

Perangkat Keamanan Tanaman Cabai Hidroponik Menggunakan Teknologi *Object Detection*

Harlan Pakpahan
Jurusan Teknik Elektronika
Politeknik Negeri Batam

email: pneumaticsystem70@gmail.com

Fernando Josua Sejati Sirait
Jurusan Teknik Elektronika
Politeknik Negeri Batam

email: nandobenz0402@gmail.com

Fitriyanti Nakul
Jurusan Teknik Elektronika
Politeknik Negeri Batam

email: fitriyantinakul@polibatam.ac.id

Abstrak — Cabai hidroponik menawarkan hasil produksi yang tinggi dan efisien, tetapi rentan terhadap serangan hama yang dapat mengurangi kualitas dan kuantitas panen. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan perangkat deteksi hama pada tanaman cabai hidroponik menggunakan teknologi *vision* berupa deteksi objek guna mengurangi dampak negatif dari serangan hama. Metode yang digunakan mencakup pengambilan data visual dari tanaman cabai, pelabelan citra untuk melatih model deteksi objek menggunakan algoritma *deep learning*, dan mengimplementasikan perangkat deteksi hama secara dini dalam lingkungan hidroponik. Perangkat ini berupa robot *line follower* yang dilengkapi dengan dua unit Ai Cam yang mampu mendeteksi keberadaan hama dan melakukan tindakan pencegahan dengan menyemprotkan pestisida. Perangkat ini diuji pada kondisi variasi sudut penangkapan gambar, jarak pengambilan gambar dan kondisi pencahayaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perangkat keamanan yang dikembangkan berhasil beroperasi dalam kondisi yang cukup stabil dengan parameter konfigurasi yang direkomendasikan pada sudut penangkapan gambar 90°, jarak 5cm – 8cm dan pencayahan 400-500 lux, dengan capaian presisi, *recall* dan *F1-score* sebesar 0.80.

Kata Kunci — AI Cam, Deteksi objek, Deep learning, Hidroponik, Keamanan, Line follower

Abstract—Hydroponic chili offers high and efficient production yields, but is vulnerable to pest attacks that can reduce crop quality and quantity. This research aims to develop a pest detection tool in hydroponic chili plants using vision technology in the form of object detection to reduce the negative impact of pest attacks. The methods used include capturing visual data from chili plants, labeling images to train object detection models using deep learning algorithms, and implementing early pest detection devices in a hydroponic environment. The device is a line follower robot equipped with two Ai Cam units capable of detecting the presence of pests and taking preventive action by spraying pesticides. This device was tested under conditions of variations in image capture angle, image capture distance and lighting conditions. The results showed that the developed security device successfully operated under fairly stable conditions with recommended configuration parameters at an image capture angle of 90°, a distance of 5cm - 8cm and an illumination of 500 lux, with a total precision, recall and *F1-score* rate 0.80.

Index Terms—Ai Cam, Object detection, Deep learning, Hydroponics, Security, Line follower

I. PENDAHULUAN

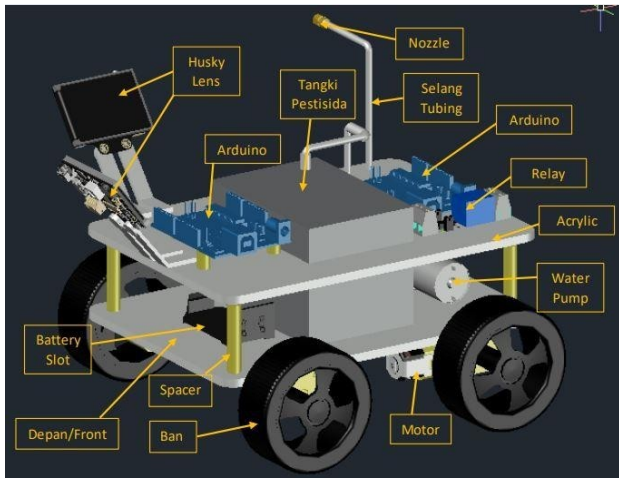
Budidaya tanaman cabai di Indonesia sebagian besar masih dilakukan secara konvensional, yaitu menggunakan media tanam tanah. Sistem ini rentan terhadap serangan hama dan penyakit, sehingga menyebabkan gagal panen [1]. Data lapangan menunjukkan bahwa 62% kegagalan panen cabai di Indonesia disebabkan oleh hama dan penyakit. Cabai merupakan komoditas hortikultura bernilai tinggi dan dibudidayakan oleh lebih dari 1 juta petani; sektor pertanian menyumbang sekitar 14,23% terhadap PDB pada tahun 2023 [2], [3]. Serangan hama dapat menurunkan hasil panen hingga 50%, menyebabkan krisis pangan dan kerugian ekonomi signifikan [4]. Pada sistem hidroponik—walaupun wadah lebih kecil dan lingkungan terkontrol—hama seperti ulat grayak lebih mudah menyerang tanaman cabai [5], [6]. Ulat grayak dapat merusak daun, batang, dan buah cabai [7], [8]. Untuk mengatasi ini, kami mengusulkan perangkat keamanan cabai hidroponik yang memanfaatkan visi komputer. Sistem ini menggunakan kamera dan algoritma deteksi objek secara *real-time* [1], [9]. Setelah hama terdeteksi, perangkat akan menyemprot pestisida secara otomatis, untuk mengurangi paparan pada petani [10], [11]. Metode tradisional seperti pemantauan manual dan penyemprotan berkala kurang efektif karena butuh banyak tenaga dan sering menyemprot berlebihan [12]. Sensor optik atau kimia memiliki keterbatasan dalam identifikasi spesifik hama [13], [14]. Sistem kami unggul dalam *recall* tinggi, presisi tinggi, dan *F1-score* optimal — metrik penting dalam visi komputer [9], [15]. Sensor AI Cam HuskyLens dipilih karena kemampuan onboard AI—*object detection*, *line tracking*, lebih kompleks daripada sensor inframerah biasa [16]. Integrasi dengan Arduino via I²C memudahkan pengembangan sistem keamanan berbasis visi [17].

II. METODE PENELITIAN

A. Perancangan Perangkat Keamanan

Perangkat ini berupa robot *line follower* yang dikonfigurasi dengan pemasangan dua kamera AI yang masing-masing diposisikan pada bagian bawah dan pada bagian atas perangkat. Kamera tersebut berfungsi untuk memproses pergerakan perangkat dan pemantauan hama. Pada perangkat juga terdapat beberapa komponen utama dan komponen pendukung yang terdiri dari baterai, motor DC gearbox, modul relay

1 channel, 4 roda penggerak, pompa untuk menyemprotkan pestisida, serta kabel dan konektor untuk menghubungkan semua bagian di perangkat ini.



Gambar 1: Komponen-komponen pada perangkat keamanan hidroponik.

Komponen - komponen tersebut dihubungkan ke mikrokontroler Arduino Uno sebagai pengontrol sistem yang akan dimasukkkan program untuk pergerakan perangkat serta kestabilan kamera ai dalam mendeteksi hama yang terdapat pada tanaman cabai. Semua komponen pada perangkat tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.

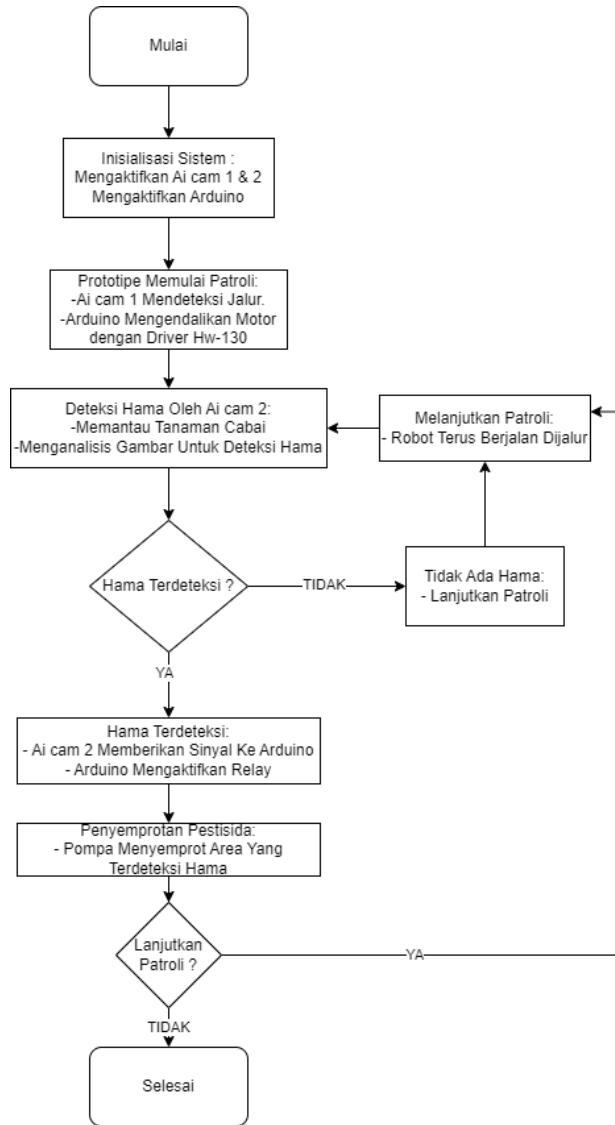
B. Flowchart Mekanisme Kerja Perangkat Keamanan

Perangkat berkerja dimulai dengan menginisialisasi sistem dengan menyalakan perangkat keras dan menghubungkan kabel pada perangkat serta menginisialisasi perangkat lunak dengan AI Cam, yang berfungsi untuk mengambil gambar tanaman cabai dan menganalisisnya untuk mendeteksi hama. Selanjutnya dilakukan penyemprotan pestisida jika hama terdeteksi, AI Cam akan mengirim sinyal ke Arduino, kemudian diproses oleh Arduino untuk memberikan trigger pada modul relay dan mengaktifkan pompa pestisida. Pompa pestisida kemudian menyemprotkan pestisida ke area yang terdeteksi hama. Selanjutnya, jika hama tidak terdeteksi, perangkat melanjutkan pergerakan sesuai jalur yang dideteksi menggunakan kamera AI.

Perangkat mengikuti jalur yang telah ditentukan untuk berpatrioli di sekitar kebun cabai. Selanjutnya Sistem akan dimatikan ketika perangkat menyelesaikan patroli dengan 1 siklus. Flowchart mekanisme kerja perangkat keamanan dapat dilihat pada Gambar 2.

C. Perancangan Desain Elektrikal

Rangkaian sistem kelistrikan pada perangkat keamanan ini dirancang untuk mendukung fungsi navigasi dan penyemprotan pestisida secara otomatis. Sumber utama tegangan berasal dari baterai 12VDC, yang pertama kali dialirkan ke terminal konektor sebagai pusat distribusi daya. Dari terminal ini, tegangan 12V disalurkan ke beberapa komponen utama,

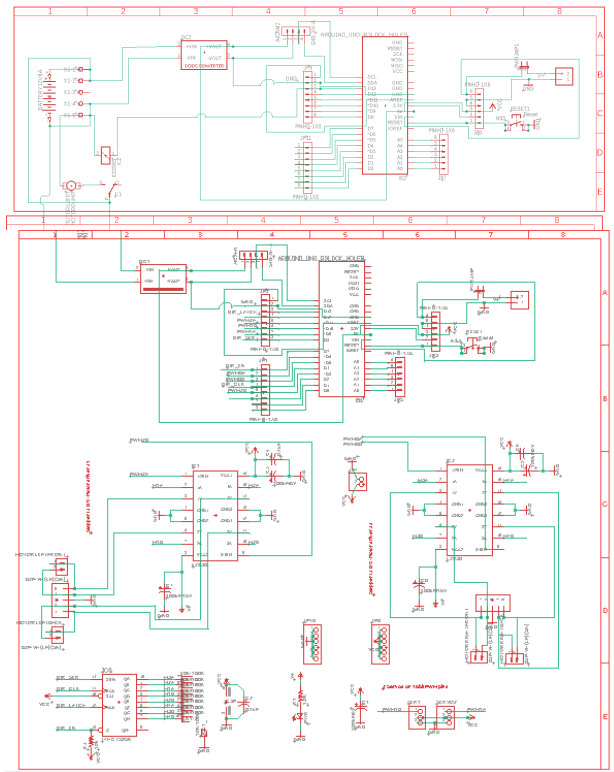


Gambar 2: Flowchart perangkat keamanan.

yaitu ke motor-motor gearbox sebagai aktuator penggerak roda, ke modul relay yang mengontrol motor pompa, serta ke modul konverter DC to DC. Konverter ini berfungsi menurunkan tegangan dari 12V menjadi 5V untuk menyuplai daya ke Arduino Uno, dua modul kamera AI HuskyLens, dan relay.

Unit kendali utama pergerakan perangkat keamanan ini adalah Arduino Uno yang dipasangkan dengan motor driver shield tipe HW-130. Shield ini digunakan untuk mengontrol arah dan kecepatan empat buah motor gearbox melalui pin digital. Untuk M1 dibagian sisi kiri depan dan belakang menggunakan pin digital D3, untuk M2 sisi kanan depan dan belakang menggunakan pin digital D5. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.

Untuk navigasi, Kamera HuskyLens pertama difungsikan untuk membaca dan mengikuti jalur garis hitam pada permukaan, layaknya prinsip kerja robot line follower. Kamera ini mengenali jalur secara visual menggunakan fitur line track-



Gambar 3: Desain elektikal.

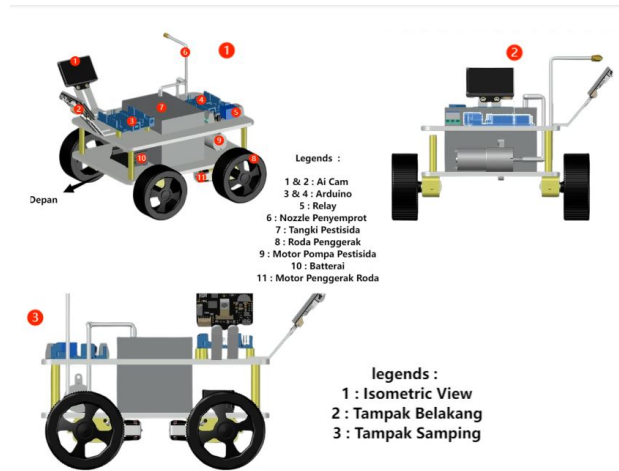
ing berbasis pembelajaran mesin, dan mengirimkan informasi posisi garis ke Arduino melalui komunikasi I2C. Kamera kedua digunakan khusus untuk mendeteksi hama ulat pada tanaman cabai. Kedua kamera terhubung ke Arduino melalui pin I2C, yaitu A4 (SDA) dan A5 (SCL), dan masing-masing telah dikonfigurasi dengan alamat I2C yang berbeda agar dapat dikenali secara independen. Kedua kamera mendapatkan pasokan daya 5V dan GND dari modul konverter.

Apabila kamera pendeteksi hama mengenali keberadaan ulat, Arduino akan memberikan sinyal logika HIGH ke pin digital D13, yang terhubung ke modul relay. Ketika relay aktif, arus 12V dari baterai akan dialirkan ke motor pompa DC, sehingga cairan pestisida disemprotkan ke area yang terdeteksi selama waktu tertentu sesuai pemrograman selama 6 detik. Setelah penyemprotan selesai, Arduino mematikan relay dan robot kembali melanjutkan pergerakan mengikuti jalur. Dengan rancangan ini, robot mampu bergerak secara mandiri mengikuti jalur, mendeteksi keberadaan hama, dan melakukan tindakan penyemprotan secara otomatis, berkat integrasi antara sistem penglihatan berbasis AI dan kendali aktuator berbasis mikrokontroler.

D. Perancangan Desain Mekanik

Desain mekanikal pada perangkat keamanan tanaman cabai ini dibuat dengan dimensi ukuran 50cm x 30cm x 45cm yang dibuat dengan material akrilik. Selain itu, terdapat tangki di bagian tengahnya dengan ukuran 10cm x 15cm x 20cm, untuk menyimpan pestisida. Pada bagian atas perangkat terpasang

camera AI untuk pendeteksi hama, dan selanjutnya terdapat Arduino sebagai pengontrol semua pergerakan tegangan yang masuk dan keluar, lalu terdapat juga relay untuk mengontrol pompa pestisida dan yang terakhir terdapat tubing yang menjulang tinggi keatas dan diarahkan secara vertical untuk menyemprotkan pestisida jika hama terdeteksi. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4: Desain mekanikal.

Pada bagian perangkat terdapat 2 buah AI Cam untuk mengontrol pergerakan sesuai dengan jalur yang sudah ditentukan dan juga untuk mendeteksi hama pada tanaman cabai, lalu terdapat tangki yang dibuat dari material akrilik yang dapat dimodifikasi dengan bentuk bongkar pasang apabila pestisida habis, tangki bisa diambil melewati bagian atas perangkat

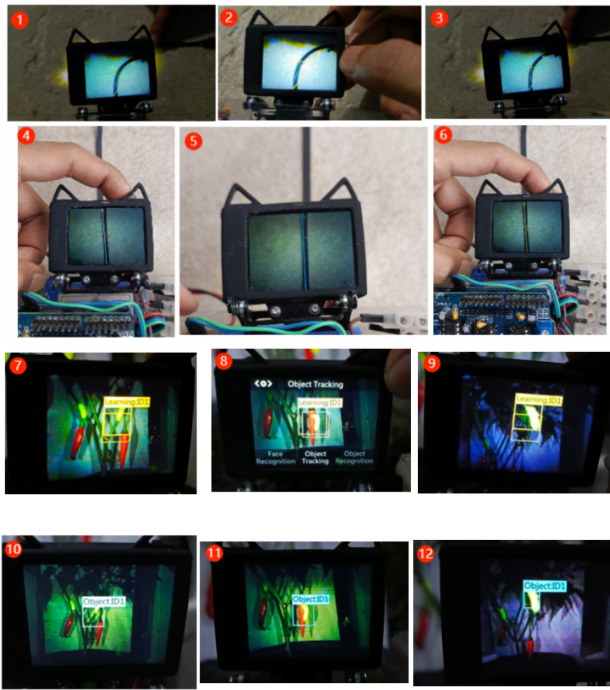
E. Pengumpulan Data Visual

Tahap pengumpulan data visual dilakukan untuk membentuk *dataset* yang akan digunakan dalam pelatihan model deteksi objek. Kamera AI HuskyLens digunakan untuk dua fungsi utama, yaitu *line tracking* (pelacakan jalur untuk navigasi) dan *object detection* (deteksi hama). Dua unit kamera dipasang pada bagian bawah dan atas perangkat; kamera bawah digunakan untuk pelacakan jalur, sedangkan kamera atas digunakan untuk mendeteksi hama pada tanaman cabai.

Gambar 5 memperlihatkan proses pembelajaran dan deteksi, baik pada jalur navigasi maupun pada objek hama, sesuai keterangan indeks 1–12. Metode ini menghasilkan *dataset* visual yang beragam untuk meningkatkan akurasi model deteksi objek.

1) Line Tracking: *Menu Line Tracking* pada HuskyLens digunakan untuk mempelajari pola jalur berupa garis hitam sebagai acuan pergerakan robot. Tampilan monitor AI Cam menampilkan tiga indikator warna:

- Putih: jalur default yang belum dipelajari (indeks 1 dan 4).
- Kuning: jalur dalam tahap pembelajaran (*learning*) (indeks 2 dan 5).
- Biru: jalur telah dipelajari dan dikenali (indeks 3 dan 6).



Gambar 5: Pengumpulan data visual.

Indeks 1–3 menunjukkan pembelajaran garis berbelok, sedangkan indeks 4–6 menunjukkan pembelajaran garis lurus. Setelah jalur dikenali, robot dapat bergerak mandiri mengikuti lintasan.

2) Object Detection: *Menu Object Detection* digunakan untuk mendeteksi keberadaan hama. Karena sulit memperoleh data hama asli secara konsisten, digunakan *hama dummy* sebagai pengganti. Warna *bounding box* pada monitor menunjukkan status pembelajaran dan deteksi:

- Kuning: kamera sedang mempelajari objek hama (*learning*). Indeks 7–9: hama pada batang, buah, dan daun cabai.
- Biru: kamera telah mendeteksi objek hama dan memberi label *Object ID1*. Indeks 10–12: deteksi hama pada buah dan daun cabai.

3) Faktor Teknis Pengambilan Data:

- 1) **Posisi Penempatan:** Hama dummy diletakkan pada batang, buah, dan daun.
- 2) **Variasi Sudut dan Jarak:** Pengambilan gambar pada sudut 90°, 45°, dan 135°, dengan jarak 5 cm, 8 cm, dan 10 cm.
- 3) **Kondisi Pencahayaan:** Pencahayaan rendah, sedang, dan tinggi untuk memastikan model bekerja di berbagai kondisi.

F. Pelabelan Citra

Pelabelan citra merupakan tahap penting dalam proses pelatihan model deteksi objek. Pada penelitian ini, setiap citra yang diambil oleh kamera AI HuskyLens diberi label secara otomatis berdasarkan objek yang terdeteksi. Apabila objek yang terdeteksi adalah *hama dummy*, HuskyLens

memberikan label bawaan seperti *IDI* untuk mewakili kelas “hama”. Apabila di kemudian hari tersedia data hama asli, proses pelabelan dapat diperbarui agar sesuai dengan jenis hama sebenarnya.



Gambar 6: Pelabelan citra pada perangkat.

Proses ini menghasilkan dataset yang siap digunakan untuk pelatihan model deteksi objek. Penggunaan kamera AI HuskyLens memberikan efisiensi tinggi karena mampu menggabungkan pengambilan citra, pelabelan otomatis, dan pembelajaran model secara terintegrasi. Model dapat dioptimalkan kembali (*refined*) dengan data hama asli untuk meningkatkan akurasi dan efektivitas deteksi pada tanaman cabai hidroponik.

Gambar 6 menampilkan enam tahap utama pelabelan dan deteksi:

- 1) **Indeks 1:** Tahap *learning* hama pada buah cabai. Ditandai dengan *bounding box* berwarna kuning dan label *Learning ID1* pada layar kamera.
- 2) **Indeks 2:** Tahap *learning* hama pada daun cabai, ditandai dengan *bounding box* kuning dan label *Learning ID1*.
- 3) **Indeks 3:** Tahap *learning* hama pada batang cabai, juga menggunakan *bounding box* kuning dan label *Learning ID1*.
- 4) **Indeks 4:** Deteksi berhasil pada hama di buah cabai. *Bounding box* berubah menjadi biru dengan label *Object ID1*, menandakan objek telah dikenali.
- 5) **Indeks 5:** Deteksi berhasil pada hama di daun cabai, dengan *bounding box* biru dan label *Object ID1*.
- 6) **Indeks 6:** Deteksi berhasil pada hama di batang cabai, dengan *bounding box* biru dan label *Object ID1*.

G. Penggunaan Confusion Matrix dan Metrik

Confusion Matrix menyediakan alat penting untuk mengevaluasi performa model klasifikasi hama tanaman. Akurasi mengukur proporsi prediksi yang benar secara keseluruhan, presisi menunjukkan proporsi prediksi hama yang benar dari semua prediksi hama, recall menunjukkan proporsi hama yang benar-benar terdeteksi, spesifisitas menunjukkan proporsi non-hama yang benar-benar terdeteksi, dan F1-Score memberikan keseimbangan antara presisi dan recall. Memahami metrik-metrik ini sangat penting untuk mengetahui seberapa sering model membuat prediksi yang benar, menilai kemampuan model dalam memprediksi hama secara akurat, mengevaluasi kemampuan model dalam mendeteksi hama yang ada, menentukan apakah model mampu mengklasifikasikan non-hama dengan baik, serta menemukan keseimbangan antara presisi dan recall dalam performa model.

Dimana:

- Prediksi Positif (P) adalah gambar yang diprediksi sebagai hama.
- Prediksi Negatif (N) adalah gambar yang diprediksi sebagai bukan hama.
- Aktual Positif (P) adalah gambar yang sebenarnya adalah hama.
- Aktual Negatif (N) adalah gambar yang sebenarnya bukan hama.

Berikut adalah rumus yang digunakan untuk menghitung metrik-metrik pada confusion matrix:

1) Akurasi mengukur seberapa sering model membuat prediksi yang benar:

$$\text{Akurasi} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\%$$

2) Presisi mengukur seberapa akurat model dalam memprediksi hama:

$$\text{Presisi} = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\%$$

3) Recall (Sensitivitas atau True Positive Rate) mengukur seberapa baik model dalam mendeteksi hama sebenarnya:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\%$$

4) Spesifisitas mengukur seberapa baik model dalam mendeteksi non-hama:

$$\text{Spesifisitas} = \frac{TN}{TN + FP} \times 100\%$$

5) F1-Score adalah rata-rata harmonik dari presisi dan recall:

$$\text{F1-Score} = 2 \times \frac{\text{Presisi} \times \text{Recall}}{\text{Presisi} + \text{Recall}}$$

Dalam penelitian ini, metrik evaluasi utama yang digunakan adalah Recall, karena sistem harus mampu mendeteksi sebanyak mungkin hama untuk mencegah kerusakan tanaman. Selain itu, Presisi diperhitungkan untuk menilai akurasi penyemprotan pestisida agar tidak menyasar tanaman yang

Tabel 1 Confusion Matrix.

		Prediksi	
		Positive	Negative
Aktual	Positive	<p><i>True Positive (TP)</i> Jumlah kasus hama yang benar-benar terdeteksi sebagai hama</p>	<p><i>False Negative (FN)</i> Jumlah kasus hama yang tidak terdeteksi sebagai hama</p>
	Negative	<p><i>False Positive (FP)</i> Jumlah kasus non-hama yang salah terdeteksi sebagai hama</p>	<p><i>True Negative (TN)</i> Jumlah kasus non-hama yang benar-benar tidak terdeteksi sebagai hama</p>

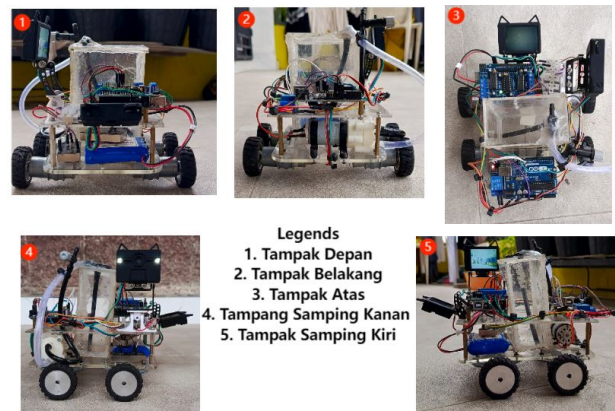
sehat. Kinerja keseluruhan sistem ditinjau melalui F1-Score, yang merepresentasikan keseimbangan antara kemampuan deteksi dan ketepatan aksi.

III. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dan tingkat akurasi alat deteksi yang dirancang dan dibuat. Tujuan dari pengujian adalah untuk memastikan bahwa setiap komponen berfungsi dengan baik serta memeriksa integrasi perangkat yang akan dirakit

A. Hasil Pengujian

Salah satu pengujian yang dilakukan adalah pengujian tingkat akurasi Line Tracking AI Cam. dilakukan dengan berbagai metode, seperti uji lintasan lurus, berliku, dan beragam kondisi cahaya. Akurasi diukur menggunakan metrik seperti kesalahan jarak, sudut, tingkat keberhasilan, dan waktu penyelesaian. parameter yang memengaruhi akurasi termasuk kualitas kamera, kondisi cahaya, sudut penangkaapan, kecepatan robot, dan algoritma line tracking. Peningkatan akurasi dapat dilakukan dengan meningkatkan kualitas kamera, menambahkan penerangan, mengoptimalkan algoritma, dan meningkatkan kecepatan pemrosesan gambar. AI Cam Huskylens 1 sebagai line tracking dan AI Cam Huskylens 2 sebagai pendeteksi hama pada tanaman cabai.



Gambar 7: Perangkat keamanan.

Perangkat keamanan pada Gambar 7 ini menggunakan teknologi vision object detection berbasis AI Cam dan

mikrokontroller yang telah berhasil dirancang untuk mendeteksi hama secara otomatis dan mengontrol penyemprotan pestisida guna menjaga kesehatan tanaman cabai selama masa pertumbuhan. Selain itu, perangkat juga dilengkapi dengan sistem navigasi berbasis line tracking yang memungkinkan perangkat untuk bergerak secara mandiri di sekitar kebun hidroponik. Pengujian dilakukan pada perangkat keamanan tanaman cabai hidroponik melalui teknologi vision object detection. Hasil pengujian mencakup efektivitas sistem pada berbagai kondisi parameter sudut, pencahayaan dan jarak penangkapan. Perangkat diuji untuk pendeteksian hama maupun navigasi jalur. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan metrik confusion matrix yang mencakup True Positive (TP), False Negative (FN), False Positive (FP), dan True Negative (TN), serta tingkat akurasi sebagai ukuran utama keberhasilan sistem.

Hasil pengujian yang telah diuji sebagai berikut

- Hasil Pengujian Line Tracking

Pada Tabel 2. dapat dilihat pengujian dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi sistem dalam mendeteksi jalur yang telah ditentukan. Pengujian mencakup dua jenis jalur, yaitu jalur lurus dan berbelok, dengan tiga variasi pencahayaan: pencahayaan tinggi (10000-25000 lux), pencahayaan sedang (400-500 lux), dan pencahayaan rendah (0.002 lux).

Tabel 2 Hasil pengujian line tracking.

No	Kondisi Pengujian	Jenis Jalur	Parameter	TP	FN	FP	TN	Precisi	Recall	Spesifisitas	F1 Score	Akurasi (%)
1	Pencabayaan Tinggi	Lurus	10.000–25.000 lux (<i>siang hari, tidak langsung</i>)	6	3	1	0	0.86	0.67	0.00	0.75	60.00%
2	Pencabayaan Tinggi	Berbelok	10.000–25.000 lux (<i>siang hari, tidak langsung</i>)	5	3	2	0	0.71	0.62	0.00	0.67	50.00%
3	Pencabayaan Sedang	Lurus	400 lux (<i>matahari terbenam, langit cerah</i>)	8	2	0	0	1.00	0.80	0.00	0.89	80.00%
4	Pencabayaan Sedang	Berbelok	400 lux (<i>matahari terbenam, langit cerah</i>)	7	2	1	0	0.88	0.78	0.00	0.83	70.00%
5	Pencabayaan Rendah	Lurus	0.002 lux (<i>malam hari tanpa bulan</i>)	8	2	0	0	1.00	0.80	0.00	0.89	80.00%
6	Pencabayaan Rendah	Berbelok	0.002 lux (<i>malam hari tanpa bulan</i>)	7	2	1	0	0.88	0.78	0.00	0.83	70.00%

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pencahayaan sedang (400–500 lux) memberikan tingkat akurasi terbaik untuk line tracking, dengan akurasi 80% untuk jalur lurus dan 70% untuk jalur berbelok. Sebaliknya, pencahayaan tinggi (1000 lux) menurunkan akurasi, terutama pada jalur berbelok (50%), karena adanya pembiasan cahaya yang mengganggu kemampuan HuskyLens dalam mengenali jalur.

- Hasil Pengujian Deteksi Hama

Pengujian deteksi hama dilakukan dengan berbagai kondisi pencahayaan, sudut kamera, dan jarak pengambilan gambar. Hasil pengujian ditunjukkan dalam table 3

B. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian, beberapa faktor utama yang mempengaruhi akurasi sistem adalah pencahayaan, sudut kamera, dan jarak deteksi sebagai berikut:

Tabel 3 Hasil pengujian deteksi hama.

No	Kondisi Pengujian	Parameter	TP	FN	FP	TN	Precisi	Recall	Spesifisitas	F1 Score	Akurasi (%)
1	Pencabayaan Tinggi	10.000–25.000 lux (<i>siang hari, tidak langsung</i>)	2	3	2	3	0.50	0.40	0.60	0.44	50.00%
2	Pencabayaan Sedang	400 lux (<i>matahari terbenam</i>)	4	1	1	4	0.80	0.80	0.80	0.80	80.00%
3	Pencabayaan Rendah	0.002 lux (<i>malam tanpa bulan</i>)	4	2	1	3	0.80	0.67	0.75	0.73	70.00%
4	Sudut 90°	Kamera sejajar	4	1	1	4	0.80	0.80	0.80	0.80	80.00%
5	Sudut 45°	Kamera miring 45°	3	2	2	3	0.60	0.60	0.60	0.60	60.00%
6	Sudut 135°	Kamera miring ke bawah	2	3	2	3	0.50	0.40	0.60	0.44	50.00%
7	Jarak 5 cm	Jarak dekat	4	2	1	3	0.80	0.67	0.75	0.73	70.00%
8	Jarak 8 cm	Jarak sedang	3	2	2	3	0.60	0.60	0.60	0.60	60.00%
9	Jarak 10 cm	Jarak jauh	0	5	0	5	0.00	0.00	1.00	0.00	50.00%

- **Pencabayaan sedang (400–500 lux)** menunjukkan performa terbaik dengan presisi 0,80, recall 0,80, spesifisitas 0,80, dan F1-score 0,80.
- **Pencabayaan tinggi (10 000–25 000 lux)** menurunkan performa secara signifikan dengan presisi 0,50, recall 0,40, dan F1-score 0,44. Hal ini disebabkan oleh pembiasan cahaya yang tinggi, yang mengganggu tampilan visual objek dan mengurangi akurasi deteksi.
- **Pencabayaan rendah (0,002 lux)** menunjukkan hasil yang cukup baik, dengan presisi 0,80, recall 0,67, dan F1-score 0,73, meskipun terdapat sedikit penurunan akurasi akibat *noise* pencahayaan rendah.
- **Sudut 90°** (kamera sejajar dengan tanaman) merupakan sudut terbaik, dengan presisi 0,80, recall 0,80, dan F1-score 0,80.
- **Sudut 45°** menurunkan kinerja AI Cam dengan presisi dan recall masing-masing 0,60, dan F1-score 0,60, menunjukkan adanya sedikit distorsi dalam tampilan objek.
- **Sudut 135°** (kamera miring ke bawah secara ekstrem) memberikan hasil paling buruk, dengan presisi 0,50, recall 0,40, dan F1-score 0,44, karena sudut terlalu curam membuat bentuk objek hama tidak terbaca optimal.
- **Jarak 5 cm** memberikan performa terbaik, dengan presisi 0,80, recall 0,67, dan F1-score 0,73.
- **Jarak 8 cm** masih cukup akurat, meskipun terjadi penurunan ke presisi 0,60 dan F1-score 0,60.
- **Jarak 10 cm**, AI Cam gagal mendeteksi hama (TP = 0), menghasilkan presisi dan recall 0, serta F1-score 0, karena objek menjadi terlalu kecil atau tidak terlihat dalam frame pengambilan gambar.

Pencahayaan adalah ukuran dari banyaknya fluks cahaya yang tersebar di suatu area tertentu. Fluks cahaya (diukur dalam lumen) merepresentasikan jumlah total cahaya yang terlihat, sedangkan pencahayaan mengukur intensitas cahaya pada suatu permukaan. Jumlah cahaya yang menerangi suatu permukaan akan semakin rendah jika tersebar pada area yang lebih luas, sehingga pencahayaan berbanding terbalik dengan luas area ketika fluks cahaya konstan.

Satu lux setara dengan satu lumen per meter persegi:

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2 = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr/m}^2.$$

Misalnya, fluks sebesar 1000 lumen yang terfokus pada area 1 m² akan menghasilkan pencahayaan sebesar 1000 lux.

Namun, fluks yang sama bila tersebar pada area 10 m² hanya menghasilkan pencahayaan sebesar 100 lux.

Berikut adalah beberapa contoh tingkat pencahayaan pada berbagai kondisi:

Tabel 4 Pencahayaan berbagai kondisi.

Pencahayaan (lux)	Permukaan diterangi oleh
0.0001	Malam tanpa bulan, langit mendung saat malam.
0.002	Langit malam tanpa bulan yang cerah dengan pijaran udara
0.05–0.36	Bulan purnama di langit malam yang cerah
3.4	Batas antara kegelapan saat senja di pemukiman di bawah langit yang cerah
20–50	Tempat umum, dengan lingkungan yang gelap
50	Penerangan ruang tamu keluarga (Australia, 1998)
80	Gedung kantor, lorong/Toilet pencahayaan
100	Mendung yang sangat gelap di siang hari.
320–500	Penerangan kantor
400	Matahari Terbit atau matahari terbenam pada hari yang cerah
1000	Hari mendung, Pencahayaan di TV studio
10,000–25,000	Siang hari (tidak terkena matahari langsung)
32,000–100,000	Sinar matahari

Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa sistem deteksi berbasis AI Cam cukup efektif, tetapi masih dapat ditingkatkan dengan penyesuaian lebih lanjut dalam hal pencahayaan, sudut pengambilan gambar, dan algoritma deteksi yang lebih akurat. Untuk ilustrasi pergerakan perangkat keamanan ini bisa dilihat pada gambar 8.



Gambar 8: Ilustrasi pergerakan perangkat keamanan.

IV. KESIMPULAN

Sistem deteksi hama berbasis *vision object detection* yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan akurasi yang bervariasi tergantung pada kondisi pencahayaan, sudut kamera, dan jarak deteksi. Performa optimal dicapai pada pencahayaan sedang (400–500 lux), sudut kamera 90°, dan jarak 5 cm dari objek, dengan nilai presisi, *recall*, spesifisitas, dan skor-F1 tertinggi. Pencahayaan berlebih menurunkan akurasi akibat pembiasan cahaya, sedangkan pencahayaan rendah meningkatkan tingkat *noise*. Sudut kamera yang terlalu curam dan jarak

yang terlalu jauh juga menurunkan kinerja deteksi. Sistem ini berpotensi digunakan untuk pengendalian hama secara otomatis dan efektif pada budidaya cabai hidroponik. Penelitian selanjutnya difokuskan pada pengembangan algoritma yang lebih adaptif guna meningkatkan akurasi deteksi pada berbagai kondisi lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Teixeira, J. Ribeiro, R. Morais, and J. Sousa, "A systematic review on automatic insect detection using deep learning," *Agriculture*, vol. 13, no. 3, p. 713, 2023.
- [2] Badan Pusat Statistik (BPS), "Indikator pertanian 2023," 2024.
- [3] Kementerian Pertanian RI, "Analisis pdb sektor pertanian 2023," 2024.
- [4] T. Nguyen *et al.*, "A systematic review of pesticide exposure, associated risks, and health outcomes," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 21, 2024.
- [5] C. Schneider, J. Swiatek, and M. Jelali, "Detection of growth stages of chilli plants in a hydroponic grower using yolov8," *Sustainability*, vol. 16, no. 15, p. 6420, 2024.
- [6] S. Rahman *et al.*, "Pest incidence in hydroponic vegetables: causes and management," *Horticulture Research*, 2022.
- [7] I. Agustian, R. Faurina, S. Ishak, and F. Utama, "Deep learning pest detection on Indonesian red chili pepper plant based on fine-tuned yolov5," *Int. J. Adv. Intell. Informatics*, vol. 9, no. 3, pp. 383–401, 2023.
- [8] A. Astuti *et al.*, "Hama dan penyakit pada tanaman cabai rawit di polybag," *FLORA*, vol. 2, no. 1, pp. 139–151, 2025.
- [9] B. Guo, J. Wang, M. Guo, M. Chen, Y. Chen, and Y. Miao, "Overview of pest detection and recognition algorithms," *Electronics*, vol. 13, no. 15, p. 3008, 2024.
- [10] H. Li *et al.*, "Real-time target spraying system based on improved yolov5," *Frontiers in Plant Science*, vol. 13, p. 1072631, 2022.
- [11] X.-G. Zhao *et al.*, "Cabbage and weed identification and target spraying system design," *Frontiers in Plant Science*, vol. 13, p. 924973, 2022.
- [12] T. Nguyen *et al.*, "Limitations of manual pest monitoring and blanket spraying," *Agricultural Systems*, vol. 210, p. 103234, 2023.
- [13] Anonymous, "Hyperspectral methods for early pest detection," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 5, 2024.
- [14] —, "Optical and chemical sensors for pest detection: strengths and limits," *Sensors*, vol. 22, no. X, 2022.
- [15] M. Sokolova and G. Lapalme, "Analysis of performance measures for classification tasks," *Inform. Process. Management*, vol. 45, no. 4, pp. 427–437, 2009.
- [16] DFRobot, "Huskylens ai camera (technical documentation)," *DFRobot Website*, 2023, accessed via official site for HuskyLens spec.
- [17] T. Doan and T. Phan, "Deploying real-time pest detection on edge devices: implementation and benchmarks," *IJACSA*, vol. 15, no. 7, 2024.