

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Kakao (*Theobroma cacao L.*) merupakan salah satu komoditas perkebunan yang tumbuh dengan baik di bawah matahari tropis Indonesia yang memiliki prospek menjanjikan. Pada tahun 2020, Indonesia memperoleh prediket sebagai produsen kakao terbesar ketiga di dunia dengan produksi kakao sebesar 659,7 ribu ton. Pada tahun 2022, produksi kakao mencapai 667,3 ribu ton. Puncak produksi tercatat pada tahun 2012 dengan angka 740,5 ribu ton. Produksi kakao mengalami penurunan, dan hal ini dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti menurunnya kemampuan sumber daya manusia dalam mengelola perkebunan kakao[1].

Produksi kakao di Indonesia berfluktuasi setiap tahun. Penyebab fluktuasi tersebut antara lain oleh kualitas bibit, umur pohon, serangan hama dan penyakit, dan perubahan iklim. Cara pemanenan juga mempengaruhi produksi kakao. Panen merupakan prosedur awal yang sangat penting dalam pengolahan kakao untuk mendapatkan biji yang berkualitas tinggi[2].

Panen buah kakao sebaiknya dilakukan tepat waktu dan dilakukan dengan cara dan sarana yang tepat. Selain menghindari pemanenan buah muda, hal yang perlu dihindari yaitu panen buah yang sudah lewat masak. Tingkat kematangan buah kakao sangat mempengaruhi kualitas biji yang dihasilkan. Panen kakao yang tidak tepat pada waktunya akan berdampak besar terhadap hasil akhir produk kakao[3].

Seiring berjalannya waktu, kakao juga menemukan tempatnya dalam industri kosmetik dan farmasi, yang terus mengalami peningkatan permintaan di pasar domestik dan global. Kualitas kakao yang konsisten sangat penting bagi produksi dan pendapatan petani. Kualitas ditentukan oleh aroma dan rasa, yang dapat bervariasi berdasarkan praktik pengelolaan pasca panen. Penyortiran, fermentasi, pengeringan, pengklasifikasian, dan penyimpanan merupakan tahapan penting. Parameter seperti indeks fermentasi, tingkat kematangan, dan varietas digunakan untuk mengevaluasi dan mengklasifikasi biji kakao[4].

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Menurut Indonesia Investments, 90 persen produksi kakao di Indonesia berasal dari petani dengan peralatan yang terbatas. Kondisi ini tentu turut menyumbang jumlah produksi kakao yang semakin menurun[1].

Panen buah kakao sebaiknya dilakukan tepat waktu dan dilakukan dengan cara dan sarana yang tepat. Selain menghindari pemanenan buah muda, hal yang perlu dihindari yaitu panen buah yang sudah lewat masak. Panen buah yang terlalu tua akan menurunkan rendemen lemak dan menambah persentase biji berkecambah. Sementara itu, panen buah muda akan menghasilkan rendemen yang rendah, cita rasa khas coklat tidak maksimal, persentase biji pipih (*flat bean*) tinggi, serta kadar kulit biji yang cenderung tinggi[3].

Kakao merupakan jenis buah non-klimakterik, yang berarti buah tidak akan mengalami proses pemasakan lebih lanjut setelah dipetik dari pohon. Oleh karena itu, penting untuk tidak memetik buah dalam keadaan belum matang karena biji di dalamnya tidak akan siap untuk difermentasi[5].

Dalam proses produksi kakao, biji kakao menyumbang sekitar 33% dari total berat buah dan 67% lainnya terdiri dari biomassa yang tersisa seperti kulit kakao, kulit buah, dan produk sampingan kakao lainnya[6].

Buah kakao yang dipanen dalam keadaan belum matang atau terlalu matang dapat mempengaruhi kualitas biji kakao selama fermentasi. Setelah dipanen, biji kakao diekstraksi dari buah kakao, diikuti dengan fermentasi, pengeringan, dan pemanggangan. Kematangan ini penting karena memastikan proses selanjutnya untuk mendapatkan rasa kakao premium dari biji kakao[7].

Pemilihan tingkat kematangan buah kakao sangat penting untuk menghasilkan biji kakao dengan kualitas terbaik karena pada saat buah matang, senyawa seperti gula, asam organik, metilxantin, polifenol, dan protein, yang semuanya penting untuk produksi prekursor aroma, terbentuk atau berubah. Oleh karena itu, tingkat kematangan buah kakao yang tepat dan homogenitasnya akan berkontribusi pada pengolahan yang baik pada kualitas biji kakao[8].

Biasanya, buah kakao berbentuk bulat telur yang tidak pecah dengan panjang 15–30 cm dan lebar 8–10 cm, tersedia dalam berbagai bentuk seperti lonjong, bulat, elips, dan lonjong. Permukaan kulit buah kakao bisa halus atau kasar selama masa mudanya dengan warna hijau dan merah, tergantung pada. Umumnya, buah kakao yang belum matang memiliki kulit berwarna hijau atau ungu kemerahan, yang berubah menjadi kekuningan atau jingga kemerahan saat matang. Warna buah kakao merupakan salah satu indikator tingkat kematangannya, dan petani secara luas menggunakannya untuk memutuskan kapan akan memanen tanaman tersebut[9].

Skala warna merupakan salah satu metode non-destruktif yang paling banyak digunakan untuk mengkarakterisasi tingkat kematangan buah, karena memungkinkan keterkaitan parameter fisikokimia seperti kadar gula, pH, keasaman, indeks kematangan, dan warna kulit buah[10].

Buah kakao berbeda dengan buah – buahan lain, sulit untuk menentukan tingkat kematangan buah kakao secara akurat jika hanya dilihat dari penampilan luarnya karena warna dinding luar buahnya tergantung pada variannya. Misalnya, buah kakao *Forastero* berubah dari hijau menjadi kuning, kakao *Criollo* dari merah tua menjadi merah, dan jenis lainnya berubah menjadi merah jingga[5].

Mengidentifikasi indikator tingkat kematangan buah kakao merupakan tugas yang kompleks karena buah ini tidak menunjukkan karakteristik buah lain selama masa pematangan. Umumnya, tingkat kematangan buah kakao ditentukan secara manual berdasarkan perkiraan tanggal panen harian menggunakan pengamatan sensorik, yang ditandai dengan perubahan warna kulit buah kakao. Hal ini tentu tidak akurat karena penilaian visual hanya dilakukan secara subjektif. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi yang cepat, tidak merusak, dan akurat untuk mengklasifikasikan tingkat kematangan buah kakao selama masa panen[8].

Tabel 1. 1 Solusi yang Telah Ada

No	Solusi	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
1	Sensor fluoresensi multiparametrik (pigmen, flavonoid, klorofil, nitrogen) pada beberapa klon kakao (DESA1, KKM22, KKM25, MCBC1, PBC221)	<ul style="list-style-type: none"> - Cepat dan non-destruktif. - Akurat dalam mendeteksi pigmen (<i>anthocyanin, flavonol</i>) dan perubahan kandungan klorofil serta nitrogen. - Membantu menentukan waktu panen yang optimal dengan menggunakan indeks fluoresensi yang bisa diterapkan di berbagai klon. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mungkin membutuhkan kalibrasi khusus untuk setiap klon kakao. - Biaya alat bisa cukup mahal, tergantung pada teknologi sensor yang digunakan. - Sulit digunakan oleh petani tradisional tanpa pelatihan lebih lanjut. 	[11]
2	Spektroskopi NIR dan Vis-NIR dengan analisis PCA-LDA	<ul style="list-style-type: none"> - Spektroskopi NIR memberikan akurasi yang tinggi (92.50% untuk prediksi). - Penggunaan <i>chemometric analysis</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - Peralatan spektroskopi mahal. - Membutuhkan pengetahuan teknis untuk 	[8]

No	Solusi	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
		memperkuat deteksi kematangan buah kakao.	interpretasi data spektral dan penggunaan alat. - Pengoperasian rumit, tidak praktis untuk penggunaan lapangan tanpa pelatihan.	
3	Pembelajaran mesin pada tahap pasca-panen (klasifikasi, penilaian kualitas, fermentasi)	- Teknologi pembelajaran mesin memberikan akurasi tinggi dalam klasifikasi kematangan dan kualitas (ANN, CNN, SVM). - Dapat diadaptasi untuk berbagai tahap proses pasca-panen, termasuk fermentasi. - Tingkat akurasi tinggi pada model	- Memerlukan dataset besar untuk pelatihan model yang akurat. - Kompleksitas tinggi, tidak cocok untuk petani tanpa infrastruktur teknologi. - Bergantung pada perangkat lunak dan	[4]

No	Solusi	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
		yang berbeda (GLCM 99.61%, ANFIS 99.715%, k-NN).	infrastruktur untuk menjalankan pembelajaran mesin.	
4	Pengukuran fisik & kimia pada klon kakao (CCN51, ICS95, TSH565)	<ul style="list-style-type: none"> - Metode tradisional yang melibatkan pengukuran karakteristik fisik dan kimia seperti warna, berat, pH, padatan terlarut, dan kelembapan yang dapat diandalkan. - Praktis untuk diimplementasikan pada skala produksi kecil dan menengah. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pengukuran manual memerlukan waktu yang lama dan subyektif. - Kurang efisien untuk proses skala besar karena membutuhkan waktu lama untuk setiap pengukuran. 	[12]
5	Deep learning (CNN) untuk klasifikasi suara “thumping” pod kakao	<ul style="list-style-type: none"> - Menggunakan jaringan saraf konvolusi (CNN) yang memberikan akurasi tinggi (97.46%). - Non-destruktif dan menggunakan data akustik untuk 	<ul style="list-style-type: none"> - Dibutuhkan mikrofon khusus dan perangkat keras yang kompatibel untuk menghasilkan suara yang 	[7]

No	Solusi	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
		mendeteksi kematangan. - Efisien dan dapat digunakan untuk banyak sampel dalam waktu singkat.	sesuai. - Bergantung pada dataset suara yang baik untuk pelatihan model, bisa mahal untuk memperoleh data awal.	

1.1.2 Analisis Masalah

Dalam merancang solusi yang efektif, berbagai aspek penting harus dipertimbangkan untuk memastikan alat yang dihasilkan tidak hanya fungsional, tetapi juga efisien dari berbagai sisi. Beberapa aspek yang menjadi fokus utama dalam perancangan ini meliputi aspek ekonomi, lingkungan, sustainabilitas, manufakturabilitas, serta alokasi waktu dan sumber daya yang diperlukan. Berikut adalah analisis mendalam mengenai setiap aspek tersebut:

1. Aspek Ekonomi

Solusi yang diusulkan penulis dirancang agar biaya produksinya tidak melebihi Rp 4.000.000, sehingga tetap terjangkau untuk masyarakat luas tanpa mengurangi kualitas alat.

2. Aspek Lingkungan

Alat yang dirancang mengutamakan prinsip ramah lingkungan dengan meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem sekitar, termasuk menjaga agar tidak mengganggu tanaman dan makhluk hidup lain di sekitarnya.

3. Aspek Sustainabilitas

Bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan alat mudah diakses, tersedia secara luas di toko elektronik maupun *online shop*. Selain itu, alat

ini juga dirancang untuk memiliki masa pakai yang lama sehingga mendukung keberlanjutan.

4. Aspek Manufakturabilitas

Desain alat ini dirancang agar dapat berfungsi dengan optimal tanpa memerlukan penggunaan PCB (*Printed Circuit Board*), sehingga proses manufaktur menjadi lebih sederhana dan lebih hemat biaya.

5. Aspek Waktu & Sumber daya

Rancangan alat ini direncanakan dapat diselesaikan dalam waktu 6 bulan, dengan alokasi jam kerja yang fleksibel setiap minggunya sesuai dengan kebutuhan proyek, sehingga waktu pengerjaan dapat dimaksimalkan dengan baik tanpa terburu-buru.

1.1.3 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

Untuk memastikan alat yang dirancang dapat berfungsi sesuai dengan tujuan, ada beberapa kebutuhan penting yang harus dipenuhi. Kebutuhan ini akan menjadi dasar dalam menentukan spesifikasi teknis serta fitur-fitur yang harus ada pada alat. Berikut adalah kebutuhan utama yang harus dipenuhi dalam perancangan alat ini:

1. Alat yang dibangun harus mampu mendeteksi tingkat kematangan buah kakao secara akurat, sehingga dapat membantu pengguna dalam menentukan waktu panen yang tepat.
2. Alat tersebut harus dirancang agar dapat digunakan secara terus menerus tanpa gangguan, dengan daya tahan dan performa yang stabil dalam jangka waktu panjang.
3. Alat harus bekerja dengan konsumsi daya rendah, sehingga mampu beroperasi secara berkelanjutan tanpa perlu pengisian daya yang sering, mendukung efisiensi energi dan kemudahan penggunaan.

1.1.4 Tujuan

1. Membuat sistem yang dapat mendeteksi tingkat kematangan buah kakao secara akurat
2. Membuat sistem yang dapat digunakan secara terus menerus sehingga mendukung operasional dan produktivitas pemanenan

3. Membuat sistem yang dapat bekerja pada daya rendah untuk memungkinkan penggunaan berkelanjutan

1.2. Solusi

1.2.1 Karakteristik Produk

Fitur Dasar

1. *Sensing capability* : Sistem memiliki komponen yang dapat mendeteksi perubahan fisik pada buah untuk menentukan tingkat kematangan
2. *Realtime* : Sistem ini bekerja secara langsung dan dapat memberikan dampak secara terus menerus
3. Pengukuran Non - Destruktif : Sistem ini memungkinkan pendeteksian tanpa merusak buah sehingga tidak mempengaruhi produk akhir
4. Akurat : Sistem dapat memberikan hasil pengukuran yang akurat
5. *Output Capability* : Sistem memiliki output yang akan diberikan kepada petani berupa informasi

Fitur Tambahan

1. Penggunaan alat mudah
2. Alat dapat bekerja dalam daya rendah
3. Biaya tidak mahal dan juga tidak menurunkan kualitas alat
4. Ramah Lingkungan
5. Alat memiliki pengamanan yang cukup kuat
6. Alat berbentuk portabel yang mudah digenggam

1.2.2 Usulan Solusi

1.2.2.1 Solusi 1: Sistem deteksi tingkat kematangan buah kakao berdasarkan gas dan senyawa kimia volatil

Pada solusi pertama, menggunakan sensor kimia untuk mendeteksi gas atau senyawa volatil selama proses pematangan buah, mikrokontroller untuk memproses data, dan telegram untuk menampilkan notifikasi hasil pengukuran. Alat ini dirancang untuk memberikan bantuan kepada petani pada saat proses pemanenan buah. Berikut adalah skenario dari alat yang akan dirancang:

1. Pemasangan alat: sensor kimia yang telah dikalibrasi dihubungkan dengan mikrokontroler dan diletakkan di dekat buah.
2. Aktivasi alat: petani mengaktifkan alat untuk memulai proses deteksi
3. Penggunaan alat: sensor kimia akan mendeteksi gas atau senyawa volatil yang dihasilkan buah kakao saat proses pematangan kemudian dikirimkan ke mikrokontroler.
4. Pemrosesan data: mikrokontroler akan memproses data yang dikirim dan menganalisis data sesuai dengan ambang batas gas atau senyawa volatil yang ditetapkan. Data disiapkan untuk dikirim.
5. Pengiriman notifikasi: notifikasi akan dikirimkan melalui koneksi internet kepada akun telegram petani. notifikasi yang dikirimkan berupa teks tingkat persentase gas atau senyawa volatil pada buah dan indikator hasil pengukuran “matang” atau “belum matang”
6. Respon petani: dengan membaca notifikasi yang terkirim, petani dapat menentukan langkah selanjutnya apakah buah akan dipetik atau tidak

1.2.2.2 Solusi 2: Sistem deteksi tingkat kematangan buah kakao berdasarkan sinar ultraviolet

Pada solusi kedua, digunakan sensor spektral untuk mendeteksi tingkat kematangan buah kakao. Alat ini dilengkapi dengan mikrokontroler dan layar kecil untuk menampilkan indikator hasil pengukuran. Alat ini dirancang portabel sehingga mudah digunakan di berbagai lokasi. Berikut adalah skenario penggunaan alat ini:

1. Pemasangan alat: sensor spektral yang telah dikalibrasi dihubungkan dengan mikrokontroler dan dipasang di bagian depan alat portabel. Alat ini juga dilengkapi dengan casing ringan untuk memudahkan pengguna.

2. Aktivasi alat: petani mengaktifkan alat dengan menekan tombol switch yang terpasang pada perangkat portabel.
3. Penggunaan alat: sinar UV akan dipancarkan ke buah kakao, lalu sensor spektral akan mendeteksi fluoresensi dari permukaan buah. Data yang diperoleh dikirimkan ke mikrokontroler untuk dianalisis.
4. Pemrosesan data: mikrokontroler akan memproses data fluoresensi dan menganalisisnya berdasarkan algoritma yang membandingkan hasil dengan data referensi yang berisi karakteristik pantulan fluoresensi dari buah kakao matang dan belum matang.
5. Tampilan hasil: setelah pemrosesan selesai, hasil analisis ditampilkan di layar kecil pada alat. Informasi yang ditampilkan mencakup:
 - Persentase senyawa dalam buah.
 - Indikator hasil analisis, seperti “matang”, “belum matang” atau “terlalu matang”.
6. Respon petani: dengan melihat hasil yang ditampilkan, petani dapat menentukan langkah selanjutnya, seperti memetik buah yang sudah matang atau menunggu beberapa hari untuk buah yang belum matang.

1.2.2.3 Solusi 3: Sistem deteksi tingkat kematangan buah kakao berdasarkan pengolahan citra

Pada solusi ketiga, digunakan Camera Module 8MP yang terhubung dengan *single board computer* (SBC) sebagai pendeteksi visual untuk menangkap citra buah kakao dan menganalisis tingkat kematangan berdasarkan warna buah. Alat ini dirancang portabel, dengan smartphone sebagai media pengontrol dan tampilan. Berikut adalah skenario penggunaan alat ini:

1. Pemasangan alat: *Camera Module* 8MP dihubungkan dengan SBC melalui konektor kamera. Kamera ditempatkan di posisi yang sesuai untuk menangkap citra buah dengan jelas.

2. Aktivasi alat: petani mengaktifkan alat dengan menekan tombol switch. Tampilan antarmuka pada SBC muncul di *smartphone*, menunjukkan status perangkat dan tombol untuk memulai pengambilan gambar.
3. Pengambilan gambar: petani mengarahkan kamera ke buah kakao yang ingin dianalisis. Setelah posisi kamera disesuaikan, petani menekan tombol untuk mengambil gambar. Camera Module menangkap citra buah dalam format RGB.
4. Pemrosesan data: citra yang diambil dikonversi dari ruang warna RGB ke ruang warna *CIE Lab* yang lebih cocok untuk analisis warna. Rata-rata dan variansi dari nilai warna pada area yang relevan dihitung untuk klasifikasi kematangan buah.
5. Klasifikasi kematangan: hasil analisis warna dibandingkan dengan model klasifikasi yang telah dilatih menggunakan dataset citra buah kakao matang dan belum matang. Berdasarkan ambang batas yang telah ditetapkan, alat menentukan apakah buah tersebut matang atau belum matang.
6. Tampilan hasil: setelah pemrosesan selesai, hasil analisis ditampilkan di *smartphone*. Informasi yang ditampilkan mencakup:
 - Indikator hasil analisis seperti “matang”, “belum matang” atau “terlalu matang”.
 - Gambar buah yang dianalisis dengan *overlay* yang menunjukkan area analisis dan hasil klasifikasi.
7. Respon petani: dengan melihat hasil yang ditampilkan di *smartphone*, petani dapat segera menentukan langkah selanjutnya, seperti memetik buah yang sudah matang atau menunggu waktu yang lebih tepat.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Tabel 1. 2 Tabel HoQ

			Customer importance rating (1 = low, 5 = high)	Percent of customer importance rating	Fitur Dasar				
					Sensing capability	Realtime	Pengukuran Non-Destruktif	Akurat	Output Capability
Fitur Tambahan	Biaya <= Rp 4.000.000		5	27,77%					
	Ramah Lingkungan		2	11,11%					
	Dapat diselesaikan dalam <= 6 bulan		5	27,77%					
	Alat memiliki pengamanan yang cukup kuat		2	11,11%					
	Penggunaan alat mudah		2	11,11%					
	Alat berbentuk portabel		2	11,11%					
			Importance rating		42	36	56	32	58
			Percent of importance(100%)		18,75%	16,1%	25.0%	14,3%	25,9%
Solusi	Solusi 1 (Sistem Pendeteksi dengan sensor kimia)							3, 5015	
	Solusi 2 (Sistem Pendeteksi dengan sensor UV)							4, 6805	
	Solusi 3 (Sistem Pendeteksi dengan image processing)							3, 5015	

Keterangan :



= Hubungan Kurang = 1



= Hubungan Normal = 3



= Hubungan Erat = 5

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan dengan menggunakan *House Of Quality* didapatkan point akhir dari setiap solusi sebagai berikut :

Solusi 1 :

$$(3 \times 18,75\%) + (3 \times 16,1\%) + (5 \times 25\%) + (3 \times 14,3\%) + (3 \times 25,9\%) = 3,5015$$

Solusi 2 :

$$(5 \times 18,75\%) + (3 \times 16,1\%) + (5 \times 25\%) + (5 \times 14,3\%) + (5 \times 25,9\%) = 4,6805$$

Solusi 3 :

$$(3 \times 18,75\%) + (3 \times 16,1\%) + (5 \times 25\%) + (1 \times 14,3\%) + (3 \times 25,9\%) = 3,2155$$

1.2.4 Solusi yang dipilih

Berdasarkan perhitungan pada *house of quality* dengan melihat berbagai aspek untuk mendapatkan solusi yang tepat dan sesuai dengan permasalahan yang dikaji yaitu “Mendeteksi tingkat kematangan buah kakao untuk mengoptimalkan pemetikan buah kakao dan memastikan kualitas panen”, didapatkan solusi dengan poin yang lebih tinggi 1 poin dari dua solusi lainnya yaitu solusi 2 dengan poin 4,6805. Alat ini dirancang untuk mendeteksi tingkat kematangan buah kakao dengan memanfaatkan sinar cahaya UV yang dipancarkan ke permukaan buah dan memicu fluoresensi, yang kemudian dianalisis oleh mikrokontroler. Hasil analisis akan ditampilkan di layar kecil pada alat, memberikan informasi kepada petani mengenai kematangan buah, termasuk indikator seperti “matang” atau “belum matang.” Selain itu, alat ini dapat menampilkan persentase senyawa dalam buah untuk memberikan gambaran lebih rinci tentang kondisi buah kakao. Alasan pemilihan solusi ini adalah karena sensor spektral mampu mendeteksi perubahan senyawa di permukaan buah dengan akurasi tinggi, memungkinkan petani mengetahui waktu yang tepat untuk memetik buah. Alat ini dirancang portabel, sehingga

mudah digunakan di lapangan tanpa instalasi yang rumit. Dengan dukungan mikrokontroler, pemrosesan data dapat dilakukan dengan cepat, dan hasil langsung ditampilkan di layar, memberikan kemudahan bagi petani untuk segera mengambil keputusan. Selain itu, alat ini juga hemat energi dan fleksibel untuk dikembangkan lebih lanjut, seperti mendeteksi parameter lain pada buah kakao. Dengan semua keunggulan ini, solusi sistem portabel dipilih karena mampu meningkatkan efisiensi pemetikan buah kakao serta memastikan kualitas panen yang lebih baik.

