBAR V
DAFTAR ISTILAH VI
BAB I 1
PENDAHULUAN 1
1.1 LATAR BELAKANG 1
1.2 RUMUSAN MASALAH 5
1.3 TUJUAN PROTOTIPE 5
1.4 MANFAAT PROTOTIPE 6
1.4.1 Bagi Penulis 6
1.4.2 Bagi Universitas Negeri Semarang 6
1.4.3 Bagi Pengelola Ruang Terbuka Hijau dan Masyarakat 7
1.4.4 Bagi Lingkungan 7
1.4.5 Bagi Industri 7
1.4.6 Bagi Perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknik 7
1.4.7 Bagi Negara 8
1.5 POTENSI DAMPAK FUNGSIONAL 8
1.5.1 Membantu Pemeliharaan Rumput 8
1.5.2 Meningkatkan Keteraturan Pergerakan 8
1.5.3 Menyesuaikan Proses Pemotongan 8
1.5.4 Menyesuaikan Debit Penyemprotan 8
1.5.5 Mendukung Pengoperasian Terintegrasi 8
1.6 POTENSI DAMPAK KOMERSIAL 9
1.6.1 Potensi Produk 9
1.6.2 Potensi Pasar dan Keunggulan Karya Anak Bangsa 9
BAB II 12
KAJIAN PUSTAKA 12
2.1 TINJAUAN PUSTAKA 12
2.1.1 Konteks Sistem Robot Pemotong Rumput Otonom 12
2.1.2 Mekanisme Penyesuaian Ketinggian Dek Pemotong 12
2.1.3 Aktuator Self-Locking untuk Efisiensi Energi 13
2.1.4 Sensor Time-of-Flight untuk Pengukuran Jarak 13
2.1.5 Perbandingan Penelitian Terdahulu 14
2.2 LANDASAN TEORITIK 16
2.2.1 Hubungan Arus dan Torsi pada Motor DC 16
2.2.2 Sensor Arus INA219 16
2.2.3 Driver Motor BTS7960 17
2.2.4 Kendali PID Diskrit dengan Anti-Windup 17
2.2.5 Aktuator Linear Self-Locking 18
2.2.6 Sensor Time-of-Flight VL53L0X 18
2.2.7 Buck Converter LM2596 18
2.2.8 Logika Dua Mode dan Safety Override (State Machine) 19
BAB III 20
METODE PELAKSANAAN 20
3.1 PENDEKATAN PERANCANGAN 20
3.2 LOKASI DAN WAKTU 23
3.2.1 Lokasi Perancangan dan Pengujian 23
3.2.2 Area dan Kondisi Pengujian Lapangan 23

3.2.3 Waktu dan Jadwal Pelaksanaan 25
3.3 PROSEDUR PERANCANGAN 26
3.3.1 Analisis Kebutuhan 26
3.3.2 Perancangan Sistem 28
a. Desain Perangkat Keras 28
b. Arsitektur Perangkat Lunak 28
c. Perancangan Model Kendali dan Logika Proteksi 29
3.3.3 Implementasi 29
a. Implementasi Perangkat Keras 29
b. Implementasi Perangkat Lunak 30
c. Implementasi Model 30
3.3.4 Pengujian 30
a. Pengujian Perangkat Keras 30
b. Pengujian Perangkat Lunak 31
c. Pengujian Model dan Integrasi 31
3.3.5 Pemeliharaan 32
3.4 TEKNIK PERANCANGAN 32
3.4.1 Pemilihan Komponen dan Arsitektur Sistem 32
a. ESP32 Dev Board 32
b. Sensor Arus INA219 33
c. Driver Motor BTS7960 34
d. Aktuator Linear Self-Locking 34
e. Motor Pemotong RS 775 35
f. Sensor Time-of-Flight VL53L0X 36
g. Buck Converter LM2596 37
h. Rancangan Catu Daya 37
3.4.2 Desain Fisik 38
a. Tata Letak Komponen 38
b. Material dan Sambungan 39
c. Teknik Desain Menggunakan Autodesk Fusion 39
3.4.3 Desain Wiring 40
a. Jalur Daya 40
b. Alokasi Pin ESP32 41
c. Sambungan Driver dan Aktuator 42
d. Sambungan Sensor 42
e. Praktik Pengawatan dan Proteksi 43
f. Panduan Penyusunan Gambar Wiring 44
3.4.4 Perancangan Algoritma Kendali dan Logika Proteksi 44
a. Pembacaan dan Penyaringan Arus 44
b. PID Diskrit dengan Deadband dan Integral Clamping 45
c. Finite State Machine Dua Mode dan Safety Override 46
3.4.5 Simulasi MATLAB dan Uji Pendahuluan 47
3.4.6 Antarmuka Variabel Status 48
3.5 TEKNIK PENGUMPULAN DAN ANALISIS DATA 50
3.5.1 Instrumen Pengumpulan Data 50
3.5.2 Skenario dan Prosedur Pengujian 50
3.5.3 Teknik Analisis Data 51
3.5.4 Kriteria Keberhasilan 52
DAFTAR PUSTAKA 53
LAMPIRAN 55

DAFTAR TABEL

TABEL 1.1 MATRIKS KOMPARASI PENELITIAN TERDAHULU DAN POSISI PROTOTIPE 11
TABEL 2.1. PERBANDINGAN PENELITIAN TERDAHULU 14
TABEL 3.1. PENERAPAN PENDEKATAN PERANCANGAN PADA SUBSISTEM ELEVASI DEK 22
TABEL 3.2. LOKASI DAN FUNGSI KEGIATAN PERANCANGAN 23
TABEL 3.3. DATA KONDISI LOKASI YANG DICATAT SEBELUM PENGUJIAN 24
TABEL 3.4. RENCANA WAKTU PERANCANGAN SUBSISTEM ELEVASI DEK 26
TABEL 3.5. KEBUTUHAN PERANGKAT KERAS DAN PERANGKAT LUNAK SUBSISTEM ELEVASI DEK 28
TABEL 3.6. SPESIFIKASI ESP32 DEV BOARD 33
TABEL 3.7. SPESIFIKASI SENSOR ARUS INA219 34
TABEL 3.8. SPESIFIKASI DRIVER BTS7960 34
TABEL 3.9. SPESIFIKASI AKTUATOR LINEAR 35
TABEL 3.10. SPESIFIKASI MOTOR PEMOTONG RS 775 36
TABEL 3.11. SPESIFIKASI SENSOR VL53L0X 36
TABEL 3.12. SPESIFIKASI BUCK CONVERTER LM2596 37
TABEL 3.13. RANCANGAN JALUR CATU DAYA SUBSISTEM 38
TABEL 3.14. MATERIAL RANCANGAN FISIK 39
TABEL 3.15. REKOMENDASI ALOKASI PIN ESP32 SUBSISTEM ELEVASI DEK 41
TABEL 3.16. SAMBUNGAN DRIVER BTS7960 UNIT 1 DAN AKTUATOR LINEAR 42
TABEL 3.17. SAMBUNGAN DRIVER BTS7960 UNIT 1 DAN AKTUATOR LINEAR 42
TABEL 3.18. SAMBUNGAN SENSOR INA219 DAN VL53L0X 43
TABEL 3.19. PARAMETER AWAL PENGENDALI DAN PROTEKSI 45
TABEL 3.20. TABEL TRANSISI STATUS FSM 47
TABEL 3.21. VARIABEL STATUS YANG DIKIRIM KE MODUL UTAMA 49
TABEL 3.22. FORMAT PESAN KOMUNIKASI UART 49
TABEL 3.23. INSTRUMEN PENGUMPULAN DATA 50
TABEL 3.24. SKENARIO PENGUJIAN SUBSISTEM ELEVASI DEK 51
TABEL 3.25. KRITERIA KEBERHASILAN PENGUJIAN 52

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 3.1. ALUR PENDEKATAN PERANCANGAN SUBSISTEM ELEVASI DEK 21
GAMBAR 3.2. TAMPAK KONDISI RUMPUT LAPANGAN WOODBALL UNNES 25
GAMBAR 3.3. ESP32 DEV BOARD BERBASIS ESP-WROOM-32 33
GAMBAR 3.4. MODUL SENSOR ARUS INA219 33
GAMBAR 3.5. MODUL DRIVER MOTOR BTS7960 34
GAMBAR 3.6. AKTUATOR LINEAR SELF-LOCKING 35
GAMBAR 3.7. MOTOR PEMOTONG RS 775 36
GAMBAR 3.8. MODUL SENSOR VL53L0X 36
GAMBAR 3.9. MODUL BUCK CONVERTER LM2596 37
GAMBAR 3.10. TATA LETAK DEK DAN AKTUATOR (TAMPAK BAWAH) 38
GAMBAR 3.11. TATA LETAK KOMPONEN AKTUATOR (TAMPAK SAMPING 39
GAMBAR 3.12. HASIL SIMULASI MATLAB RESPONS ARUS MOTOR DAN ELEVASI DEK 47
GAMBAR 3.13. HASIL UJI PENDAHULUAN PEMBACAAN ARUS PADA KONDISI NORMAL DAN HAMBATAN KERTAS 48

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/m².
Step-down	Konverter DC–DC untuk menurunkan tegangan.
PID	Proportional–Integral–Derivative; pengendali umpan balik berdasarkan galat, akumulasi galat, dan laju perubahan galat.
FSM	Finite State Machine; model logika berupa kumpulan status dan aturan transisi antarstatus.
Stalling	Kondisi motor berhenti atau berputar sangat lambat akibat beban berlebih, disertai lonjakan arus.
Arus stall	Arus yang ditarik motor saat terhenti akibat beban berlebih (acuan >235 mA).
Self-locking	Sifat transmisi yang menahan posisi beban tanpa dapat digerakkan balik oleh beban.
Worm gear	Transmisi roda gigi cacing yang menghasilkan sifat self-locking pada aktuator linear.
Aktuator linear	Penggerak yang mengubah putaran motor menjadi gerak lurus.
Setpoint	Nilai acuan yang ingin dipertahankan oleh pengendali (arus aman 155 mA).
Deadband	Rentang galat yang diabaikan (dipaksa nol) agar tidak terjadi getaran mikro pada aktuator.
Anti-windup	Teknik pembatasan suku integral agar tidak terakumulasi berlebihan.
Integral clamping	Metode anti-windup dengan membatasi suku integral pada rentang tertentu (±500).
Override	Status keselamatan yang mengesampingkan mode manual maupun keluaran PID saat arus melampaui ambang bahaya.
INA219	Sensor pemantau arus dan daya sisi tinggi dengan antarmuka I²C.
VL53L0X	Sensor jarak time-of-flight berbasis laser inframerah dengan antarmuka I²C.
ToF	Time-of-flight; pengukuran jarak berdasarkan waktu tempuh pulsa.
BTS7960	Modul driver motor H-bridge arus besar.
LM2596	IC regulator step-down (buck converter) dengan keluaran yang dapat diatur.
ESP32	Mikrokontroler dual-core dengan GPIO, I²C, UART, dan PWM.
I²C	Inter-Integrated Circuit; protokol komunikasi serial dua kabel (SDA dan SCL).
UART	Universal Asynchronous Receiver–Transmitter; protokol komunikasi serial antarperangkat.
ESP-NOW	Protokol komunikasi nirkabel antarmodul ESP32.
Checksum	Nilai pemeriksa keutuhan pesan; di sini berupa hasil XOR karakter pesan.
Bench test	Uji bangku; pengujian komponen atau subsistem di laboratorium sebelum diuji di lapangan.
Overshoot	Besar puncak respons yang melampaui nilai setpoint.
Latensi	Selang waktu dari deteksi kondisi hingga aktuator mulai bergerak.

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 akibat 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 Prototipe

Pengembangan prototipe subsistem kendali adaptif dan manajemen daya pada elevasi dek robot pemotong rumput otonom diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut.

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 Teknik

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

1.5.1 Membantu Pemeliharaan Rumput

Robot berpotensi mengurangi pekerjaan manual dalam pemotongan rumput dan penyemprotan pada area pengujian. Setelah area kerja dan misi ditentukan, robot dirancang untuk menjalankan kedua pekerjaan tersebut dengan intervensi operator yang lebih sedikit.

1.5.2 Meningkatkan Keteraturan Pergerakan

Penerapan GPS dan *coverage path planning* berpotensi membantu robot menjangkau area kerja secara lebih terencana. Deteksi halangan, kendali gerak, dan fusi sensor mendukung kemampuan robot untuk mengikuti lintasan serta menyesuaikan pergerakannya saat menemukan halangan statis.

1.5.3 Menyesuaikan Proses Pemotongan

Pengaturan elevasi dek memungkinkan tinggi pemotongan disesuaikan dengan kebutuhan pengujian. Pemantauan arus motor dan kendali PID berpotensi membantu sistem merespons peningkatan beban saat proses pemotongan berlangsung.

1.5.4 Menyesuaikan Debit Penyemprotan

Sistem VRA berpotensi mengatur debit penyemprotan berdasarkan kondisi area yang terdeteksi kamera. Dengan demikian, cairan dapat diberikan sesuai kebutuhan area, sehingga penggunaan cairan berlebih berpotensi berkurang.

1.5.5 Mendukung Pengoperasian Terintegrasi

Integrasi subsistem navigasi, kendali gerak, pemotongan, dan penyemprotan memungkinkan robot menjalankan satu rangkaian misi

pemeliharaan rumput. Dampak fungsional tersebut akan dinilai melalui pengujian cakupan area, penghindaran halangan, kinerja pemotongan, ketepatan debit, dan keberhasilan misi tanpa intervensi manual.

1.6 Potensi Dampak Komersial

1.6.1 Potensi Produk

Prototipe ini berpotensi dikembangkan menjadi robot pemeliharaan rumput yang menggabungkan navigasi otonom, deteksi halangan, pemotongan dengan pengaturan elevasi dek, dan penyemprotan VRA. Robot dirancang agar dapat menjalankan misi pemotongan saja atau mengaktifkan penyemprotan ketika diperlukan. Kesiapan fungsi tersebut sebagai produk masih perlu dibuktikan melalui pengujian kinerja, keselamatan, dan ketahanan.

1.6.2 Potensi Pasar dan Keunggulan Karya Anak Bangsa

Robot ini dikembangkan dan dirakit oleh tim mahasiswa Indonesia. Dengan target harga jual maksimal Rp15.000.000 per unit, robot berpotensi menjadi alternatif yang lebih terjangkau dibandingkan beberapa produk impor pada Tabel 1.1. Calon penggunanya meliputi pengelola fasilitas kampus, lapangan olahraga, kawasan perumahan, dan penyedia jasa pemeliharaan taman. Keunggulan harga tersebut perlu dipastikan kembali setelah biaya produksi dan layanan purnajual dihitung secara lengkap.

No	Nama Produk	Gambar Produk	Harga Produk	Kelebihan	Kekurangan
1.	Husqvarna Automower 450X NERA		Rp 98.480.000	a. Kapasitas dan jangkauan pemotongan jauh lebih luas hingga 5.000 m^2. 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.
2.	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.

3.	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.

Tabel 1.1 Matriks Komparasi Penelitian Terdahulu dan Posisi Prototipe

BAB II
KAJIAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka ini membahas penelitian terdahulu yang menjadi acuan perancangan subsistem elevasi cutting deck dan manajemen daya pada robot pemotong rumput otonom. Literatur dipilih berdasarkan keterkaitannya dengan mekanisme penyesuaian ketinggian dek pemotong, pemanfaatan aktuator self-locking untuk efisiensi energi, serta sensor time-of-flight sebagai umpan balik jarak/ketinggian.

2.1.1 Konteks Sistem Robot Pemotong Rumput Otonom

Robot pemotong rumput otonom yang dikembangkan pada penelitian kelompok ini memerlukan kemampuan navigasi, penghindaran halangan, serta kendali gerak yang adaptif terhadap kondisi medan. Inoue dkk. (2022) mengembangkan sistem navigasi dan penghindaran halangan pada robot pemotong rumput menggunakan dua kamera RGB-D dan IMU, dengan selisih posisi estimasi terhadap posisi sebenarnya sebesar 0,30 m pada pengujian di lingkungan kebun simulasi. Sathyamoorthy dkk. (2022), melalui pengembangan TerraPN, menunjukkan bahwa interaksi robot dengan medan turut memengaruhi kemampuan robot bergerak sesuai perintah pada permukaan yang tidak terstruktur. Kedua penelitian tersebut menjadi acuan bahwa setiap subsistem robot, termasuk subsistem mekanis elevasi dek yang menjadi fokus penelitian ini, perlu dirancang agar mampu beradaptasi terhadap kondisi lapangan yang dinamis, meskipun keduanya tidak membahas kendali beban motor pemotong secara khusus.

2.1.2 Mekanisme Penyesuaian Ketinggian Dek Pemotong

Diwakaran dkk. (2023) merancang sebuah mower otonom dengan motor pemotong yang ketinggiannya dapat disesuaikan (height adjustable cutting motor), bertujuan meminimalkan keterlibatan manual dalam proses pemotongan rumput. Rancangan tersebut menempatkan penyesuaian ketinggian sebagai fitur struktural pada mower, namun penyesuaian dilakukan berdasarkan pengaturan

posisi tetap dan belum memanfaatkan umpan balik beban motor secara real-time sebagai dasar keputusan elevasi. Pendekatan tersebut menjadi acuan mengenai kebutuhan mekanisme elevasi pada mower otonom, tetapi belum menjawab persoalan respons terhadap variasi kerapatan rumput yang berubah secara dinamis selama operasi berlangsung, yang menjadi celah yang coba dijawab pada penelitian ini melalui pemanfaatan sensor arus sebagai umpan balik.

2.1.3 Aktuator Self-Locking untuk Efisiensi Energi

Shoaib dkk. (2023) meneliti kendali robot penyelamat (rescue robot) yang digerakkan oleh transmisi worm-wheel gear dengan mempertimbangkan gesekan bergantung beban (load-dependent friction). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa sifat self-locking atau non-backdrivability pada transmisi worm-wheel gear memungkinkan aktuator mempertahankan posisi atau menahan beban tanpa memerlukan daya listrik secara terus-menerus, sehingga aktuator tidak perlu tetap teraliri daya hanya untuk menjaga posisi. Prinsip tersebut menjadi dasar pemanfaatan aktuator linear self-locking pada rancangan elevasi dek dalam penelitian ini, dengan asumsi bahwa karakteristik serupa dapat diperoleh pada skala beban dan mekanisme yang berbeda, yaitu penahanan posisi dek pemotong rumput.

2.1.4 Sensor Time-of-Flight untuk Pengukuran Jarak

Laković dkk. (2019) mengevaluasi penggunaan sensor VL53L0X berbiaya rendah untuk deteksi lingkungan pada robot, dengan pengujian presisi pada berbagai jenis permukaan, warna, dan kondisi pencahayaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor tersebut memberikan alternatif yang andal untuk keperluan proximity sensing dengan jangkauan hingga 2 meter. Pada konteks yang berbeda, Maria dan Susianti (2019) menerapkan sensor VL53L0X bersama mikrokontroler ATMEGA8535 untuk membangun surface scanner tiga dimensi, dan menunjukkan bahwa sensor tersebut mampu memberikan data jarak yang konsisten untuk merekonstruksi profil permukaan suatu objek. Kedua penelitian tersebut menjadi acuan kelayakan sensor VL53L0X sebagai sensor jarak yang presisi dan berbiaya rendah, yang pada penelitian ini direncanakan

untuk membantu memverifikasi ketinggian aktual dek pemotong terhadap permukaan tanah sebagai pelengkap estimasi posisi aktuator.

2.1.5 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Penelitian	Kontribusi Utama	Relevansi dan Batasan terhadap Prototipe
Diwakaran dkk. (2023)	Perancangan mower otonom dengan motor pemotong yang ketinggiannya dapat disesuaikan secara struktural.	Menjadi acuan kebutuhan elevasi dek, tetapi belum menggunakan umpan balik arus motor secara real-time.
Shoaib dkk. (2023)	Kendali robot berpenggerak worm-wheel gear dengan kompensasi gesekan bergantung beban.	Menjadi dasar pemanfaatan sifat self-locking untuk efisiensi daya, tetapi diterapkan pada rescue robot, bukan elevasi dek pemotong rumput.
Laković dkk. (2019)	Evaluasi presisi sensor VL53L0X untuk deteksi lingkungan robot pada berbagai material dan pencahayaan.	Menjadi acuan kelayakan sensor jarak, tetapi fokus pada deteksi objek sekitar, bukan pengukuran ketinggian dek.
Maria dan Susianti (2019)	Penerapan VL53L0X dan ATMEGA8535 untuk surface scanner tiga dimensi.	Menjadi acuan penggunaan VL53L0X untuk pengukuran profil permukaan, tetapi belum diterapkan sebagai umpan balik kendali elevasi waktu nyata.
Inoue dkk. (2022); Sathyamoorthy dkk. (2022)	Navigasi robot pemotong rumput dan pemodelan interaksi robot–medan.	Menjadi konteks sistem robot secara keseluruhan; tidak membahas kendali beban motor pemotong atau manajemen daya aktuator.

Tabel 2.1. Perbandingan Penelitian Terdahulu

Berdasarkan penelitian terdahulu, mekanisme elevasi dek, aktuator self-locking, dan sensor jarak time-of-flight masing-masing telah diterapkan secara terpisah pada berbagai konteks robotika. Penelitian ini mengadaptasi dan menggabungkan pendekatan tersebut untuk merancang subsistem elevasi dek robot pemotong rumput yang mengombinasikan umpan balik arus motor, kendali PID diskrit, aktuator self-locking, dan verifikasi ketinggian berbasis

sensor time-of-flight dalam satu kerangka rancangan yang belum banyak dibahas secara terintegrasi pada skala penelitian mahasiswa.

2.2 Landasan Teoritik

Bagian ini menjelaskan konsep dan komponen yang digunakan untuk merancang subsistem elevasi dek dan manajemen daya. Parameter yang disajikan merupakan pendekatan awal yang akan diperiksa dan dikalibrasi pada perangkat fisik.

2.2.1 Hubungan Arus dan Torsi pada Motor DC

Pada motor DC, torsi yang dihasilkan berbanding lurus dengan arus jangkar yang mengalir pada kumparan motor. Hubungan tersebut secara sederhana dinyatakan sebagai berikut:

$$T = K_t \times I$$

Dalam persamaan tersebut, T adalah torsi yang dihasilkan motor, K_t adalah konstanta torsi motor, dan I adalah arus jangkar. Ketika motor pemotong (RS 775) menghadapi beban mekanis yang meningkat akibat rumput lebat, torsi yang dibutuhkan untuk mempertahankan kecepatan putar juga meningkat, sehingga arus yang ditarik motor turut meningkat mengikuti hubungan tersebut. Kondisi arus yang terus meningkat tanpa penurunan beban dapat mengarah pada kondisi stalling, yaitu penurunan drastis kecepatan putar motor yang disertai lonjakan arus mendekati arus stall (>235 mA pada motor yang digunakan). Prinsip inilah yang mendasari penggunaan arus motor sebagai indikator tidak langsung dari beban mekanis yang diterima dek pemotong.

2.2.2 Sensor Arus INA219

INA219 merupakan IC pemantau arus dan daya sisi tinggi (high-side current/power monitor) produksi Texas Instruments yang mengukur tegangan jatuh pada sebuah shunt resistor untuk menghitung arus yang mengalir pada beban. Sensor ini berkomunikasi dengan mikrokontroler melalui antarmuka I2C pada alamat default 0x40, dengan ADC internal 12-bit. Berdasarkan spesifikasi komponen yang digunakan, sensor ini memiliki shunt resistor 0,1 Ω (toleransi 1%), rentang pengukuran tegangan bus 0–26 VDC, dan arus maksimum 3,2 A dengan resolusi 0,8 mA. Nilai arus dan tegangan yang terbaca digunakan untuk menghitung daya sesaat menggunakan hubungan berikut:

$$P = V \times I$$

Nilai arus hasil pembacaan INA219 menjadi variabel proses (process variable) utama pada loop kendali PID subsistem ini, sedangkan nilai daya digunakan pada tahap evaluasi efisiensi energi aktuator.

2.2.3 Driver Motor BTS7960

BTS7960 adalah modul driver motor H-Bridge heavy-duty berbasis dua IC half-bridge yang mampu menangani arus puncak hingga 43 A (kontinu sekitar 15 A) pada tegangan input 6–27 VDC. Modul ini dikendalikan melalui empat jalur sinyal, yaitu RPWM, LPWM, R_EN, dan L_EN, dengan level logika kompatibel 3,3–5 V dan kemampuan PWM hingga 25 kHz. Pada subsistem ini, ESP32 menghasilkan sinyal PWM dan arah berdasarkan keluaran pengendali PID untuk menggerakkan aktuator linear melalui BTS7960, baik pada arah elevasi (naik) maupun penurunan dek.

2.2.4 Kendali PID Diskrit dengan Anti-Windup

Kendali Proportional–Integral–Derivative (PID) diskrit digunakan untuk menghitung sinyal kendali berdasarkan galat antara nilai arus aktual dan nilai setpoint arus aman. Bentuk umum persamaan PID diskrit dinyatakan sebagai berikut:

$$u[k] = K_p\, e[k] + K_i \Sigma\, e[k]\, \Delta t + K^d\, (e[k] - e[k-1]) / \Delta t$$

dengan u[k] adalah sinyal kendali pada waktu cuplik ke-k, e[k] adalah galat arus pada waktu tersebut, serta K_p, K_i, dan K^d masing-masing adalah konstanta proporsional, integral, dan derivatif. Pada rancangan ini, galat dihitung terhadap setpoint arus aman 155 mA, dengan deadband filter yang memaksa galat menjadi nol ketika arus aktual berada pada atau di bawah setpoint, guna mencegah getaran mikro (anti-chattering) pada aktuator. Untuk mengatasi fenomena integral windup pada kondisi beban ekstrem, digunakan mekanisme integral clamping yang membatasi akumulasi suku integral pada rentang ±500. Parameter awal yang direncanakan adalah K_p = 10,0 mA^{-1}, K_i = 0,2 $(mA \cdot s)^{-1}$, dan K^d = 1,0 s/mA, yang akan diperiksa dan disesuaikan melalui pengujian pada perangkat fisik.

2.2.5 Aktuator Linear Self-Locking

Aktuator linear yang digunakan memanfaatkan transmisi worm gear yang memiliki sifat self-locking, yaitu kondisi ketika sudut kisar (lead angle) ulir cacing lebih kecil daripada sudut gesekan ekuivalen antara material worm dan roda gigi pasangannya, sehingga beban pada sisi keluaran tidak dapat menggerakkan balik (backdrive) motor penggerak pada sisi masukan. Sifat ini memungkinkan aktuator mempertahankan posisi dek tanpa memerlukan arus penahan (holding current) saat aktuator dalam kondisi diam, sebagaimana ditunjukkan pada prinsip serupa oleh Shoaib dkk. (2023). Aktuator yang digunakan pada penelitian ini memiliki panjang stroke 100 mm, kapasitas beban 750–1000 N, kecepatan gerak 10–12 mm/s, serta konsumsi arus 1,5–2 A saat bergerak dan mendekati 0 A saat diam pada posisi terkunci.

2.2.6 Sensor Time-of-Flight VL53L0X

VL53L0X adalah sensor pengukur jarak berbasis prinsip time-of-flight (ToF) produksi STMicroelectronics, yang memancarkan pulsa laser inframerah bervektor 940 nm (VCSEL) dan mengukur waktu tempuh pulsa tersebut hingga kembali ke sensor setelah dipantulkan permukaan target. Sensor ini berkomunikasi melalui antarmuka I2C, mampu mengukur jarak pada rentang sekitar 50–1200 mm, dan tidak terlalu dipengaruhi warna maupun tekstur permukaan target dibandingkan sensor jarak berbasis inframerah konvensional, sebagaimana ditunjukkan oleh Laković dkk. (2019). Pada subsistem ini, VL53L0X direncanakan dipasang menghadap ke bawah pada rangka dek untuk memverifikasi jarak aktual dek terhadap permukaan tanah, sebagai pembanding independen terhadap estimasi posisi yang diperoleh dari pergerakan aktuator.

2.2.7 Buck Converter LM2596

LM2596 adalah IC regulator tegangan step-down (buck converter) yang menurunkan tegangan input searah 4–40 VDC menjadi tegangan keluaran yang dapat diatur pada rentang 1,25–35 VDC, dengan arus keluaran maksimum 3 A (direkomendasikan di bawah 2 A untuk operasi kontinu) dan efisiensi konversi hingga 92% pada frekuensi switching 150 kHz. Modul ini digunakan untuk

menurunkan tegangan sumber baterai robot menjadi tegangan kerja yang sesuai bagi ESP32, sensor INA219, dan rangkaian logika lain pada subsistem, sehingga turut memengaruhi total efisiensi daya subsistem secara keseluruhan.

2.2.8 Logika Dua Mode dan Safety Override (State Machine)

Finite State Machine (FSM) digunakan untuk mengatur logika dua mode operasi pada subsistem ini, yaitu mode manual (pengguna menentukan ketinggian target) dan mode otomatis adaptif (dek menyesuaikan posisi berdasarkan umpan balik arus). FSM merepresentasikan sistem sebagai sekumpulan status (state) dan aturan transisi antarstatus berdasarkan kondisi masukan tertentu. Pada rancangan ini, transisi menuju status override keselamatan terjadi ketika nilai arus melampaui ambang bahaya absolut (>200 mA), tanpa memandang status mode yang sedang aktif, sehingga aktuator akan mengangkat dek secara otomatis untuk melindungi motor pemotong dari kerusakan termal. Pendekatan berbasis FSM dipilih karena memberikan struktur logika yang eksplisit dan dapat diverifikasi melalui tabel transisi status sebelum diimplementasikan pada program ESP32.

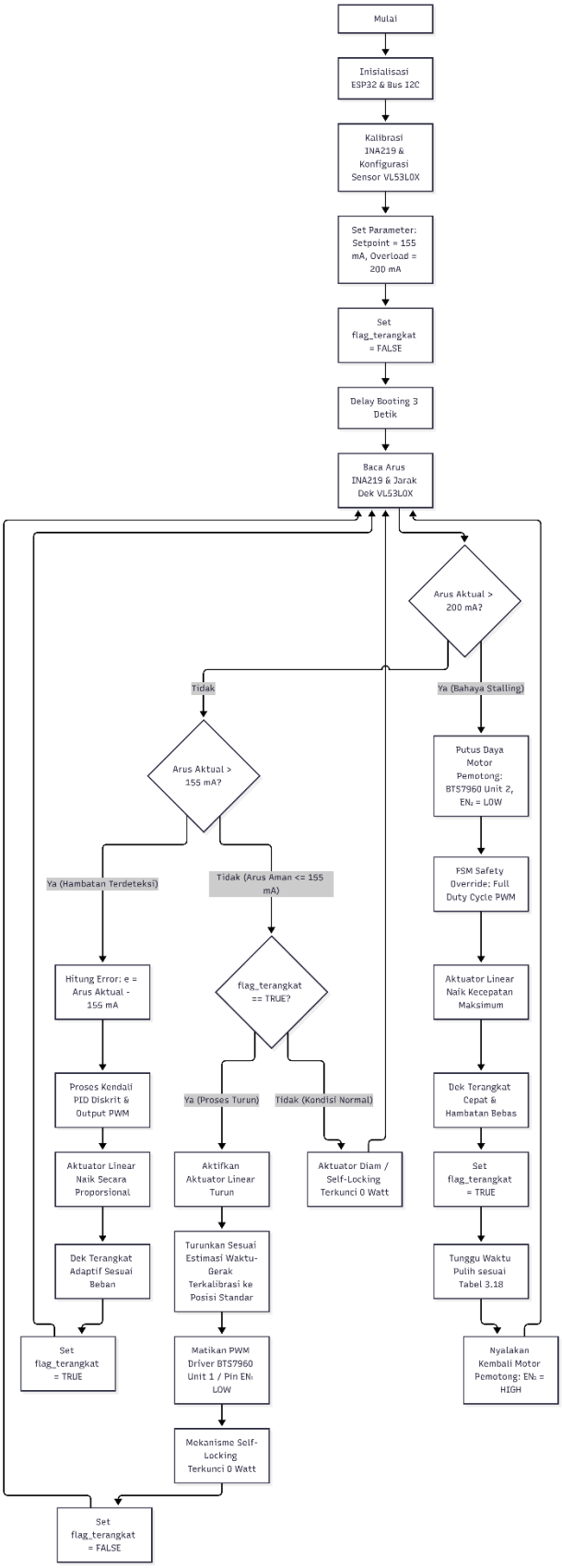
BAB III
METODE PELAKSANAAN

3.1 Pendekatan Perancangan

Perancangan subsistem elevasi dek dan manajemen daya menggunakan pendekatan prototipe iteratif. Rancangan awal diimplementasikan, dikalibrasi, dan diuji; hasil pengukurannya digunakan untuk memperbaiki parameter sebelum pengujian berikutnya. Pendekatan ini diperlukan karena beban motor pemotong berubah menurut tinggi dan kerapatan rumput, sedangkan setpoint arus aman 155 mA, ambang bahaya 200 mA, serta konstanta PID yang direncanakan pada Bab II masih merupakan nilai awal dari pengamatan dan simulasi. Dengan demikian, nilai tersebut perlu diperiksa pada perangkat fisik. Rancangan penyesuaian ketinggian dek mengacu pada Diwakaran dkk. (2023), pemanfaatan sifat self-locking mengacu pada Shoaib dkk. (2023), dan verifikasi jarak dek mengacu pada Laković dkk. (2019).

Pendekatan waterfall linear tidak dipilih karena hasil kalibrasi dan uji beban hampir pasti mengubah konstanta PID, setpoint, dan waktu stabil. Kerangka V-model dipakai hanya sebagai penjenjangan verifikasi di dalam setiap iterasi, yaitu uji bangku pada tiap komponen, uji bangku terintegrasi dengan beban buatan, dan uji lapangan di Lapangan Woodball UNNES. Urutan ini bergerak dari kondisi yang paling terkendali ke kondisi yang paling mendekati penggunaan sebenarnya.

Pada tahap proposal ini, prototipe fisik subsistem belum selesai dirakit, sehingga bab ini menyajikan rancangan dan rencana pengujian. Data yang telah tersedia hanya berupa simulasi MATLAB dan uji pendahuluan pembacaan arus di laboratorium (Subbab 3.4.5).



Gambar 3.1. Alur pendekatan perancangan subsistem elevasi dek

Penerapan setiap tahap pada prototipe diringkas dalam Tabel 3.1. Rincian urutan pekerjaan, teknik perancangan, dan metode pengujian disajikan pada Subbab 3.3 sampai 3.5.

Tahap	Fokus Pekerjaan	Keluaran yang Direncanakan
Identifikasi kebutuhan	Menetapkan fungsi elevasi dek, sensor umpan balik, variabel status yang dikirim ke modul utama, serta indikator kinerja	Spesifikasi fungsi dan kriteria pengujian
Perancangan	Menyusun hubungan arus–beban, pengendali PID diskrit dengan deadband dan integral clamping, FSM dua mode dengan safety override, serta hubungan antarkomponen	Diagram sistem, diagram alir, tabel transisi status, dan parameter awal
Implementasi	Memasang aktuator linear, driver BTS7960, sensor INA219, sensor VL53L0X, dan LM2596 pada ESP32; mengembangkan program C++	Subsistem elevasi dek dan program awal yang dapat diuji
Kalibrasi dan uji subsistem	Uji bangku di laboratorium: mengkalibrasi INA219, mengukur karakteristik arus motor dan aktuator, menguji respons PID, proteksi, dan konsumsi daya dengan beban buatan	Data kalibrasi dan hasil uji untuk menilai rancangan
Analisis dan revisi	Membandingkan hasil uji dengan indikator, menelusuri penyebab penyimpangan, lalu memperbaiki parameter terkait	Rancangan yang diperbarui dan catatan perubahan
Integrasi dan uji lapangan	Menghubungkan variabel status subsistem dengan modul utama dan menguji pada petak di Lapangan Woodball UNNES	Subsistem yang siap diuji bersama sistem robot
Dokumentasi	Mencatat konfigurasi akhir, hasil pengujian, dan keterbatasan prototipe	Bahan evaluasi dan laporan prototipe

Tabel 3.1. Penerapan pendekatan perancangan pada subsistem elevasi dek

Subsistem ini dibatasi pada elevasi cutting deck, kendali arus berbasis PID, proteksi stalling, dan manajemen daya aktuator. Navigasi otonom, kinematika penggerak, dan antarmuka IoT/dashboard utama merupakan tanggung jawab anggota kelompok lain. Subsistem ini hanya menyediakan variabel status berupa mode operasi, ketinggian dek, dan nilai arus motor.

3.2 Lokasi dan Waktu

3.2.1 Lokasi Perancangan dan Pengujian

Lokasi	Kegiatan yang Direncanakan	Peralatan atau Fasilitas Utama	Keluaran
Ruang kerja tim di lingkungan UNNES	Simulasi MATLAB, penyusunan program C++, perancangan diagram wiring dan diagram alir	Laptop, MATLAB, Arduino IDE, dokumen rancangan mekanik	Model, diagram, program, dan konfigurasi awal
Area perakitan dan pengujian terkendali di lingkungan UNNES	Pemasangan komponen dan uji bangku (bench test): kalibrasi INA219, karakterisasi aktuator dan motor pemotong, penyetelan PID, uji proteksi dengan hambatan buatan, uji konsumsi daya	Peralatan perakitan, catu daya, multimeter atau clamp meter DC, mistar/jangka sorong, stopwatch	Rakitan subsistem dan data kalibrasi awal
Lapangan Woodball UNNES	Pengujian respons dek terhadap variasi kerapatan dan tinggi rumput pada permukaan sebenarnya, serta uji terintegrasi	Petak uji, penanda batas, alat ukur tinggi rumput, perangkat pencatat data, fasilitas penghentian darurat	Data kinerja subsistem pada lokasi studi kasus

Tabel 3.2. Lokasi dan fungsi kegiatan perancangan

Nama ruang dan fasilitas perakitan dicantumkan secara spesifik setelah penempatannya ditetapkan. Perubahan lokasi pelaksanaan dicatat karena kondisi tempat pengujian dapat memengaruhi interpretasi hasil. Uji bangku dilakukan lebih dahulu di laboratorium sebelum subsistem dipasang pada robot dan diuji di rumput asli, sehingga penyetelan PID dan proteksi tidak bergantung pada kondisi lapangan yang sulit diulang.

3.2.2 Area dan Kondisi Pengujian Lapangan

Pengujian awal direncanakan pada petak seluas 100 m² di dalam Lapangan Woodball UNNES, yang luas keseluruhannya diperkirakan sekitar 3.058 m² berdasarkan pengukuran awal Google Earth. Bentuk, dimensi sisi, dan posisi petak ditentukan melalui pengukuran langsung sebelum pengujian, karena angka Google Earth hanya merupakan estimasi. Petak dipilih agar memuat

bagian rumput dengan kerapatan dan tinggi yang berbeda sehingga beban motor pemotong dapat bervariasi.

Parameter	Cara Pencatatan yang Direncanakan	Kegunaan
Batas dan luas petak uji	Mengukur dan menandai batas petak hingga luasnya 100 m^2	Menetapkan wilayah pengujian yang dapat diulang
Tinggi rumput	Mengukur tinggi rumput pada beberapa titik dengan mistar	Menjelaskan variasi beban pemotong
Kerapatan rumput	Mengklasifikasikan bagian petak menjadi jarang, sedang, dan lebat secara visual dan mencatat titiknya	Menghubungkan arus motor dengan kondisi vegetasi
Kelembapan dan cuaca	Mencatat waktu, cuaca, dan kondisi rumput basah atau kering	Memastikan hasil dibandingkan pada kondisi terdokumentasi
Kondisi permukaan dan kemiringan	Mencatat bagian tanah yang tidak rata dan kemiringan pada segmen uji	Menentukan kondisi medan yang benar-benar diuji
Tinggi dek standar	Menetapkan dan menandai posisi standar dek pada tanah rata	Menjadi acuan posisi awal dan posisi kembali
Keberadaan pengguna dan halangan	Memeriksa area sebelum robot dioperasikan	Menetapkan zona aman

Tabel 3.3. Data kondisi lokasi yang dicatat sebelum pengujian

Pengujian direncanakan pada siang hari, saat tidak hujan, dan area kerja telah dikosongkan dari pengguna lapangan. Operator mengawasi robot selama percobaan dan dapat mengaktifkan penghentian darurat. Sebelum pengujian dek dengan pisau pemotong aktif, uji awal dilakukan tanpa pisau berputar atau dengan hambatan buatan agar keselamatan operator terjamin. Kondisi rumput yang tidak tercakup dalam percobaan tidak dinyatakan telah teruji.



Gambar 3.2. Tampak kondisi rumput Lapangan Woodball UNNES

3.2.3 Waktu dan Jadwal Pelaksanaan

Pelaksanaan direncanakan selama 16 minggu dalam satu periode pengembangan prototipe. Jadwal pada Tabel 3.4 menunjukkan urutan relatif kegiatan; tanggal kalender disesuaikan dengan jadwal akademik, ketersediaan komponen, dan kesempatan penggunaan lapangan. Kalender ini disamakan dengan kalender kelompok agar integrasi antarsubsistem dapat dilakukan pada minggu yang sama. Pengujian luar ruang dijadwalkan setelah uji proteksi di area terkendali selesai.

Kegiatan	M1-M2	M3-M4	M5-M6	M7-M8	M9-M10	M11-M12	M13-M14	M15-M16
Analisis kebutuhan dan antarmuka status								
Pemeriksaan rancangan mekanik dek dan komponen fisik								
Perakitan aktuator, INA219, VL53L0X, driver, dan catu daya								
Kalibrasi INA219 dan karakterisasi aktuator serta motor pemotong								
Simulasi MATLAB dan penyetelan PID								
Implementasi FSM, uji bangku proteksi stalling, dan penyetelan PID								
Pengujian efisiensi daya aktuator self-locking								

Kegiatan	M1-M2	M3-M4	M5-M6	M7-M8	M9-M10	M11-M12	M13-M14	M15-M16
Integrasi dengan modul utama kelompok								
Survei petak, pengujian lapangan, dan perbaikan parameter								
Pengolahan data dan dokumentasi hasil								

Tabel 3.4. Rencana waktu perancangan subsistem elevasi dek

Keterangan: M = minggu pelaksanaan; kotak berwarna = kegiatan direncanakan berlangsung. Kegiatan yang saling bergantung dapat bergeser apabila hasil kalibrasi atau pengujian memerlukan perbaikan. Setiap pergeseran jadwal dan perubahan rancangan dicatat agar konfigurasi yang digunakan pada pengujian akhir tetap dapat ditelusuri.

3.3 Prosedur Perancangan

Prosedur perancangan dilakukan melalui analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi, pengujian, dan pemeliharaan. Model arus beban, pengendali PID diskrit, dan logika FSM terlebih dahulu disusun dan disimulasikan menggunakan MATLAB pada laptop. Hasil rancangan kemudian diimplementasikan sebagai program C++ pada ESP32 untuk membaca sensor dan mengendalikan aktuator linear. Data hasil pengujian digunakan untuk memperbaiki parameter sebelum pengujian diulang.

3.3.1 Analisis Kebutuhan

Analisis kebutuhan menetapkan komponen, fungsi, dan aliran data pada subsistem. Sensor INA219 mengukur arus motor pemotong RS 775 sebagai variabel proses. ESP32 membaca arus tersebut, menjalankan logika FSM dan PID diskrit, lalu menghasilkan sinyal PWM dan arah ke driver BTS7960 unit 1 yang menggerakkan aktuator linear self-locking untuk menaikkan atau menurunkan dek. ESP32 juga mengendalikan driver BTS7960 unit 2 yang menggerakkan dan dapat memutus daya motor pemotong RS 775 secara elektrik sebagai lapisan proteksi independen dari mekanisme elevasi. Sensor VL53L0X digunakan untuk kalibrasi ketinggian potong pada fitur atur-ketinggian-manual

melalui aplikasi, dengan syarat robot berada di permukaan rata; nilai jarak yang terbaca dikurangi offset tetap sensor-ke-bilah untuk memperoleh ketinggian potong aktual. Selama operasi pemotongan di rumput, posisi dek dipertahankan dari estimasi waktu-gerak aktuator, bukan dari pembacaan VL53L0XModul LM2596 menurunkan tegangan sumber baterai robot menjadi tegangan kerja aktuator dan rangkaian logika.

Subsistem menyediakan tiga variabel status, yaitu mode operasi, ketinggian dek, dan nilai arus motor, kepada modul utama kelompok melalui protokol komunikasi internal. Laptop digunakan untuk simulasi MATLAB, penulisan program melalui Arduino IDE, serta pencatatan dan analisis data pengujian.

No	Komponen	Jumlah	Fungsi dalam Prosedur Perancangan
1	ESP32 Dev Board	1	Membaca sensor, menjalankan FSM dan PID, menghasilkan PWM, serta mengirim variabel status
2	Sensor arus INA219	1	Mengukur arus dan tegangan motor pemotong sebagai umpan balik beban
3	Driver motor BTS7960 (unit 1)	1	Mengatur arah dan besaran penggerak aktuator linear berdasarkan perintah ESP32
4	Aktuator linear self-locking 12 V	1	Menaikkan dan menurunkan dek serta menahan posisi tanpa arus penahan
5	Motor pemotong RS 775	1	Beban yang arusnya dipantau; menjadi indikator kerapatan rumput
6	Sensor VL53L0X	1	Mengukur jarak dek terhadap tanah untuk verifikasi ketinggian
7	Buck converter LM2596	Sesuai rancangan catu daya	Menurunkan tegangan baterai menjadi tegangan kerja aktuator dan logika
8	Laptop dengan MATLAB dan Arduino IDE	1	Simulasi, penulisan program C++, pencatatan dan analisis data
9	Alat ukur acuan (multimeter atau clamp meter DC, mistar atau jangka sorong, stopwatch)	Sesuai kebutuhan uji	Menghasilkan data pembanding yang independen dari INA219 dan VL53L0X

10	Driver motor BTS7960 (unit 2)	1	Menggerakkan dan memutus daya motor pemotong RS 775 berdasarkan perintah ESP32; lapisan proteksi elektrik independen dari elevasi dek

Tabel 3.5. Kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak subsistem elevasi dek

Pada akhir tahap ini, spesifikasi listrik komponen, alamat I²C, nomor pin, kapasitas catu daya, letak pemasangan sensor, dan format pertukaran data dengan modul utama harus tercatat.

3.3.2 Perancangan Sistem

a. Desain Perangkat Keras

Desain perangkat keras menentukan letak aktuator linear, driver BTS7960 unit 1 (aktuator), driver BTS7960 unit 2 (motor pemotong), INA219, VL53L0X, ESP32, dan modul LM2596 pada rangka robot. Aktuator dipasang pada mekanisme dek sehingga langkah 100 mm dapat menaikkan atau menurunkan dek. VL53L0X dipasang menghadap ke bawah pada rangka dek. INA219 dipasang secara seri pada jalur catu motor pemotong (konfigurasi high-side). Rancangan memisahkan jalur daya aktuator dari jalur logika, dan nomor pin serta kapasitas arus ditetapkan sebelum rangkaian diberi daya. Desain fisik dan tabel koneksi dijabarkan pada Subbab 3.4.

b. Arsitektur Perangkat Lunak

Perangkat lunak dibagi menjadi dua lingkungan kerja. MATLAB pada laptop digunakan untuk mensimulasikan respons arus motor dan gerak dek terhadap beban rumput, mencari nilai awal konstanta PID, dan memeriksa logika FSM. Skenario simulasi mencakup kondisi normal, lonjakan beban, pelepasan beban, dan arus melampaui ambang bahaya. Keluaran simulasi disimpan sebagai data acuan implementasi.

Program C++ pada ESP32 dirancang untuk membaca INA219, menyaring pembacaan, memperbarui status FSM, menghitung keluaran PID, membaca VL53L0X, menghasilkan perintah arah dan PWM untuk BTS7960 unit 1 (aktuator), mengendalikan BTS7960 unit 2 untuk menjalankan atau memutus daya motor pemotong, serta mengirim variabel status. Program ditulis dan diunggah melalui Arduino IDE; ketika robot beroperasi, program berjalan

pada ESP32, bukan pada laptop. Pemeriksaan ambang bahaya dijalankan pada setiap siklus sebelum keluaran PID diterapkan, sehingga status override keselamatan dapat mengesampingkan perintah manual maupun keluaran PID.

c. Perancangan Model Kendali dan Logika Proteksi

Pengendali PID diskrit menggunakan galat arus terhadap setpoint arus aman sebagai masukan dan menghasilkan sinyal kendali yang dipetakan menjadi PWM kenaikan dek. Deadband filter, integral clamping, dan batas keluaran PWM dirancang untuk mencegah getaran mikro serta integral windup. Logika dua mode (manual dan otomatis adaptif) dan safety override disusun sebagai Finite State Machine dengan tabel transisi yang dapat diverifikasi sebelum diimplementasikan. Parameter awal mengikuti Subbab 2.2.4 dan 2.2.8 serta ditetapkan pada Subbab 3.4.4. Alur kendali sementara yang telah tersedia (baca arus, bandingkan dengan batas aman, hitung PID, naikkan dek, redam arus, kembali ke posisi standar) dilengkapi dengan mode, overide, dan pembatas posisi. Penyetelan konstanta dilakukan dua tahap: nilai awal dicari melalui simulasi MATLAB, kemudian disetel secara empiris (trial and error terkontrol) pada ESP32 di uji bangku, satu konstanta per iterasi dengan urutan K_p, K_i, lalu Kd, dan setiap perubahan dicatat.

3.3.3 Implementasi

a. Implementasi Perangkat Keras

Aktuator linear dipasang pada mekanisme dek dan dihubungkan ke BTS7960 unit 1. Motor pemotong RS 775 dihubungkan ke BTS7960 unit 2, dengan INA219 dipasang seri di antara keluaran BTS7960 unit 2 dan terminal motor pemotong. VL53L0X dipasang pada rangka dek menghadap ke tanah. ESP32, driver, sensor, dan modul LM2596 dihubungkan mengikuti diagram wiring. Sebelum robot dijalankan, sambungan listrik dan polaritas diperiksa, keluaran LM2596 diatur dan diukur sebelum dihubungkan ke beban. Aktuator diuji terpisah melalui perintah naik, turun, dan berhenti. Pembacaan INA219 dan VL53L0X diperiksa saat motor pemotong diam dan berputar. Hasil pemeriksaan dicatat sebelum seluruh komponen dioperasikan bersama.

b. Implementasi Perangkat Lunak

1. Pada laptop dengan MATLAB, dibuat model simulasi arus motor dan respons dek, kemudian konstanta PID dan logika FSM diperiksa terhadap skenario uji. Keluarannya disimpan sebagai acuan.
2. Pada laptop dengan Arduino IDE, ditulis program C++ untuk ESP32 yang memuat pembacaan INA219 dan VL53L0X, penyaringan arus, FSM, PID diskrit dengan deadband dan integral clamping, pembentukan PWM dan arah untuk BTS7960, serta pengiriman variabel status.
3. Pada ESP32 setelah program diunggah, pembacaan sensor dan perhitungan kendali berjalan berulang dengan periode cuplik tetap. Arus, tegangan, ketinggian, status, keluaran PID, dan PWM dikirim melalui serial untuk pencatatan pengujian.
4. Pada antarmuka dengan modul utama, variabel mode, ketinggian dek, dan arus dikirim menggunakan format yang disepakati.

c. Implementasi Model

Parameter hasil kalibrasi dimasukkan ke program MATLAB dan C++ dengan satuan yang konsisten. Keluaran PID pada ESP32 dibandingkan dengan keluaran simulasi MATLAB untuk deret arus masukan yang sama sebelum aktuator dijalankan menggunakan keluaran pengendali. Batas PWM, batas posisi aktuator, dan keputusan override tetap diberlakukan pada seluruh keluaran.

3.3.4 Pengujian

a. Pengujian Perangkat Keras

1. Menguji motor pemotong melalui BTS7960 unit 2 untuk memeriksa respons ON/OFF dan waktu pemutusan daya saat pin enable diset LOW.
2. Membandingkan pembacaan arus INA219 dengan alat ukur acuan pada beberapa titik arus untuk memperoleh galat dan faktor koreksi.
3. Mengukur arus motor pemotong pada kondisi tanpa beban dan dengan hambatan buatan untuk menentukan nilai dasar, lonjakan, dan arus stall.

4. Membandingkan pembacaan VL53L0X dengan pengukuran mistar pada beberapa ketinggian dek.
5. Memeriksa tegangan keluaran, suhu, dan arus LM2596 serta suhu BTS7960 saat aktuator bergerak.

b. Pengujian Perangkat Lunak

1. Memberikan deret arus masukan yang sama ke simulasi MATLAB dan program ESP32, lalu membandingkan keluaran PID untuk memeriksa kesesuaian implementasi.
2. Menguji deadband dengan arus di sekitar setpoint untuk memastikan aktuator tidak bergetar, serta menguji integral clamping pada beban berkepanjangan.
3. Menguji setiap transisi pada tabel FSM, termasuk perpindahan mode, masuk dan keluar dari override, serta perintah manual yang dikesampingkan saat override.
4. Menguji respons program terhadap pembacaan sensor yang gagal atau tidak valid.
5. Memeriksa bahwa pembacaan sensor dan pengiriman status tetap berlangsung selama aktuator bergerak.

c. Pengujian Model dan Integrasi

1. Pada uji bangku, memberikan hambatan buatan berupa lembar kertas bertingkat pada bilah pengganti (kabel tis) atau rem gesek, lalu mencatat arus, ketinggian dek, dan PWM untuk menghitung waktu respons proteksi serta overshoot arus. Jumlah lembar diubah bertahap agar besar beban dapat diulang.
2. Mengukur konsumsi energi aktuator saat dek diam pada posisi terkunci dan membandingkannya dengan estimasi aktuator konvensional.
3. Menguji integrasi dengan modul utama untuk memastikan variabel status diterima dengan benar.
4. Setelah uji bangku memenuhi kriteria, melaksanakan pengujian awal dengan bilah pemotong sebenarnya pada petak sekitar 100 m^2 di Lapangan Woodball UNNES dan mencatat kondisi rumput,

konfigurasi program, serta hasil setiap pengulangan. Instrumen, rumus, dan kriteria penilaian dijabarkan pada Subbab 3.5.

3.3.5 Pemeliharaan

Setelah pengujian, kondisi sambungan ESP32 dengan sensor, konektor BTS7960 unit 1 dan unit 2, pemasangan aktuator, dudukan VL53L0X, wiring INA219, sekring jalur motor pemotong, serta keluaran LM2596 diperiksa. Program C++ pada ESP32, model MATLAB, parameter kalibrasi, konstanta PID, dan rekaman pengujian disimpan menurut versi. Jika aktuator, motor pemotong, atau posisi sensor berubah, parameter yang terpengaruh dikalibrasi ulang sebelum hasil uji berikutnya dibandingkan.

3.4 Teknik Perancangan

Teknik perancangan mencakup pemilihan komponen, penempatan fisik, pengawatan, penyusunan algoritma PID dan FSM, serta simulasi. Model disimulasikan terlebih dahulu menggunakan MATLAB. Parameter yang telah diperiksa kemudian diterapkan pada program C++ di ESP32. Hubungan antara arus motor, keluaran PID, dan gerak dek ditetapkan melalui kalibrasi, karena arus pada rumput lebat belum tentu sama dengan arus pada hambatan buatan.

3.4.1 Pemilihan Komponen dan Arsitektur Sistem

Komponen dipilih berdasarkan fungsi, kesesuaian tegangan, ketersediaan di pasaran, dan kemudahan pemasangan. Spesifikasi komponen dibedakan dari pengaturan yang ditetapkan dalam rancangan.

a. ESP32 Dev Board

ESP32 digunakan sebagai pengendali subsistem. Program C++ yang ditulis melalui Arduino IDE membaca sensor melalui I²C, menjalankan FSM dan PID, serta menghasilkan PWM untuk BTS7960. Modul ESP-WROOM-32 menyediakan GPIO, I²C, UART, dan pengendali PWM yang mendukung kebutuhan tersebut, serta ESP-NOW jika dipilih untuk komunikasi antarmodul.



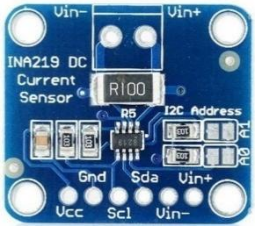
Gambar 3.3. ESP32 Dev Board berbasis ESP-WROOM-32

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	3,3 V; rentang suplai modul 3,0–3,6 V
Antarmuka yang digunakan	I²C (INA219 dan VL53L0X), GPIO PWM (BTS7960), UART/serial (status dan pencatatan)
Pengaturan rancangan	PWM 8 bit dengan nilai perintah 0–255

Tabel 3.6. Spesifikasi ESP32 Dev Board

b. Sensor Arus INA219

INA219 mengukur tegangan jatuh pada shunt resistor untuk menghitung arus dan daya. Sensor dihubungkan seri antara keluaran BTS7960 unit 2 dan terminal motor pemotong RS 775, berkomunikasi dengan ESP32 melalui I²C... Rentang penguatan (PGA) dan kalibrasi sensor pada tahap proposal ini masih mengacu pada nilai awal karakterisasi arus kerja sekitar 115 mA dan lonjakan di atas 235 mA; nilai ini, termasuk kesesuaian rentang ukur INA219 terhadap karakteristik RS 775 yang sesungguhnya, akan diperiksa ulang terhadap alat ukur acuan pada skenario kalibrasi S1



Gambar 3.4. Modul sensor arus INA219

Spesifikasi	Detail
Fungsi	Pemantau arus dan daya sisi tinggi (high-side)
Antarmuka dan alamat	I²C, alamat default 0x40

ADC	12 bit
Shunt resistor	0,1 Ω (toleransi 1%)
Rentang tegangan bus	0–26 VDC
Arus maksimum dan resolusi	3,2 A dengan resolusi 0,8 mA (sesuai spesifikasi modul yang digunakan)
Pengaturan rancangan	Pemasangan seri pada jalur motor pemotong; kalibrasi terhadap alat ukur acuan

Tabel 3.7. Spesifikasi sensor arus INA219

c. Driver Motor BTS7960

Digunakan dua unit modul BTS7960 dengan spesifikasi identik. Unit 1 menggerakkan aktuator linear berdasarkan sinyal ESP32, dengan RPWM untuk arah naik dan LPWM untuk arah turun sehingga aktuator dapat bergerak dua arah. Unit 2 menggerakkan motor pemotong RS 775 yang hanya berputar satu arah, sehingga hanya jalur RPWM yang dipakai untuk kendali ON/OFF, sedangkan LPWM ditahan LOW permanen. Pin enable (R_EN dan L_EN) pada unit 2 disatukan sebagai saklar pemutus daya elektrik yang dikendalikan FSM, independen dari mekanisme elevasi dek.



Gambar 3.5. Modul driver motor BTS7960

Spesifikasi	Detail
Tipe modul	H-Bridge dengan dua IC half-bridge BTS7960
Rentang tegangan masukan	6–27 VDC
Arus	Puncak hingga 43 A; kontinu sekitar 15 A
Pin kendali	RPWM, LPWM, R_EN, dan L_EN
Level logika dan PWM	3,3–5 V; PWM hingga 25 kHz
Suplai daya pada rancangan	12 V untuk aktuator melalui terminal B+ dan B−

Tabel 3.8. Spesifikasi driver BTS7960

d. Aktuator Linear Self-Locking

Aktuator linear dengan transmisi worm gear digunakan untuk menaikkan dan menurunkan dek. Sudut kisar ulir yang lebih kecil daripada sudut gesekan ekuivalen membuat beban pada sisi keluaran tidak dapat menggerakkan balik

motor sehingga dek tertahan tanpa arus penahan (Shoaib dkk., 2023). Konsumsi arus saat diam akan diukur karena nilai mendekati 0 A merupakan spesifikasi, bukan hasil pengujian.



Gambar 3.6. Aktuator linear self-locking

Spesifikasi	Detail
Tegangan kerja	12 V
Panjang stroke	100 mm
Kapasitas beban	750–1000 N
Kecepatan gerak	10–12 mm/s
Konsumsi arus	1,5–2 A saat bergerak; mendekati 0 A saat diam terkunci
Sifat mekanis	Self-locking (non-backdrivable) pada transmisi worm gear

Tabel 3.9. Spesifikasi aktuator linear

e. Motor Pemotong RS 775

Motor pemotong RS 775 merupakan beban yang arusnya dipantau dan dayanya dikendalikan melalui BTS7960 unit 2. Nilai arus nominal dan arus stall pada subbab ini masih merupakan nilai awal dari karakterisasi pendahuluan dan akan diverifikasi ulang terhadap spesifikasi RS 775 yang sesungguhnya pada tahap kalibrasi. Saat rumput lebat mengenai pisau, putaran turun dan arus meningkat dari kisaran nominal sekitar 115 mA hingga lebih dari 235 mA. Kenaikan arus ini digunakan sebagai indikator tidak langsung beban mekanis pada dek. Hubungan antara arus dan torsi mengikuti persamaan $T = K_t \times I$ pada Subbab 2.2.1.



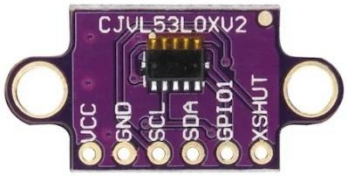
Gambar 3.7. Motor pemotong RS 775

Spesifikasi	Detail
Model	RS 775
Fungsi	Penggerak pisau pemotong
Arus nominal	Sekitar 115 mA pada kondisi normal
Arus stall	Lebih dari 235 mA
Tegangan nominal dan RPM	Diperiksa dari label atau datasheet motor yang digunakan dan dicatat sebelum uji

Tabel 3.10. Spesifikasi motor pemotong RS 775

f. Sensor Time-of-Flight VL53L0X

VL53L0X mengukur jarak berdasarkan waktu tempuh pulsa laser inframerah. Sensor dipasang menghadap ke bawah pada rangka dek dan digunakan pada fitur atur-ketinggian-manual melalui aplikasi, dengan syarat robot berada di permukaan rata — idealnya saat berada di dok pengisian daya. Ketinggian potong dihitung sebagai selisih antara jarak hasil pembacaan VL53L0X dan jarak tetap sensor-ke-ujung bilah (offset hasil kalibrasi mekanis saat perakitan). Setelah ketinggian target tercapai, posisi tersebut dipertahankan selama pemotongan berlangsung menggunakan estimasi posisi berbasis waktu-gerak aktuator, mengingat permukaan kanopi rumput dapat memantulkan pulsa secara tidak beraturan (Laković dkk., 2019; Maria dan Susianti, 2019) sehingga pembacaan VL53L0X di atas rumput tidak digunakan sebagai umpan balik kendali waktu nyata.



Gambar 3.8. Modul sensor VL53L0X

Spesifikasi	Detail
Prinsip kerja	Time-of-flight, laser inframerah 940 nm (VCSEL)
Rentang ukur	Sekitar 50–1200 mm
Antarmuka	I^2C (alamat default 0x29)
Pengaturan rancangan	Dipasang menghadap ke bawah pada rangka dek; dipakai untuk kalibrasi ketinggian potong saat robot di permukaan rata, dengan offset tetap sensor-ke-bilah dikurangkan dari hasil baca

Tabel 3.11. Spesifikasi sensor VL53L0X

g. Buck Converter LM2596

LM2596 menurunkan tegangan baterai robot menjadi tegangan kerja subsistem. Karena aktuator menarik 1,5–2 A saat bergerak, sedangkan arus keluaran yang direkomendasikan untuk operasi kontinu di bawah 2 A, jalur aktuator dirancang menggunakan modul LM2596 tersendiri yang terpisah dari jalur logika, dan suhunya dipantau saat pengujian.



Gambar 3.9. Modul buck converter LM2596

Spesifikasi	Detail
Tegangan masukan	4–40 VDC
Tegangan keluaran	1,25–35 VDC (dapat diatur)
Arus keluaran	Maksimum 3 A; direkomendasikan di bawah 2 A untuk operasi kontinu
Efisiensi dan frekuensi	Hingga 92% pada 150 kHz

Tabel 3.12. Spesifikasi buck converter LM2596

h. Rancangan Catu Daya

Sumber daya berasal dari baterai robot; tegangan nominal mengikuti rancangan platform kelompok. Pembagian jalur daya subsistem ini diringkas pada Tabel 3.13. Nilai tegangan dan arus akan diukur sebelum komponen dihubungkan.

Jalur	Sumber	Beban	Catatan
12 V	LM2596 (unit 1) dari baterai robot	Aktuator linear melalui BTS7960 (B+ dan B−)	Arus 1,5–2 A saat bergerak; diukur dan dipantau suhunya
5 V	LM2596 (unit 2) dari baterai robot	ESP32 (VIN), tombol, dan LED indikator	Terpisah dari jalur aktuator untuk mengurangi derau
3,3 V	Regulator ESP32	INA219, VL53L0X, dan pin VCC logika BTS7960 (varian modul dengan buffer 74HC244)	Level logika BTS7960 diperiksa pada modul yang dibeli

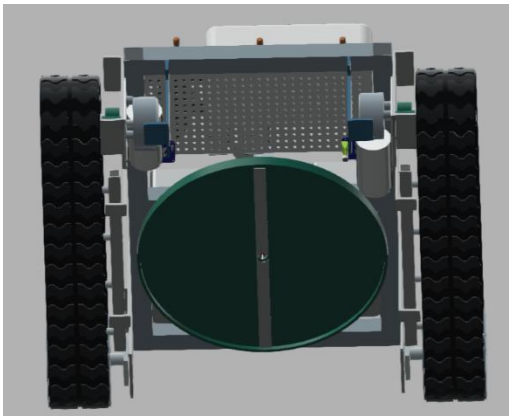
GND	Bersama	Seluruh komponen	Ground bersama untuk sinyal ESP32, sensor, dan driver
12 V (Motor Pemotong)	Baterai robot langsung (tanpa LM2596)	Motor pemotong RS 775 melalui BTS7960 unit 2	Jalur terpisah dengan sekring tersendiri (indikatif 10 A); tidak diregulasi karena RS 775 toleran tegangan baterai langsung

Tabel 3.13. Rancangan jalur catu daya subsistem

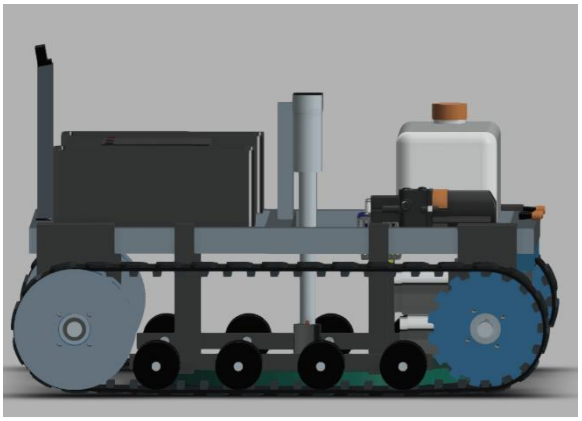
3.4.2 Desain Fisik

a. Tata Letak Komponen

Desain fisik menetapkan posisi aktuator terhadap dek, dudukan VL53L0X, dan kotak elektronik pada rangka robot. Posisi aktuator harus menghasilkan langkah 100 mm yang cukup untuk mengangkat dek dari posisi standar ke posisi aman tanpa membebani sambungan secara menyamping. Jarak bebas dek terhadap tanah pada posisi standar dan posisi terangkat ditetapkan setelah pengukuran pada rakitan fisik.



Gambar 3.10. Tata letak dek dan aktuator (tampak bawah)



Gambar 3.11. Tata letak komponen aktuator (tampak samping

b. Material dan Sambungan

Material dipilih untuk menopang komponen, menyediakan tempat pengikat, dan memudahkan perawatan. Ukuran penampang dan ketebalan pelat ditetapkan setelah penyesuaian terhadap rangka robot.

Bagian	Material Rancangan	Fungsi
Dudukan aktuator	Braket logam dengan baut dan mur	Menahan aktuator dan menyalurkan gaya angkat ke dek
Dudukan VL53L0X	Braket ringan atau cetak 3D	Menjaga sensor menghadap ke tanah dengan sudut tetap
Kotak elektronik	Termoplastik hasil cetak 3D	Menempatkan ESP32, BTS7960 (2 unit), INA219, LM2596, dan jalur kabel.
Pengikat dan penahan kabel	Klem dan cable ties	Menjaga jalur kabel tetap rapi dan tidak tertarik saat dek bergerak

Tabel 3.14. Material rancangan fisik

c. Teknik Desain Menggunakan Autodesk Fusion

Autodesk Fusion digunakan untuk membuat model tiga dimensi parametrik dudukan dan tata letak. Ukuran dudukan, posisi aktuator, dan jarak antarkomponen dijadikan parameter sehingga perubahan ukuran dapat diterapkan tanpa menggambar ulang.

1. Membuat model dek dan rangka berdasarkan ukuran aktual hasil pengukuran, kemudian menyusun posisi aktuator pada rakitan.

2. Mensimulasikan gerak aktuator sepanjang langkah 100 mm untuk memeriksa tabrakan antarkomponen dan jarak bebas dek terhadap tanah.
3. Menentukan lubang pengikat, ruang konektor, dan akses perawatan pada kotak elektronik.
4. Menyiapkan gambar kerja dudukan dan rakitan.

3.4.3 Desain Wiring

Desain wiring memisahkan subsistem menjadi tiga domain, yaitu domain daya aktuator 12 V yang berarus paling besar, domain logika 5 V dan 3,3 V untuk ESP32 dan sensor, serta domain sinyal (I^2C, PWM, dan UART). Pemisahan ini mengurangi derau pada pembacaan arus INA219, yang menjadi variabel proses seluruh loop kendali. Seluruh domain berbagi satu titik ground agar level sinyal konsisten.

a. Jalur Daya

Sumber daya berasal dari baterai robot (mengikuti platform kelompok). Dari baterai, daya melewati sakelar utama dan tombol darurat yang memutus jalur daya, bukan hanya sinyal. Setelah itu daya dibagi ke dua modul LM2596. Unit 1 diatur ke 12 V dan hanya melayani aktuator melalui terminal B+ dan B− pada BTS7960, dengan sekring 3 A pada keluarannya (nilai final mengikuti arus terukur). Unit 2 diatur ke 5 V dan melayani ESP32 melalui pin VIN. Dari ESP32, regulator 3,3 V menyuplai INA219, VL53L0X, dan pin VCC logika BTS7960. Kapasitor elektrolit tambahan 470–1000 µF dapat dipasang di dekat B+ dan B− apabila teramati penurunan tegangan saat aktuator mulai bergerak. Keluaran kedua LM2596 diatur dan diukur tanpa beban sebelum dihubungkan.

INA219 dipasang seri pada kabel positif catu motor pemotong (konfigurasi high-side): sumber positif ke VIN+, VIN− ke terminal positif motor, sedangkan terminal negatif motor tetap ke ground. Tegangan bus INA219 dibatasi 26 V, sehingga sensor tidak boleh dipasang langsung pada jalur baterai 24 V yang terisi penuh apabila tegangannya dapat melampaui batas tersebut. Tegangan pada titik pemasangan diukur terlebih dahulu.

b. Alokasi Pin ESP32

Alokasi pin pada Tabel 3.15 dipilih dengan menghindari pin strapping (GPIO0, 2, 12, dan 15), pin flash (GPIO6–11), serta pin masukan saja tanpa pull-up internal (GPIO34–39). Skema ini merupakan rekomendasi rancangan dan dapat disesuaikan bila bentrok dengan pin yang dipakai subsistem lain.

Pin ESP32	Terhubung ke	Fungsi dan Alasan Pemilihan
GPIO21 (SDA)	SDA INA219 dan VL53L0X	Jalur data I²C bawaan; alamat 0x40 dan 0x29 tidak bentrok
GPIO22 (SCL)	SCL INA219 dan VL53L0X	Jalur clock I²C bawaan
GPIO25	RPWM BTS7960	PWM arah naik (kanal LEDC 0)
GPIO26	LPWM BTS7960	PWM arah turun (kanal LEDC 1); hanya satu jalur aktif pada satu waktu
GPIO27	R_EN dan L_EN BTS7960	Enable bersama; LOW memutus driver pada status FAULT
GPIO32	Tombol NAIK	Masukan mode manual (INPUT_PULLUP, aktif LOW)
GPIO33	Tombol TURUN	Masukan mode manual (INPUT_PULLUP, aktif LOW)
GPIO13	Tombol MODE	Pindah manual dan otomatis (INPUT_PULLUP)
GPIO4	LED merah melalui resistor 330 Ω	Indikator override keselamatan
GPIO18	LED hijau melalui resistor 330 Ω	Indikator mode otomatis
GPIO16 (RX2)	TX modul utama	Menerima perintah (UART2)
GPIO17 (TX2)	RX modul utama	Mengirim variabel status (UART2)
VIN, 3V3, GND	LM2596 unit 2 (5 V), catu sensor, ground bersama	Catu ESP32 dan sensor
GPIO19	RPWM BTS7960 unit 2 (motor pemotong)	PWM kendali ON/OFF motor pemotong (kanal LEDC 2)
GPIO23	R_EN + L_EN BTS7960 unit 2 (disatukan)	Enable; LOW memutus daya motor pemotong secara elektrik dipicu saat OVERRIDE berkepanjangan atau FAULT

Tabel 3.15. Rekomendasi alokasi pin ESP32 subsistem elevasi dek

Frekuensi PWM awal diusulkan 20 kHz dengan resolusi 8 bit agar tidak terdengar, dan ditetapkan final melalui uji bangku.

c. Sambungan Driver dan Aktuator

Pin/Terminal Modul	Disambungkan ke	Catatan
VCC BTS7960	3V3 ESP32	Untuk varian dengan buffer 74HC244; jika tidak, gunakan pergeser level
GND	Ground bersama	Ground logika
RPWM / LPWM	GPIO25 / GPIO26	Pull-down 10 kΩ ke ground agar aktuator diam saat ESP32 reset
R_EN dan L_EN	GPIO27	Pull-down 10 kΩ; dua pin disatukan
R_IS dan L_IS	Tidak dipakai	Keluaran pengukur arus driver, dicadangkan untuk pengembangan
B+ dan B−	+12 V dan ground daya (LM2596 unit 1)	Melalui sekring 3 A
M+ dan M−	Kabel aktuator (merah dan hitam)	Bila arah gerak terbalik, tukar kedua kabel

Tabel 3.16. Sambungan driver BTS7960 unit 1 dan aktuator linear

Pin/Terminal Modul	Disambungkan ke	Catatan
VCC	3V3 ESP32	Sama seperti unit 1
GND	Ground bersama	Ground logika
RPWM	GPIO19	Pull-down 10 kΩ ke ground agar motor diam saat ESP32 reset
LPWM	Ground (ditahan LOW permanen)	Arah mundur tidak dipakai
R_EN dan L_EN	GPIO23	Pull-down 10 kΩ; dua pin disatukan
B+ dan B−	+12 V langsung dari baterai dan ground daya	Melalui sekring tersendiri, terpisah dari jalur LM2596
M+ dan M−	VIN+ INA219 (diteruskan ke motor RS 775) dan terminal negatif motor RS 775	M+ melewati INA219 agar arus motor terukur

Tabel 3.17. Sambungan driver BTS7960 unit 1 dan aktuator linear

d. Sambungan Sensor

Komponen dan Pin	Disambungkan ke	Catatan

INA219: VCC dan GND	3V3 dan ground bersama	Ground harus sama dengan ESP32
INA219: SDA dan SCL	GPIO21 dan GPIO22	Alamat 0x40
INA219: VIN+ dan VIN−	Keluaran M+ BTS7960 unit 2 dan terminal positif motor pemotong RS 775 | Seri, high-side; tegangan ≤ 26 V	Seri, high-side; tegangan ≤ 26 V
VL53L0X: VIN dan GND	3V3 dan ground bersama	Sesuai tegangan modul
VL53L0X: SDA dan SCL	GPIO21 dan GPIO22 (bus bersama)	Alamat 0x29
VL53L0X: XSHUT dan GPIO1	Tidak dipakai	XSHUT disediakan bila alamat perlu diubah

Tabel 3.18. Sambungan sensor INA219 dan VL53L0X

e. Praktik Pengawatan dan Proteksi

1. Ground disatukan pada satu titik (busbar atau terminal ground LM2596 unit 2) agar arus aktuator tidak mengalir melalui jalur ground sensor.
2. Kabel daya aktuator dipisahkan dari kabel I²C. Kabel I²C dijaga pendek (sekitar 30 cm); bila VL53L0X berada jauh, dipakai kabel berpilin atau berperisai dan kecepatan bus diturunkan ke 100 kHz. Resistor pull-up I²C 4,7 kΩ ke 3,3 V diperiksa agar tidak terpasang paralel berlebihan pada beberapa modul.
3. Kapasitor 100 nF dipasang dekat pin catu sensor untuk meredam derau.
4. Penampang kabel daya aktuator minimal 0,75 mm² (sekitar AWG 18), sedangkan kabel sinyal sekitar AWG 24–26.
5. Kabel yang ikut bergerak bersama dek (aktuator dan VL53L0X) diberi penahan tarik dan lengkungan longgar agar tidak tertarik saat dek naik dan turun. Seluruh kabel diberi label dan memakai konektor terminal atau konektor berkunci.
6. Saat ESP32 diprogram lewat USB, catu 5 V dari LM2596 dilepas dari pin VIN atau dipisahkan dengan dioda untuk mencegah dua sumber 5 V bertemu.

7. Sebelum daya diberikan, dilakukan uji kontinuitas, pemeriksaan polaritas, dan pengukuran keluaran LM2596 tanpa beban.
8. Jalur daya motor pemotong (BTS7960 unit 2) diberi sekring tersendiri dan dipisahkan secara fisik dari jalur daya aktuator maupun jalur logika, mengikuti prinsip pemisahan domain yang sama seperti jalur aktuator.

f. Panduan Penyusunan Gambar Wiring

Pada komponen baterai, sakelar utama, tombol darurat, dan sekring, yang bercabang ke LM2596 unit 1 (12 V) dan unit 2 (5 V). ESP32 diletakkan di tengah dan menerima 5 V pada VIN. Pada komponen BTS7960 unit 1 yang menerima 12 V pada B+ dan B−, dihubungkan ke ESP32 melalui GPIO25, GPIO26, dan GPIO27, dan menggerakkan aktuator pada terminal M+ dan M−. Di bawahnya digambar BTS7960 unit 2 yang menerima 12 V langsung dari baterai melalui sekring tersendiri, dihubungkan ke ESP32 melalui GPIO19 dan GPIO23, dengan INA219 disisipkan pada jalur M+ menuju motor pemotong.INA219 digambar pada garis catu motor pemotong di bagian bawah, dengan SDA dan SCL menuju ESP32. VL53L0X digambar di bagian atas dan berbagi jalur SDA dan SCL yang sama. Konektor UART ke modul utama digambar di tepi atas ESP32 dengan TX dan RX bersilang. Konvensi warna yang disarankan adalah merah untuk +12 V, oranye untuk +5 V, kuning untuk +3,3 V, hitam untuk ground, hijau untuk SDA, biru untuk SCL, ungu untuk PWM dan enable, serta abu-abu untuk UART.

3.4.4 Perancangan Algoritma Kendali dan Logika Proteksi

a. Pembacaan dan Penyaringan Arus

Arus dibaca oleh INA219 pada periode cuplik T_s yang tetap. Data uji pendahuluan memperlihatkan fluktuasi arus yang cukup besar antarcuplikan, sehingga penyaringan sederhana berupa rata-rata bergerak beberapa cuplikan diterapkan sebelum nilai dipakai oleh PID. Jumlah cuplikan dipilih agar derau berkurang tanpa menunda deteksi lonjakan, dan ditetapkan melalui pengujian.

b. PID Diskrit dengan Deadband dan Integral Clamping

Galat arus dihitung terhadap setpoint arus aman I_set = 155 mA. Deadband filter memaksa galat menjadi nol ketika arus aktual berada pada atau di bawah setpoint:

$$e[k] = I_aktual[k] - I_set, \text{ bila } I_aktual[k] > I_set; \; e[k] = 0, \text{ bila } I_aktual[k] \leq I_set$$

$$u[k] = K_p\, e[k] + K_i \Sigma\, e[k]\, \Delta t + Kd\, (e[k] - e[k-1]) / \Delta t$$

Suku integral dibatasi (clamping) pada rentang ±500 untuk mencegah integral windup. Keluaran u[k] dibatasi pada 0–255 dan dipetakan menjadi PWM RPWM (arah naik). Ketika arus kembali normal, dek diturunkan bertahap ke posisi standar setelah arus berada di bawah setpoint selama waktu stabil tertentu. Pada saat itu suku integral dikosongkan agar sisa akumulasi tidak menaikkan dek secara tidak perlu. Pemilihan pengosongan integral ini diverifikasi pada pengujian.

Parameter	Nilai Awal	Keterangan
Periode cuplik (T_s)	50 ms (usulan)	Diperiksa terhadap waktu konversi INA219 dan beban proses ESP32
Setpoint arus aman (I_set)	155 mA	Deadband: e = 0 bila I ≤ I_set
Ambang bahaya absolut (I_bahaya)	200 mA	Memicu override keselamatan
K_p	10,0	Nilai awal Subbab 2.2.4; disetel melalui pengujian
K_i	0,2	Nilai awal Subbab 2.2.4; disetel melalui pengujian
Kd	1,0	Nilai awal Subbab 2.2.4; disetel melalui pengujian
Batas integral	±500	Integral clamping
Batas keluaran PWM	0–255	PWM 8 bit
Arus stall acuan	235 mA	Batas atas yang dihindari pada pengujian
Waktu stabil dan waktu pulih	Awal 2 s (usulan)	Ditentukan melalui pengujian
Offset sensor-ke-bilah (*d*~offset~)	Diukur saat perakitan	Konstanta mekanis untuk menghitung ketinggian potong pada mode kalibrasi manual

Tabel 3.19. Parameter awal pengendali dan proteksi

c. Finite State Machine Dua Mode dan Safety Override

FSM mengatur status INIT, MANUAL, AUTO, OVERRIDE, dan FAULT. Pada mode MANUAL, operator menentukan ketinggian target. Pada mode AUTO, dek menyesuaikan posisi berdasarkan umpan balik arus melalui PID. Status OVERRIDE terjadi ketika arus melampaui I_bahaya, tanpa memandang mode yang aktif; aktuator mengangkat dek dan secara bersamaan BTS7960 unit 2 memutus daya motor pemotong secara elektrik (EN_2 = LOW) sebagai lapisan proteksi yang tidak bergantung pada keberhasilan mekanisme elevasi. Selama OVERRIDE, perintah manual yang menurunkan dek diabaikan. Karena aktuator tidak memiliki umpan balik posisi sendiri, posisi diestimasi dari lama gerak dan kecepatan aktuator hasil kalibrasi, lalu dikoreksi dengan VL53L0X agar galat akumulasi tidak membesar. Batas atas dan bawah langkah 100 mm dijaga oleh program dan oleh saklar batas internal aktuator bila tersedia.

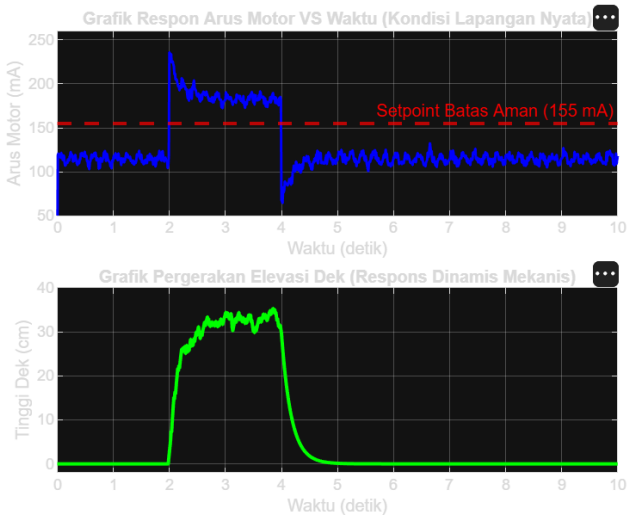
Status Asal	**Kondisi atau Kejadian**	**Status Tujuan**	**Aksi**
INIT	INA219 dan VL53L0X merespons; dek pada posisi standar	MANUAL	Mengatur nilai awal dan mengirim status
INIT	Sensor tidak merespons	FAULT	Aktuator dihentikan; flag kesalahan dikirim
MANUAL	Perintah pilih mode otomatis	AUTO	Menyalakan PID dan mengosongkan integral
AUTO	Perintah pilih mode manual	MANUAL	Aktuator mengikuti target manual
AUTO	I > I_set	AUTO (naik)	PID menaikkan dek secara proporsional
AUTO	I ≤ I_set selama waktu stabil	AUTO (turun ke standar)	Dek diturunkan bertahap ke posisi standar lalu aktuator dihentikan dan terkunci
MANUAL atau AUTO	I > I_bahaya	OVERRIDE	Dek diangkat; perintah manual turun dikesampingkan
OVERRIDE	I ≤ I_set selama waktu pulih	Mode sebelumnya	Override dilepas; kendali kembali ke mode sebelumnya

Semua status	Pembacaan INA219 gagal atau tidak valid	FAULT	Aktuator dihentikan; status dikirim ke modul utama

Tabel 3.20. Tabel transisi status FSM

3.4.5 Simulasi MATLAB dan Uji Pendahuluan

Simulasi MATLAB (bukan pengukuran lapangan) memodelkan arus motor pemotong dengan nilai dasar sekitar 115 mA yang berderau. Beban rumput lebat ditambahkan pada detik ke-2 hingga ke-4, sehingga arus melonjak hingga sekitar 235 mA, kemudian bertahan sekitar 185 mA ketika dek naik, dan kembali ke sekitar 115 mA setelah beban dilepas. Arus selama beban masih di atas setpoint 155 mA tetapi di bawah ambang bahaya 200 mA, sehingga perilaku PID pada rentang 155–200 mA menjadi bagian yang dievaluasi pada pengujian. Skala ketinggian dek pada simulasi awal disesuaikan dengan langkah aktuator 100 mm sebelum dijadikan acuan.



Gambar 3.12. Hasil simulasi MATLAB respons arus motor dan elevasi dek

Uji pendahuluan pembacaan arus dilakukan di laboratorium dengan peralatan seadanya. Bilah pemotong rumput belum dipasang sehingga digunakan kabel tis sebagai bilah pengganti, dan hambatan diberikan menggunakan lembar kertas. Arus dibaca melalui Serial Plotter pada 115200 baud dalam dua kondisi. Pada kondisi normal, arus berfluktuasi pada kisaran sekitar 30–120 mA dan tetap di bawah batas 155 mA. Pada kondisi dengan hambatan kertas, arus beberapa kali melampaui batas 155 mA dengan puncak

sekitar 232 mA. Hasil ini menunjukkan bahwa pembacaan arus dapat membedakan kondisi normal dan berbeban, sekaligus memperlihatkan derau yang perlu disaring. Uji ini belum memakai bilah pemotong sebenarnya dan belum mencakup aktuator maupun dek.



Gambar 3.13. Hasil uji pendahuluan pembacaan arus pada kondisi normal dan hambatan kertas

3.4.6 Antarmuka Variabel Status

Subsistem mengirim tiga variabel status, yaitu mode, ketinggian dek, dan arus motor, ke modul utama kelompok. Dari tiga protokol yang tersedia, dipilih UART (serial) sebagai protokol utama dengan alasan berikut. I²C tidak dipilih karena ESP32 subsistem ini sudah menjadi master bus I²C untuk INA219 dan VL53L0X, sehingga menjadikannya slave pada modul utama menambah kerumitan dan risiko bentrok alamat. ESP-NOW tidak dipilih sebagai protokol utama karena seluruh modul berada pada satu robot sehingga sambungan kabel

lebih dapat diandalkan dibandingkan sambungan nirkabel; ESP-NOW tetap menjadi cadangan bila modul utama tidak dapat dikabel. UART sederhana, mudah diamati melalui Serial Monitor, dan didukung baik oleh ESP32 maupun Orange Pi 4 Pro.

Sambungan UART memakai TX2 dan RX2 ESP32 (GPIO17 dan GPIO16) yang dihubungkan silang ke RX dan TX modul utama, dengan ground bersama. Kedua sisi berlogika 3,3 V sehingga tidak diperlukan pergeser level; hal ini diverifikasi pada modul yang digunakan. Pengaturan komunikasi adalah 115200 baud, 8 bit data, tanpa paritas, 1 stop bit.

Variabel	Satuan atau Nilai	Keterangan
Mode	0 = INIT, 1 = MANUAL, 2 = AUTO, 3 = OVERRIDE, 4 = FAULT	Status FSM saat ini
Ketinggian dek	mm	Dari VL53L0X, dengan estimasi posisi aktuator sebagai pembanding
Arus motor pemotong	mA	Nilai INA219 yang telah disaring
Flag override atau kesalahan	0 atau 1	Menandai override keselamatan atau kegagalan sensor

Tabel 3.21. Variabel status yang dikirim ke modul utama

Pesan	Arah	Format	Laju
Status	Subsistem → modul utama	$ELV,mode,tinggi_mm,arus_mA,flag*CS*	5 Hz
Perintah	Modul utama → subsistem	$CMD,mode,target_mm*CS*	Saat diperlukan

Tabel 3.22. Format pesan komunikasi UART

CS adalah checksum berupa hasil XOR seluruh karakter di antara tanda $ dan , ditulis dua digit heksadesimal, dan setiap pesan diakhiri karakter baris baru. Pesan dengan checksum salah dibuang. Nilai target_mm hanya diproses pada mode MANUAL. Keputusan override keselamatan diambil secara lokal oleh ESP32 dan tidak menunggu modul utama, sehingga kegagalan komunikasi tidak menonaktifkan proteksi. Apabila perintah tidak diterima, dek tetap pada

posisi terakhir dan status tetap dikirim. Laju kirim dan format final dikonfirmasi bersama anggota kelompok pada tahap integrasi.

3.5 Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

3.5.1 Instrumen Pengumpulan Data

Instrumen	Besaran	Kegunaan
INA219 dan ESP32 (Serial Monitor atau Serial Plotter, dicatat dalam CSV)	Arus, tegangan, daya, PWM, status FSM, dan penanda waktu	Data utama respons kendali dan energi
Multimeter atau clamp meter DC	Arus dan tegangan acuan	Kalibrasi dan verifikasi INA219
Mistar atau jangka sorong	Ketinggian dek dan tinggi rumput	Acuan untuk VL53L0X dan pencatatan kondisi rumput
VL53L0X	Jarak dek terhadap tanah	Pengukuran ketinggian dek
Penanda waktu millis() dan stopwatch	Waktu	Waktu respons proteksi
Tachometer (bila tersedia)	Putaran motor pemotong	Melihat penurunan putaran saat beban meningkat
Laptop dengan MATLAB	Data terekam	Pengolahan grafik dan perhitungan indikator

Tabel 3.23. Instrumen pengumpulan data

3.5.2 Skenario dan Prosedur Pengujian

Kode	Skenario	Kondisi dan Data yang Dicatat	Ulangan
S1	Kalibrasi INA219	Membandingkan arus INA219 dengan alat ukur acuan pada 10 titik arus dalam rentang 50–300 mA	3 per titik
S2	Kondisi normal	Motor pemotong berputar tanpa hambatan 60 detik; mencatat arus dasar, derau, dan PWM aktuator	5
S3	Hambatan buatan	Memberi hambatan pada pisau; mencatat arus, waktu respons proteksi, overshoot, dan ketinggian dek	10
S4	Safety override	Arus melampaui 200 mA saat mode manual diberi perintah turun; memeriksa dek tetap terangkat dan daya motor pemotong terputus (EN_2 LOW) dalam waktu yang ditentukan	10

S5	Efisiensi daya	Dek diam 10 menit pada posisi terkunci; mengukur arus dan energi aktuator dan membandingkannya dengan estimasi konvensional	5
S6	Uji lapangan	Petak 100 m² dengan kerapatan rumput jarang, sedang, dan lebat; mencatat arus, ketinggian dek, dan kondisi rumput	5 per kerapatan
S7	Verifikasi ketinggian	Dek pada 5 ketinggian; membandingkan VL53L0X dengan mistar	3 per ketinggian
S8	Kalibrasi ketinggian manual	Robot di permukaan rata; menetapkan ketinggian target via aplikasi pada 3 nilai berbeda, mencatat ketinggian hasil VL53L0X-dikurangi-offset dibandingkan pengukuran mistar	3 per nilai

Tabel 3.24. Skenario pengujian subsistem elevasi dek

3.5.3 Teknik Analisis Data

Setiap skenario diulang sesuai Tabel 3.24 dan hasilnya dinyatakan sebagai rata-rata dan simpangan baku. Indikator dihitung sebagai berikut.

1. Waktu respons proteksi dihitung dari saat arus pertama melampaui I_bahaya hingga aktuator mulai menaikkan dek (latensi), serta hingga arus stabil di bawah I_set (waktu pulih): t_respons = t_aktuator_naik − t_deteksi.
2. Overshoot arus terhadap setpoint dihitung dari arus puncak: OS = (I_puncak − I_set) / I_set × 100%.
3. Energi aktuator dihitung dari integrasi daya: $E = \Sigma (V_k \times I_k \times \Delta t) / 3600$ (Wh).
4. Estimasi energi aktuator konvensional dihitung dari arus penahan terukur pada kondisi yang sama: E_konv = V × I_penahan × t_diam / 3600 + E_gerak.
5. Persentase penghematan energi dihitung sebagai H = (E_konv − E_self-locking) / E_konv × 100%.
6. Galat pembacaan dihitung sebagai selisih antara INA219 dan alat ukur acuan (untuk arus), serta antara VL53L0X dan mistar (untuk ketinggian), dinyatakan sebagai galat absolut rata-rata.

Karena pembanding energi berupa estimasi, penghematan yang dilaporkan dinyatakan sebagai perbandingan terhadap estimasi dan tidak dianggap sama dengan hasil pengukuran pada aktuator konvensional yang sesungguhnya, kecuali aktuator pembanding tersedia dan diuji pada kondisi yang sama.

3.5.4 Kriteria Keberhasilan

Kriteria keberhasilan pada Tabel 3.25 merupakan target awal perancangan dan akan ditetapkan final bersama pembimbing sebelum pengujian dilakukan.

Indikator	Kriteria Awal	Skenario
Galat pembacaan arus INA219 terhadap acuan	≤ 5% pada rentang 100–250 mA	S1
Latensi deteksi hingga perintah aktuator	≤ 200 ms	S3, S4
Waktu pulih arus hingga di bawah I_set	≤ 3 s	S3, S6
Overshoot arus terhadap I_set	Puncak arus tidak melebihi arus stall 235 mA (≤ 51,6%)	S3, S6
Keberhasilan safety override	10 dari 10 percobaan	S4
Konsumsi arus aktuator saat dek diam terkunci	Mendekati 0 A pada pengukuran	S5
Penghematan energi terhadap estimasi konvensional	≥ 50% pada skenario dek diam dominan	S5
Galat ketinggian VL53L0X terhadap mistar	≤ 5 mm	S7

Tabel 3.25. Kriteria keberhasilan pengujian

Apabila kriteria tidak terpenuhi, penyebabnya ditelusuri melalui data pengujian (derau sensor, konstanta PID, panjang waktu stabil, atau karakteristik mekanis aktuator), parameter diperbaiki, dan pengujian diulang sesuai pendekatan iteratif pada Subbab 3.1.

DAFTAR PUSTAKA

Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA, The Instrumentation, Systems, and Automation Society.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's mechanical engineering design* (10th ed.). McGraw-Hill Education.

Diwakaran, S., Kumar, M. D. V., Mohanreddy, P. S., Rishika, C., Sreenivasulu, P., & Sivasubramanian, M. (2023). Design of an autonomous mower with height adjustable cutting motor. *2023 4th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSPC)*, 348–352. https://doi.org/10.1109/ICSPC57692.2023.10125879

Espressif Systems. (n.d.). *ESP32 series datasheet* [Datasheet]. https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents

Infineon Technologies. (n.d.). *BTS7960 high current PN half bridge NovalithIC™* [Datasheet]. https://www.infineon.com

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

Laković, N., Brkić, M., Batinić, B., Bajić, J., Rajs, V., & Kulundžić, N. (2019). Application of low-cost VL53L0X ToF sensor for robot environment detection. *2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, 1–4. https://doi.org/10.1109/INFOTEH.2019.8717779

Maria, P., & Susianti, E. (2019). Uji kinerja surface scanner 3D menggunakan sensor VL53L0X dan mikrokontroler ATMEGA8535. *Jurnal Teknik Elektro, 11*(1), 1–8. https://doi.org/10.15294/jte.v11i1.18821

Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Prentice Hall.

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

Sathyamoorthy, A. J., Weerakoon, K., Guan, T., Liang, J., & Manocha, D. (2022). *TerraPN: Unstructured terrain navigation using online self-supervised learning*. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.12873

Shoaib, M., Kim, M., Park, D., & Cheong, J. (2023). Control of a worm-wheel gear driven rescue robot with friction compensation and its experimental verification. *Advances in Mechanical Engineering, 15*(10). https://doi.org/10.1177/16878132231191031

STMicroelectronics. (n.d.). *VL53L0X world's smallest time-of-flight ranging and gesture detection sensor* [Datasheet]. https://www.st.com

Texas Instruments. (n.d.-a). *INA219 zero-drift, bidirectional current/power monitor with I²C interface* [Datasheet]. https://www.ti.com

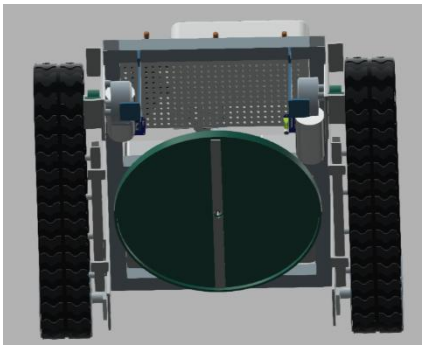
Texas Instruments. (n.d.-b). *LM2596 SIMPLE SWITCHER® 3-A step-down voltage regulator* [Datasheet]. https://www.ti.com

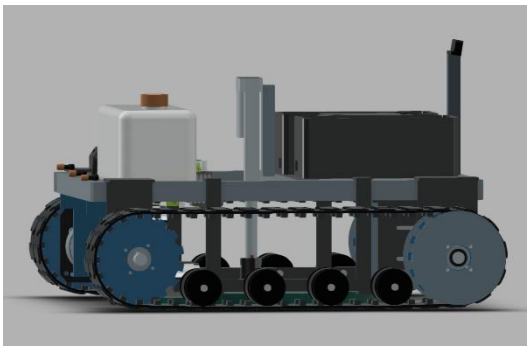
LAMPIRAN

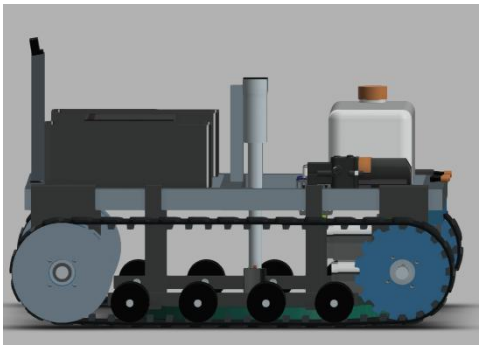
Lampiran 1: Biodata Penulis

Nama Lengkap	: Maulana Fathurahman
Nomor Induk Mahasiswa	: 2305110022
Tempat, Tanggal Lahir	: Jakarta, 27 Agustus 2005
Program Studi	: Teknik Komputer (S1)
Fakultas	: Fakultas Teknik
Perguruan Tinggi	: Universitas Negeri Semarang (UNNES)
Alamat Surel (Email)	: Maulanafathur10@students.unnes.ac.id

Lampiran 2: Draf Karya / Sketsa / Lembar Kerja Prototipe







Lampiran 3: Surat Keputusan / Lembar Pengesahan 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/949/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	: MAULANA FATHURAHMAN
NIM	: 2305110022
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.

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

2305110022

DITETAPKAN DI : SEMARANG
PADA TANGGAL : 1 September 2026
DEKAN

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

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