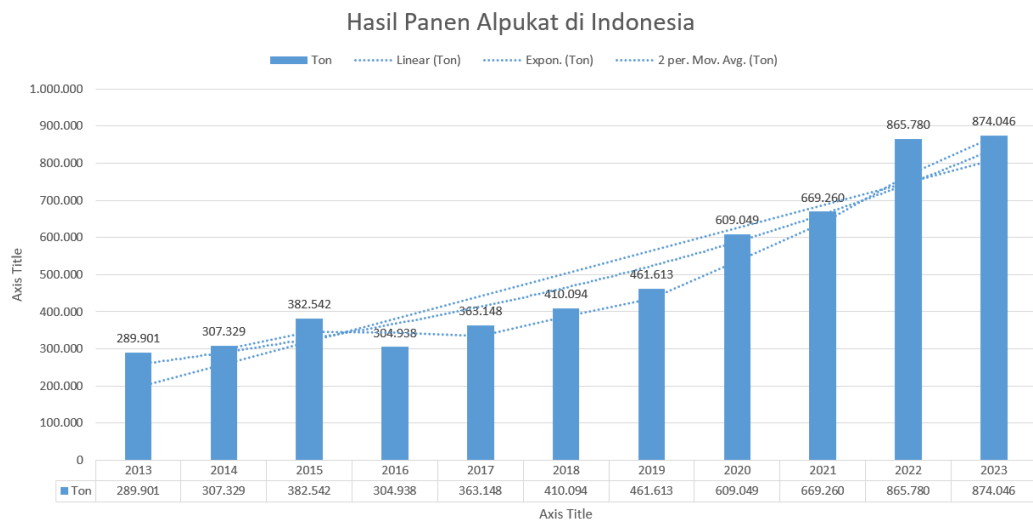


BAB I

PENDAHULUAN

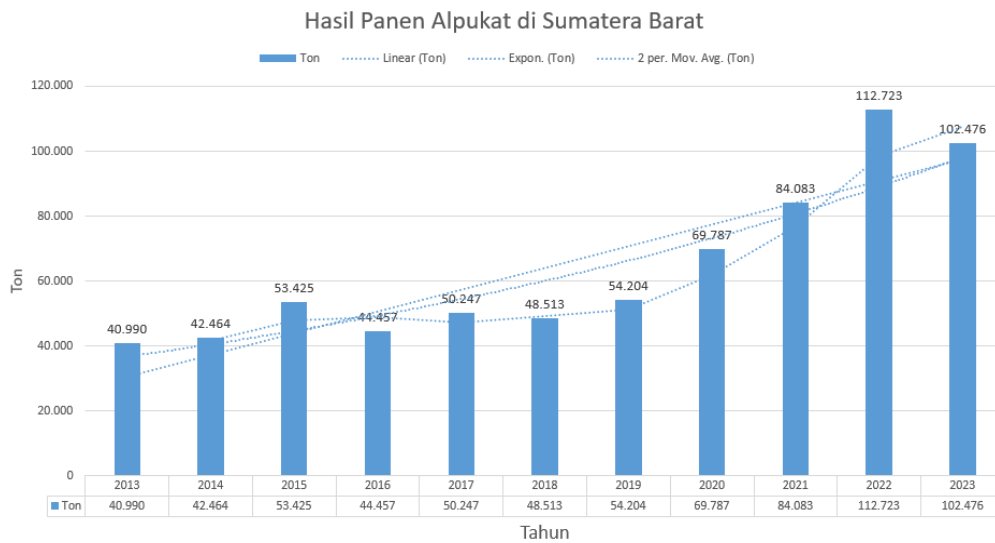
1.1 Pengenalan Masalah

Tanaman alpukat merupakan salah satu komoditas budidaya yang memiliki nilai ekonomi tinggi di Indonesia. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2023, produksi alpukat nasional mencapai 874.046 ton, menunjukkan bahwa permintaan konsumen terhadap buah ini cukup tinggi[1].



**Gambar 1.1 Hasil Panen Alpukat di Indonesia
dalam 2013 - 2023[1]**

Sumatera Barat sendiri menjadi salah satu provinsi penghasil alpukat terbesar di Indonesia dengan kontribusi sebesar 102.476 ton, menempati peringkat ketiga setelah Jawa Timur dan Jawa Tengah. Hal ini menunjukkan potensi ekonomi yang signifikan bagi petani di wilayah ini. Kondisi iklim dan topografi Sumatera Barat yang mendukung membuat provinsi ini berpeluang untuk meningkatkan produksi alpukat lebih lanjut dan memperkuat posisinya sebagai salah satu penghasil utama buah alpukat di Indonesia [1].



**Gambar 1.2 Hasil Panen Alpukat di Sumatera Barat
dalam 2013 - 2023[1]**

Kondisi lingkungan yang optimal untuk pertumbuhan dan pembuahan alpukat merupakan kunci keberhasilan panen. Tanaman alpukat membutuhkan suhu udara ideal di kisaran 12,8-28,3°C dan dapat mentolerir suhu 15-30°C. Suhu yang terlalu ekstrem, baik terlalu panas maupun terlalu dingin, dapat mengganggu proses pembuahan dan menurunkan kualitas buah. Selain itu, curah hujan yang memadai, yaitu sekitar 1.000–2.000 mm per tahun, sangat diperlukan. Namun, hal ini harus didukung dengan drainase tanah yang baik untuk mencegah genangan air yang dapat memicu penyakit busuk akar pada tanaman [6].

Meskipun potensi panen alpukat sangat menjanjikan, petani kini menghadapi tantangan besar yang menyebabkan penurunan hasil panen secara signifikan. Penurunan ini tidak hanya disebabkan oleh satu faktor, melainkan kombinasi dari serangan penyakit yang masif dan minimnya monitoring lingkungan. Pada tanaman alpukat produktivitas menurun akibat serangan penyakit mencapai nilai 60% yang mana sangat merugikan petani secara finansial[5].

Penyakit tanaman menjadi ancaman utama yang mempengaruhi setiap tahap pertumbuhan alpukat. Antraknosa dan bercak daun sering menyerang daun dan buah, mengurangi kualitas dan kuantitas hasil panen. Lebih parah lagi, busuk akar atau kanker batang yang disebabkan oleh jamur (*Phytophthora cinnamomi*) dapat

merusak sistem perakaran hingga mematikan pohon secara keseluruhan, seperti yang banyak dilaporkan oleh lembaga penelitian. Kondisi ini diperburuk oleh busuk buah pascapanen, yang menyebabkan kerugian ekonomi besar karena buah menjadi tidak layak jual [4][5][7].

Penyebaran penyakit-penyakit ini dipercepat oleh kurangnya monitoring lingkungan yang efektif. Petani sering kali tidak memiliki data akurat mengenai kelembaban tanah, suhu, dan intensitas cahaya di lahan mereka. Tanpa informasi ini, mereka kesulitan mengambil tindakan pencegahan yang optimal atau memberikan perlakuan yang tepat waktu. Akibatnya, penyakit menyebar dengan cepat, menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan dan mengancam keberlanjutan usaha tani alpukat [6].

Jika masalah ini tidak segera diatasi, dampaknya akan meluas. Petani akan terus mengalami penurunan pendapatan yang berujung pada kerugian ekonomi yang signifikan. Di sisi yang lebih luas, keterbatasan pasokan alpukat akibat kegagalan panen dapat mengancam ketahanan pangan lokal dan stabilitas harga pasar. Tanpa solusi yang konkret, siklus kerugian ini akan terus berulang dan berpotensi mematikan usaha tani alpukat.

Berikut adalah stakeholder dari masalah yang diangkat:

1. Petani alpukat, yang terdampak oleh penurunan produktivitas hasil panen dan kerugian finansial.
2. Distributor, yang menginginkan pasokan buah alpukat yang berkualitas dan harga yang stabil.

Dampak yang akan terjadi apabila masalah dapat terselesaikan:

1. Petani alpukat
 - a. Dapat memantau kondisi kebun secara real-time sehingga mampu mencegah penyakit sejak dini.
 - b. Produktivitas dan kualitas panen meningkat, kerugian finansial menurun, dan keuntungan lebih stabil.

- c. Biaya operasional berkurang karena penggunaan pupuk, fungisida, atau air menjadi lebih efisien sesuai kebutuhan.

2. Distributor

- a. Mendapat pasokan buah alpukat yang lebih berkualitas dan konsisten sepanjang tahun.
- b. Harga alpukat lebih stabil karena ketersediaan terjaga.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Penurunan hasil panen ini sangat berkaitan dengan serangan penyakit tanaman yang masif dan kurangnya monitoring lingkungan yang akurat. Berdasarkan kajian dari Jurnal KRIS 2024 – JIGA Journal, dapat disimpulkan bahwa serangan penyakit utama seperti antraknosa, bercak daun, busuk buah, dan kanker batang, yang sebagian besar disebabkan oleh jamur, menjadi penyebab utama kerugian. Kondisi lingkungan yang ideal bagi pertumbuhan jamur-jamur ini adalah kelembapan relatif (RH) antara 95% - 100% dan suhu 28 - 36 °C[4].

Alpukat Alligator (*Persea americana*) merupakan varietas unggul yang dicirikan oleh ukuran buahnya yang besar (mencapai 1–2 kg per buah) dengan bentuk memanjang yang khas. Dari sisi pertumbuhan vegetatif, varietas ini memiliki laju pertumbuhan yang cepat dengan struktur batang yang kokoh [71]. Dalam penelitian agronomi, Alpukat Aligator sering diperbanyak melalui teknik grafting atau sambung pucuk. Keberhasilan pertumbuhan sangat dipengaruhi oleh kecocokan diameter batang bawah dan batang atas. Batang yang lebih tebal dan sehat pada fase bibit menentukan kemampuan translokasi nutrisi ke seluruh bagian tanaman [72]. Varietas Aligator memiliki ketahanan yang relatif baik terhadap serangan hama ulat buah karena struktur kulit buahnya yang cenderung lebih kuat. Namun, tanaman ini tetap rentan terhadap penyakit menular tanah jika kondisi lingkungan tidak mendukung seperti penyakit busuk akar. Aligator juga dikenal sebagai varietas yang sangat adaptif, mampu tumbuh di dataran rendah maupun dataran tinggi 300–2.000 mdpl[73].

Terdapat beberapa penyakit utama pada alpukat yang sangat merugikan petani, terutama yang disebabkan oleh jamur. Kondisi lingkungan yang terlalu lembab menjadi faktor pemicu utama munculnya penyakit ini[7].

Berikut adalah penyakit utama alpukat yang sering dialami petani:

1. Antraknosa



Gambar 1.3 Penyakit Antraknosa[7]

Antraknosa disebabkan oleh jamur *Colletotrichum gloeosporioides* yang menyerang daun, bunga, dan buah alpukat. Gejalanya berupa bercak coklat kehitaman yang pada buah dapat meluas hingga ke daging, membuat alpukat tidak layak konsumsi, bahkan tetap bisa menular ke buah lain setelah dipanen[7]. Penyakit ini berkembang dengan sangat pesat pada kelembapan relatif tinggi (95–100%), dengan kondisi 100% sebagai tingkat kelembapan paling ideal. Suhu hangat antara 25–30 °C mendukung pertumbuhan penyakit, di mana suhu 25 °C merupakan kondisi paling optimal untuk perkembangannya[67]. Kebun yang terlalu rimbun atau minim cahaya matahari juga memperparah pertumbuhan jamur ini[7].

2. Bercak Daun



Gambar 1.4 Penyakit Bercak Daun[7]

Penyakit bercak daun disebabkan oleh jamur *Pseudocercospora purpurea*. Gejalanya berupa bercak berwarna coklat hingga ungu pada permukaan daun yang kemudian berubah menjadi bintik kelabu. Jika dibiarkan, daun dapat berlubang, mengering, dan akhirnya gugur, sehingga proses fotosintesis terganggu dan pertumbuhan tanaman melemah. Kondisi lingkungan yang lembab, terutama pada musim hujan dengan curah hujan tinggi, sangat mendukung penyebaran penyakit ini[7]. Penyakit ini berkembang dengan sangat pesat pada kelembapan relatif tinggi 90–100%, dengan kondisi 100% sebagai tingkat kelembapan paling ideal. Suhu hangat antara 20–30 °C mendukung pertumbuhan penyakit, di mana suhu 25 °C merupakan kondisi paling optimal untuk perkembangannya[68].

3. Busuk Akar dan Kanker Batang



Gambar 1.5 Penyakit Busuk Akar dan Kanker Batang[7]

Busuk akar dan kanker batang umumnya disebabkan oleh jamur tanah seperti *Phytophthora cinnamomi*. Penyakit ini ditandai dengan akar yang membusuk, daun yang layu, serta batang yang tampak melepuh atau menghitam. Pada serangan parah, sistem perakaran tidak berfungsi sehingga tanaman bisa mati. Faktor lingkungan yang mendukung perkembangan penyakit ini adalah tanah yang tergenang air, kelembapan tanah yang terlalu tinggi, serta drainase lahan yang buruk[7]. Penyakit ini berkembang dengan sangat pesat pada kelembapan tanah 54–100%, dengan kondisi 100% sebagai tingkat kelembapan paling ideal. Suhu hangat antara 23-27 °C mendukung pertumbuhan penyakit, di mana suhu 25 °C merupakan kondisi paling optimal untuk perkembangannya[69].

4. Busuk Buah



Gambar 1.6 Penyakit Busuk Buah[7]

Busuk buah disebabkan oleh jamur patogen seperti *Colletotrichum* sp. atau *Lasiodiplodia* sp. Gejalanya berupa bercak basah pada permukaan buah yang meluas, menyebabkan buah melunak dan membusuk sebelum sempat dipanen. Kerugian yang ditimbulkan cukup besar karena buah yang seharusnya siap dipasarkan menjadi tidak layak konsumsi[7]. Penyakit ini berkembang dengan sangat pesat pada kelembapan relative 80–100%, dengan kondisi 100% sebagai tingkat kelembapan paling ideal. Suhu hangat antara 28-30 °C mendukung pertumbuhan penyakit, di mana suhu 28 °C merupakan kondisi paling optimal untuk perkembangannya[70].

Penyakit yang menyerang tanaman alpukat dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman terganggu, seperti pohon menjadi kering, diameter batang menyusut, tunas muda jarang muncul, serta rusaknya jaringan batang maupun cabang. Kondisi ini secara langsung maupun tidak langsung menurunkan produktivitas dan menghambat pertumbuhan tanaman alpukat[64]. Selain itu, kadar air sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan diameter batang tanaman, dimana ketersediaan air yang cukup akan meningkatkan pertumbuhan diameter batang secara signifikan, sedangkan kekurangan air menyebabkan pertumbuhan diameter batang terhambat[65].

Berdasarkan penelitian, infeksi penyakit pada tanaman alpukat menyebabkan perubahan fisiologis pada jaringan tanaman, termasuk perubahan warna, struktur,

dan kandungan air, yang pada akhirnya berdampak pada suhu jaringan tersebut. Hal ini mengakibatkan perilaku termal dan reflektansi spektral jaringan tanaman yang sakit berbeda dengan tanaman sehat[66].

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	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	Observasi lapangan, 2025

	pestisida/pupuk dari pemerintah.	program/kunjungan).	
<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.	[78]

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 [8].
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) [9]

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 mengklasifikasikan penyakit alpukat.
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 alpukat.
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 tiga objek permasalahan yang telah diidentifikasi, dirumuskan usulan solusi yang disesuaikan dengan karakteristik masing-masing objek, sebagai berikut:

1.2.2.1 Sistem Monitoring Berbasis Sensor Lingkungan dan Prediksi Penyakit Alpukat dengan Algoritma LSTM

Solusi pertama mengandalkan sensor yang mendeteksi parameter lingkungan sekitar kebun untuk mendeteksi faktor-faktor lingkungan yang terjadi secara kontinu terutama kelembapan udara dan kelembapan tanah yang merupakan indikator paling jelas untuk kebanyakan penyakit alpukat. Adapun skema penggunaan dari solusi ini:

1. Pemasangan alat

Modul alat dipasang di kebun pada posisi yang ditetapkan`.

2. Waktu operasi

Alat dinyalakan 24 jam terus-menerus untuk menangkap data sensor siang-malam dan kejadian mendadak serta akan mengirim data setiap 10 menit ke server.

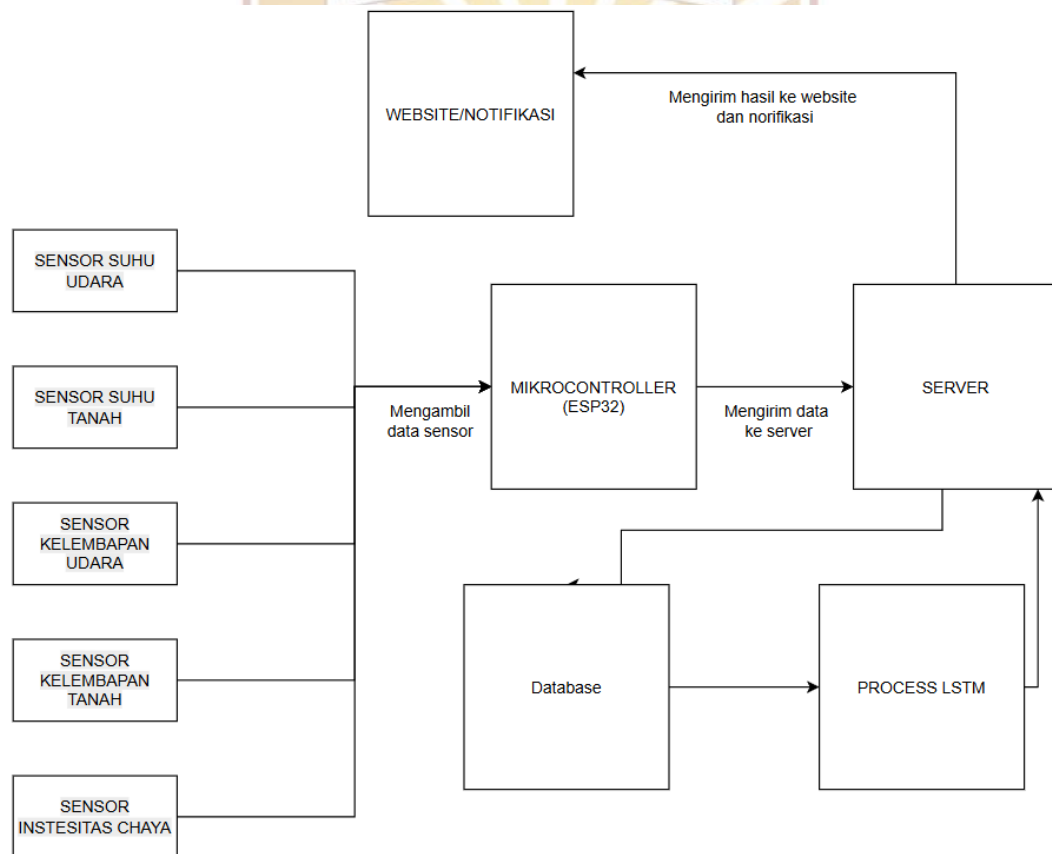
3. Akses monitoring :

Buka website atau aplikasi yang disediakan. Di dashboard akan terlihat:

- a. Tampilan real-time: nilai sensor terbaru (suhu udara, kelembapan udara, kelembapan tanah, dan intensitas cahaya).
- b. Grafik historis: perkembangan beberapa jam/hari/minggu terakhir untuk tiap sensor.
- c. Status perangkat: koneksi, level baterai/tenaga, dan kesehatan sensor.

- d. Sistem otomatis menampilkan status risiko penyakit (rendah / sedang / tinggi) serta menampilkan rekomendasi yang bisa dilakukan.
4. Notifikasi dan tindakan yang disarankan
Jika sistem mendeteksi kondisi berisiko, notifikasi dikirim lewat push email, atau WhatsApp/SMS serta akan dikirimkan juga rekomendasi yang bisa dilakukan petani untuk mengatasi kondisi tersebut .
5. Mengonfirmasi dan mencatat tindakan
Di dashboard, pengguna dapat mengonfirmasi bahwa peringatan sudah diterima, mencatat tindakan yang telah dilakukan, serta menandai apakah isu sudah teratasi atau masih memerlukan tindak lanjut.

Berikut adalah blok diagram cara kerja dari usulan solusi ini:



Gambar 1.7 Blok Diagram Cara Kerja Usulan Solusi 1

Berikut adalah tahapan-tahapan proses yang dilakukan pada solusi ini:

1. Pembacaan di perangkat (ESP32)
Sensor membaca otomatis setiap beberapa menit (mis. 5–10 menit): suhu udara, kelembapan udara (RH), suhu tanah, kelembapan tanah, dan intensitas

cahaya.

ESP32 memberi tanggal/jam, mengecek nilai aneh (kosong atau lonjakan tidak wajar), lalu mengirim data dalam format JSON lewat MQTT/HTTP ke server. Jika internet putus, ESP32 menyimpan sementara (store-and-forward) lalu mengirim saat koneksi kembali.

2. Penerimaan data di server

Server menerima data, menyamakan waktu, membuang angka yang jelas tidak masuk akal, lalu ubah semua data ke interval waktu yang tetap (mis. tiap 10 menit).

3. Pembentukan jendela urutan (framing)

Kumpulkan data menjadi potongan waktu dengan panjang tertentu, misalnya 48 jam terakhir dengan langkah 10 menit, sehingga satu potongan berisi 288 titik waktu. Setiap titik waktu berisi 5 nilai: suhu udara, kelembapan udara (RH), suhu tanah, kelembapan tanah, dan intensitas cahaya. Data yang sudah diubah ke bentuk deret waktu disimpan di database.

4. Prediksi dengan Model LSTM

Potongan data terbaru dikirim ke model LSTM yang sudah dilatih. Hasilnya adalah skor risiko (0–1) untuk antraknosa, busuk akar, busuk buah, dan bercak daun. Sistem lalu mengubah skor menjadi label mudah dibaca: rendah, sedang, atau tinggi (berdasarkan ambang yang sudah ditentukan).

Berikut adalah cara LSTM mengolah data input tersebut:

Setiap data adalah urutan vektor $x_t = [\text{suhu udara, RH udara, suhu tanah, kelembapan tanah, intensitas cahaya}]$ pada waktu t . LSTM membaca urutan ini selangkah demi selangkah, menyimpan “memori” tentang pola sebelumnya di dua komponen internalnya (cell state dan hidden state). Pada tiap langkah, tiga “gerbang” bekerja sederhana: gerbang lupa memutuskan mana memori lama yang tidak perlu, gerbang masuk memilih informasi baru yang penting dari x_t untuk ditambahkan ke memori, dan gerbang keluar menentukan bagian memori yang dipakai untuk menghasilkan representasi saat ini. Dengan mekanisme ini, LSTM bisa “mengikat” pola harian dan beberapa hari ke belakang misalnya kombinasi RH tinggi berkepanjangan, suhu tanah tertentu, dan kelembapan tanah yang jenuh yang historisnya

berkaitan dengan munculnya penyakit. Setelah membaca seluruh urutan, LSTM meneruskan ringkasan akhirnya ke lapisan keluaran yang memetakan ke empat skor risiko penyakit. Saat pelatihan, bobot gerbang dan lapisan keluaran disesuaikan otomatis agar prediksi pada data historis mendekati label kejadian penyakit; saat produksi, bobot itu dipakai untuk menghitung skor risiko dari urutan terbaru.

Hasil dari process LSTM ini akan dikirimkan ke frontend website untuk kebutuhan monitoring serta jika ada resiko terjadinya penyakit maka server akan langsung memberikan notifikasi (push/email/WhatsApp/SMS).

5. Website dan Notifikasi

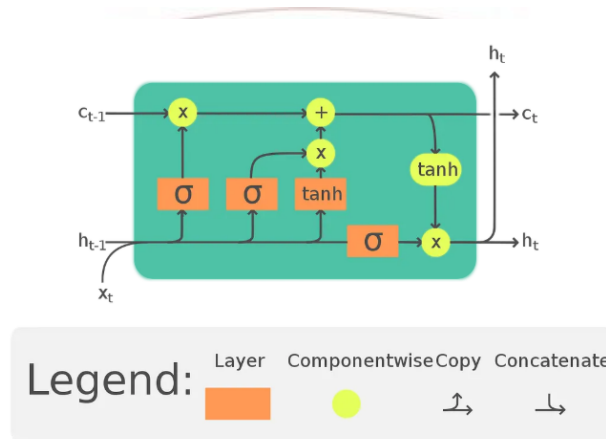
Hasil dari LSTM (skor risiko dan label) yang dikirim dari server ditampilkan di dashboard secara langsung. Jika ada kejanggalan misalnya skor melewati batas yang sudah ditentukan frontend mengirim notifikasi ke pengguna (push/email/WhatsApp/SMS) supaya segera ditindak. Batas ambang dan durasi minimum pemicu notifikasi bisa diatur di aplikasi.

Pada solusi ini data dari sensor yang diambil akan disimpan sebagai data deret waktu yang nantinya akan digunakan untuk menjalankan algoritma LSTM. Long Short-Term Memory sendiri adalah arsitektur Recurrent Neural Network (RNN) yang dirancang untuk belajar dari data berurutan dan “mengingat” pola penting dalam jangka panjang. Pada Solusi ini, deret waktu dari sensor lingkungan kebun alpukat seperti suhu udara, kelembapan udara, kelembapan tanah, suhu tanah, dan intensitas cahaya digunakan sebagai masukan untuk memperkirakan kemungkinan terjadinya penyakit antraknosa, busuk akar, busuk buah, dan bercak daun dalam waktu dekat. Model mempelajari hubungan nonlinier antara pola kondisi lingkungan terkini dan historis dengan kejadian penyakit, lalu menghasilkan skor risiko/probabilitas dan label risiko (rendah/sedang/tinggi) beserta nilai kepercayaan yang mencerminkan tingkat keyakinan model terhadap prediksi tersebut.

Cara kerja LSTM adalah memproses data berurutan secara bertahap dengan memori internal yang disebut cell state. Pada setiap waktu t , LSTM menerima masukan saat ini dan keadaan sebelumnya, lalu tiga gerbang (forget, input, dan output) mengatur aliran informasi.

1. Forget gate membuang memori yang tidak relevan.
2. Input gate menambahkan informasi baru yang penting ke dalam memori.
3. Output gate menghasilkan representasi tersembunyi (hidden state) yang digunakan untuk membuat prediksi.

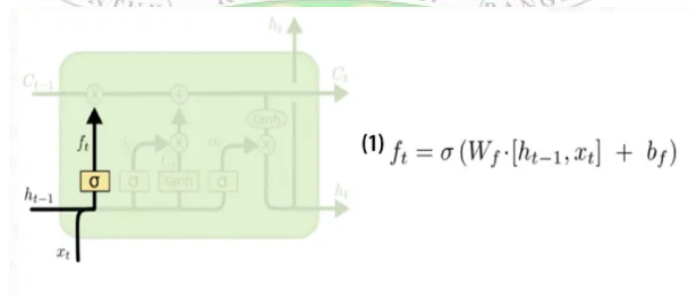
Mekanisme gerbang ini menjaga gradien tetap stabil sehingga model mampu “mengingat” pola jangka panjang. Selama pelatihan, bobot dioptimalkan melalui backpropagation through time (BPTT) untuk meminimalkan kesalahan, sedangkan pada saat inferensi, rangkaian data terbaru di masukkan dan keluaran terakhir digunakan untuk memprediksi nilai atau kelas target (misalnya risiko penyakit dalam 24–72 jam ke depan).



Gambar 1.8 Prinsip Kerja Algoritma LSTM[10]

Berikut adalah tahapan-tahapan dalam proses algoritma LSTM tersebut:

1. Forget Gate

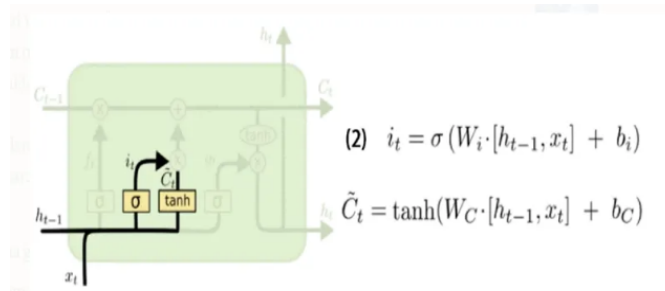


Gambar 1.9 Tahap *Forget Gate* pada LSTM[10]

Forget gate memutuskan informasi mana yang akan disimpan ataupun di buang. Forget gate akan menerima informasi yang berupa hidden state yang berasal dari cell sebelumnya dan informasi baru yang berasal dari input saat ini, kemudian informasi tersebut akan digabung dan diproses dengan

menggunakan fungsi sigmoid yang akan menghasilkan hasil berupa 0 hingga 1. Semakin dekat hasil yang diperoleh dengan 0 maka berarti informasi akan di buang, sebaliknya semakin dekat dengan 1 maka informasi akan disimpan[10].

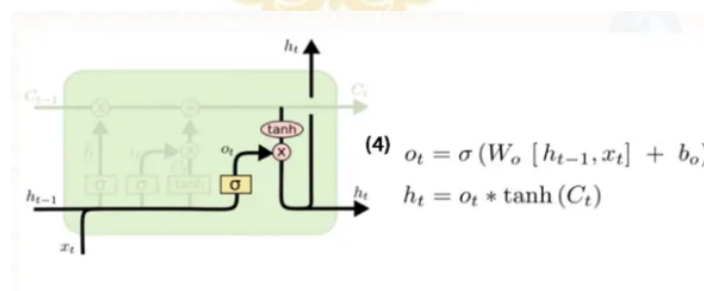
2. Input gate



Gambar 1.10 Tahap *Input Gate* pada LSTM

Input gate akan menerima informasi yang berupa hidden state yang berasal dari cell sebelumnya dan informasi baru yang berasal dari input saat ini, kemudian informasi tersebut akan digabung dan diproses dengan menggunakan fungsi sigmoid dan fungsi tanh. Hasil dari fungsi sigmoid akan mengubah nilai menjadi 0 hingga 1 untuk menentukan informasi mana yang akan di update. Semakin dekat dengan 0 berarti informasi tidak penting, semakin dekat dengan 1 berarti informasi penting. Hasil dari fungsi tanh berupa nilai -1 hingga 1 digunakan untuk mendukung agar cell dapat mempelajari informasi dengan lebih baik[10].

3. Output gate



Gambar 1.11 Tahap *Output Gate* pada LSTM[10]

Output gate akan menentukan hidden state yang akan dikirim ke cell selanjutnya. Output gate akan menerima informasi yang berupa hidden state yang berasal dari cell sebelumnya dan informasi baru yang berasal dari input

saat ini kemudian informasi akan digabung dan diproses dengan fungsi sigmoid. Cell state yang baru kemudian akan diproses melalui fungsi tanh. Hasil dari fungsi tanh akan dikalikan dengan hasil dari fungsi sigmoid untuk memperoleh informasi yang akan disimpan pada hidden state yang baru. Hidden state dan Cell state yang baru kemudian akan diteruskan ke cell selanjutnya[10].

Untuk mewujudkan solusi ini, beberapa komponen penting akan dibutuhkan:

1. Mikrokontroller

Digunakan untuk membaca semua sensor, melakukan pra pemrosesan ringan, memberi cap waktu, lalu mengirim data ke server secara periodik. Mendukung Wi-Fi, deep sleep untuk hemat daya, dan OTA untuk update firmware.

2. Sensor Suhu Udara

Mengukur temperatur udara di sekitar kebun. Rekomendasi: gunakan modul seperti untuk mendapatkan suhu dan RH sekaligus; pasang dalam radiation shield agar tidak bias panas matahari.

3. Sensor Kelembapan Udara

Mengukur RH (%) untuk mengetahui tingkat “kejenuhan” udara. RH tinggi berkorelasi dengan lamanya permukaan daun/buah tetap basah. Data RH + suhu dipakai untuk titik embun dan defisit tekanan uap (VPD).

4. Sensor Suhu Tanah

Mengukur temperatur tanah di zona akar. Suhu tanah mempengaruhi aktivitas patogen akar.

5. Sensor Kelembapan Tanah

Mengukur kadar air tanah untuk mendeteksi tanah jenuh/tergenang yang memicu busuk akar.

6. Sensor Intensitas Cahaya

Mengukur tingkat cahaya (lux) untuk mengetahui pencahayaan kebun.

7. Jaringan konektivitas

Digunakan untuk memungkinkan mengirimkan data sensor ke server untuk pemrosesan algoritma LSTM.

8. Sumber Daya

Digunakan untuk memberikan alat daya listrik agar dapat berjalan dengan baik.

9. Server Website

Digunakan untuk menyimpan data dan memproses data sensor dengan menggunakan algoritma LSTM untuk mendeteksi penyakit.

10. Frontend Website/Aplikasi

Digunakan user untuk memonitoring keadaan kebun saat ini, serta dapat melihat data histori keadaan lingkungan sekitar kebun dan hasil rekomendasi

1.2.2.2 Sistem Monitoring Berbasis Kamera dan Mendeteksi Penyakit Alpukat dengan Algoritma YOLO

Solusi kedua ini mengandalkan kamera yang dipasang di area kebun, baik itu kamera terpisah atau kamera built-in dari alat. Adapun skema penggunaan dari solusi ini:

1. Pemasangan alat

Modul alat dipasang di kebun pada posisi yang di tetapkan.

2. Waktu operasi

Alat dinyalakan 24 jam terus-menerus untuk menangkap gambar serta akan mengirim gambar setiap 5 atau 10 menit ke server.

3. Akses monitoring

Buka website atau aplikasi yang disediakan. Di dashboard akan terlihat:

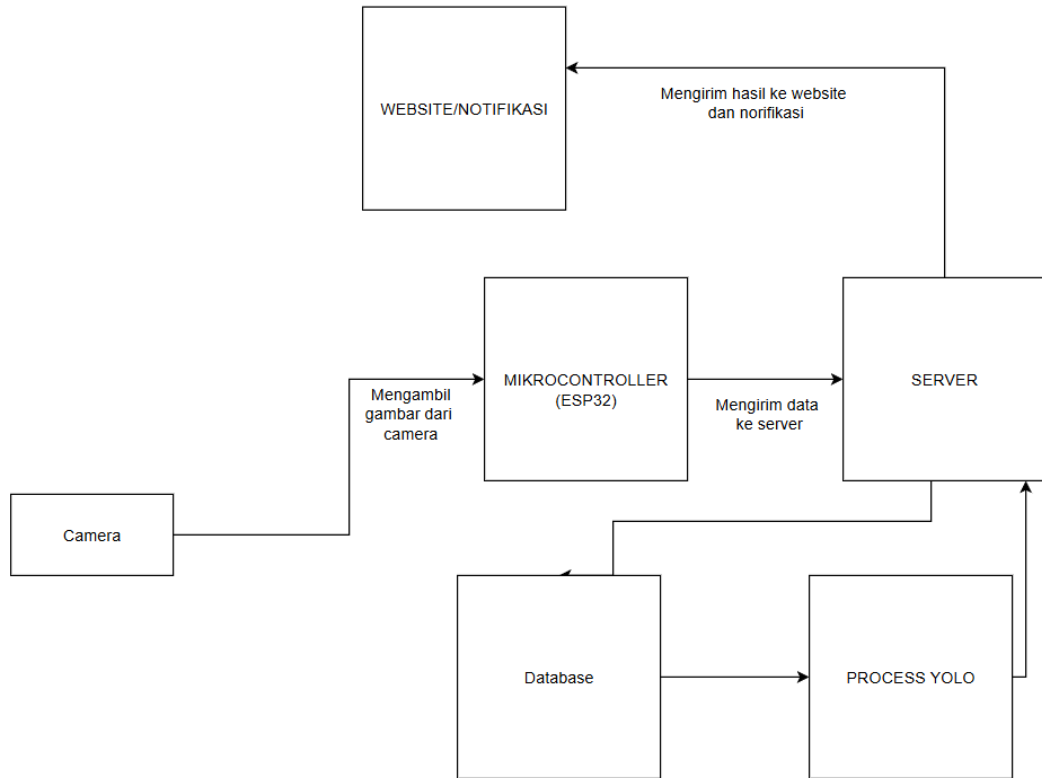
- a. Tampilan real-time: gambar terbaru ditampilkan di dashboard website atau aplikasi.
- b. Grafik historis: perkembangan beberapa jam/hari/minggu terakhir.
- c. Status perangkat: koneksi, level baterai/tenaga, dan kesehatan sensor.
- d. Sistem otomatis menampilkan jika ada gambar yang mendeteksi ada nya indikasi penyakit serta menampilkan rekomendasi yang bisa dilakukan petani.

4. Notifikasi dan tindakan yang disarankan

Jika sistem mendeteksi kondisi berisiko, notifikasi dikirim lewat push email atau WhatsApp/SMS serta akan dikirimkan juga rekomendasi yang bisa dilakukan petani untuk mengatasi kondisi tersebut.

5. Mengonfirmasi dan mencatat tindakan

Di dashboard, petani dapat mengonfirmasi bahwa peringatan sudah diterima, mencatat tindakan yang telah dilakukan, serta menandai apakah isu sudah teratasi atau masih memerlukan tindak lanjut.

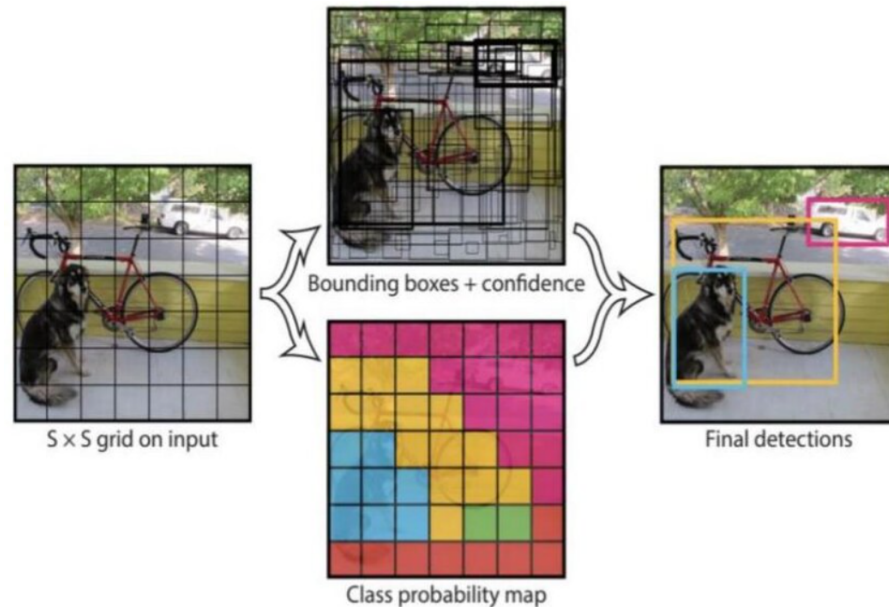


Gambar 1.12 Blok Diagram Cara Kerja Solusi ini

Nanti solusi ini akan mengirimkan gambar secara kontinu sebagai input ke sistem dengan menggunakan YOLO. You Only Look Once (YOLO) adalah algoritma deteksi objek real-time yang memproses gambar untuk menemukan dan melabeli objek di dalamnya. Dalam solusi ini, YOLO digunakan untuk mendeteksi gejala penyakit alpukat yang kasat mata pada daun dan buah, seperti antraknosa, bercak daun, dan busuk buah. Model dilatih dengan contoh gambar yang sudah diberi anotasi, sehingga saat menerima gambar baru dari kamera, YOLO dapat menandai area yang dicurigai sebagai lesi/bercak dan memberi label jenis penyakit beserta tingkat kepercayaan (confidence).

Cara kerja YOLO cukup sederhana, YOLO menerima sebuah gambar, membaginya menjadi grid $S \times S$, lalu neural network memprediksi untuk setiap sel grid sejumlah bounding box, kelas (misalnya: antraknosa, bercak daun, busuk

buah, sehat/unknown), serta confidence score yang menunjukkan keyakinan model terhadap prediksi tersebut. Deteksi dengan skor tertinggi dipilih sebagai hasil akhir. Output akhirnya adalah kotak pembatas di area daun/buah yang terinfeksi, label penyakit, dan confidence, yang kemudian dipakai sistem untuk menampilkan hasil pada dashboard serta memicu peringatan dan rekomendasi tindakan.



Gambar 1.13 Prinsip Kerja Algoritma YOLO[11]

Algoritma YOLO bekerja berdasarkan empat pendekatan berikut:

1. Residual blocks

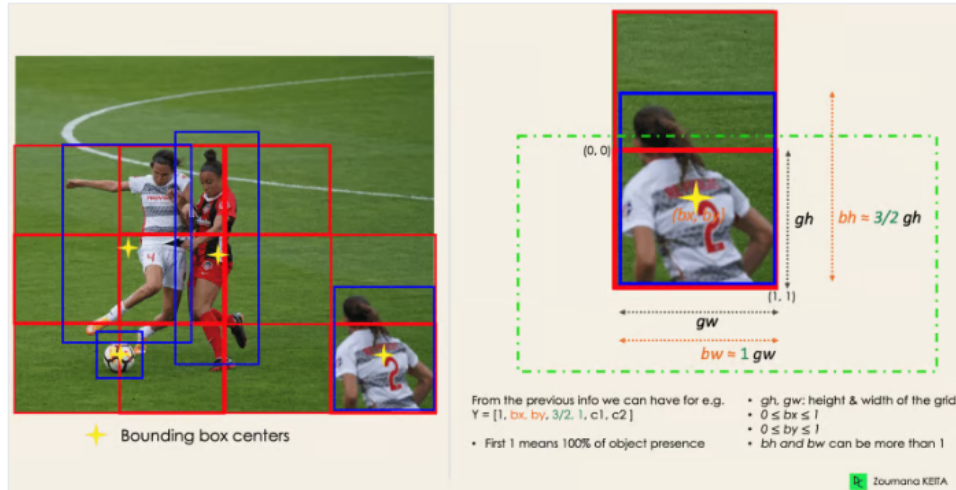


Gambar 1.14 Ilustrasi Residual Blocks[12]

Langkah pertama ini dimulai dengan membagi citra asli (A) menjadi $N \times N$ sel grid dengan bentuk yang sama, di mana N , dalam kasus kita, adalah 4, seperti

yang ditunjukkan pada gambar di sebelah kanan. Setiap sel dalam grid bertanggung jawab untuk melokalisasi dan memprediksi kelas objek yang dicakupnya, beserta nilai probabilitas/keyakinannya[12].

2. Bounding box regression



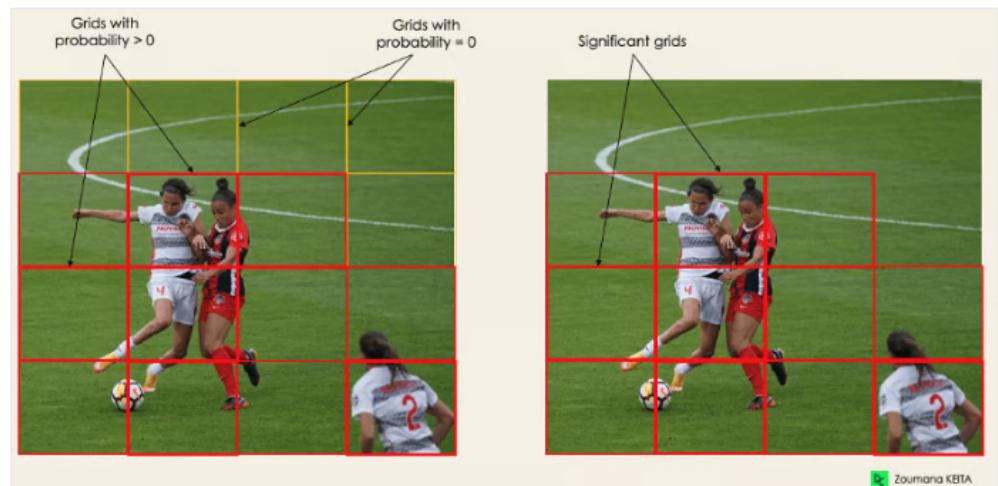
Gambar 1.15 Prinsip Kerja Bounding Box Regression[12]

Langkah selanjutnya adalah menentukan kotak pembatas yang sesuai dengan persegi panjang, dengan menyorot semua objek dalam gambar. Kita dapat memiliki kotak pembatas sebanyak jumlah objek dalam gambar tertentu[12]. YOLO menentukan atribut kotak pembatas ini menggunakan modul regresi tunggal dalam format berikut, di mana Y adalah representasi vektor akhir untuk setiap kotak pembatas[12].

$$Y = [pc, bx, by, bh, bw, c1, c2]$$

Hal ini terutama penting selama fase pelatihan model.

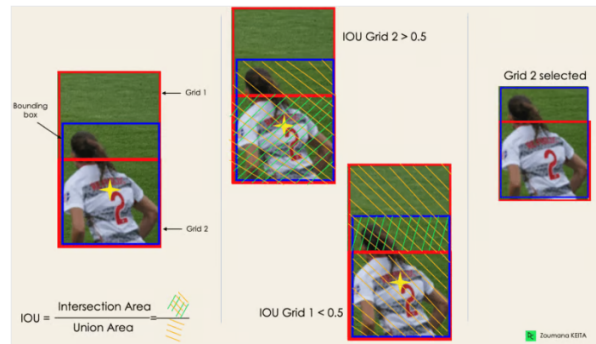
- pc sesuai dengan skor probabilitas yang berisi suatu objek. Misalnya, semua kisi berwarna merah akan memiliki skor probabilitas lebih tinggi dari nol. Gambar di sebelah kanan adalah versi yang disederhanakan karena probabilitas setiap sel kuning adalah nol (tidak signifikan).



Gambar 1.16 Ilustrasi PC pada YOLO[12]

- b. bx , by adalah koordinat x dan y dari pusat kotak pembatas terhadap sel grid yang menyelubunginya.
 - c. bh , bw bersesuaian dengan tinggi dan lebar kotak pembatas berkenaan dengan sel kisi yang membungkusnya.
 - d. $c1$ dan $c2$ sesuai dengan dua kelas, Pemain dan Bola. Kita dapat memiliki kelas sebanyak yang dibutuhkan dalam kasus penggunaan.
3. Intersection Over Unions or IOU for short.
 Seringkali, satu objek dalam sebuah gambar dapat memiliki beberapa kandidat kotak kisi untuk prediksi, meskipun tidak semuanya relevan. Tujuan IOU (nilai antara 0 dan 1) adalah membuang kotak kisi tersebut dan hanya menyimpan kotak yang relevan. Berikut logikanya:
 - a. Pengguna menentukan ambang batas pemilihan IOU-nya, yang dapat berupa, misalnya, 0,5.
 - b. Kemudian, YOLO menghitung IOU setiap sel grid, yaitu Area Persimpangan dibagi dengan Area Gabungan.
 - c. Terakhir, ia mengabaikan prediksi sel grid yang memiliki $IOU \leq$ ambang batas dan mempertimbangkan sel grid yang memiliki $IOU >$ ambang batas.

Di bawah ini adalah ilustrasi penerapan proses pemilihan grid pada objek di kiri bawah. Kita dapat mengamati bahwa objek tersebut awalnya memiliki dua kandidat grid, dan hanya "Grid 2" yang terpilih pada akhirnya[12].



Gambar 1.17 Ilustrasi Penerapan IOU[12]

4. Non-Maximum Suppression.

Menetapkan ambang batas untuk IOU tidak selalu cukup karena suatu objek dapat memiliki beberapa kotak dengan IOU di atas ambang batas, dan membiarkan semua kotak tersebut dapat menimbulkan gangguan. Di sinilah kita dapat menggunakan NMS untuk hanya menyimpan kotak dengan skor deteksi probabilitas tertinggi[12].

Untuk mewujudkan solusi ini, beberapa komponen penting akan dibutuhkan

1. ESP32-CAM / IP Camera

Digunakan untuk mengambil data visual yang dibutuhkan untuk dikirim ke unit pemrosesan.

2. Jaringan konektivitas

Digunakan untuk mentransfer data foto dari kamera ke unit pemrosesan, dan mungkin untuk mengirimkan hasil deteksi, sistem ini memerlukan konektivitas.

3. Sumber Daya

Digunakan untuk memberikan alat daya listrik agar dapat berjalan dengan baik.

4. Server Website

Digunakan untuk menyimpan data dan memproses data foto dengan menggunakan algoritma YOLO+CNN untuk mendeteksi penyakit.

5. Frontend Website/Aplikasi

Digunakan user untuk memonitoring keadaan kebun saat ini, serta dapat melihat data histori keadaan sekitar kebun dan hasil rekomendasi.

Dalam solusi ini sistem juga akan menyediakan notifikasi pengingat yang dikirim kepada pengguna jika output yang dihasilkan mengindikasikan bahwa ada resiko terkena penyakit.

1.2.2.3 Sistem Monitoring Alpukat dengan Sensor Fisiologis dan Prediksi Penyakit dengan Algoritma GRU

Solusi ketiga mengandalkan sensor yang mendeteksi keadaan fisiologis tanaman alpukat secara kontinu terutama kadar air pada batang yang merupakan indikator paling jelas untuk penyakit busuk akar. Adapun skema penggunaan dari solusi ini:

1. Pemasangan alat

Modul alat dipasang pada batang alpukat.

2. Waktu operasi

Alat dinyalakan 24 jam terus-menerus untuk mengambil data sensor serta akan mengirim data setiap 5 atau 10 menit ke server.

3. Akses monitoring

Buka website atau aplikasi yang disediakan. Di dashboard akan terlihat:

- a. Tampilan real-time: nilai sensor terbaru (suhu jaringan tanaman, diameter batang, dan kadar air batang).
- b. Grafik historis: perkembangan beberapa jam/hari/minggu terakhir untuk tiap sensor.
- c. Status perangkat: koneksi, level baterai/tenaga, dan kesehatan sensor.
- d. Sistem otomatis menampilkan status risiko penyakit (rendah / sedang / tinggi) serta menampilkan rekomendasi yang bisa dilakukan.

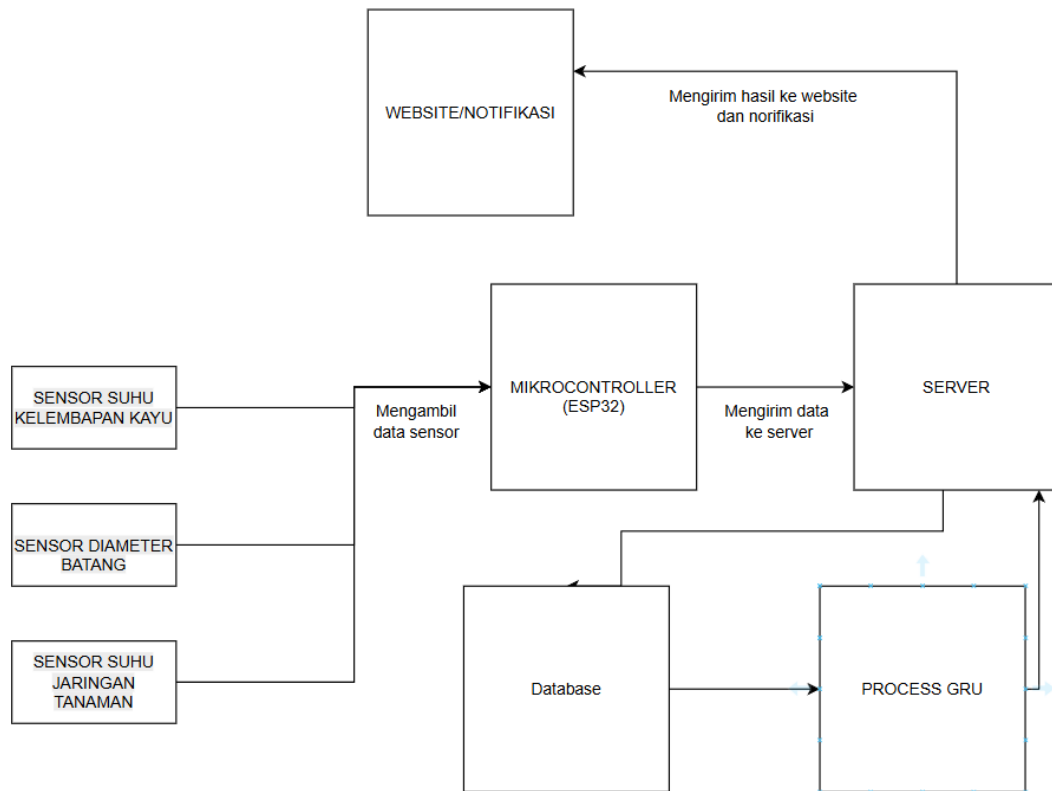
4. Notifikasi dan tindakan yang disarankan

Jika sistem mendeteksi kondisi berisiko, notifikasi dikirim lewat push email atau WhatsApp/SMS serta akan dikirimkan juga rekomendasi yang bisa dilakukan petani untuk mengatasi kondisi tersebut.

5. Mengonfirmasi dan mencatat tindakan

Di dashboard, petani dapat mengonfirmasi bahwa peringatan sudah diterima, mencatat tindakan yang telah dilakukan, serta menandai apakah isu sudah teratasi atau masih memerlukan tindak lanjut.

Berikut adalah blok diagram cara kerja dari usulan solusi ini:



Gambar 1.18 Blok Diagram Cara Kerja Solusi ini

Berikut adalah tahapan-tahapan proses yang dilakukan pada solusi ini:

1. Pembacaan di perangkat (ESP32)
Sensor membaca otomatis setiap 5–10 menit: resistansi kelembapan kayu, pengukur diameter batang, dan suhu jaringan tanaman (termokopel). ESP32 memberi tanggal/jam, menyaring nilai kosong atau lonjakan tidak wajar. Data dikirim ke server dalam format JSON lewat MQTT/HTTP. Jika internet putus, ESP32 menyimpan sementara (store-and-forward) lalu mengirim saat koneksi kembali.
2. Penerimaan data di server
Server menerima data, menyamakan waktu, membuang angka yang jelas tidak masuk akal, lalu ubah semua data ke interval waktu yang tetap (mis. tiap 10 menit).
3. Pembentukan jendela urutan (framing)
Kumpulkan data menjadi potongan waktu dengan panjang tertentu, misalnya 48 jam terakhir dengan langkah 10 menit, sehingga satu potongan berisi 288 titik waktu. Setiap titik berisi beberapa nilai: [indeks kelembapan batang

terkoreksi, diameter batang, suhu jaringan] plus fitur turunannya (mis. perubahan antarwaktu). Data yang sudah diubah ke bentuk deret waktu disimpan di database.

Data yang sudah diubah ke bentuk deret waktu disimpan di database.

4. Prediksi dengan model GRU

Data terbaru dikirim ke model GRU yang sudah dilatih pada data historis. Model menghasilkan skor risiko (0–1) untuk tiap penyakit yang dipantau (mis. busuk akar, antraknosa, busuk buah, bercak daun). Sistem mengubah skor menjadi label mudah dibaca: rendah, sedang, atau tinggi, sesuai ambang yang sudah disetel dari hasil uji.

Berikut adalah cara kerja GRU mengolah data input:

Pada tiap waktu (mis. tiap 10 menit), kita bentuk satu vektor $x_t = [\text{kelembapan_kayu}, \text{diameter_batang}, \text{suhu_jaringan}]$. Angka ini sudah dirapikan lebih dulu (cek lonjakan aneh, samakan skala/normalisasi, dan selaras waktu). GRU membaca vektor x_t tersebut langkah demi langkah selama 48 jam terakhir. Di setiap langkah, GRU melihat data saat ini dan “ingatan” dari jam-jam/hari sebelumnya.

- a. Update gate: memutuskan seberapa banyak ingatan lama dipertahankan. Ini penting untuk menyimpan tren beberapa hari, misalnya:
 - i. Kelembaban kayu pelan-pelan turun atau malah jenuh terus.
 - ii. Diameter siang menyusut tapi malam tidak pulih lagi (pemulihan melemah).
 - iii. Suhu jaringan cenderung lebih tinggi dari biasanya. Pola seperti ini sering terkait masalah aliran air dari akar (indikasi busuk akar).
- b. Reset gate: mengatur seberapa besar “jejak masa lalu” dipakai saat mengolah data baru. Ini membantu saat ada perubahan mendadak yang sah, misalnya:
 - i. Baru saja ada irigasi atau hujan lebat → nilai kelembapan kayu dan diameter bisa berubah cepat. Dengan reset gate, GRU bisa “mengurangi pengaruh” memori lama supaya cepat menyesuaikan diri ke kondisi baru, bukan terjebak oleh pola sebelumnya.

Setelah menelusuri seluruh urutan 48 jam, GRU menghasilkan “ringkasan ingatan” terakhir. Ringkasan ini diteruskan ke lapisan akhir (dense) untuk menghasilkan skor risiko 0–1 per penyakit (mis. busuk akar, antraknosa, busuk buah, bercak daun). Sistem kemudian mengubah skor menjadi label mudah dibaca: rendah/sedang/tinggi.

Hasil dari process GRU ini akan dikirimkan ke frontend website untuk kebutuhan monitoring serta jika ada resiko terjadinya penyakit maka server akan langsung memberikan notifikasi (push/email/WhatsApp/SMS).

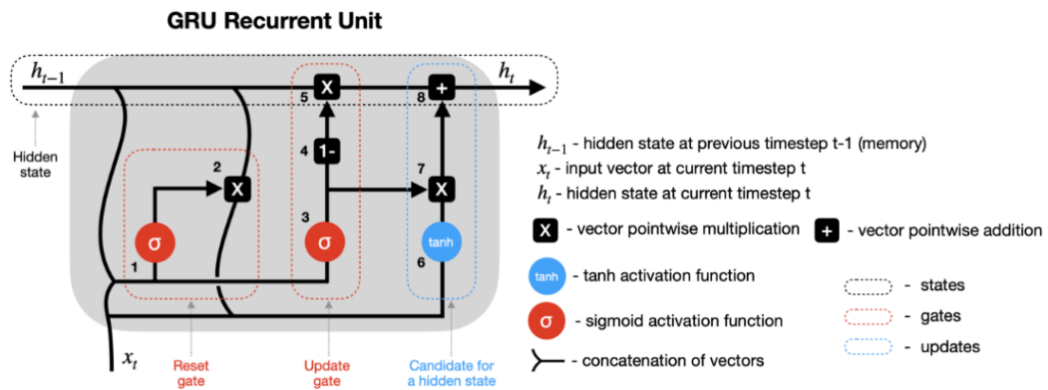
5. Website dan Notifikasi

Hasil dari LSTM (skor risiko dan label) yang dikirim dari server ditampilkan di dashboard secara langsung. Jika ada kegagalan misalnya skor melewati batas yang sudah ditentukan frontend mengirim notifikasi ke pengguna (push/email/WhatsApp/SMS) supaya segera ditindak. Batas ambang dan durasi minimum pemicu notifikasi bisa diatur di aplikasi.

Pada algoritma GRU data dari sensor yang diambil akan disimpan sebagai deret waktu yang nantinya akan digunakan untuk menjalankan algoritma GRU. Gated Recurrent Unit (GRU) sendiri adalah algoritma yang menggunakan jenis jaringan saraf rekuren yang dirancang untuk memproses data berurutan seperti deret waktu dan teks, dengan dua mekanisme yaitu:

1. Update gate untuk menentukan seberapa banyak memori lama dipertahankan.
2. Reset gate untuk mengatur seberapa kuat memori lama mempengaruhi informasi baru.

Sehingga aliran informasi terkontrol, masalah gradien hilang berkurang, dan dependensi jangka panjang lebih mudah dipelajari; arsitekturnya lebih sederhana dan parameter lebih sedikit dibanding LSTM, membuat pelatihan lebih cepat namun tetap efektif untuk tugas prediksi deret waktu, deteksi anomali, dan pemodelan urutan. GRU mirip dengan LSTM tetapi memiliki lebih sedikit gerbang.



Gambar 1.19 Prinsip Kerja Algoritma GRU[13]

Berikut adalah tahapan-tahapan dalam proses algoritma GRU tersebut:

1. Reset Gate

Hidden state sebelumnya (h_{t-1}) dan masukan saat ini (x_t) digabungkan (dikalikan dengan bobot dan bias masing-masing yang ditambahkan) dan dilewatkan melalui gerbang reset. Karena fungsi sigmoid berkisar antara 0 dan 1, langkah pertama menentukan nilai mana yang harus dibuang (0), diingat (1), atau dipertahankan sebagian (antara 0 dan 1). Langkah kedua mereset hidden state sebelumnya dengan mengalikannya dengan keluaran dari langkah pertama[13].

2. Update gate

Langkah ketiga mungkin tampak serupa dengan langkah pertama, tetapi perlu diingat bahwa bobot dan bias yang digunakan untuk menskalakan vektor-vektor ini berbeda, sehingga menghasilkan keluaran sigmoid yang berbeda. Jadi, setelah melewati vektor gabungan melalui fungsi sigmoid, kurangi vektor tersebut dari vektor yang berisi semua angka 1 (langkah keempat) dan kalikan dengan keadaan tersembunyi sebelumnya (langkah kelima). Itu merupakan salah satu bagian dari pembaruan keadaan tersembunyi dengan informasi baru[13].

3. Hidden state candidate

Setelah mengatur ulang hidden state sebelumnya pada langkah kedua, keluaran digabungkan dengan masukan baru (x_t), mengalikannya dengan bobot masing-masing dan menambahkan bias sebelum melewati fungsi aktivasi tanh (langkah keenam). Kemudian, kandidat hidden state dikalikan

dengan hasil gerbang pembaruan (langkah ketujuh) dan ditambahkan ke h_t-1 yang telah dimodifikasi sebelumnya untuk membentuk hidden state baru $h_t[13]$.

Untuk mewujudkan solusi ini, beberapa komponen penting akan dibutuhkan:

1. ESP32

Digunakan untuk membaca semua sensor, melakukan pra pemrosesan ringan, memberi cap waktu, lalu mengirim data ke server (MQTT/HTTP) secara periodik. Mendukung Wi-Fi, deep sleep untuk hemat daya, dan OTA untuk update firmware.

2. Sensor Resistansi Kelembaban Kayu (Wood Moisture Sensor)

Digunakan untuk mendeteksi perubahan kadar air jaringan batang dengan cara menempelkan elektroda ke kulit batang.

3. Strain Gauge Mini (Diameter Meter Sederhana)

Digunakan untuk mendeteksi perubahan diameter batang (penyusutan akibat kekurangan atau kelebihan kadar air).

4. Sensor Suhu jaringan tanaman

Digunakan untuk mendeteksi suhu pada jaringan tanaman. Rekomendasi: Termokopel tipe K.

5. Sumber Daya

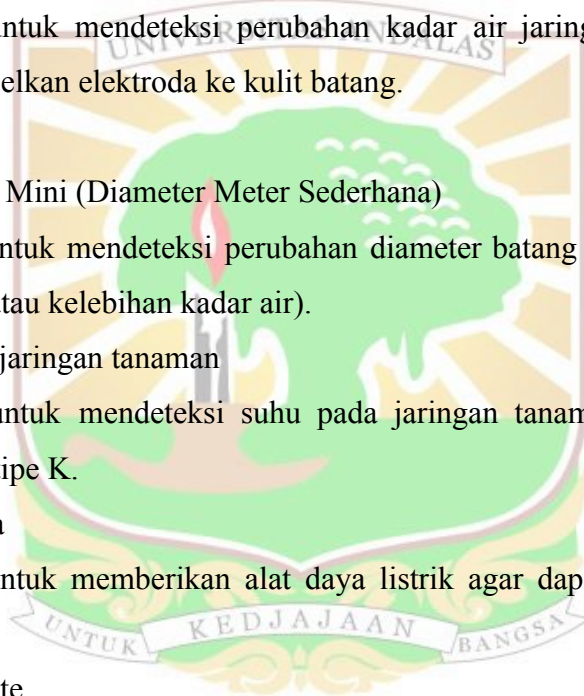
Digunakan untuk memberikan alat daya listrik agar dapat berjalan dengan baik.

6. Server Website

Digunakan untuk menyimpan data dan memproses data sensor dengan menggunakan algoritma GRU untuk mendeteksi penyakit.

7. Frontend Website/Aplikasi

Digunakan user untuk memonitoring keadaan tanaman saat ini, serta dapat melihat data histori tanaman dan hasil rekomendasi.



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 1.20 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, 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, berikut perhitungan menggunakan *house of quality* ketiga solusi yaitu:

1. Solusi 1

$$= (5 \times 25,3\%) + (3 \times 22,0\%) + (5 \times 18,7\%) + (5 \times 11,0\%) + (5 \times 4,4\%) + (5 \times 4,9\%) + (5 \times 13,7\%)$$

$$= 4,56$$

2. Solusi 2

$$= (3 \times 25,3\%) + (3 \times 22,0\%) + (3 \times 18,7\%) + (5 \times 11,0\%) + (1 \times 4,4\%) + (3 \times 4,9\%) + (3 \times 13,7\%)$$

$$= 3,13$$

3. Solusi 3

$$= (1 \times 25,3\%) + (3 \times 22,0\%) + (1 \times 18,7\%) + (5 \times 11,0\%) + (5 \times 4,4\%) + (5 \times 4,9\%) + (5 \times 13,7\%)$$

$$= 2,57$$

Berdasarkan perhitungan diperoleh solusi dengan nilai tertinggi yaitu solusi 1 dengan nilai 4.56

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

1. Solusi 1 meraih skor tertinggi ($\approx 4,55$) karena sistem ini menggunakan sensor lingkungan untuk mengukur parameter utama iklim mikro seperti suhu udara, kelembapan udara, suhu tanah, kelembapan tanah, dan intensitas cahaya.

Sensing Capability, memperoleh nilai tertinggi (5), sebab solusi ini mampu menangkap perubahan lingkungan yang menjadi pemicu penyakit alpukat karena jamur sebelum gejala visual terlihat, sehingga sangat optimal untuk prediksi dini.

Computing Performance, mendapat skor (3), karena proses analisis utama berjalan di cloud/server sehingga efisien dan node di lapangan tetap hemat daya meski komputasi penuh tidak dilakukan di sisi node.

Computing Method, memperoleh nilai (5) karena algoritma LSTM sangat cocok untuk data time-series, mampu mengenali pola fluktuasi lingkungan yang kompleks, serta memberikan prediksi akurat untuk pencegahan dini penyakit alpukat.

Notification Capability, juga meraih nilai maksimal (5), karena sistem secara otomatis mengirim peringatan ke petani baik melalui web, SMS, maupun aplikasi, memberi waktu respons cepat sebelum penyakit berkembang.

Biaya dibawah Rp10.000.000, mendapatkan nilai (5), karena solusi ini menggunakan komponen-komponen dengan harga terjangkau sehingga biaya implementasinya menjadi lebih murah.

Pengerjaan Kurang dari 6 Bulan, mendapatkan nilai (5), karena komponen utama dari solusi ini adalah sensor sehingga proses pengembangannya tidak akan sulit, meskipun tantangan utamanya terletak pada optimasi sistem manajemen daya agar perangkat dapat bertahan secara kontinu selama 24 jam.

Dapat Mengirimkan Data dengan delay dibawah 10 detik, mendapatkan nilai (5), karena solusi ini hanya mengirimkan data tabular ke server sehingga waktu transmisi tidak akan lama, serta ukuran payload yang dikirimkan juga sangat kecil.

Secara keseluruhan, solusi ini paling sesuai untuk monitoring 24 jam yang bersifat prediktif dan responsif.

2. Solusi 2 meraih skor ($\approx 3,13$) karena keunggulannya pada deteksi visual berbasis kamera dan kecepatan notifikasi, meskipun kurang kuat pada deteksi lingkungan dini.

Sensing Capability, solusi ini mendapat nilai (3), karena kamera hanya dapat mendeteksi gejala penyakit jamur setelah muncul, sehingga bersifat reaktif dan kurang mendukung pencegahan dini.

Computing Performance, mendapatkan nilai (3), karena analisis gambar memerlukan komputasi cukup besar, namun bila diproses secara berkala, performa sistem tetap efisien untuk kebutuhan monitoring.

Computing Method, mendapat skor (3), karena algoritma YOLO hanya efektif untuk deteksi berbasis visual, yang berarti infeksi penyakit tersebut sudah terlanjur terjadi pada tanaman.

Notification Capability, solusi ini mendapat poin tertinggi (5), sebab notifikasi bisa segera dikirimkan begitu gejala visual terdeteksi oleh kamera, memungkinkan penanganan cepat setelah penyakit tampak.

Biaya dibawah Rp10.000.000, mendapatkan nilai (1), karena solusi ini menggunakan komponen-komponen dengan harga yang cukup mahal seperti kamera, sehingga biaya implementasinya menjadi jauh lebih tinggi.

Pengerjaan Kurang dari 6 Bulan, mendapatkan nilai (3), karena komponen utama dari solusi ini adalah kamera sehingga proses pengembangan dan integrasi sistemnya akan menjadi lebih rumit.

Dapat Mengirimkan Data dengan delay dibawah 10 detik, mendapatkan nilai (3), karena solusi ini hanya mengirimkan data gambar ke server sehingga waktu transmisi akan sedikit lama, meskipun prosesnya tetap dapat diselesaikan di bawah 10 detik.

Secara keseluruhan, solusi dua cocok untuk validasi visual lanjutan ketika diperlukan bukti nyata gejala penyakit di area tertentu.

3. Solusi 3 karena ($\approx 2,80$) karena kekuatan pada efisiensi daya, namun terdapat keterbatasan nyata pada aspek prediksi dan cakupan deteksi.

Sensing Capability, mendapatkan nilai (1), karena hanya menggunakan sensor fisiologis yang mengukur sebagian parameter internal dan cenderung kurang mampu mengantisipasi penyebab utama penyakit jamur.

Computing Performance, mendapatkan nilai (3), mengingat data fisiologis yang sederhana memungkinkan semua proses komputasi berjalan ringan baik di perangkat maupun cloud tanpa membebani sistem.

Computing Method, mendapatkan nilai (1), karena GRU memiliki kapasitas memori dan modelling lebih sederhana dibanding LSTM, sehingga kurang optimal untuk mendeteksi pola data yang besar dan kompleks.

Notifikasi Capability, memperoleh nilai (5), karena sistem dapat memberikan peringatan real-time secara otomatis kepada petani jika terdeteksi perubahan abnormal.

Biaya dibawah Rp10.000.000, mendapatkan nilai (5), karena solusi ini menggunakan komponen-komponen dengan harga terjangkau sehingga biaya implementasinya menjadi lebih murah.

Pengerjaan Kurang dari 6 Bulan, mendapatkan nilai (5), karena komponen utama dari solusi ini adalah sensor sehingga proses pengembangannya tidak akan sulit, meskipun tantangan utamanya terletak pada optimasi sistem manajemen daya agar perangkat dapat bertahan secara kontinu selama 24 jam.

Dapat Mengirimkan Data dengan delay dibawah 10 detik, mendapatkan nilai (5), karena solusi ini hanya mengirimkan data tabular ke server sehingga waktu transmisi tidak akan lama, serta ukuran payload yang dikirimkan juga sangat kecil.

Solusi ini secara keseluruhan lebih cocok untuk monitoring di lokasi dengan keterbatasan energi atau sebagai sistem pendukung berbasis ambang sederhana.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Berdasarkan analisis House of Quality terhadap fitur dasar dan tambahan, Solusi 1 yaitu Sistem Monitoring Berbasis Sensor Lingkungan dan Prediksi Penyakit Alpukat dengan Algoritma LSTM memperoleh skor tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa solusi ini paling sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik produk yang diinginkan, karena menawarkan kombinasi fitur yang seimbang dan optimal untuk pemantauan lingkungan, prediksi dini penyakit, efisiensi daya, notifikasi otomatis, dan kemudahan integrasi dengan web atau aplikasi. Dengan keunggulan pada aspek tersebut, Solusi 1 dinilai mampu memberikan manfaat maksimal dalam mencegah penyakit alpukat sejak dini dan mendukung operasional yang efektif di lapangan.

