

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Pengujian komunikasi komponen

Dilakukan pengujian komunikasi yang ada pada robot yang terdiri dari dua protokol komunikasi meliputi TCP/IP yang digunakan browser/website ke Raspberry Pi 5 menggunakan *hotspot*, serta UART yang digunakan untuk menghubungkan Raspberry Pi 5 dengan ESP32. Pada pengujian TCP/IP dilakukan pengecekan ping dengan mengirimkan 32 *bytes* data ke Raspberry Pi 5 yang dilakukan pada terminal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.

```
Pinging 192.168.4.1 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.4.1: bytes=32 time=24ms TTL=64
Reply from 192.168.4.1: bytes=32 time=20ms TTL=64
Reply from 192.168.4.1: bytes=32 time=16ms TTL=64
Reply from 192.168.4.1: bytes=32 time=26ms TTL=64

Ping statistics for 192.168.4.1:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 16ms, Maximum = 26ms, Average = 22ms

PS C:\Users\nabil> |
```

Gambar 4. 1. Grafik hasil training model YOLOv11n

Dari gambar tersebut didapat rata-rata kecepatan kirim data pada browser ke Raspberry Pi 5 sebesar 22 milisecond dengan nilai maksimum di angka 26 milisecond. Disisi lain untuk pengujian komunikasi UART pada ESP32 dilakukan dengan mengirim data dari Raspberry Pi 5 ke ESP32 kemudian dikembalikan lagi ke Raspberry Pi 5 menggunakan 115200 baudrate. Digunakan program python pada Lampiran 14 untuk mengirim data *string* dan menghitung delaynya untuk mengetahui nilai dari kecepatan komunikasi. Pada pengujian menggunakan 10 sampel pengiriman data, didapat data nilai delay protokol komunikasi ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1. Data pengujian modul pan-tilt

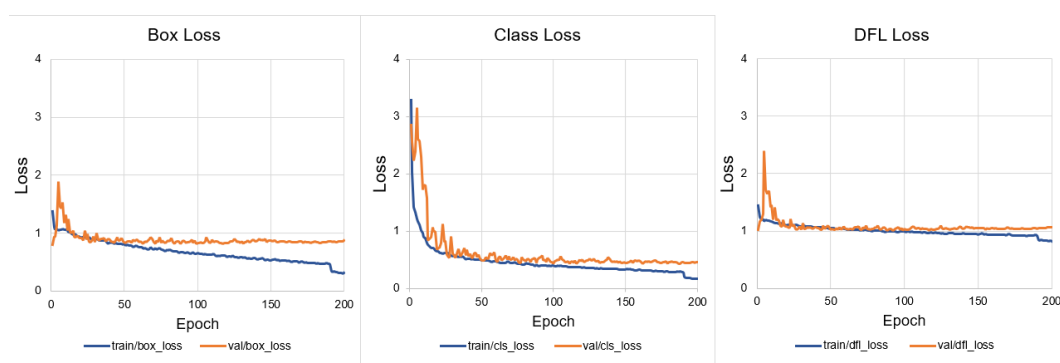
No	Paket Terkirim	Byte/sec	kbps
1	820	9840	78.72

No	Paket Terkirim	Byte/sec	kbps
2	835	10020	80.16
3	810	9720	77.76
4	825	9900	79.20
5	830	9960	79.68
6	818	9816	78.52
7	840	10080	80.64
8	822	9864	78.91
9	828	9936	79.49
10	833	9996	79.96

Didapat nilai kecepatan pengiriman data string dari Raspberry Pi ke ESP32 dengan nilai rata-rata sekitar 79.30 kbps membuktikan kecepatan pengiriman data yang optimal untuk protokol pada robot penyemprot herbisida.

4.2 Evaluasi dan analisa hasil *training* model YOLOv11n

Setelah melalui tahapan *training* data sesuai dengan tahapan pada sub bab 3.4.1 (BAB III), didapatkan hasil *training* untuk kedua model YOLOv11n seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2. Grafik hasil training model YOLOv11n

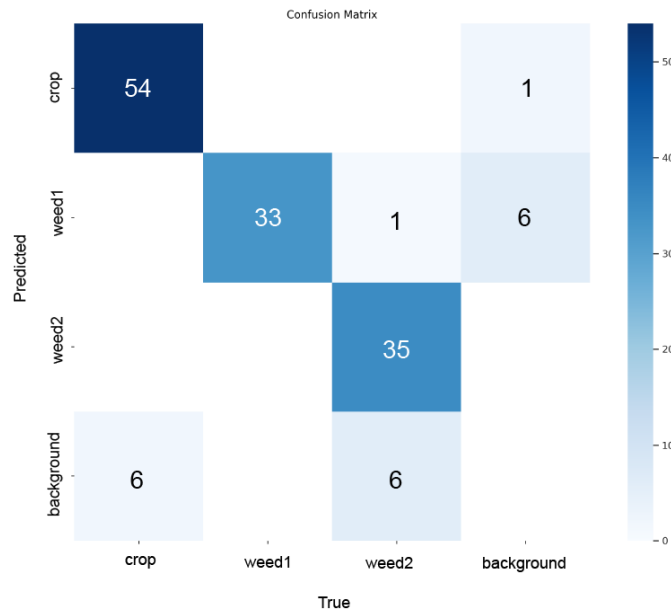
Pada Gambar 4.2. menunjukkan grafik training dari model YOLOv11n. Dari grafik tersebut didapat dinamika pembelajaran model deteksi objek pada 200 *epoch*.

Ditemui pada komponen *training loss* yaitu *box loss*, *classification loss*, dan *distribution focal loss* (DFL) mengalami penurunan yang mendekati ideal namun mulai muncul generalisasi pada *epoch* ke 80. Bersamaan dengan itu, *validation loss* juga mampu mencapai keadaan stabil dan muncul generalisasi juga seperti pada *training loss*. Dari kedua data yakni *training* dan *validation*, memberikan korelasi yang dapat ditarik kesimpulan bahwa model mampu mencapai keadaan konvergen namun juga terdeteksi *overfitting* terutama pada *box loss*.



Gambar 4.3. Nilai akhir mAP, Precision dan Recall dalam Roboflow

Pada akhir proses pelatihan, sebagaimana yang telah ditunjukkan pada Gambar 4.3, model mencapai nilai mAP@50 sebesar 95,2%, precision 95,7%, dan recall 89,6%, mengindikasikan model dengan performa kuantitatif yang tinggi, walau mengalami *overfitting*. Dari proses *training* ini pula, didapat *confusion matrix* untuk menggambarkan kinerja klasifikasi model untuk setiap kelas yang pada penelitian ini meliputi *crop*, *weed1*, dan *weed2*. Setelah mendapat nilai-nilai diatas, penulis menyampaikan analisa yang merujuk tentang konsep *bias-variance* yang ditulis oleh Bishop [34]. Dimana kesalahan generalisasi terdiri atas dua komponen utama yaitu *bias* dimana model terlalu simpel dalam melatih pola, atau *variance* dimana model terlalu kompleks dan mempelajari banyak pola termasuk *noise*. Pada penelitian ini dimana dataset sebanyak 1000 gambar diolah oleh model YOLOv11n dengan jaringan konvolusional yang cukup kompleks membuat *variance* cenderung meningkat. Namun model YOLOv11n memiliki fleksibilitas tinggi untuk membentuk *decision boundary* sehingga mampu menurunkan error pelatihan dengan cepat di sekitar 50-80 *epoch*. Namun hal ini berakibat dengan meningkatnya sensitivitas terhadap pola lain yang berkorelasi dengan kelas yang ada, pada hal ini adalah *background* yang kebetulan berkorelasi dengan kelas tanaman. Dampaknya adalah munculnya *false positive* meskipun nilai mAP tinggi.



Gambar 4.4. Confusion Matrix pada roboflow

Pada Gambar 4.4 menunjukkan kemampuan klasifikasi model dalam performa yang cukup tinggi. Walaupun begitu masih terdapat beberapa kesalahan kecil yang didominasi oleh model kebingungan terhadap background. *Confussion matrix* menjadi bukti dimana salah deteksi pada *background* beberapa kali muncul. Nilai precision 95,7% menunjukkan bahwa secara global model cukup selektif, sedangkan nilai recall 89,6% adalah *trade-off* dari generalisasi. Prediksi terhadap background dapat disimpulkan sebagai konsekuensi dari peningkatan variance walaupun begitu, model mampu dalam membedakan tanaman dan gulma.

4.3 Pengujian dan analisa hasil penyemprotan modul pan-tilt servo

Sebelum modul *pan-tilt* diinstalasi dengan *sprayer* dan pompa DC, untuk melakukan pengujian akurasi pada titik koordinat yang disemprot penulis memberikan laser pada ujung modul *pan-tilt* sebagai media penunjuk arah tembak modul penyemprot. Hal ini bertujuan untuk menyingkirkan variabel *noise* yang tidak ada kaitannya dengan tujuan pengujian ini dilakukan. Untuk menilai ketepatan dari proses penyemprotan, sebelum pengujian, penguji melakukan pengukuran

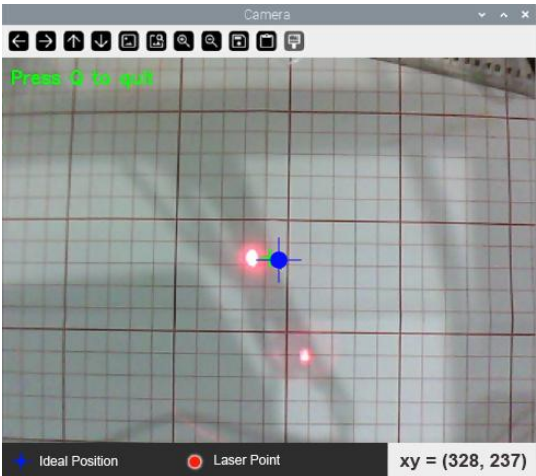
pada bidang datar bergaris (grid) dengan koordinat yang telah diketahui (satu kotak merepresentasikan 1 cm).

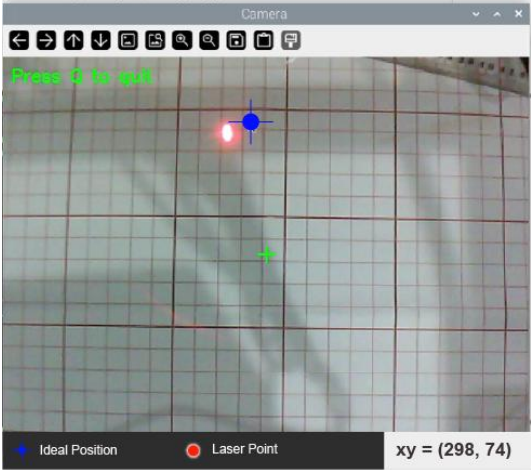
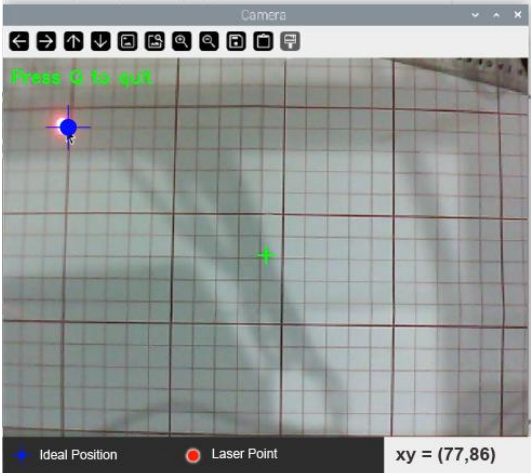
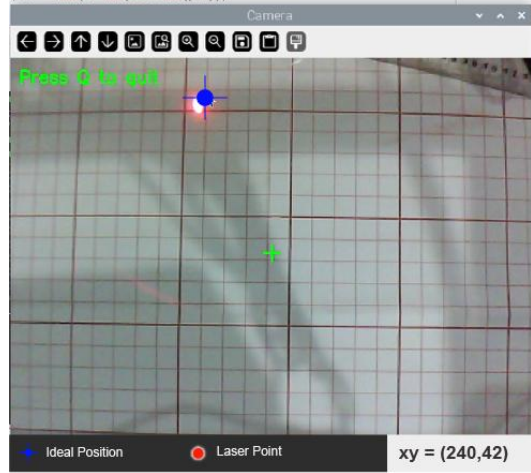
Pengujian dilakukan pada 10 titik uji. Dimana setiap *take* memberikan perintah modul penyemprot mengarah ke koordinat yang telah ditentukan kemudian dicatat nilai koordiant hasil aktualnya yang ditunjukkan pada laser. Hasil pengujian kemudian akan dimasukan dan dihitung pada perhitungan *Euclidean Distance* ditunjukkan pada persamaan (2.12).

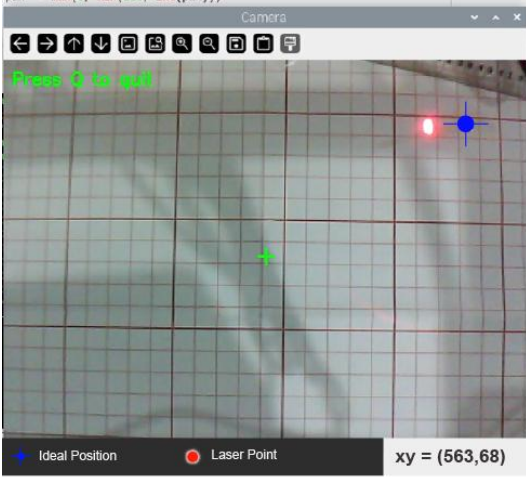
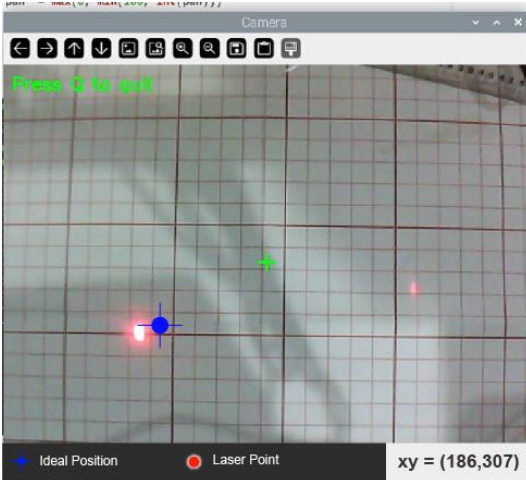
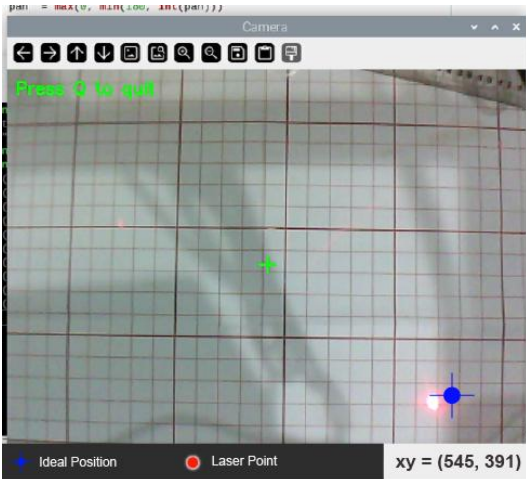
Keterangan :

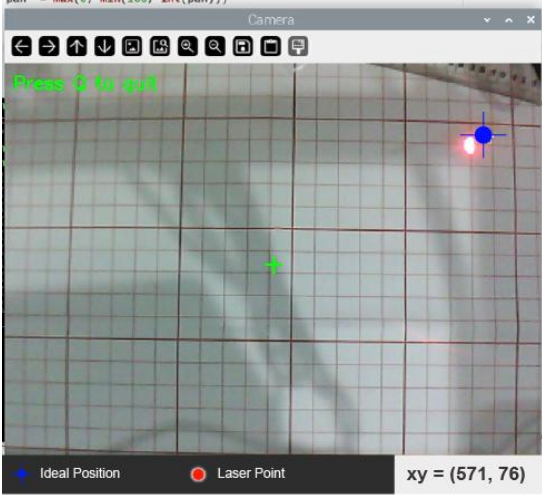
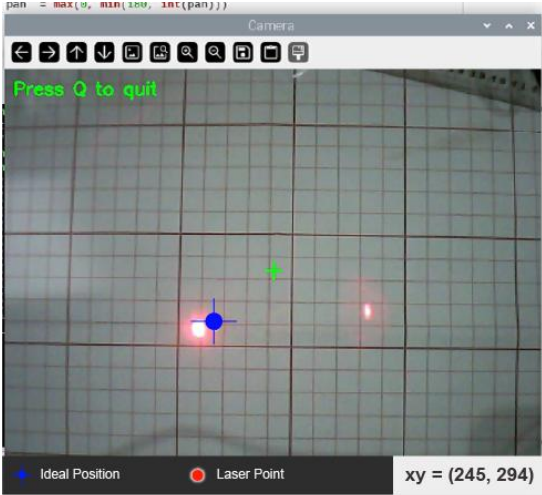
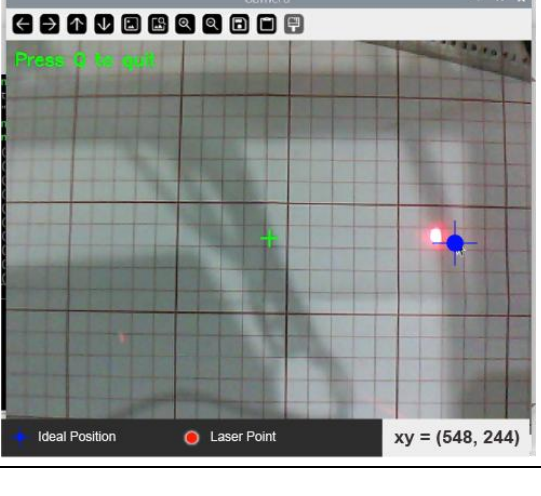
- (X_i, Y_i) = koordinat target ideal secara matematis
- (X_l, Y_l) : koordinat aktual yang terukur pada bidang uji

Tabel 4. 2. Data pengujian modul pan-tilt

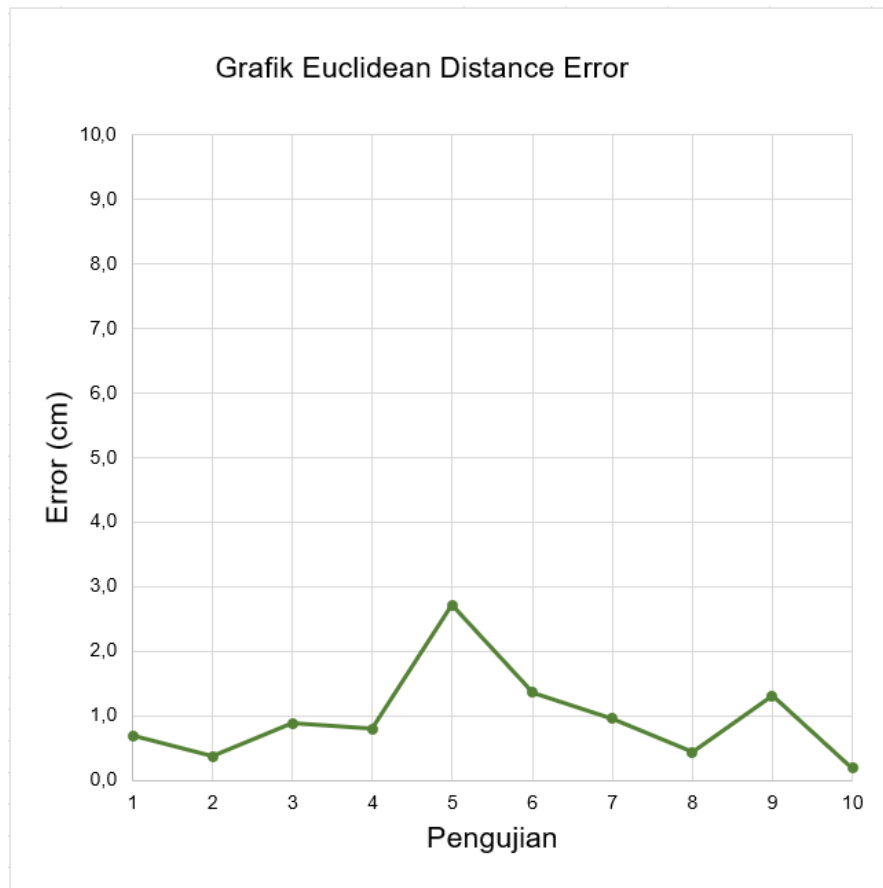
No	Documentasi	X_i (cm)	Y_i (cm)	X_l (cm)	Y_l (cm)	Error (cm)
1		0,32	0,12	1	0	0,69

No	Documentasi	X_i (cm)	Y_i (cm)	X_l (cm)	Y_l (cm)	Error (cm)
2		-0,88	6,64	-1	7	0,38
3		-9,72	6,16	-10	7	0,89
4		-3,20	7,92	-4	8	0,8

No	Documentasi	X_i (cm)	Y_i (cm)	X_l (cm)	Y_l (cm)	Error (cm)
5		9,72	6,88	7	7	2,72
6		-5,36	-2,68	-5	-4	1,37
7		9,00	-6,04	9	-7	0,96

No	Documentasi	X_i (cm)	Y_i (cm)	X_l (cm)	Y_l (cm)	Error (cm)
8		10,04	6,56	10	7	0,44
9		-3,00	-2,16	-4	-3	1,31
10		9,12	-0,16	9	0	0,2

Dari data yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 dapat digambarkan sebuah grafik untuk nilai *Euclidean Distance* melalui Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Grafik Euclidean Distance dari pengujian modul pan-tilt

Berdasarkan hasil pengujian pada sepuluh titik uji, dilakukan perhitungan pada Lampiran 6 .sistem pointing laser memiliki nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 1.19 cm, dan error maksimum sebesar 2.72 cm. Gambar 4.4 menunjukkan grafik *Euclidean Distance* pada setiap percobaan, yang memperlihatkan variasi nilai *error* pada tiap percobaan.

. Berdasarkan data dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem penyemprotan tanaman dengan modul pan-tilt dapat berjalan dengan baik dengan adanya error pada sistem dapat disimpulkan disebabkan oleh adanya bias sistematis akibat keterbatasan mekanik pada fabrikasi alat.

4.4 Pengujian dan analisa gerak robot pada medan pertanian

. Pengujian gerak robot pada medan pertanian akan berfokus pada gerakan mekanik robot yang telah dibangun diikuti dengan pengujian penyemprotan robot pada medan pertanian.

4.4.1 Pengujian dan analisa mekanik robot

Pengujian dilakukan dengan menghitung jarak tempuh robot pada medan tanah terhadap waktu untuk mengetahui kemampuan komponen dalam menggerakkan robot penyemprot herbisida di medan pertanian. Pada hal ini penulis menguji JGY 370 Worm Gear Motor dimana komponen ini adalah penggerak utama robot penyemprot. Pengujian dilakukan dengan menggerakkan robot pada lahan 3 meter diatas tanah dan menghitung durasi jarak tempuhnya. Karena spesifikasi motor telah diketahui seperti yang ditunjukkan pada sub bab 2.4.13, dihitung beban motor terhadap robot untuk bergerak dilakukan pada Lampiran 8.



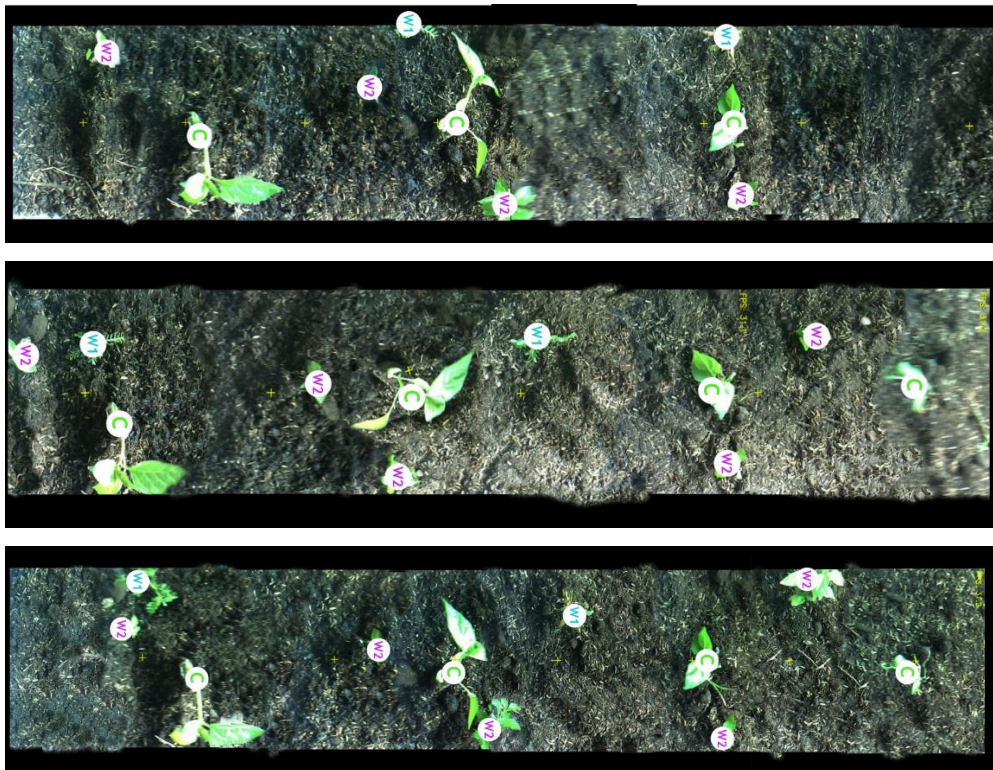
Gambar 4. 6. Dokumentasi pengujian mekanik robot

Pengujian dilakukan pada bidang tanah kebun buatan didaerah masih dalam perumahan berkelompok dengan nilai koefisien tanah sebesar 0,6 [35]. Dengan diketahuinya berat massa robot, secara matematis robot mampu bergerak di jarak 3 meter dalam waktu 15,3 detik dengan beban total 18 kg. Sementara itu dari pengujian yang telah dilakukan didapat bahwa robot bergerak sejauh 3 meter dengan beban 18 kg mencapai tujuan dalam waktu

21 detik membuktikan bahwa robot mampu bergerak pada medan pertanian dengan penurunan RPM sekitar 24% kemungkinan disebabkan karena nilai koefisien tanah di lapangan lebih besar dari yang digunakan pada perhitungan matematis.

4.4.2 Pengujian dan analisa penyemprotan robot pada medan pertanian

Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pada 3 plot lahan tanam cabai dengan luas 25cm x 100cm ditunjukkan pada Lampiran 13. Setiap pengujian mencatat jumlah gulma yang teridentifikasi (weed1 dan weed2), jumlah tanaman cabai (crop), serta jumlah kejadian gagal deteksi. Dalam konteks evaluasi ini berarti True Positive (TP) gulma berhasil disemprot, False Negative (FN) gulma tidak disemprot (gagal deteksi), False Positive (FP) tanaman cabai ikut disemprot, True Negative (TN) tanaman cabai tidak disemprot.



Gambar 4. 7. Dokumentasi *ground truth* lahan tanman cabai

Pada Gambar 4.7 ditunjukkan ketiga plot lahan tanaman cabai yang digunakan pada penelitian beserta *ground truth* atau catatan jenis asli dari setiap tanaman. *Ground truth* ini dibandingkan dengan hasil deteksi dari deteksi gambar dan penyemprotannya sehingga menghasilkan data pengujian penyemprotan yang dapat dibandingkan ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 data pengujian penyemprotan gulma di medan pertanian

plot	Total Gulma	Cabai	TP	FN	FP	TN
1	6	3	6	0	0	3
2	7	4	5	2	0	4
3	7	4	4	3	0	4

Dari pengujian robot penyemprot herbisida terhadap 3 plot lahan tanaman cabai yang ditunjukkan pada tabel 4.2, dapat diketahui nilai *Recall*, *Precision* dan *F1-Score* percobaan dengan menggunakan persamaan (2.3) , (2. 4) dan (2. 5) dihitung pada Lampiran 7 dan ditampilkan pada Tabel 4.4. Didapat data *Precision*, *Recall*, dan *F1-Score* :

Tabel 4. 4. data precision,recall dan F1-score di medan pertanian

plot	Total Gulma	Cabai	Precision	Recall	F1-Score
1	6	3	1.00	1.00	1.00
2	7	4	1.00	0.71	0.83
3	7	4	1.00	0.57	0.73

Pengujian menunjukkan precision yang tinggi pada tanaman cabai, menandakan tidak terdapat penyemprotan terhadap tanaman cabai. Hal ini mengindikasikan bahwa model mampu membedakan jenis tanaman dan gulma. Dari data ini juga didapat bahwa nilai tren recall bersifat fluktuatif dibuktikan dengan perubahan score dari 1.00 menjadi 57.00. Kasus ini berefek pada pengujian penyemprotan melewati gulma saat berjalan. Faktor dari munculnya kasus ini disebabkan beberapa hal. Pada pengujian sebelumnya diketahui *confusion matrix* ditunjukkan pada Gambar 4.4 yang menunjukkan bahwa adanya *false positive* pada pendeteksian terutama pada

background. Hal tersebut membuat model mengalami kesulitan dalam membedakan *background* dengan tanaman mengakibatkan beberapa tanaman dianggap sebagai *backgroud* ketika tidak tertangkap baik dengan kamera. Selain itu pergeseran kamera yang tidak stabil memperparah kondisi ini..