

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 tomat, alpukat, 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%%. [3]

Berdasarkan permasalahan diatas tim penulis berfokus pada tiga jenis tanaman yang ada di Indonesia, yaitu tanaman tomat, tanaman alpukat dan tanaman sawi. Pemilihan ketiga tanaman ini didasarkan pada kontribusinya terhadap sektor pertanian serta tantangan yang dihadapi dalam proses budidaya.

Berdasarkan data BPS, produksi tomat di Sumatera Barat mengalami penurunan dari 100.429,4 ton pada tahun 2023 menjadi 85.587,465 ton pada tahun 2024[4]. Salah satu penyebab dari penurunan ini adalah rentannya tanaman tomat terhadap serangan penyakit. Tanaman tomat terkena hama dan penyakit menunjukkan berbagai gejala fisik yang dapat diamati dengan mudah. Sebagian besar penyakit utama pada tanaman tomat diawali dari bagian daun yang memiliki kelembapan relatif tinggi. Daun berperan sebagai organ pertama yang menunjukkan gejala visual akibat infeksi patogen seperti penyakit bercak coklat (*Alternaria solani*), penyakit busuk daun (*Phytophthora infestans*), dan penyakit bercak septoria (*Septoria lycopersici*) [3].

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.

Terdapat beberapa stakeholder yang berhubungan dengan masalah ini, diantaranya petani, distributor tomat dan pembeli atau konsumen. Gagal panen menyebabkan petani kehilangan sumber pendapatannya, sehingga menyebabkan penurunan kesejahteraan petani. Selain petani, gagal panen juga akan menjadi masalah untuk distributor karena pasokan hasil pertanian yang sedikit sehingga terjadi kelangkaan pada hasil pertanian. Ketika terjadi kelangkaan konsumen harus membeli hasil pertanian dengan harga yang mahal sesuai dengan hukum penawaran dan permintaan.

Gagal panen dapat dicegah dengan pengendalian penyakit pada tanaman dengan metode yang tepat. Jika pengendalian penyakit 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 tomat yang melimpah, konsumen dapat membeli hasil pertanian dengan harga wajar.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Tanaman tomat yang sehat memiliki dedaunan berwarna hijau tua dan cerah, batang yang kuat, dan susunan daun yang konsisten tanpa adanya bercak atau kerusakan, serta menunjukkan pertumbuhan yang stabil sepanjang musim dan menghasilkan buah tomat yang bernaas dan berwarna cerah dalam jumlah yang melimpah. Untuk pertumbuhan yang sehat dan produksi buah yang optimal, tanaman tomat membutuhkan sinar matahari penuh minimal 6-8 jam sehari, media tanam yang subur, gembur, dan memiliki drainase yang baik serta penyiraman secara teratur.

Namun pada temperatur tinggi di atas 32 derajat Celcius pertumbuhan dapat terhambat. Berbeda dengan kondisi ideal tersebut, gejala awal daun tanaman tomat yang terinfeksi *Alternaria solani* ditandai dengan munculnya bercak berwarna coklat pada daun, kemudian bercak tersebut berkembang hingga membentuk pola lingkaran konsentris. Pada tahap awal infeksi, terdapat bercak-bercak kecil berbentuk bulat dan bersudut dengan warna coklat tua sampai hitam berukuran sekitar 4 mm. Gejala pada daun tomat umumnya muncul pada daun-daun yang paling tua dan dimulai sebagai lesi kecil berwarna coklat hingga hitam, dengan bercak daun yang menyerupai cincin konsentris sebagai karakteristik khas patogen ini dan berukuran hingga 1,3 cm. Jaringan di sekitar bercak biasanya menguning, dan daun yang terinfeksi akan mulai menguning lalu rontok dimulai dari bagian bawah tanaman[5].

Penyakit bercak coklat sangat dipengaruhi oleh kondisi suhu dan kelembapan lingkungan. Patogen ini tumbuh optimal pada suhu antara 24–29°C dan kelembapan udara di atas 85%, di mana kondisi hangat dan lembab mendukung pembentukan spora dan infeksi pada jaringan daun. Kelembapan tanah yang tinggi, (sekitar 70-80%) juga mempercepat infeksi karena meningkatkan ketersediaan air di permukaan tanah yang menjadi tempat perkembangan konidia. Dengan demikian, kombinasi suhu hangat, kelembapan udara dan tanah tinggi merupakan kondisi ideal untuk perkembangan penyakit *Alternaria solani*[5].



Gambar 1.1 Penyakit Bercak Coklat pada Daun Tanaman Tomat [5]

Daun yang terserang *Phytophthora infestans* menunjukkan gejala adanya bercak kecil yang tampak kebasah-basahan berwarna hijau kelabu yang kemudian berubah menjadi coklat kehitaman. Tahap awal penyakit ini mudah terlewatkan, dengan gejala yang meliputi munculnya bercak gelap pada ujung daun dan batang tanaman, serta jamur putih yang akan muncul di bawah daun dalam kondisi lembab. Penyakit ini disebabkan oleh jamur *Phytophthora infestans* dan sering muncul saat kelembapan tinggi, dapat menyebar dengan cepat dan menyebabkan daun, batang, serta buah membusuk dengan munculnya bercak coklat. Bercak awal tampak berminyak atau basah dan tidak berbatas tegas, berbeda dengan penyakit bercak kering yang memiliki pola konsentris yang jelas[6].

Penyakit busuk daun berkembang pesat pada kondisi lingkungan yang lembab dan dingin. Patogen ini menunjukkan aktivitas infeksi optimal pada suhu 15–22°C dan kelembapan udara di atas 90%, terutama saat terjadi embun atau hujan berkepanjangan. Kelembapan tanah tinggi (>90%) atau kondisi jenuh air juga sangat mendukung penyebaran sporangia dan zoospora, karena air berperan sebagai media penyebaran infeksi antar tanaman. Oleh karena itu, daerah dengan suhu sejuk, curah hujan tinggi, dan tanah lembab menjadi lingkungan yang sangat rentan terhadap penyakit Late Blight ini[8].



Gambar 1.2 Penyakit Bercak Coklat pada Daun Tanaman Tomat [8]

Terakhir, ada penyakit bercak septoria yang menyerang daun tanaman tomat. Gejala umumnya meliputi lesi berbentuk bulat atau bersudut yang paling sering ditemukan pada daun bagian bawah yang lebih tua, dengan lesi berukuran 2-5 mm

yang memiliki bagian tengah berwarna keabuan dengan tepi cokelat *Septoria lycopersici*. Gejala muncul pada daun sebagai bercak bulat berwarna kecoklatan hingga keabuan dengan tepi coklat yang lebih gelap dan ditandai dengan adanya piknidium gelap yang menonjol di dalam lesi, bercak ini sering dikelilingi oleh lingkaran kuning di sekitar bintik. Gejala umumnya berkembang pada daun bagian bawah terlebih dahulu kemudian penyakit berkembang ke atas tanaman, dengan lesi yang juga berkembang pada batang, tangkai daun, dan kelopak bunga, meskipun buah jarang terpengaruh. Karakteristik khas dari penyakit ini adalah adanya titik-titik hitam kecil (piknidium) di tengah bercak yang merupakan tubuh buah jamur[9].

Penyakit bercak septoria (*Septoria lycopersici*) disebabkan oleh jamur yang berkembang dalam kondisi suhu sedang hingga hangat dan kelembapan tinggi. Suhu optimal untuk perkembangan penyakit ini berkisar antara 20–25°C, sedangkan kelembapan udara di atas 85–90% diperlukan untuk pembentukan piknidia dan pelepasan spora. kelembapan tanah tinggi (>70%) meningkatkan risiko infeksi karena tetesan air hujan atau percikan air dari tanah dapat membawa spora ke permukaan daun bagian bawah. Secara keseluruhan, kondisi lingkungan yang lembab, suhu sedang, dan pH mendekati netral merupakan faktor utama yang mempercepat penyebaran *Septoria lycopersici* pada tanaman tomat.



Gambar 1.3 Penyakit Bercak Septoria Pada Daun Tanaman Tomat [9]

Permasalahan penyakit pada daun tanaman tomat 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.	[10]

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

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 [11].
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) [12]

1.1.3 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 penyakit pada daun tanaman tomat.
2. Solusi harus dapat memberikan informasi yang akurat pada pengguna melalui beberapa antarmuka pengguna, informasi berupa kondisi tanaman, keadaan tanah dan metode pengendalian yang tepat jika daun tanaman memiliki kondisi penyakit tertentu.
3. Solusi harus bisa digunakan pada lokasi yang tidak memiliki sumber listrik rumah tangga.

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 penyakit pada daun tanaman tomat berdasarkan gejala awal penyakit.
2. Menyediakan antarmuka pengguna yang berfungsi untuk menampilkan informasi terkait kondisi terkini tanaman, meliputi kondisi tanah dan lingkungan, hasil prediksi penyakit yang terdeteksi, serta rekomendasi metode pengendalian yang sesuai berdasarkan hasil analisis sistem.
3. Membangun sistem yang dapat digunakan pada lokasi yang tidak memiliki sumber listrik rumah tangga.

1.2 Solusi

Berdasarkan kebutuhan dan tujuan yang telah diuraikan pada sub bab sebelumnya, diperlukan solusi untuk ketiga 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) 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 permasalahan yang telah diidentifikasi, dirumuskan usulan solusi yang disesuaikan dengan karakteristik masalah yang diangkat, sebagai berikut:

- a. Sistem Node IoT untuk Pemantauan Kesehatan Dan Deteksi Penyakit Daun Tanaman Tomat Menggunakan Single Shot MultiBox Detector dan Fuzzy Logic.

Solusi yang diusulkan adalah Sistem Node IoT untuk Pemantauan Kesehatan Dan Deteksi Penyakit Daun Tanaman Tomat Menggunakan Single Shot MultiBox Detector dan Fuzzy Logic. Sistem ini dirancang untuk membantu petani tomat mengatasi tantangan deteksi dini penyakit pada daun tanaman.

Dalam implementasinya, petani memasang beberapa node mikrokontroler yang ditenagai panel surya di berbagai titik strategis lahan tomat, misalnya satu node untuk setiap 100-200 meter persegi atau per bedeng. Setiap pagi, sistem secara otomatis mengaktifkan kamera untuk menangkap gambar daun, sambil mencatat data lingkungan seperti suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah. Seluruh data ini kemudian dikirim melalui protokol komunikasi lokal ke sebuah gateway (berupa single-board computer). Di gateway, gambar akan diolah dengan algoritma Single Shot MultiBox Detector sembari algoritma Fuzzy Logic memproses data secara terintegrasi untuk mengidentifikasi tanda-tanda penyakit, berdasarkan perubahan kondisi lingkungan yang kondusif bagi perkembangan patogen. Hasil analisis berupa notifikasi seperti "Tanaman Sehat", "Potensi Risiko Sedang - Busuk Daun", atau "Terdeteksi Gejala Bercak Coklat pada Node 3" akan dikirim langsung ke aplikasi mobile petani melalui jaringan LoRaWAN. Petani kemudian dapat membuka aplikasi untuk melihat visualisasi peta lahan yang menunjukkan status kesehatan setiap area, grafik tren perubahan warna, serta rekomendasi tindakan spesifik seperti "Kurangi irigasi dan aplikasikan fungisida berbahan aktif mankozeb pada bedeng 3". Dengan demikian, petani dapat melakukan kunjungan lapangan

yang terarah hanya ke area bermasalah, sehingga menghemat waktu dan biaya, sekaligus mengambil tindakan pencegahan sebelum penyakit menyebar luas.

Produk ini menyelesaikan masalah utama dalam budidaya tomat melalui beberapa pendekatan konkret. Pertama, deteksi dengan kamera dan Single Shot MultiBox Detector dapat mengidentifikasi penyakit pada daun tanaman melalui visual. Kedua, analisis kondisi lingkungan secara terintegrasi memberikan penilaian risiko yang akurat, misalnya saat kombinasi kelembapan tinggi dan suhu hangat dapat memicu wabah, sehingga petani bisa melakukan tindakan preventif. Ketiga, operasional berbasis tenaga surya memastikan sistem dapat bekerja secara kontinu dan mandiri tanpa bergantung pada listrik PLN yang seringkali tidak tersedia di lahan pertanian. Keempat, notifikasi dan rekomendasi tindakan yang dikirimkan ke aplikasi mobile memungkinkan petani untuk merespons ancaman penyakit secara cepat dan tepat sasaran. Secara keseluruhan, produk ini mentransformasi pendekatan pengelolaan penyakit dari yang tadinya reaktif menjadi proaktif dan presisi, sehingga berpotensi meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan usaha tani tomat.

Fuzzy secara bahasa diartikan sebagai kabur atau samar yang artinya suatu nilai dapat bernilai benar atau salah secara bersamaan. Dalam fuzzy dikenal derajat keanggotaan yang memiliki rentang nilai 0 (nol) hingga 1 (satu). Logika fuzzy merupakan suatu logika yang memiliki nilai kekaburan atau kesamaran antara benar atau salah. Dalam teori logika fuzzy suatu nilai dapat bernilai benar atau salah secara bersamaan. Namun seberapa besar kebenaran dan kesalahan tergantung pada bobot keanggotaan yang dimilikinya.

Logika fuzzy memiliki derajat keanggotaan dalam rentang 0 hingga 1 dan logika fuzzy menunjukkan sejauh mana suatu nilai benar dan sejauh mana suatu nilai itu salah. Logika fuzzy adalah suatu cara yang tepat untuk memetakan suatu ruang input ke dalam suatu ruang output dan mempunyai nilai kontinyu. Fuzzy dinyatakan dalam derajat keanggotaan dan derajat kebenaran. Oleh sebab itu sesuatu dapat dikatakan sebagian benar dan sebagian salah pada waktu yang sama[13].

b. Sistem Diagnostik dan Prediksi Penyakit Daun Tanaman Tomat Portabel Berbasis AI Menggunakan YOLO dan Metode Supervised Machine Learning

Berbeda dengan sistem pemantauan (monitoring) tetap, solusi kedua ini menawarkan sebuah sistem portabel berbentuk tongkat yang mudah dibawa ke lapangan. Dalam skenario penggunaannya, petani cukup menancapkan bagian bawah tongkat yang telah dilengkapi sensor kelembapan tanah di area dekat tanaman tomat. Sementara itu, bagian atasnya dilengkapi dengan kamera, sensor suhu dan kelembapan udara, sebuah single-board computer sebagai unit pemrosesan, tombol kontrol, serta layar sentuh LCD. Alat ini ditenagai baterai sehingga dapat dioperasikan di berbagai lokasi tanpa bergantung pada sumber listrik eksternal.

Saat melakukan inspeksi, petani berjalan di sepanjang barisan tanaman dan menancapkan tongkat di beberapa titik sampel yang representatif. Setelah sensor tertancap dan kamera diarahkan ke tanaman, petani menekan tombol capture untuk memulai analisis. Kamera akan menangkap gambar yang kemudian diproses oleh algoritma YOLO pada single-board computer untuk mengklasifikasikan kondisi kesehatan tanaman, sementara data sensor diolah menggunakan Supervised ML untuk memprediksi potensi serangan penyakit. Hanya dalam beberapa detik, hasil analisis ditampilkan di layar, contohnya: "Terdeteksi: Busuk Daun - Tingkat Keparahan Sedang", "Kondisi Lingkungan: kelembapan Tinggi (88%), dan "Prediksi Risiko: Tinggi untuk Bercak Coklat". Layar juga menampilkan rekomendasi pengendalian seperti, "Aplikasikan fungisida sistemik berbahan aktif azoksistrobin, perbaikan drainase, dan kurangi frekuensi penyiraman". Solusi ini juga memanfaatkan jaringan konektivitas seluler agar data dari lapangan dapat dikirim dan ditampilkan pada aplikasi mobile berupa pemetaan persebaran penyakit dan rekomendasi metode pengendalian, sehingga petani dapat memahami kondisi lahannya secara menyeluruh.

Solusi ini dirancang untuk menyelesaikan beberapa masalah utama. Pertama, sifatnya yang portabel memungkinkan petani skala kecil melakukan diagnosis profesional tanpa perlu berinvestasi pada infrastruktur permanen. Kedua, hasil diagnosis instan yang ditampilkan di layar memungkinkan petani untuk segera

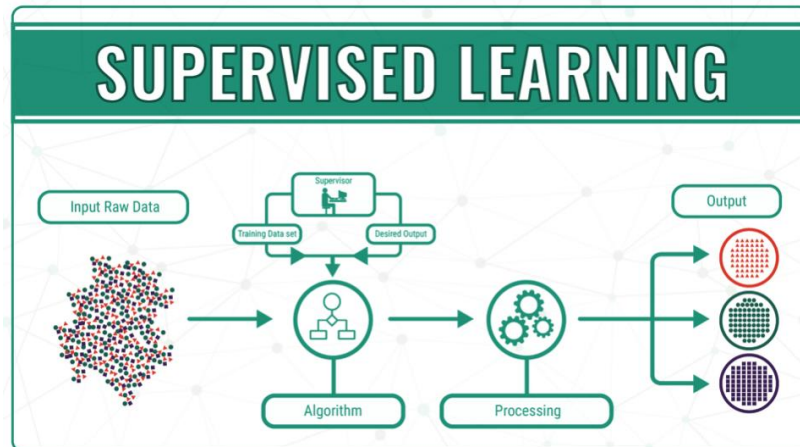
mengambil tindakan yang diperlukan. Ketiga, aplikasi mobile yang terintegrasi dapat menjadi acuan bagi petani dalam mengelola lahan pertanian mereka. Keempat, kombinasi YOLO dan Supervised ML memberikan diagnosis yang lebih komprehensif; YOLO mampu mendeteksi pola halus pada daun yang mengindikasikan infeksi dini sebelum terlihat oleh mata telanjang, sementara Supervised ML mengidentifikasi risiko berdasarkan kondisi lingkungan mikro. Kelima, rekomendasi yang disesuaikan membantu petani mengambil keputusan penanganan (treatment) yang tepat sasaran dan menghindari penggunaan pestisida berlebihan.

YOLO adalah sebuah metode untuk mendeteksi objek. YOLO memproses gambar secara real-time pada empat puluh lima (45) frames per second. Dibandingkan dengan sistem deteksi yang lainnya, YOLO membuat lebih banyak kesalahan pada praktiknya, namun dapat memprediksi kesalahan pada background objek tersebut. YOLO dapat menjadi representasi objek yang sangat umum.

YOLO mendeteksi objek dengan menggunakan unified model dimana sebuah single convolutional network memprediksi beberapa bounding boxes (kotak pembatas) serta probabilitas kelas di dalam kotak-kotak tersebut secara bersamaan. Pertama-tama, sistem YOLO membagi citra input ke dalam grid $S \times S$. Jika pusat dari sebuah objek jatuh di dalam salah satu sel grid, maka sel grid itu bertanggung jawab untuk mendeteksi objek tersebut. Setiap sel grid memprediksi bounding boxes dan confidence score dari tiap bounding box tersebut. Confidence score merefleksikan seberapa yakin dan akurat model bahwa terdapat sebuah objek di dalam kotak tersebut. Setiap bounding box terdiri dari 5 prediksi: x , y , w , h , dan confidence. Koordinat (x, y) mewakili pusat dari kotak relatif ke batas sel grid. (w, h) atau lebar dan tinggi mewakili pusat dari kotak relatif ke gambar.

Dan terakhir adalah confidence yang mewakili Intersection over Union (IoU) antara kotak prediksi dan kotak ground truth. Setiap sel grid juga memprediksi probabilitas kelas. Probabilitas dikondisikan pada sel grid yang memuat objek dan hanya satu kelas probabilitas yang dideteksi per sel grid tanpa memperhitungkan jumlah bounding boxes [14].

Algoritma Supervised Learning merupakan metode dalam machine learning dimana sistem diberikan training data set berupa informasi masukan dan keluaran yang diinginkan, sehingga sistem akan mempelajari berdasarkan data yang telah ada. Sistem akan mencari pola dari data set, kemudian pola itu akan dijadikan sebagai acuan untuk kumpulan data berikutnya. Gambar 1.4 menunjukkan diagram blok cara kerja Supervised Learning [15].



Gambar 1.4 Diagram blok Supervised Machine Learning [15]

c. Sistem Drone Cerdas Otonom Berbasis Faster R-CNN dan Rule-Based untuk Deteksi Penyakit Daun Tanaman Tomat

Solusi ini adalah sistem drone cerdas otonom yang dirancang untuk memantau kesehatan dan memprediksi penyakit daun tanaman tomat secara otomatis. Drone ini terbang secara mandiri di atas barisan tanaman, dilengkapi dengan kamera untuk mendeteksi perubahan warna pada daun dan buah, serta sensor suhu dan kelembapan udara. Keunggulan utamanya adalah semua pemrosesan data dilakukan secara on-board menggunakan sebuah single-board computer, sementara pengiriman hasilnya ke aplikasi petani dimungkinkan oleh modul SIM card yang terpasang. Ditenagai oleh baterai, alat ini menawarkan fleksibilitas operasional di berbagai lokasi tanpa bergantung pada sumber listrik eksternal.

Selama misi inspeksi, drone akan menyusuri barisan tanaman dan melayang di beberapa titik sampel yang representatif. Setelah posisi stabil, sistem secara otomatis memulai analisis. Kamera menangkap gambar yang diproses oleh algoritma Faster R-CNN untuk mengklasifikasi kondisi kesehatan tanaman dengan

akurasi tinggi, sementara data sensor lingkungan diolah menggunakan sistem berbasis aturan (rule-based system) untuk memprediksi potensi serangan penyakit. Dalam hitungan detik, hasil analisis lengkap dikirimkan ke aplikasi mobile petani, contohnya: "Terdeteksi: Busuk Daun - Tingkat Keparahan Sedang", "Kondisi Lingkungan: kelembapan Tinggi (88%)", dan "Prediksi Risiko: Tinggi untuk Busuk Daun". Aplikasi juga menampilkan rekomendasi pengendalian yang dapat ditindaklanjuti, seperti "Aplikasikan fungisida sistemik berbahan aktif azoksistrobin, perbaiki drainase, dan kurangi frekuensi penyiraman".

Solusi ini mengatasi beberapa masalah fundamental dalam budidaya tomat. Pertama, sebagai sistem yang mobile, drone memungkinkan pemantauan skala luas tanpa perlu investasi infrastruktur pemantauan permanen. Kedua, pemrosesan data secara on-board memastikan hasil diagnosis instan dapat diterima melalui aplikasi tanpa ketergantungan pada konektivitas internet, sebuah solusi efektif untuk area pedesaan dengan sinyal lemah. Ketiga, integrasi Faster R-CNN dan sistem berbasis aturan memberikan diagnosis yang komprehensif; Faster R-CNN unggul dalam melokalisasi dan mengenali pola halus (subtle) pada daun sebagai indikasi infeksi dini dengan presisi tinggi, sementara sistem berbasis aturan mengidentifikasi tingkat risiko berdasarkan kondisi lingkungan mikro (misalnya, berdasarkan ambang batas suhu dan kelembapan yang telah ditentukan pakar). Keempat, rekomendasi yang disesuaikan membantu petani mengambil keputusan penanganan (treatment) yang tepat sasaran, sehingga dapat menghindari penggunaan pestisida berlebihan. Secara keseluruhan, drone otonom ini menawarkan solusi pemantauan pertanian presisi yang cepat, akurat, dan independen dari kendala infrastruktur di lapangan.

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 1.5 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 memengaruhi 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, anti karat, 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 1.25, didapatkan nilai korelasi antara fitur dasar dan usulan solusi sebagai berikut :

Solusi 1 : 3.29

Solusi 2 : 4.41

Solusi 3 : 3.21

Berdasarkan perhitungan diperoleh solusi dengan nilai tertinggi yaitu solusi 2 dengan nilai 4.41

Dari analisa diatas masing masing solusi dibandingkan berdasarkan fitur yang ada, adapun penjelasannya adalah seperti berikut :

1. Fitur Dasar

a. Solusi 1

Solusi 1 merupakan solusi dengan poin tertinggi kedua dengan nilai 3.29 pada gambar 1.25. Solusi 1 merupakan sistem yang menggunakan kamera dan sensor untuk mendeteksi kondisi tanaman dan lingkungan pada beberapa node. Pada tabel House of Quality (HoQ), fitur kemampuan mendeteksi diberi bobot nilai 3, karena kamera pada node bersifat statik dan hanya fokus pada satu sisi sehingga tidak dapat mendeteksi dari sisi lain. Fitur performa komputasi juga diberi nilai 3, sebab sistem menggunakan single board computer yang memproses data dari beberapa node sensor secara bersamaan, sehingga ketika banyak data masuk dalam waktu berdekatan dapat menyebabkan sedikit keterlambatan atau delay. Selanjutnya, fitur kemampuan pemberitahuan mendapatkan nilai 3, karena solusi ini telah dilengkapi dengan website yang berfungsi sebagai antarmuka utama bagi petani. Melalui website tersebut, petani dapat menerima notifikasi kondisi tanaman secara real-time tanpa harus selalu berada di lahan. Fitur metode komputasi memperoleh nilai 5, karena sistem menggunakan metode Single Shot MultiBox Detector dan Fuzzy Logic yang efektif untuk mengetahui keadaan daun tanaman tomat berdasarkan visual pada masing-masing node dan kondisi lingkungan.

b. Solusi 2

Solusi 2 merupakan solusi dengan poin tertinggi sebesar 4.41 pada gambar 1.25. Solusi 2 merupakan perangkat portable berbentuk tongkat yang menggunakan kombinasi yolo untuk deteksi visual dan Metode Supervised Learning untuk

analisis lingkungan. Pada tabel HoQ, fitur kemampuan mendeteksi diberi nilai 5, karena sistem ini memiliki akurasi yang sangat tinggi dalam mengenali pola visual dan mendeteksi gejala awal penyakit tomat melalui kamera, sekaligus mampu memprediksi potensi penyakit berdasarkan kondisi lingkungan menggunakan metode supervised learning. Fitur performa komputasi diberi nilai 5, sebab solusi ini menggunakan single board computer yang mampu menjalankan inferensi CNN dan metode supervised learning secara cepat dan efisien dalam waktu beberapa detik. Sementara itu, fitur kemampuan pemberitahuan memperoleh nilai 3, karena hasil diagnosis ditampilkan pada layar sentuh LCD perangkat secara lokal dan ditampilkan pada aplikasi mobile. Fitur metode komputasi diberikan nilai 3, mengingat kombinasi algoritma CNN dan metode supervised machine learning masih membutuhkan delay untuk pemrosesan.

c. Solusi 3

Solusi 3 merupakan solusi dengan poin terendah sebesar 3.21 pada gambar 1.25. Solusi 3 adalah sistem drone otonom yang digunakan untuk monitoring dan prediksi penyakit tomat secara otomatis. Pada tabel HoQ, fitur kemampuan mendeteksi memperoleh nilai 3, karena meskipun sistem menggunakan Faster R-CNN untuk klasifikasi citra, pengambilan gambar dari ketinggian tertentu membuat gejala penyakit tahap awal sulit terdeteksi secara akurat dibanding inspeksi jarak dekat. Fitur performa komputasi juga diberi nilai 1, sebab perangkat pemrosesan di dalam drone memiliki daya komputasi yang terbatas akibat kendala berat dan konsumsi energi, sehingga pemrosesan harus dilakukan dengan model ringan yang terkadang mengurangi kecepatan maupun akurasi. Selanjutnya, fitur kemampuan pemberitahuan memperoleh nilai 5, karena drone mampu mengirimkan hasil analisis dan notifikasi secara real-time ke aplikasi mobile, lengkap dengan informasi lokasi dan tingkat keparahan penyakit. Fitur metode komputasi diberi nilai 3, sebab kombinasi Faster R-CNN dan Rule-based cukup efektif untuk klasifikasi citra dan prediksi penyakit sederhana, namun kurang adaptif terhadap hubungan non-linear kompleks antar parameter lingkungan.

2. Fitur Tambahan

a. Solusi 1

Pada solusi 1, fitur tambahan pertama yaitu biaya yang rendah mendapatkan nilai 1 karena solusi pertama ini memiliki banyak node dan untuk satu node membutuhkan banyak sumber daya sehingga untuk satu sistem membutuhkan biaya yang sangat besar. Selanjutnya fitur lama pengerjaan, sistem ini dapat dikerjakan selama 6 bulan jika dikerjakan secara konsisten setiap hari kerja sehingga diberikan nilai 3. Terakhir, fitur pengiriman data yang dibatasi dengan delay 10 detik. Pada fitur ini diberikan nilai 3 karena data yang dikirim dari node ke gateway melalui kabel lokal sehingga tidak akan ada delay berlebih namun ketika data dikirimkan dari gateway ke database akan lebih membutuhkan waktu karena menggunakan jaringan internet.

b. Solusi 2

Pada solusi 2, fitur biaya rendah diberikan nilai 5 karena sistem yang dibangun merupakan sebuah alat yang bisa dipegang dan tidak membutuhkan banyak sumber daya seperti solusi 1 sehingga akan membutuhkan biaya yang relatif rendah. Fitur lama pengerjaan diberikan nilai 3 karena sistem ini dapat dikerjakan selama 6 bulan. Terakhir, fitur pengiriman data yang juga diberikan nilai 3 karena lama pengiriman data tergantung pada internet yang ada di lapangan.

c. Solusi 3

Pada solusi 3, fitur biaya rendah diberikan nilai 1 karena sistem ini menggunakan drone sebagai bagian dari sistem yang tentunya membutuhkan biaya yang besar. Fitur lama pengerjaan juga diberikan nilai 1 karena solusi ini membutuhkan waktu yang lama karena harus konfigurasi dua hal yaitu, drone dan sistem deteksi untuk diintegrasikan. Terakhir, fitur pengiriman data yang diberikan nilai 3 karena alasan yang sama dengan solusi 1 dan 2, yaitu lama pengiriman tergantung pada internet di lapangan ketika alat digunakan.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Dari analisa solusi yang telah dilakukan dan menggunakan House Of Quality, dari ketiga solusi yang diusulkan didapatkan bahwa solusi kedua yaitu Sistem Diagnostik dan Prediksi Penyakit Daun Tanaman Tomat Portabel Berbasis AI Menggunakan YOLO dan Metode Supervised Machine Learning mendapatkan poin tertinggi yaitu 4.57, Ini sesuai dengan hasil analisa karena solusi dua memiliki fitur yang sesuai dengan karakteristik produk yang paling seimbang dibanding dua solusi lainnya.