

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Indonesia merupakan negara agraris dimana sektor pertanian dan tatanan pembangunan nasional memegang peran penting dalam menyediakan pangan bagi seluruh penduduk, selain itu sektor pertanian merupakan andalan sebagai penyumbang devisa negara [1]. Hal ini ditandai dengan profesi masyarakat Indonesia sebagai petani yang sangat tinggi, yaitu sebesar 28,55% atau sebanyak 41,61 juta jiwa [2]. Tanaman yang dibudidayakan memiliki keragaman yang tinggi, mulai dari tanaman sawi, hingga ribuan jenis tanaman lainnya. Meskipun demikian, di antara berbagai jenis tanaman tersebut terdapat satu permasalahan umum yang hampir selalu dihadapi oleh setiap tanaman, yaitu penyakit dan serangan hama pada tanaman. Hama dan penyakit pada tanaman akan menyebabkan perubahan bentuk, warna dan bau pada tanaman sehingga membuat tanaman tidak layak untuk dipanen. Pada tanaman tomat, kegagalan akibat serangan penyakit mencapai nilai 78%, sedangkan pada tanaman alpukat mencapai nilai 60% dan pada tanaman sawi mencapai nilai 71.50%. [5].

Tanaman sawi (*Brassica* sp.) merupakan sayuran daun dari famili Brassicaceae yang banyak dibudidayakan karena nilai gizinya yang tinggi dan tempo panennya yang pendek. Daun yang lunak dan berlekuk menjadikan sawi rentan terhadap serangan hama herbivora seperti belalang, yang memakan jaringan daun dan menyebabkan daun berlubang serta mengurangi kapasitas fotosintesis tanaman. Serangan hama pemakan daun seperti belalang dapat mengurangi area daun tanaman hingga lebih dari 40–50%, yang berpeluang menurunkan produksi akhir tanaman sawi secara signifikan dari produksi normalnya. Serangan hama ini berdampak pada menurunnya produktivitas tanaman jika tidak dikendalikan secara efektif [5].

Sebagai mahasiswa Teknik Komputer, tim penulis memiliki ketertarikan terhadap penerapan teknologi pada sektor pertanian yang masih menghadapi berbagai kendala dalam proses budidaya. Salah satu permasalahan yang sering terjadi adalah penyakit pada tanaman yang mengakibatkan kegagalan panen. Kondisi tersebut menyebabkan kerugian ekonomi bagi petani, terutama karena keterlambatan dalam proses identifikasi dan penanganan penyakit. Permasalahan ini menunjukkan pentingnya perhatian lebih terhadap tahapan awal munculnya penyakit agar dapat dipahami dan diantisipasi secara lebih efektif dalam kegiatan budidaya pertanian di Indonesia.

Gagal panen dapat dicegah dengan pengendalian serangan pada tanaman dengan metode yang tepat. Jika pengendalian serangan berhasil dilakukan maka risiko gagal panen dapat dikurangi sehingga petani dapat memiliki pendapatan yang stabil. Selain petani, distributor akan memiliki ketersediaan hasil pertanian yang melimpah sehingga kelangkaan dapat dihindari. Dengan ketersediaan sawi yang melimpah, konsumen dapat membeli hasil pertanian dengan harga wajar.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Tanaman sawi (*Brassica juncea* L.) yang sehat ditandai oleh daun berwarna hijau cerah hingga hijau tua, permukaan daun yang utuh tanpa lubang, batang yang tegak dan kokoh, serta susunan daun yang rapi dan simetris. Pertumbuhan tanaman berlangsung stabil dengan pembentukan daun yang optimal hingga fase panen. Tanaman sawi dapat tumbuh baik di daerah beriklim sedang (subtropis) maupun daerah beriklim panas (tropis), sehingga dapat diusahakan baik di dataran tinggi maupun dataran rendah. Pertumbuhan sawi yang optimal memerlukan suhu udara berkisar antara 19–21°C dengan ketinggian tempat 600–1200 m dpl untuk mendapatkan intensitas cahaya matahari yang cukup [6].

Selain itu, tanaman sawi tahan terhadap air hujan sehingga dapat ditanam sepanjang tahun, namun pada musim kemarau tetap memerlukan penyiraman yang teratur dan air yang cukup agar pertumbuhannya tetap optimal [6]. Media tanam yang sesuai untuk budidaya sawi adalah tanah yang gembur, banyak mengandung humus, kaya bahan organik, memiliki drainase yang baik, serta derajat keasaman (pH) tanah yang optimum berkisar antara 6–7 [Sumber, Tahun]. Suhu lingkungan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan stres fisiologis pada tanaman, yang berdampak pada penurunan kualitas daun serta melambatnya laju pertumbuhan tanaman sawi. [6]

Berbeda dengan kondisi ideal, tanaman sawi yang terserang hama, khususnya belalang (*Orthoptera: Acrididae*), menunjukkan gejala kerusakan daun yang khas. Serangan hama ini ditandai dengan munculnya lubang-lubang tidak beraturan pada permukaan daun akibat aktivitas makan belalang yang mengonsumsi jaringan daun secara langsung. Akibatnya, tepi daun menjadi bergerigi dan luas permukaan daun berkurang secara signifikan. Kerusakan umumnya diawali pada daun yang lebih tua, kemudian dapat meluas ke daun muda apabila populasi hama tidak dikendalikan. Penurunan luas permukaan daun tersebut menyebabkan berkurangnya kemampuan fotosintesis tanaman, yang berdampak pada terhambatnya pertumbuhan serta menurunnya kualitas dan kuantitas hasil panen. Pada tingkat serangan yang

berat, tanaman dapat mengalami defoliiasi parah yang memicu stres fisiologis, ditandai dengan daun menguning, layu, hingga kematian tanaman sebelum masa panen, sehingga berpotensi menurunkan produktivitas secara signifikan.

Menurut beberapa kajian, hama belalang termasuk di antara serangga yang merusak daun tanaman sawi dengan memakan jaringan daun, yang secara umum dapat menyebabkan kerusakan yang cukup besar jika kontrol hama tidak diterapkan. Dalam penelitian lapangan, beragam serangga hama termasuk belalang dilaporkan menyebabkan lubang-lubang pada daun sawi, yang merupakan indikasi umum serangan herbivora pada tanaman sayuran seperti sawi[7].



Gambar 1.1 Tanaman sawi setelah terkena serangan hama

Seiring berlanjutnya serangan, intensitas kerusakan daun meningkat yang ditandai dengan berkurangnya luas permukaan daun secara signifikan, tepi daun menjadi bergerigi, dan sebagian jaringan daun hilang. Kondisi ini menyebabkan penurunan kemampuan fotosintesis tanaman karena area daun yang berfungsi sebagai tempat penyerapan cahaya berkurang. Akibatnya, pertumbuhan tanaman sawi menjadi terhambat, ditunjukkan dengan ukuran daun yang lebih kecil, pertumbuhan yang tidak seragam, dan penurunan bobot segar tanaman saat panen.

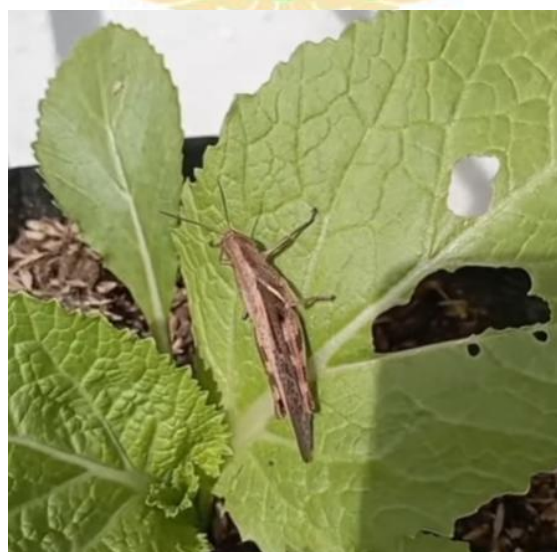
Belalang tergolong sebagai hama pemakan daun (defoliator) yang menyerang tanaman dengan cara menggigit dan memakan jaringan daun. Serangan belalang pada tanaman sawi ditandai dengan munculnya lubang-lubang tidak beraturan pada permukaan daun, bahkan pada kondisi serangan berat dapat menyebabkan daun habis dimakan hingga hanya tersisa tulang daun.

Kerusakan tersebut secara langsung menurunkan kualitas visual dan kuantitas hasil panen, yang berdampak pada penurunan nilai jual sawi di pasaran.



Gambar 1.2 Hama Belalang hijau (*Oxya Chinensis*)

Serangan hama belalang pada tanaman sawi sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan praktik budidaya. Suhu yang hangat dan cuaca kering cenderung meningkatkan aktivitas hama, terutama pada lahan terbuka. Ketersediaan tanaman inang yang melimpah serta rendahnya intensitas pengendalian hama juga dapat mempercepat peningkatan populasi belalang di area pertanaman sawi. Oleh karena itu, pengendalian hama yang tepat melalui pemantauan rutin dan strategi pengendalian terpadu sangat diperlukan untuk meminimalkan kerusakan yang diakibatkan oleh hama belalang dan meningkatkan produktivitas tanaman sawi secara berkelanjutan.



Gambar 1.3 Tanaman sawi di makan hama belalang

Pada gambar 1.3 di atas terdapat permasalahan serangan hama pada sawi sudah memiliki beberapa solusi sebelumnya yang terlihat pada tabel 1.1 berikut

Tabel 1.1 Solusi yang telah ada

Solusi	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
Identifikasi Visual Manual	1. Tidak memerlukan biaya tambahan. 2. Bisa langsung dilakukan oleh petani tanpa teknologi. 3. Pengalaman petani senior membantu mengenali penyakit.	1. Terlambat mendeteksi penyakit karena gejala baru terlihat setelah infeksi parah. 2. Subjektif, bergantung pada pengalaman petani. 3. Tidak efisien untuk kebun luas.	Observasi lapangan, 2025
Konsultasi dengan Penyuluh/Dinas Pertanian	1. Mendapatkan saran lebih akurat dari pihak yang berpengalaman/ahli. 2. Ada akses ke informasi resmi dari dinas pertanian. 3. Bisa jadi rujukan untuk bantuan pestisida/pupuk dari pemerintah.	1. Waktu respons tidak cepat, penyuluh tidak bisa selalu datang saat dibutuhkan. 2. Membutuhkan biaya/akses transportasi jika kebun jauh. 3. Tidak bisa dilakukan setiap saat (hanya ketika ada program/kunjunga	Observasi lapangan, 2025

		n).	
<i>Computer Vision Based Crop Disease Prediction in Precision Agriculture</i>	1. Dapat mengenali penyakit dengan cepat	1. Tidak ada UI tertentu sehingga petani tidak dapat memantau secara real time 2. Masih belum bisa prediksi potensi penyakit.	[15]

1.1.2 Analisis Masalah

Analisis permasalahan memiliki beberapa aspek yang harus diperhatikan, diantaranya :

1. Aspek Kecerdasan Buatan dan Pengolahan Data

Aspek ini berfokus pada performa, validitas, dan kemampuan model komputasi dalam memproses multi-sumber data—baik data visual maupun data eksperimental atau tabular (sensor)—agar menghasilkan informasi diagnosis penyakit yang akurat dan dapat diandalkan oleh sistem. Keakuratan hasil olahan data ini krusial dalam memberikan keputusan yang tepat bagi petani agar tindakan preventif dapat segera diambil. Berdasarkan pertimbangan aspek kecerdasan buatan dan pengolahan data di atas, maka ditetapkan batasan (constraints) sebagai berikut:

a. Keterbatasan Hasil Prediksi

Sistem harus tetap memberikan hasil konklusi keputusan atau diagnosis penyakit tanaman yang valid dan minim false alarm meskipun dihadapkan pada keterbatasan kualitas data lapangan. Pada data visual, hasil prediksi dibatasi oleh variasi pencahayaan alami (mendung/terik), sudut kamera, objek terhalang daun lain (occlusion), serta ukuran gejala awal penyakit yang sangat kecil. Sementara pada data tabular, prediksi dibatasi oleh fluktuasi pembacaan sensor lingkungan, jeda waktu (delay) pembaruan data, serta keterbatasan variasi data latih (dataset).

2. Aspek Manajemen Daya dan Keberlanjutan

Aspek ini mengatur bagaimana sistem mengelola konsumsi energi secara efisien agar dapat beroperasi secara mandiri dan terus-menerus di lokasi pertanian yang jauh dari sumber listrik konvensional (jala-jala PLN). Efisiensi energi menjadi faktor penentu agar sistem

dapat terus memantau kondisi lahan dalam jangka panjang tanpa memerlukan perawatan baterai yang terlalu sering. Berdasarkan pertimbangan aspek manajemen daya dan keberlanjutan di atas, maka ditetapkan batasan (constraints) sebagai berikut:

a. Durasi Sistem

Sistem dibatasi untuk tidak berjalan terus-menerus secara penuh selama 24 jam guna menghemat konsumsi daya, terutama pada komponen edge computing yang melakukan pemrosesan komputasi berat secara lokal (on-device inference). Perancang sistem harus menerapkan strategi penjadwalan aktif, seperti penggunaan mode tidur mendalam (deep sleep mode) atau intervensi berkala, agar pasokan daya dari baterai atau panel surya dapat bertahan lama di lapangan.

3. Aspek Teknik dan Perangkat Keras

Aspek ini menitikberatkan pada pemilihan material fisik, proteksi komponen elektronik, dan ketahanan mekanis perangkat terhadap tantangan lingkungan operasional luar ruangan (outdoor). Mengingat sistem ditempatkan langsung di area budidaya tanaman, seluruh komponen elektronik dituntut memiliki ketahanan yang tinggi guna mencegah kerusakan sistem yang prematur. Berdasarkan pertimbangan aspek teknik dan perangkat keras di atas, maka ditetapkan batasan (constraints) sebagai berikut:

a. Ketahanan Perangkat

Seluruh perangkat keras (seperti mikrokontroler, sensor lingkungan, kamera, dan modul komunikasi) diwajibkan mampu bertahan dan tetap beroperasi secara normal di bawah kondisi cuaca ekstrem mikro pertanian. Perangkat dibatasi oleh paparan langsung kelembapan ekstrem (>90%), air hujan, debu, dan fluktuasi suhu luar ruangan yang tinggi, sehingga wajib dirancang menggunakan pelindung (enclosure) yang memenuhi standar proteksi fisik khusus (seperti IP65 atau IP67).

4. Aspek Operasional

Aspek operasional berkaitan dengan kemudahan penggunaan, instalasi, serta pemeliharaan sistem dalam kondisi operasional nyata di lapangan. Sistem yang dirancang ditujukan untuk digunakan oleh petani sebagai pengguna utama, yang pada umumnya tidak memiliki latar belakang teknis di bidang teknologi informasi maupun sistem tertanam. Oleh karena itu, solusi yang dikembangkan harus memiliki tingkat kompleksitas operasional yang rendah agar dapat digunakan secara efektif tanpa memerlukan pelatihan khusus. Berdasarkan aspek operasional diatas, maka ditetapkan batasan sebagai berikut :

a. Easy to Use (Kemudahan Penggunaan)

Sistem ini harus dirancang agar benar-benar mudah dipasang dan digunakan oleh petani, bahkan oleh mereka yang tidak memiliki latar belakang teknologi.

Selain aspek-aspek diatas, sistem ini harus memenuhi beberapa standar yang terdapat pada tabel 1.2 berikut :

Tabel 1.2
Standar
yang
harus
dipenuhi
1.1.3

No	Regulasi/Standar	Ketentuan yang Harus Dipenuhi
1	IEC 62109-1	Sistem harus dilengkapi dengan sirkuit proteksi terhadap tegangan berlebih dari panel surya dan arus berlebih dari baterai untuk mencegah kerusakan komponen [20].
2	ISO/IEC 25010	Perangkat lunak dan model AI harus diuji untuk memastikan keandalan (beroperasi tanpa error) dan akurasi (hasil klasifikasi dan prediksi harus konsisten) [21]

Kebutuhan yang harus dipenuhi

Berdasarkan tiga objek yang difokuskan oleh tim penulis, solusi yang dibangun harus bisa memenuhi beberapa parameter tertentu, diantaranya :

1. Solusi yang dibangun harus bisa memprediksi dan mendeteksi hama belalang pada tanaman sawi.
2. Solusi harus dapat memberikan informasi yang akurat pada pengguna melalui beberapa antarmuka pengguna, informasi berupa kondisi lingkungan tanaman dan metode pengendalian yang tepat jika tanaman terdeteksi serangan hama belalang.
3. Solusi harus dapat digunakan secara real-time untuk memantau keberadaan hama belalang pada tanaman sawi sehingga pengguna dapat memperoleh informasi secara cepat ketika hama terdeteksi.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan analisis masalah dan kebutuhan yang harus dipenuhi, berikut beberapa tujuan yang ingin dicapai :

1. Membangun sistem yang dapat memprediksi dan mengklasifikasikan serangan hama pada tanaman sawi berdasarkan keadaan lingkungan.
2. Menyediakan antarmuka pengguna yang berfungsi untuk menampilkan informasi terkait kondisi terkini tanaman sawi, serta rekomendasi metode pengendalian yang sesuai berdasarkan hasil analisis sistem.
3. Membangun sistem yang dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan hama belalang pada tanaman sawi secara real-time serta memberikan respons otomatis ketika hama terdeteksi.

1.2 Solusi

Berdasarkan kebutuhan dan tujuan yang telah diuraikan pada sub bab sebelumnya, diperlukan solusi untuk objek yang dapat memenuhi kebutuhan tersebut secara efektif.

1.2.1 Karakteristik Produk

Solusi dirancang dengan serangkaian karakteristik produk yang menjadi fondasi pengembangan. Karakteristik produk ini mencakup fitur dasar dan fitur tambahan sebagai berikut :

1. Fitur Dasar

a. *Sensing Capability*

Sistem memiliki kemampuan untuk memprediksi dan mengklasifikasi penyakit tanaman guna mendukung upaya pengendalian yang lebih efektif.

b. *Computing Method*

Sistem ini mengintegrasikan metode komputasi berbasis pembelajaran mesin untuk melakukan klasifikasi penyakit pada daun tanaman, analisis data hasil monitoring, serta prediksi risiko penyakit. Seluruh data yang diperoleh tidak hanya ditampilkan, tetapi diolah melalui penyimpanan historis dan analisis tren, sehingga sistem mampu menghasilkan rekomendasi metode pengendalian penyakit yang tepat.

c. *Notification*

Capability

Notifikasi menjadi komponen penting dalam sistem monitoring untuk memberikan informasi kondisi tanaman secara tepat waktu kepada petani. Dengan adanya kemampuan ini, sistem mampu mendeteksi kondisi berisiko dan secara otomatis mengirimkan notifikasi melalui aplikasi, SMS, atau pesan instan, sehingga petani dapat segera mengambil langkah pengendalian penyakit sebelum menimbulkan dampak negatif pada tanaman.

d. *Computing Performance (Performa Komputer)*

Seluruh data yang diperoleh harus dapat diproses secara stabil dan efisien tanpa menimbulkan lag, error, maupun keterlambatan yang berarti.

2. Fitur Tambahan

a. *Low Cost*

Sistem harus dapat dikembangkan dengan anggaran maksimal sebesar Rp10.000.000. Batasan biaya ini bertujuan untuk menghasilkan solusi yang terjangkau bagi petani, sehingga mereka mampu menekan kerugian akibat penurunan kuantitas dan kualitas panen (pada komoditas tomat, alpukat, dan sawi) serta dapat meningkatkan pendapatan secara optimal melalui produk yang berkualitas baik dan stabil.

b. Lama Pengerjaan

Sistem harus diselesaikan dan siap diimplementasikan dalam kurun waktu maksimal 6 bulan. Durasi ini sudah mencakup seluruh tahapan pengembangan hingga pengujian sistem secara menyeluruh di lapangan, dengan tujuan agar teknologi dapat segera digunakan oleh petani untuk mempercepat pencegahan kerugian finansial akibat serangan penyakit.

c. Pengiriman Data

Sistem harus memiliki jangkauan komunikasi yang cukup untuk mengirimkan gambar dan data dari sistem ke database dengan delay kurang dari 10 detik agar petani dapat melihat informasi setelah penggunaan alat.

1.2.2 Usulan Solusi

Berdasarkan tiga objek permasalahan yang telah diidentifikasi, dirumuskan usulan solusi yang disesuaikan dengan karakteristik sebagai berikut:

1.2.2.1 Perangkat Hama Cerdas yang Dilengkapi dengan Kamera dan Modul IoT

Pada solusi ini Salah satu solusi inovatif yang dapat diterapkan untuk mengatasi permasalahan serangan hama pada tanaman sawi adalah Smart Insect Trap atau Perangkat Hama Cerdas yang dilengkapi dengan kamera dan modul Internet of Things (IoT). Perangkat ini dirancang untuk mendeteksi dan memantau keberadaan hama secara otomatis melalui sistem pengambilan citra dan analisis berbasis kecerdasan buatan. Secara umum, alat ini memanfaatkan yellow trap atau lem perekat serangga sebagai media utama penangkap, yang kemudian dipantau oleh kamera resolusi tinggi. Kamera tersebut secara berkala mengambil gambar perangkat, lalu mengirimkan data ke mikrokontroler seperti ESP32-CAM, Raspberry Pi, atau Jetson Nano untuk dilakukan proses identifikasi dan penghitungan jumlah hama yang tertangkap.

Proses pendeteksian dilakukan melalui algoritma Computer Vision dan Machine Learning seperti You Only Look Once (YOLO) atau Convolutional Neural Network (CNN) yang mampu mengenali bentuk dan jenis serangga secara otomatis berdasarkan pola citra. Hasil analisis tersebut kemudian dikirimkan melalui jaringan IoT, baik menggunakan Wi-Fi, LoRa, maupun NB-IoT, ke platform berbasis cloud yang menyimpan data, menampilkan visualisasi, serta memberikan notifikasi kepada petani secara real-time melalui dashboard atau aplikasi smartphone. Dengan sistem ini, petani dapat memantau tingkat serangan hama, menganalisa tren populasi serangga, serta menentukan waktu yang tepat untuk melakukan tindakan pengendalian tanpa perlu melakukan pengamatan manual yang memakan waktu.

Selain itu, Smart Insect Trap juga dapat dilengkapi dengan sensor lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya untuk membantu memahami kondisi mikroklimat yang mendukung perkembangan hama. Lampu LED UV dapat ditambahkan sebagai pemikat tambahan untuk menarik serangga agar mendekat ke perangkap, sehingga efektivitas penangkapan meningkat. Dengan integrasi kamera, sensor, dan modul IoT, sistem ini mampu memberikan informasi yang akurat dan cepat mengenai tingkat infestasi hama di area pertanian sawi.

Penerapan Smart Insect Trap membawa dampak signifikan bagi petani sawi, terutama dalam menjaga kualitas tanaman seperti selada, sawi, dan sayuran daun lainnya agar tetap segar dan layak jual. Dengan adanya deteksi dini terhadap peningkatan populasi hama, petani dapat segera melakukan langkah pengendalian yang tepat sebelum terjadi kerusakan parah pada daun yang dapat menurunkan nilai jual produk. Selain meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam pengawasan, sistem ini juga berkontribusi dalam pengurangan penggunaan pestisida berlebihan, menjaga keamanan pangan, serta meningkatkan keuntungan ekonomi petani. Oleh karena itu, pengembangan Smart Insect Trap berbasis kamera dan IoT menjadi salah satu solusi modern yang efektif, efisien, dan berkelanjutan dalam mendukung sistem pertanian cerdas.

1.2.2.2 Sistem deteksi Hama pada tanaman sawi sebagai stimulus gangguan berbasis suara yang diaktifkan secara selektif setelah sistem computer vision.

Dalam upaya meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil pertanian sawi, diperlukan sistem cerdas yang mampu melakukan deteksi dini terhadap serangan hama secara otomatis. Salah satu inovasi yang dikembangkan adalah Sistem Deteksi Hama Berbasis Kamera dan Teknologi Computer Vision, yang dirancang untuk memantau kondisi tanaman sawi secara real-time

melalui analisis citra digital. Sistem ini hadir sebagai solusi modern untuk menggantikan metode pengawasan manual yang selama ini masih mengandalkan observasi visual petani, yang bersifat subjektif, memakan waktu, serta memiliki tingkat akurasi yang bervariasi tergantung pada pengalaman pengamat.

Secara umum, sistem ini bekerja dengan memanfaatkan kamera digital atau modul kamera IoT (seperti ESP32-CAM atau Raspberry Pi Camera) yang dipasang di area penanaman sawi untuk mengambil gambar tanaman pada interval waktu tertentu. Citra yang diperoleh kemudian dikirimkan ke unit pemrosesan, seperti Raspberry Pi, Jetson Nano, atau komputer server, untuk dilakukan analisis menggunakan algoritma pengolahan citra digital (image processing) dan pengenalan pola berbasis machine learning. Algoritma Convolutional Neural Network (CNN) atau You Only Look Once (YOLO) digunakan untuk mendeteksi pola visual yang menandakan adanya serangan hama — seperti perubahan warna daun menjadi kekuningan, munculnya lubang pada permukaan daun, atau bercak yang tidak normal.

Tahapan pemrosesan citra meliputi preprocessing, seperti penyesuaian pencahayaan, peningkatan kontras, dan segmentasi area daun untuk menghilangkan gangguan latar belakang. Setelah itu, dilakukan feature extraction untuk mengenali ciri khas daun yang terserang, dan hasilnya dianalisis oleh model klasifikasi berbasis CNN atau YOLO yang telah dilatih menggunakan dataset citra tanaman sehat dan terinfeksi hama. Dengan cara ini, sistem mampu memberikan hasil deteksi secara cepat, akurat, dan konsisten, bahkan ketika terdapat ratusan tanaman dalam satu area tanaman sawi.

Selain kemampuan deteksi visual, sistem ini juga terintegrasi dengan sensor lingkungan, seperti sensor suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya. Integrasi ini memungkinkan sistem untuk memantau kondisi mikroklimat di sekitar tanaman, karena faktor lingkungan memiliki pengaruh besar terhadap populasi dan aktivitas hama. Misalnya, kondisi yang terlalu lembab atau bersuhu tinggi dapat mempercepat siklus hidup serangga seperti kutu daun atau thrips, sehingga meningkatkan risiko serangan. Dengan data sensor ini, sistem dapat mengkorelasikan antara tingkat serangan hama dan kondisi lingkungan, sehingga mampu memberikan prediksi preventif dan rekomendasi bagi petani untuk melakukan penyesuaian ventilasi, pencahayaan, atau penyemprotan alami secara lebih efisien.

Seluruh data hasil pemantauan, baik dari kamera maupun sensor, disimpan secara otomatis dalam basis data terpusat. Data ini kemudian dapat dianalisis secara longitudinal untuk

menemukan pola kemunculan hama berdasarkan waktu, suhu, dan kelembaban tertentu. Hasil analisis divisualisasikan dalam bentuk grafik dan laporan statistik melalui dashboard interaktif berbasis web atau aplikasi mobile. Melalui dashboard ini, petani dapat memantau kondisi tanaman secara real-time, melihat tren perkembangan hama, serta menerima notifikasi otomatis apabila sistem mendeteksi gejala serangan yang berpotensi serius.

Keunggulan utama sistem ini terletak pada kemampuannya yang bersifat otomatis, real-time, dan adaptif. Dengan penerapan teknologi Computer Vision dan Internet of Things (IoT), petani tidak lagi harus melakukan inspeksi langsung ke lapangan untuk mendeteksi serangan hama. Selain itu, sistem ini juga dapat dikembangkan lebih lanjut dengan fitur Smart Decision Support System (DSS) yang mampu memberikan rekomendasi tindakan seperti penyemprotan alami, penyesuaian nutrisi, atau pemasangan perangkat tambahan berdasarkan tingkat serangan yang terdeteksi.

Secara keseluruhan, sistem deteksi hama berbasis kamera dan Computer Vision ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pemantauan, tetapi juga mendukung konsep pertanian presisi (precision agriculture) yang mengedepankan penggunaan data dan teknologi untuk pengambilan keputusan yang lebih cerdas. Dengan kemampuan mendeteksi serangan sejak dini dan memberikan informasi berbasis data, sistem ini berpotensi besar dalam meningkatkan kualitas sayur sawi, mengurangi kerugian ekonomi akibat penurunan hasil panen, serta menjaga stabilitas harga jual produk di pasaran

1.2.2.3 Pengendalian Mekanis–Preventif Berbasis Deteksi YOLO pada hama

Pengendalian mekanis–preventif berbasis deteksi YOLO merupakan pendekatan pengendalian hama yang mengkombinasikan teknologi computer vision dengan tindakan pengendalian fisik yang terarah. Pada penelitian ini, algoritma YOLO digunakan untuk mendeteksi keberadaan hama belalang (*Orthoptera: Acrididae*) pada tanaman sawi secara real-time melalui citra visual. Deteksi dilakukan dengan mengidentifikasi ciri visual belalang, seperti bentuk tubuh memanjang, posisi kaki belakang yang dominan, serta warna tubuh yang umumnya menyerupai daun tanaman. Hasil deteksi berupa informasi lokasi (bounding box), waktu kemunculan, dan tingkat kepercayaan (confidence score), yang selanjutnya dijadikan dasar pelaksanaan pengendalian mekanis secara selektif.

Belalang merupakan hama pemakan daun yang mampu menyebabkan kehilangan hasil panen sayuran daun hingga 10–40% pada kondisi serangan ringan hingga sedang, dan dapat

meningkat pada serangan yang tidak terdeteksi sejak dini. Kerusakan utama ditandai dengan munculnya lubang tidak beraturan pada daun sawi yang menurunkan kualitas visual dan nilai jual produk. Oleh karena itu, deteksi dini menjadi faktor penting agar pengendalian dapat dilakukan sebelum tingkat kerusakan meluas. Dengan sistem ini, tindakan pengendalian mekanis seperti penangkapan manual belalang atau penyemprotan lokal terbatas dapat dilakukan secara tepat sasaran hanya pada tanaman yang terdeteksi terserang, sehingga lebih efisien dan ramah lingkungan dibandingkan penyemprotan pestisida secara menyeluruh.

Pendekatan ini bersifat preventif, karena sistem mampu memberikan informasi serangan hama pada tahap awal kemunculan, serta mekanis, karena tindakan pengendalian dilakukan secara fisik tanpa bergantung sepenuhnya pada bahan kimia. Selain itu, penggunaan deteksi berbasis YOLO membantu mengurangi subjektivitas pengamatan manual petani, yang selama ini sering terlambat karena keterbatasan waktu dan pengamatan visual. Dengan demikian, pengendalian mekanis–preventif berbasis deteksi YOLO tidak hanya berfungsi sebagai metode penanganan, tetapi juga sebagai sistem pendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan hama tanaman sawi.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Berdasarkan usulan solusi yang telah dipaparkan sebelumnya, dilakukan analisis terhadap solusi pada masing-masing topik sebagai berikut

Konstrain		Rank of Importance	Fitur Dasar				Fitur Tambahan			
			Sensing Capability	Computing Performance	Computing Method	Notification Capability	Biaya < Rp 10.000.000	Pengerjaan kurang dari 6 Bulan	Dapat Mengirimkan data dengan delay dibawah 10 detik	
			↑	↓	↑	↑				
Konstrain Keterbatasan Hasil Prediksi		5	○	○	○		△	△	△	
Konstrain Durasi Sistem		3	○	△	○		△			
Konstrain Ketahanan Perangkat		4	○					△		
Konstrain Kemudahan Pengguna		4		○		○			○	
Importance Rating			46	40	34	20	8	9	25	182
Percent of Importance			25.3%	22.0%	18.7%	11.0%	4.4%	4.9%	13.7%	100.0%
Subsistem 1	Solusi 1		○	○	○	○	△	○	○	3.29
	Solusi 2		○	○	○	○	○	○	○	4.41
	Solusi 3		○	△	○	○	△	△	○	3.21
Subsistem 2	Solusi 1		○	○	○	○	○	○	○	4.56
	Solusi 2		○	○	○	○	△	○	○	3.13
	Solusi 3		△	○	△	○	○	○	○	2.80
Subsistem 3	Solusi 1		○	△	○	○	△	○	○	3.01
	Solusi 2		○	○	○	○	○	○	○	4.03
	Solusi 3		○	△	○	△	○	○	○	2.57

Relationship
△ : Lemah
○ : Sedang
○ : Kuat

Gambar 1.4 House Of Quality

Berikut penjelasan House of Quality dari solusi yang telah diusulkan :

Keterbatasan hasil prediksi menjadi batasan utama agar sistem dapat mendiagnosis penyakit tanaman secara akurat dan valid di lapangan, sehingga diberi nilai rank of importance sebesar 5. Fitur ini memiliki korelasi yang kuat dengan fitur sensing capability, computing performance, dan computing method. Hal ini karena sensor serta kamera yang berkualitas tinggi secara langsung menentukan tingkat kejelasan data yang ditangkap, sementara performa komputasi yang mumpuni serta algoritma yang dioptimalkan sangat dibutuhkan untuk mengeksekusi model kecerdasan buatan secara presisi guna menghasilkan prediksi yang valid. Di sisi lain, konstrain ini memiliki hubungan yang lemah dengan batasan biaya di bawah Rp 10.000.000, pengerjaan kurang dari 6 bulan, dan pengiriman data dengan delay di bawah 10 detik. Hal ini dikarenakan upaya untuk mencapai hasil prediksi yang sangat akurat seringkali berbenturan dengan pembatasan anggaran, membutuhkan waktu riset dan pelabelan data yang lebih lama, serta memerlukan pengolahan data visual yang besar sehingga pengiriman datanya ke server rentan mengalami jeda waktu.

Konstrain durasi sistem membatasi seberapa efisien perangkat dapat beroperasi secara mandiri di lahan pertanian, pada fitur ini diberi nilai rank of importance sebesar 3. Fitur ini memiliki hubungan yang sedang dengan sensing capability dan computing method karena intensitas pembacaan sensor serta seberapa berat algoritma memproses data sangat mempengaruhi tingkat konsumsi daya baterai. Fitur ini berbanding terbalik atau memiliki hubungan yang lemah dengan fitur computing performance serta biaya di bawah Rp 10.000.000. Hal ini terjadi karena komponen komputasi yang memiliki kecepatan dan performa tinggi secara alami membutuhkan daya listrik yang jauh lebih besar sehingga mengurangi umur operasional alat, dan perangkat dengan manajemen daya yang sangat efisien umumnya menggunakan modul khusus yang berdampak pada peningkatan biaya produksi.

Ketahanan perangkat merupakan konstrain yang mengharuskan sistem mampu bertahan dan beroperasi normal menghadapi cuaca ekstrem di luar ruangan sehingga diberi nilai rank of importance sebesar 4. Fitur ini memiliki hubungan yang sedang dengan sensing capability karena sensor yang ditempatkan langsung di lahan terbuka menuntut spesifikasi material yang tahan banting, antikarat, dan kedap air agar pembacaan lingkungannya tetap stabil dalam jangka panjang. Konstrain ini juga memiliki hubungan yang lemah dengan fitur pengerjaan kurang dari 6 bulan, karena perancangan pelindung atau enclosure fisik yang benar-benar memenuhi standar proteksi industri seringkali memerlukan waktu pengujian dan uji coba fisik yang ekstra, sehingga dapat memperlambat proses perakitan.

Kemudahan pengguna sangat penting agar sistem dapat dipahami dan langsung dioperasikan oleh petani tanpa memerlukan bantuan teknis khusus, sehingga konstrain ini diberi nilai rank of importance sebesar 4. Fitur ini memiliki korelasi yang kuat dengan notification capability dan kemampuan mengirimkan data dengan delay di bawah 10 detik. Hal ini karena notifikasi yang jelas dan pengiriman peringatan dini yang nyaris instan menjadi cara utama pengguna mendapatkan panduan atau rekomendasi tindakan secara langsung, tanpa harus menganalisis data mentah yang rumit. Selain itu, fitur ini berhubungan sedang dengan computing performance karena antarmuka yang responsif dan bebas hambatan komputasi akan sangat meningkatkan kenyamanan petani saat berinteraksi dengan perangkat, meskipun bukan merupakan faktor teknis yang paling krusial asalkan informasi utamanya dapat tersampaikan dengan baik.

Berdasarkan gambar 1.4, berikut perhitungan menggunakan *house of quality* keenam solusi terhadap fitur dasar yaitu:

$$\text{Solusi 1 : } (3 \times 24,55\%) + (1 \times 26,34\%) + (5 \times 26,79\%) + (3 \times 22,32\%) = 3,01$$

$$\text{Solusi 2 : } (3 \times 24,55\%) + (5 \times 26,34\%) + (5 \times 24,79\%) + (3 \times 22,32\%) = 4,03$$

$$\text{Solusi 3 : } (3 \times 24,55\%) + (1 \times 26,34\%) + (5 \times 24,79\%) + (3 \times 22,32\%) = 2,57$$

Berdasarkan perhitungan diperoleh solusi dengan nilai tertinggi yaitu solusi 2 dengan nilai 4,03
Berikut penjelasan House of Quality dari solusi yang telah diusulkan :

Aspek biaya rendah menjadi prioritas utama agar sistem pendeteksi hama belalang dapat diterapkan secara luas oleh petani sawi dengan modal terbatas. Oleh karena itu, fitur ini diberi *rank of importance* sebesar 5. Hubungannya dengan *sensing capability* bernilai lemah (Δ), karena sensor dengan akurasi tinggi seperti kamera resolusi besar atau sensor suara frekuensi tinggi untuk mendeteksi aktivitas belalang membutuhkan biaya yang lebih tinggi. Sistem harus menyeimbangkan antara harga terjangkau dan akurasi deteksi yang cukup untuk kebutuhan praktis di lapangan. Korelasi dengan *computing performance* juga lemah (Δ), sebab perangkat keras dengan performa tinggi memerlukan komponen yang lebih mahal, sedangkan fokus sistem ini adalah menjaga biaya rendah dengan tetap mempertahankan performa yang memadai untuk analisis dasar. Sebaliknya, hubungan dengan *notification capability* sedang ($\circ$), karena sistem yang hemat biaya masih dapat menyediakan fitur notifikasi sederhana berbasis pesan singkat atau sinyal visual tanpa memerlukan komponen mahal.

Aspek ini sangat penting untuk memastikan sistem dapat segera diimplementasikan di lapangan guna mengantisipasi serangan hama belalang yang dapat terjadi sewaktu-waktu. Oleh karena itu diberi nilai 5. Hubungan dengan *computing performance* kuat (©), sebab perangkat yang memiliki kemampuan pemrosesan cepat akan mempercepat tahap pengujian, pelatihan model deteksi visual atau suara, serta integrasi sistem notifikasi. Korelasi dengan *notification capability* sedang (○), karena pengembangan sistem peringatan memang memerlukan waktu tambahan untuk memastikan pesan dikirim tepat waktu dan dalam format yang mudah dipahami petani. Sementara *computing method* juga kuat (©), sebab desain algoritma deteksi belalang misalnya menggunakan *object detection* berbasis YOLO atau CNN memerlukan eksperimen dan optimasi yang cukup kompleks sehingga menjadi faktor penentu lamanya proses pengembangan.

Konsumsi daya rendah menjadi kriteria vital karena sistem ini akan ditempatkan di area pertanian yang jauh dari sumber listrik PLN. Nilai 5 diberikan untuk menjamin alat dapat beroperasi lama menggunakan baterai atau panel surya. Hubungannya dengan *sensing capability* lemah (Δ) karena semakin banyak sensor visual atau audio yang aktif, konsumsi daya meningkat. Sistem perlu strategi efisiensi seperti mode tidur (*sleep mode*) saat tidak ada pergerakan. Korelasi dengan *computing performance* lemah (Δ), sebab perangkat komputasi dengan performa tinggi membutuhkan konsumsi energi besar. Oleh karena itu, desain sistem harus menyeimbangkan antara daya rendah dan kecepatan pemrosesan.

Konstrain ini menunjukkan pentingnya ketahanan alat terhadap kondisi lapangan seperti panas, debu, dan hujan. Diberi nilai 2 karena meskipun penting, aspek ini dapat diatasi dengan pelindung fisik atau *housing* standar. Hubungannya dengan *sensing capability* sedang (○) karena sensor yang tahan cuaca akan lebih andal merekam aktivitas hama bahkan saat kondisi lingkungan berubah. Korelasi dengan *computing performance* juga sedang (○), sebab perangkat dengan perlindungan yang baik cenderung lebih stabil dalam kinerja jangka panjang. Jangkauan komunikasi yang luas penting agar data deteksi dari berbagai titik lahan sawi dapat terkirim ke pusat kendali secara real-time. Oleh karena itu diberi nilai 4. Fitur ini berhubungan kuat (©) dengan *computing performance*, karena semakin baik performa pemrosesan data, semakin efisien ukuran paket data yang dikirim, sehingga menghemat bandwidth jaringan. Hubungannya dengan *computing method* sedang (○) karena algoritma yang efisien dapat mengatur prioritas pengiriman data penting terlebih dahulu untuk menjaga stabilitas koneksi di daerah terpencil.

Kemudahan instalasi menjadi pertimbangan penting agar petani dapat memasang sistem tanpa bantuan teknisi. Nilai 4 diberikan untuk mencerminkan pentingnya aspek ini. Hubungan dengan *sensing capability* kuat (©), sebab sensor yang mudah dipasang dan dikalibrasi mempercepat penerapan sistem di lapangan tanpa kesalahan konfigurasi. Korelasi dengan *computing method* sedang (○), karena software yang mudah diinstal dan dikonfigurasi sangat mendukung kemudahan implementasi. Sementara hubungan dengan *notification capability* kuat (©), sebab sistem yang langsung dapat mengirim notifikasi otomatis begitu aktif memudahkan petani dalam memantau lahan tanpa harus sering memeriksa perangkat secara manual.

Pemenuhan standar industri dan keamanan sistem menjadi syarat mutlak agar alat ini dapat digunakan secara luas dan diintegrasikan dengan sistem pertanian cerdas lainnya. Nilai 5 diberikan karena faktor ini menentukan keandalan dan kredibilitas produk. Hubungannya dengan *sensing capability* kuat (©), karena sistem deteksi harus memenuhi standar akurasi minimum agar hasilnya dapat dipercaya. Korelasi dengan *notification capability* kuat (©), sebab sistem peringatan harus sesuai standar komunikasi dan keamanan data agar pesan tidak salah kirim atau gagal terkirim. Pada *computing method*, juga diberi hubungan kuat (©), karena algoritma deteksi harus memenuhi standar efisiensi dan reliabilitas perangkat lunak seperti yang diatur dalam ISO/IEC 25010 agar sistem bekerja stabil dalam jangka panjang. Hal ini

1. Fitur Dasar

a. Solusi 1

Solusi 1 merupakan solusi dengan poin tertinggi kedua dengan nilai 3.52. Solusi pertama menonjol pada aspek efisiensi daya dan biaya rendah, sehingga cocok diterapkan pada lahan kecil atau daerah dengan keterbatasan energi listrik. Sistem menggunakan sensor dasar seperti sensor gerak (PIR) atau sensor getaran untuk mendeteksi keberadaan belalang tanpa memerlukan komputasi tinggi. Kelebihan utamanya adalah konsumsi daya yang sangat hemat (*low power consumption*) serta kemudahan instalasi (*ease of installation*) yang tinggi, karena alat ini sederhana dan tidak memerlukan kalibrasi rumit. Namun, kelemahannya terletak pada akurasi deteksi yang masih terbatas, terutama untuk membedakan antara pergerakan belalang dengan gangguan lingkungan lain seperti angin atau daun bergerak. Fitur komunikasi dan notifikasi juga sederhana — misalnya hanya menyalakan alarm atau lampu indikator tanpa

sistem peringatan jarak jauh. Secara keseluruhan, Solusi 1 sesuai untuk pemantauan dasar di area kecil, dengan fokus pada efisiensi energi dan biaya minimal.

b. Solusi 2

Solusi 2 merupakan solusi dengan poin tertinggi sebesar 4.57. Solusi kedua merupakan alternatif terbaik dengan skor tertinggi karena menawarkan keseimbangan optimal antara akurasi, kecepatan, dan jangkauan sistem. Sistem ini memanfaatkan kamera visual dan algoritma komputasi berbasis YOLO atau CNN untuk mendeteksi belalang secara real-time dari citra daun atau permukaan tanaman. Fitur *sensing capability* memperoleh nilai tinggi karena kemampuan sensor kamera menangkap data visual detail yang memungkinkan deteksi hama secara presisi. Pada sisi *computing method*, solusi ini menggunakan metode pemrosesan yang kuat (nilai 5), memungkinkannya menganalisis gambar dengan cepat bahkan dalam kondisi cahaya berubah-ubah. Kinerja *notification capability* juga unggul (nilai 5), di mana sistem mampu mengirimkan peringatan otomatis ke perangkat petani melalui aplikasi atau pesan singkat ketika belalang terdeteksi dalam jumlah signifikan. *Computing performance* yang tinggi membuat seluruh proses dari pengambilan gambar hingga notifikasi berlangsung cepat dan stabil. Kelemahannya adalah kebutuhan daya dan biaya perangkat yang lebih tinggi dibandingkan solusi lain. Namun secara keseluruhan, Solusi 2 paling sesuai untuk implementasi utama sistem pendeteksi hama belalang skala luas yang presisi dan responsif.

c. Solusi 3

Solusi 3 merupakan solusi dengan poin terendah sebesar 2.57. Solusi ketiga berfokus pada daya tahan dan kemudahan operasional, namun memiliki keterbatasan dari sisi akurasi dan performa. Sistem ini umumnya menggunakan sensor suara frekuensi tinggi atau getaran sederhana untuk mendeteksi keberadaan belalang melalui aktivitas fisiknya. Kelebihan utama solusi ini adalah daya tahan lingkungan (*environmental durability*) karena komponennya minim paparan langsung terhadap kondisi cuaca ekstrem, serta konsumsi daya rendah yang membuatnya cocok untuk pemantauan jangka panjang di area tanpa sumber listrik tetap. Namun, skor *computing method* dan *sensing capability* relatif rendah karena sistem tidak mampu menganalisis pola secara mendalam atau membedakan suara belalang dari serangga lain. Selain itu, fitur komunikasi masih sederhana, sehingga laporan hasil deteksi harus diambil secara manual dari perangkat. Secara keseluruhan, Solusi 3 cocok sebagai sistem tambahan atau cadangan di area dengan keterbatasan energi, tetapi kurang optimal untuk deteksi akurat dan pengiriman data real-time.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Berdasarkan analisis *House of Quality* terhadap ketiga solusi, Solusi 2 direkomendasikan sebagai pilihan terbaik dengan skor tertinggi 4,06. Solusi ini memberikan keseimbangan optimal antara kemampuan deteksi yang akurat, sistem notifikasi yang efektif, performa komputasi yang memadai, dan efisiensi daya yang reasonable. Solusi 2 mampu memenuhi sebagian besar kebutuhan fitur dasar dengan baik, khususnya dalam aspek waktu pengembangan dan keterjangkauan biaya, sambil tetap memberikan performa teknis yang handal untuk operasional jangka panjang di lapangan.

