

SnailBot, Robot Penyiang Gulma Berbasis Binocular Stereo Vision

SnailBot, a Binocular Stereo Vision-Based Weeding Robot

Dinta Hanasta¹, Azka Auliya Nolan¹, Rido Tsania Noor², Himah Muhandisyah¹, Furqon Furqon^{1*}

¹ Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Indonesia

² Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Indonesia

* Email: furqon@unsoed.ac.id

DOI: <http://dx.doi.org/10.20884/1.jaber.2025.6.2.18114>

Naskah ini diterima pada 20 Oktober 2025; revisi pada 24 November 2025;
disetujui untuk dipublikasikan pada 6 Desember 2025

ABSTRAK

Budidaya padi menghadapi tantangan utama berupa serangan gulma yang dapat menurunkan hasil panen hingga 60–87%, serta krisis tenaga kerja produktif di sektor pertanian Indonesia. Penelitian ini mengembangkan *SnailBot*, robot penyiang gulma semi-otonom berbiaya rendah yang terinspirasi dari morfologi keong (siput). Robot ini dirancang dengan roda spiral untuk meningkatkan traksi di lahan berlumpur, serta sistem deteksi gulma berbasis *binocular stereo vision* menggunakan algoritma CNN YOLOv5 yang dikonversi ke TensorFlow Lite INT8 untuk estimasi kedalaman secara *real-time*. Gulma yang terdeteksi dipotong dan digiling hingga ke akarnya. Hasil pengujian menunjukkan model deteksi mencapai mAP 0,739 dengan jarak deteksi 20-40 cm. Sistem navigasi berbasis GPS Neo-6M, dengan kecepatan rata-rata robot mencapai 0,0854 m/s di tanah berlumpur, 0,0979 m/s di tanah sedikit berlumpur, dan 0,1325 m/s di tanah padat.

Kata kunci: *SnailBot*, penyiang gulma, *binocular stereo vision*, YOLOv5, robot pertanian, lahan sawah

ABSTRACT

Rice cultivation faces major challenges from weed infestations that can reduce yields by up to 60–87%, as well as a shortage of productive labor in Indonesia's agricultural sector. This study develops *SnailBot*, a low-cost semi-autonomous weeding robot inspired by snail morphology, featuring spiral wheels to enhance traction in muddy fields and a weed detection system based on binocular stereo vision using a CNN YOLOv5 algorithm converted into TensorFlow Lite INT8 for real-time depth estimation; detected weeds are cut and ground to their roots. Experimental results show that the model achieves a mean Average Precision (mAP) of 0.739 with an effective detection range of 20-40 cm, while the GPS Neo-6M-based navigation system enables average speeds of 0.0854 m/s on muddy soil, 0.0979 m/s on slightly muddy soil, and 0.1325 m/s on solid ground.

Keywords: *SnailBot*, weeding robot, *binocular stereo vision*, YOLOv5, agricultural robot, paddy field

PENDAHULUAN

Tantangan utama budidaya padi adalah serangan gulma yang menurunkan hasil hingga 60–87% (Syarifudin & Nofa, 2020). Pengendalian konvensional dengan herbisida semakin tidak efektif akibat resistensi yang dilaporkan di 71 negara (Duke *et al.*, 2021). Ditambah krisis tenaga kerja di Indonesia: proporsi petani >60 tahun naik dari 7,6% (1971) menjadi 21,2% (2020), sedangkan partisipasi pemuda hanya 18,8% (Ngadi *et al.*, 2023). Hal ini mendorong adopsi robotika dan AI (Reina, 2024). Inovasi yang telah dikembangkan antara lain robot penanam padi otomatis dengan keberhasilan 95% (Sugiarto *et al.*, 2024), robot pengaduk gabah IoT dengan keseragaman 92% (Chairany *et al.*, 2025), serta rover penyanggul gulma berbasis YOLOv4 dengan akurasi 89% dan efektivitas lapangan hingga 100% (Rahmad *et al.*, 2022). Namun, penerapan luas masih terkendala jangkauan Wi-Fi, sensitivitas cahaya, kompleksitas desain, dan kebutuhan dataset nasional yang lebih komprehensif.

Deteksi gulma merupakan komponen penting dalam sistem robot penyanggulan karena menentukan efektivitas operasi di lapangan. Robot seperti Ferrari Remoweed, Robovator, Garford In-row cultivator, dan Steketee IC memanfaatkan pengenalan barisan tanaman untuk mengidentifikasi gulma di sekitar tanaman individu. Kemajuan teknologi visi mesin dan kecerdasan buatan, termasuk jaringan saraf dalam, telah memungkinkan pengenalan gulma melalui berbagai sensor seperti kamera RGB-D, LIDAR, ToF, serta pencitraan multispektral dan hiperspektral (Shamshiri *et al.*, 2024). Robot darat (UGV) juga banyak digunakan karena mampu beroperasi di medan berlumpur dengan dukungan sensor kamera dan lidar untuk pemetaan serta penghindaran rintangan (Butuner *et al.*, 2023). Konsep *intelligent weeders* yang diperkenalkan oleh (Sanchez & Gallandt, 2021) menekankan penyanggulan selektif berbasis sensor dan GPS, seperti Robovator dan Robocrop yang dapat meningkatkan efektivitas pengendalian gulma sebesar 18–41% dan menurunkan kepadatan gulma hingga 85%. Namun, biaya sistem berbasis kamera dan GPS masih tinggi, mencapai hingga 13 kali lipat dibandingkan alat manual, sehingga menjadi kendala bagi petani kecil.

Penerapan AIoT di pertanian menghadapi hambatan infrastruktur, tenaga ahli, biaya perangkat, dan data musiman yang menurunkan akurasi model (Adli *et al.*, 2023). Chang *et al.*, (2021) mengembangkan sistem penyanggul gulma berbasis YOLOv3 dengan akurasi 95,6% dan F1-score 74,3–92,8% pada pencahayaan optimal, tetapi turun menjadi 76,1% saat cahaya rendah. Efisiensi penyanggulan mencapai 84–92,3% pada kecepatan 10–15 cm/detik, menurun menjadi 54–64% pada 20 cm/detik, dengan peningkatan kerusakan tanaman dari 5,5% menjadi 44,4%. Zhang *et al.*, (2022) menambahkan bahwa efektivitas robot masih rendah akibat keterbatasan adaptasi terhadap variasi lapangan, sehingga diperlukan peningkatan pra-pemrosesan data dan sensor yang lebih andal. Sebaliknya, Lytridis & Pachidis, (2024) mengembangkan sistem visi berbasis morfologi bibit padi untuk navigasi robot di lahan berlumpur dengan tingkat kesalahan kurang dari 1, menggunakan kuadrat terkecil dan CNN-fuzzy classifier. Keterbatasannya meliputi sensitivitas terhadap pencahayaan, performa rendah pada kecepatan tinggi, ketidakstabilan torsi, serta keterbatasan di lahan keras atau berbatu.

Penelitian terkini menunjukkan bahwa pengembangan robot penyanggul gulma masih menghadapi berbagai tantangan, terutama dalam hal efisiensi kerja dan adaptasi terhadap kondisi lahan pertanian yang berlumpur. Berdasarkan permasalahan tersebut, *SnailBot* atau Robot Siput, robot penyanggul gulma sederhana yang terinspirasi dari morfologi keong dan dirancang khusus untuk lahan sawah di Indonesia dirancang. Robot ini menggunakan roda spiral untuk meningkatkan traksi di lumpur serta sistem deteksi gulma berbasis *binocular stereo vision* dengan algoritma YOLO dan *Stereo Deep Matching* guna memperoleh akurasi identifikasi spasial yang lebih tinggi. Gulma yang terdeteksi akan dipotong menggunakan motor pemotong mini yang hemat energi. Inovasi ini diharapkan dapat mengurangi ketergantungan petani terhadap herbisida kimia, menekan biaya operasional, dan meningkatkan produktivitas pertanian secara berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan secara rinci dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Alat dan bahan penelitian

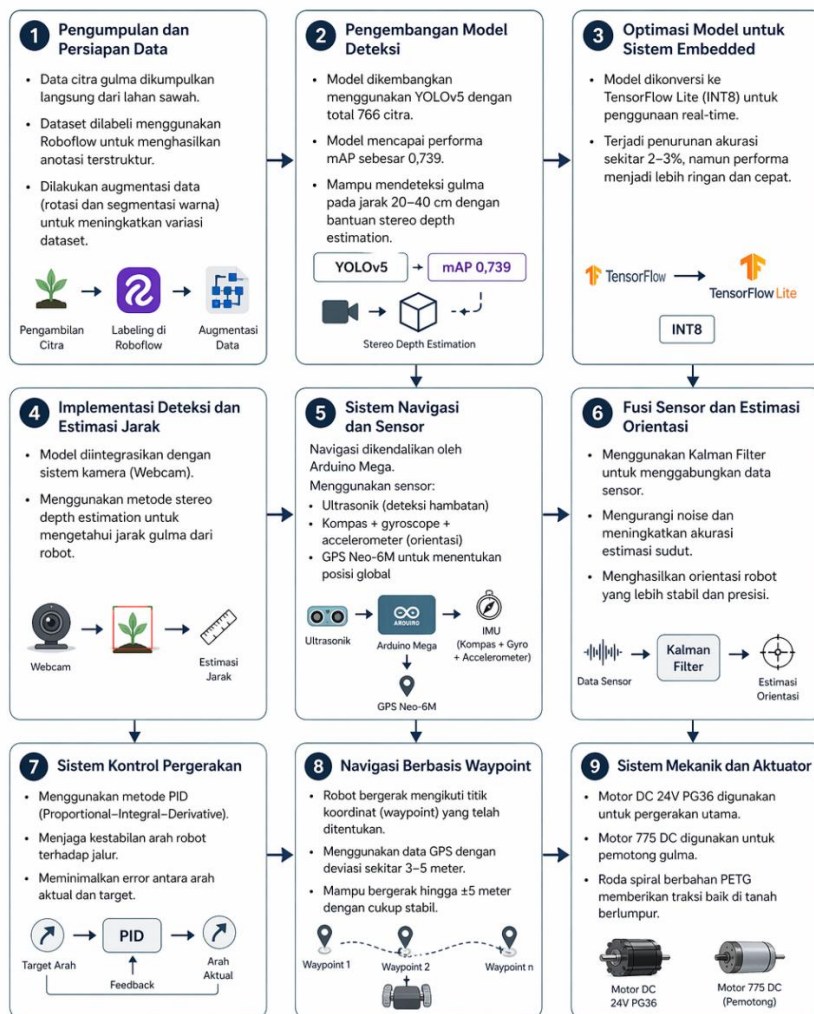
Alat Utama			
No	Alat	Jumlah	Spesifikasi
1	Arduino Mega 2560 + PCB Board	1 Unit	Mikrokontroler + papan PCB
2	Baterai 24V	1 Unit	Sistem Utama
3	Baterai 12V	1 Unit	Sistem Pemotong
4	Motor DC775	1 Unit	Motor DC 12V untuk pisau potong
5	PG36DCMOTOR	2 Unit	Motor DC planetary gear PG36
6	Pisau Potong	1 Unit	Pisau Potong Custom
7	Raspberry Pi 4, RAM 2GB	1 Unit	RAM 2GB
Alat Elektronik			
1	Logitech C270	2 Unit	Webcam HD 720p
2	MPU GY 9250		Sensor accelerometer + gyroscope 9-axis
3	NEO-6M GPS Module	1 Unit	Modul GPS
4	Ultrasonic	1 Unit	Sensor Jarak
5	Kabel jumper	-	Kabel jumper female-to-female / male-to-male
6	Switch	1 Unit	-
7	BTS7960	2 Unit	Driver motor 24V
8	L298N	1 Unit	Driver motor 12V
9	JST Kabel & Soket JST	-	-
10	XL4016	2 Unit	Modul step-down DC-DC XL4016
11	Fuse	5 Unit	-
12	Kabel USB Type-C	1 Unit	50 cm
13	Kipas 5V	2 Unit	Kipas pendingin 5V
14	Micro SD 16 GB	1 Unit	Penyimpanan Raspberry Pi 4
15	Adaptor Raspberry Pi	1 Unit	Adaptor power untuk Raspberry Pi
16	Kabel HDMI tipe M	1 Unit	-
Alat Ukur			
1	Stopwatch	1 Unit	
Bahan			
1	Filamen 3D Printing	2 roll	Filamen untuk printer 3D
2	PVC	5 Lembar	Lembaran PVC tebal 5 mm, ukuran 30x60 cm
3	Skrup	33 Buah	Sekrup berbagai ukuran
4	Sealant, Super Glue, Nilon Cable Ties	1 Paket	-
5	Amplas	3 Lembar	30 cm, sedang dan kasar
6	Siku L, Mur, Baut	1 Set	-
7	Gear dan rantai	1 Set	-
8	Shaft,	2 Batang	Poros diameter 8 mm, panjang 50 cm
9	Lem plastic steel	2 buah	-
10	Akrilik sensor	1 Box	-
	Pillow bearing	4 Unit	KP08 ID 8 mm

Prosedur Penelitian

Alur pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 yang diawali dengan identifikasi masalah dan studi literatur untuk memahami dasar teori serta kebutuhan yang ada, kemudian dilanjutkan dengan penentuan kriteria desain dan evaluasi sebagai acuan perancangan sistem serta penyiapan alat dan bahan. Tahap berikutnya adalah implementasi sistem dalam bentuk prototipe yang diuji dan dianalisis untuk menilai kinerjanya, lalu dilakukan evaluasi produk guna mengetahui kesesuaian dengan tujuan awal dan potensi perbaikan. Metode ini juga bersifat fleksibel karena dalam praktiknya proses perancangan dan implementasi tidak selalu berjalan linier, pada tahap perakitan sering ditemui kendala teknis atau kebutuhan penyesuaian sehingga dilakukan beberapa kali redesain dimana desain terakhir dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Alur Pelaksanaan



Gambar 2. Pembuatan *SnailBot* secara menyeluruh.

Studi Literatur

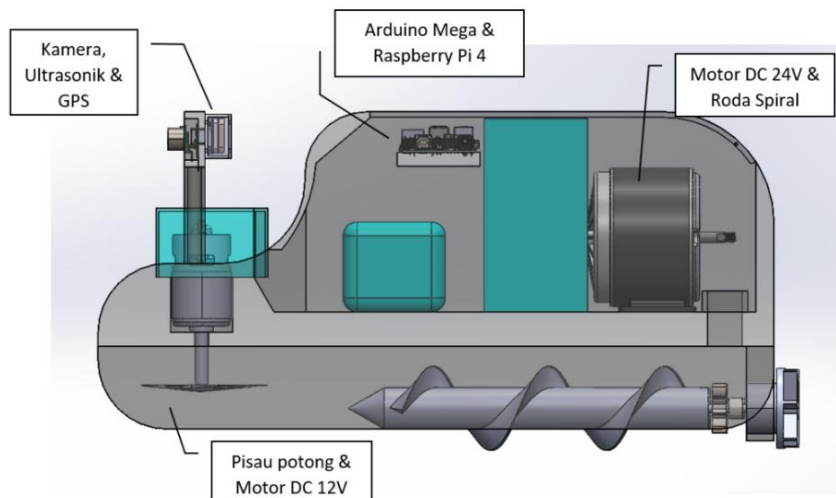
Proses studi literatur dilakukan mulai dari identifikasi masalah, analisis kebutuhan hingga referensi yang relevan pada teknologi penyiangan gulma secara mekanik dan otomatis seperti robotika. Seperti Algoritma *stereo depth estimation* yang disusun dengan merujuk pada Zheng *et al.*, (2022) yang melatih model MobileNetV1–YOLOv4 untuk deteksi objek serta metode *Binocular Stereo Vision* (BSV) berbasis triangulasi dari dua citra kamera yang dikalibrasi baseline atau jarak antar kamera dan sudut kamera. Selain itu, desain pelatihan model juga mengacu pada Sportelli *et al.*, (2023) yang membandingkan YOLOv5–v8 dan EfficientDet pada dataset *Weeds*.

Perancangan sistem navigasi mengacu pada penelitian Maharani *et al.*, (2025) yang menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai pengendali utama dengan sensor GPS Neo-6M, kompas, dan ultrasonik untuk menentukan posisi, arah, serta mendeteksi halangan. Sementara itu, rancangan roda spiral mengacu pada penelitian *et al.*, (2025) yang memperkuat hasil penelitian Murugaraj *et al.*, (2022), dengan kombinasi parameter optimal berupa sudut kembang 35° , tinggi bilah 35 mm, sudut tirus 20° , jarak antar bilah 50 mm, dan diameter luar 80 mm. Konfigurasi ini menghasilkan manuver belok optimal pada sudut sekitar $35^\circ \pm 2^\circ$, sehingga mendukung stabilitas dan performa gerak robot di lahan pertanian

Rancang Bangun

Hardware

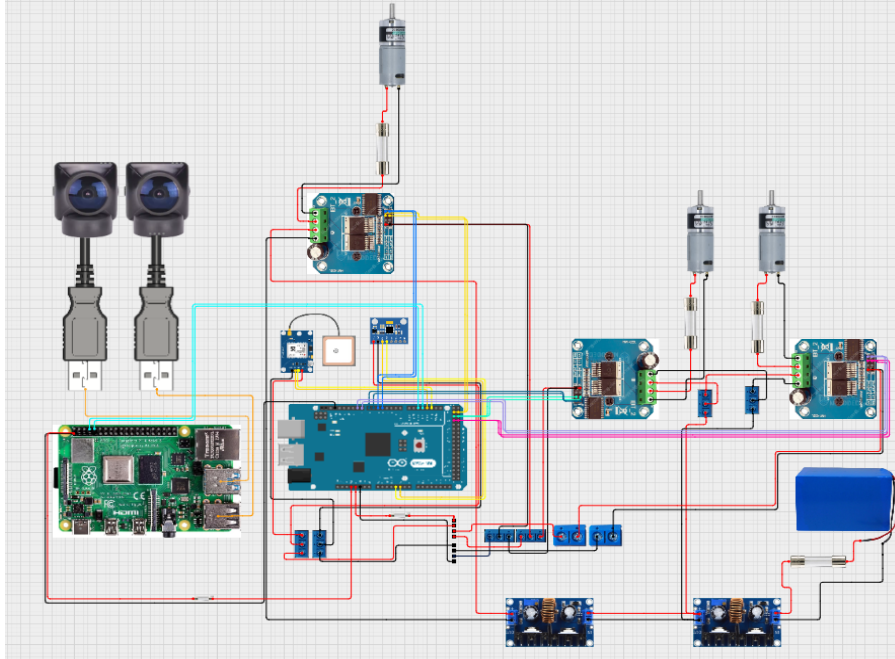
Proses rancang bangun perangkat keras (*hardware*) robot penyiangan gulma dilakukan melalui tahap perancangan dan pembuatan sketsa sistem yang mengintegrasikan sensor, unit kontrol, dan aktuator dalam satu kesatuan. Dimensi keseluruhan robot adalah panjang 40 cm, lebar 24 cm, dan tinggi 23 cm. Sistem dilengkapi dengan modul sensor berupa kamera, ultrasonik, dan GPS yang dipasang pada bagian depan untuk kebutuhan deteksi gulma, penghindaran hambatan, dan navigasi. Unit kontrol menggunakan Arduino Mega dan Raspberry Pi 4 yang ditempatkan pada kompartemen utama untuk pengolahan data dan pengendalian sistem secara *real-time*. Mekanisme aktuator terdiri dari pisau pemotong yang digerakkan motor DC 12V di bagian depan bawah serta sistem penggerak menggunakan motor DC 24V dengan roda spiral di bagian belakang. Secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Rancang Bangun *SnailBot*.

Software

Proses rancang bangun perangkat lunak (*software*) adalah perancangan sistem elektronik seperti pada Gambar 4 dan pemrograman pada robot penyiang gulma yang dilakukan dengan memprogram sistem menggunakan Arduino IDE dan Python pada Raspberry Pi untuk mengatur integrasi sensor, pemrosesan data, dan aktuator. Raspberry Pi digunakan untuk menjalankan algoritma deteksi gulma berbasis citra (YOLOv5) dari input kamera, kemudian hasil deteksi dikirim ke Arduino Mega sebagai pengendali utama. Arduino membaca data dari sensor GPS dan ultrasonik untuk navigasi dan penghindaran hambatan, serta mengontrol driver motor untuk pergerakan robot dan aktivasi pisau pemotong. Sistem bekerja secara otomatis berdasarkan hasil deteksi, di mana jika gulma teridentifikasi maka aktuator pemotong akan aktif, sedangkan jika tidak terdeteksi robot akan terus bergerak mengikuti jalur navigasi yang telah ditentukan.



Gambar 4. Skematik Wiring *SnailBot*.

Uji Coba

Proses uji coba sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja deteksi gulma menggunakan model YOLOv5 yang telah dilatih. Pengujian dilakukan dengan menjalankan sistem secara *real-time* menggunakan kamera, di mana objek gulma dideteksi dan ditampilkan dalam bentuk *bounding box* beserta informasi jarak dan ukuran objek. Pada tahap pengujian lapangan, sistem diuji pada tiga jenis medan, yaitu berlumpur, sedikit berlumpur, dan padat, yang masing-masing dilakukan dalam dua tahap pengujian.

Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan Microsoft Excel untuk mengetahui kecepatan gerak robot pada 3 medan sebagai indikator untuk mengklasifikasikan kondisi tanah (lunak, sedang, keras) yang dapat dilalui robot secara efisien berdasarkan respons kecepatan robot.

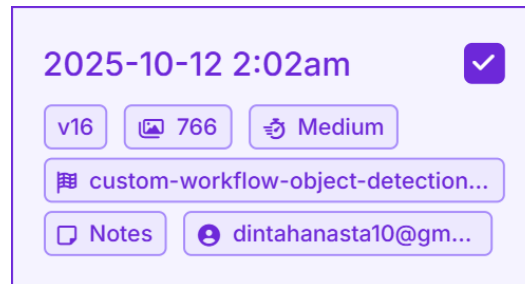
Kecepatan rata-rata dihitung dengan persamaan:

$$v = s/t$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem Vision

Dataset yang digunakan dalam penelitian ini berjumlah 766 gambar yang dilabeli menggunakan *platform* Roboflow, kemudian proses pelatihan model dilakukan di Google Colab. Model YOLOv5l dilatih selama 150 epoch dengan total durasi 1,653 jam menggunakan dataset yang terbagi menjadi data latih dan data validasi, menghasilkan ukuran model akhir sebesar 106,8 MB dalam format PyTorch dan 203,5 MB setelah diekspor ke format ONNX. Selanjutnya, model juga berhasil diekspor ke format TensorFlow Lite (TFLite) dengan ukuran 203,0 MB dalam format float32 menggunakan TensorFlow 2.19.0, yang memungkinkan model untuk dijalankan pada perangkat *edge* dengan efisiensi lebih baik. Berdasarkan hasil validasi multi-confidence dengan variasi threshold dari 0,05 hingga 0,25, ditemukan bahwa *confidence threshold* optimal untuk memaksimalkan recall kelas gulma adalah 0,25 yang menghasilkan recall tertinggi sebesar 0,511 atau 51,1%, dimana model mampu mendeteksi sekitar setengah dari total 137 instance gulma pada dataset validasi yang terdiri dari 35 gambar. Pada *threshold* tersebut, model mencapai *precision* untuk kelas gulma sebesar 0,479, mAP50 sebesar 0,484, dan mAP50-95 sebesar 0,269, dengan overall mAP50 untuk semua kelas mencapai 0,739. Model ini selanjutnya diimplementasikan pada perangkat Raspberry Pi 4 dengan RAM 2GB, yang dilengkapi dengan dua webcam dan sistem *stereo depth estimation* untuk mendeteksi jarak objek pada rentang 20-40 cm. Ketika model mendeteksi keberadaan gulma pada jarak tersebut, sistem akan mengaktifkan pisau potong secara otomatis. Meskipun *recall* masih tergolong rendah (di bawah 60%) dan *precision* menunjukkan masih banyaknya *false positive* (hampir setengah dari prediksi gulma adalah keliru) yang berpotensi menyebabkan pemotongan tanaman non-gulma, model ini telah berhasil diekspor dalam tiga format (PyTorch, ONNX, dan TFLite) sehingga siap digunakan untuk uji coba terbatas di lingkungan *edge computing* seperti Raspberry Pi dengan pengawasan manual. Namun demikian, model ini belum direkomendasikan untuk *deployment* produksi sebelum dilakukan penambahan data latih yang lebih beragam serta penyeimbangan jumlah antara kelas gulma dan non gulma agar *performa* model dapat meningkat secara signifikan, mengingat keterbatasan sumber daya komputasi pada Raspberry Pi 4 yang memerlukan model yang lebih ringan dan efisien.



A

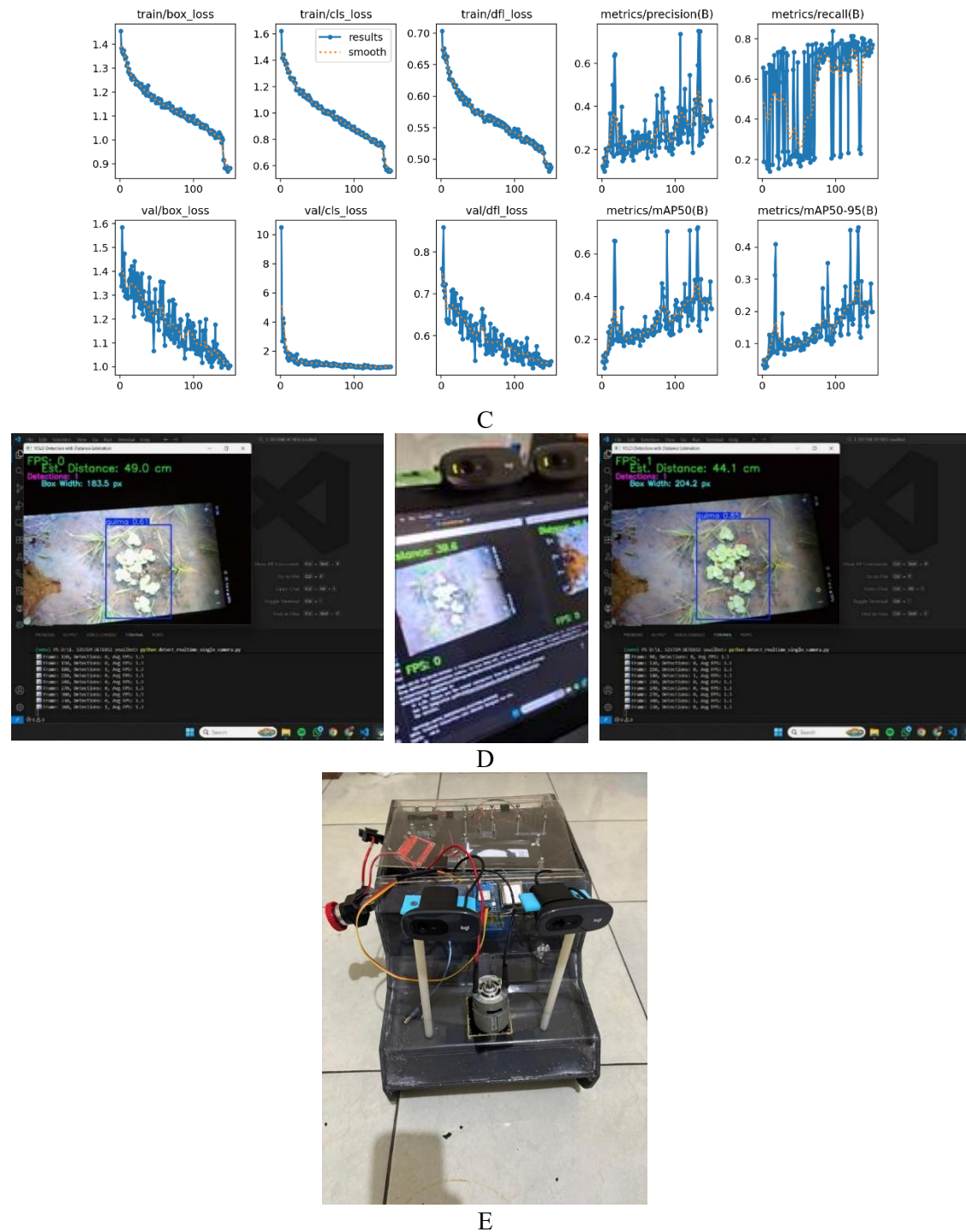
```
=== TESTING DENGAN CONFIDENCE OPTIMAL ===
Ultralytics 8.3.211 Python-3.12.11 torch-2.8.0+cu126 CUDA:0 (Tesla T4, 15095MiB)
val: Fast image access (ping: 0.0±0.0 ms, read: 2632.4±812.2 MB/s, size: 116.5 KB)
val: Scanning /content/dataset/valid/labels.cache... 35 images, 0 backgrounds, 0 corrupt: 100% 35/35 71.1Kit/s 0.0s

```

Class	Images	Instances	Box(P)	R	mAP50	mAP50-95)
all	35	138	0.74	0.755	0.739	0.483
gulma	35	137	0.479	0.511	0.484	0.269
non gulma	1	1	1	1	0.995	0.697

```
Speed: 6.8ms preprocess, 44.9ms inference, 0.0ms loss, 2.3ms postprocess per image
Results saved to /content/runs/detect/val6
Final results dengan conf=0.25:
mAP50: 0.739
mAP50-95: 0.483
Recall Gulma: 0.511
```

B



Gambar 5. (a) *Labeling* dataset; (b) *Training* di Google Colab; (c) Metrik pelatihan model *machine learning*; (d) Uji coba menggunakan Laptop dan Webcam; (e) Penempatan kamera pada robot.

Berdasarkan metrik pelatihan model object detection yang disajikan pada Gambar 5 (c), terlihat bahwa terjadi anomali antara nilai *loss* dan metrik evaluasi. Meskipun *training loss* (*box_loss*, *cls_loss*, *dfi_loss*) dan *validation loss* terus menurun dari *epoch* 1 ke 100 yang mengindikasikan model semakin yakin dan *fit* terhadap data namun metrik *precision*, *recall*, dan *mAP50-95* justru mengalami penurunan (*precision* dari 0,25 menjadi 0,10; *recall* dari 0,25 menjadi 0,10; *mAP50-95* dari 0,25 menjadi 0,10), sementara *mAP50* stagnan di 0,50.

Program navigasi menggunakan sensor NEO-6M GPS untuk posisi (lintang/bujur) dan MPU GY-9250 untuk *heading* kendaraan. Setelah inisialisasi, sistem membaca data posisi dan *heading* secara terus-menerus. Data GPS yang valid memicu perhitungan jarak ke *waypoint* dengan metode *haversine*; jika jarak kurang dari toleransi, program beralih ke *waypoint* berikutnya. Secara simultan, program menghitung sudut target ke *waypoint* dan membandingkannya dengan *heading* saat ini untuk menghasilkan *error* arah. Berdasarkan besaran *error* dengan ambang batas 8 derajat untuk toleransi lurus dan 60 derajat untuk manuver tajam, program menentukan strategi pergerakan: gerak lurus saat *error* kecil, koreksi halus dengan pengurangan kecepatan proporsional pada satu sisi saat *error* sedang, atau putaran di tempat saat *error* besar. Seluruh keputusan gerakan diterjemahkan menjadi sinyal PWM untuk kedua motor dan dijalankan melalui mekanisme akselerasi bertahap agar perubahan kecepatan terjadi secara halus. Program juga menyediakan fitur pemantauan dengan mengirimkan data status seperti posisi, *heading*, *error*, jarak, dan nilai PWM secara periodik melalui komunikasi serial, serta melayani pembaruan *waypoint* dinamis yang masuk untuk mengubah target tujuan secara *real-time* melalui koneksi Raspberry Pi 4.

(a)



1. BTS7960 Driver motor 24V
2. NEO-6M GPS Module
3. MPU GY-9250 (sensor accelerometer dan gyroscope 9-axis)
4. Arduino Mega 2560 + PCB Board
5. Modul step-down DC-DC XL4016
6. L298N Driver motor 12V

145

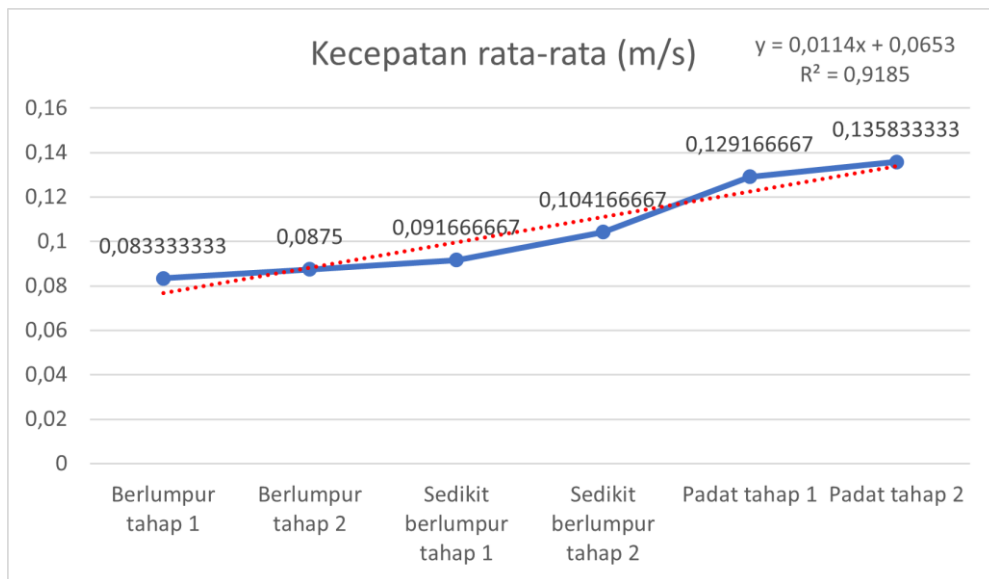
Pengujian Lapangan Performansi Robot

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja pergerakan robot pada berbagai jenis kondisi tanah, yaitu berlumpur, sedikit berlumpur, dan padat, dengan masing-masing dua tahap pengujian. Setiap pengujian dilakukan dalam durasi waktu yang sama, yaitu 120 detik, untuk menempuh jarak tertentu yang kemudian digunakan untuk menghitung kecepatan rata-rata robot.

Tabel 2. Pengujian pada tiga medan.

Jenis Tanah	Tahap	Waktu (s)	Jarak (m)	Kecepatan Rata-rata (m/s)
Berlumpur	1	120	10	0,0833
	2	120	10,5	0,0875
Sedikit Berlumpur	1	120	11	0,0917
	2	120	12,5	0,1042
Padat	1	120	15,5	0,1230
	2	120	16,3	0,1360

Pada kondisi tanah berlumpur tahap 1 dan 2, robot mampu menempuh jarak masing-masing 10 m dan 10,5 m dengan kecepatan rata-rata 0,0833 m/s dan 0,0875 m/s, menunjukkan performa yang relatif lebih rendah akibat hambatan lumpur. Pada kondisi sedikit berlumpur, terjadi peningkatan performa dengan jarak tempuh 11 m dan 12,5 m serta kecepatan rata-rata 0,0917 m/s dan 0,1042 m/s. Sementara itu, pada kondisi tanah padat, robot menunjukkan performa terbaik dengan jarak tempuh 15,5 m dan 16,3 m serta kecepatan rata-rata mencapai 0,1292 m/s dan 0,1358 m/s.



Gambar 7. Kecepatan rata-rata pada tiga medan.

Berdasarkan grafik pada Gambar 7, terlihat bahwa kecepatan rata-rata robot mengalami tren peningkatan seiring dengan perubahan kondisi permukaan tanah dari berlumpur hingga padat. Pada kondisi berlumpur tahap 1 dan 2, kecepatan robot berada pada nilai terendah, yaitu sekitar 0,0833 m/s hingga 0,0875 m/s, yang menunjukkan adanya hambatan gerak akibat tekstur tanah yang lunak dan licin. Selanjutnya, pada kondisi sedikit berlumpur, kecepatan mulai meningkat secara bertahap hingga mencapai sekitar 0,1042 m/s, menandakan bahwa robot dapat bergerak lebih efisien ketika hambatan tanah berkurang.

Peningkatan paling signifikan terlihat pada kondisi tanah padat, di mana kecepatan robot mencapai nilai tertinggi, yaitu sekitar 0,1292 m/s hingga 0,1358 m/s. Garis tren linear pada grafik

dengan persamaan $y=0,0114x+0,0653$ dan nilai $R^2=0,9185$ menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang kuat antara jenis permukaan tanah dan kecepatan robot. Nilai koefisien determinasi yang mendekati 1 mengindikasikan bahwa variasi kecepatan robot sebagian besar dipengaruhi oleh perubahan kondisi tanah. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semakin padat permukaan tanah, semakin optimal performa pergerakan robot.

KESIMPULAN

SnailBot berhasil dikembangkan sebagai robot penyanggul gulma untuk lahan sawah dengan sistem deteksi berbasis YOLOv5 dan *stereo depth estimation*. Model deteksi gulma mencapai *recall* tertinggi 51,1% pada *confidence threshold* 0,25 dengan mAP50 sebesar 0,739, serta berhasil diimplementasikan pada Raspberry Pi 4 dalam tiga format (PyTorch, ONNX, TFLite). Pengujian lapangan menunjukkan performa terbaik robot pada tanah padat dengan kecepatan rata-rata 0,1358 m/s, diikuti tanah sedikit berlumpur (0,1042 m/s) dan tanah berlumpur (0,0875 m/s). Terdapat hubungan kuat antara jenis permukaan tanah dan kecepatan robot ($R^2 = 0,9185$), dimana semakin padat tanah semakin optimal pergerakan robot. Meskipun *recall* model masih perlu ditingkatkan, prototipe ini telah menunjukkan potensi sebagai solusi mekanis pengendalian gulma yang ramah lingkungan untuk mendukung pertanian berkelanjutan di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Balai Pembiayaan Pendidikan Tinggi (BALAMWA) Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi serta Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) atas pendanaan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik, dan juga menyampaikan penghargaan serta terima kasih yang mendalam kepada Universitas Jenderal Soedirman (UNSOED) atas fasilitas penelitian, dukungan akademik, serta sarana dan prasarana yang telah disediakan selama proses pelaksanaan penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Adli, H.K., Remli, M.A., Wan Salihin Wong, K.N.S., Ismail, N.A., González-Briones, A., Corchado, J.M., Mohamad, M.S., 2023. Recent advancements and challenges of AIoT application in smart agriculture: A review. *Sensors* 23, 3752.
- Barbole, D., Jadhav, P., 2023. Comparative analysis of 2D and 3D vineyard yield prediction system using artificial intelligence. *J. Agric. Eng.* 55. <https://doi.org/10.4081/jae.2023.1545>
- Butuner, R., Calp, M.H., Butuner, N., Butuner, M., 2023. Robotic systems and artificial intelligence applications in agriculture. *Curr. Stud. Technol. Innov. Entrep.* 145.
- Chairany, A., Buaton, R., Puspadini, R., 2025. Penerapan Internet of Things pada Mekanik Prototipe Robot Pengaduk Gabah. *Repeater Publ. Tek. Inform. Dan Jar.* 3, 89–101.
- Chang, C.-L., Xie, B.-X., Chung, S.-C., 2021. Mechanical control with a deep learning method for precise weeding on a farm. *Agriculture* 11, 1049.
- Duke, S.O., Heap, I., Tranel, P.J., Bobadilla, L.K., 2021. How Many Ways Can Nature Kill the Goose That Laid the Golden Egg?—The Many Mechanisms of Evolved Glyphosate Resistance. *Outlooks Pest Manag.* 32, 197–202.
- Maharani, S., Panjaitan, S.D., Marindani, E.D., 2025. Wheeled Mobile Robot with GPS-Based Waypoint Navigation System and IoT Application. *Telecommun. Comput. Electr. Eng. J. ELECTRICAL* 2, 316–325.

- Murugaraj, G., Kumar, S.S., Pillai, A.S., Bharatiraja, C., 2022. Implementation of in-row weeding robot with novel wheel, assembly and wheel angle adjustment for slurry paddy field. *Mater. Today Proc.* 65, 215–220.
- Ngadi, N., Zaelany, A.A., Latifa, A., Harfina, D., Asiati, D., Setiawan, B., Ibnu, F., Triyono, T., Rajagukguk, Z., 2023. Challenge of agriculture development in Indonesia: rural youth mobility and aging workers in agriculture sector. *Sustainability* 15, 922.
- Rahmad, Rusdinar, A., Suratman, F.Y., 2022. Sistem Penyiang Otomatis pada Rover Pertanian Cerdas dengan Pengolahan Citra. Universitas Telkom, S1 Teknik Elektro.
- Reina, G., 2024. Robotics and AI for precision agriculture. *Robotics* 13, 64.
- Sanchez, J., Gallandt, E.R., 2021. Functionality and efficacy of Franklin Robotics' TertillTM robotic weeder. *Weed Technol.* 35, 166–170.
- Shamshiri, R.R., Rad, A.K., Behjati, M., Balasundram, S.K., 2024. Sensing and perception in robotic weeding: Innovations and limitations for digital agriculture. *Sensors* 24, 6743.
- Sportelli, M., Apolo-Apolo, O.E., Fontanelli, M., Frascioni, C., Raffaelli, M., Peruzzi, A., Perez-Ruiz, M., 2023. Evaluation of YOLO object detectors for weed detection in different turfgrass scenarios. *Appl. Sci.* 13, 8502.
- Sugiarto, H., Astutik, R.P., Saputra, P.P.S., 2024. Rancang Bangun Sistem Kendali Alat Penanam Padi Otomatis Berbasis IoT Menggunakan ESP32 CAM. *G-Tech J. Teknol. Terap.* 8, 81–90.
- Syaifudin, A., Nofa, F.A., 2020. Jenis-Jenis Gulma Padi (*Oryza Sativa* L) di Lahan Pertanian Desa Terban Kecamatan Warungasem Kabupaten Batang Provinsi Jawa Tengah. *J. Biol. Samudra* 2, 128–136.
- Yin, Q., Xia, X., Liu, X., Zhang, Y., Song, S., Li, H., 2025. WITHDRAWN: Structural optimization design of spiral-driven grain detection robot based on EDEM-RecurDyn.
- Zhang, W., Miao, Z., Li, N., He, C., Sun, T., 2022. Review of current robotic approaches for precision weed management. *Curr. Robot. Rep.* 3, 139–151.
- Zheng, Y., Liu, P., Qian, L., Qin, S., Liu, X., Ma, Y., Cheng, G., 2022. Recognition and depth estimation of ships based on binocular stereo vision. *J. Mar. Sci. Eng.* 10, 1153.