

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kopi merupakan salah satu komoditas unggulan Indonesia yang memiliki peran penting dalam perekonomian nasional. Indonesia saat ini menempati peringkat keempat sebagai negara produsen kopi terbesar di dunia, setelah Brasil, Vietnam, dan Kolombia. Namun, produksi kopi nasional mengalami penurunan dalam beberapa tahun terakhir. Berdasarkan data dari Direktorat Jenderal Perkebunan (2024), produksi kopi di Provinsi Sulawesi Selatan — salah satu daerah sentra penghasil kopi — tercatat sebesar 30.727 ton pada tahun 2023, menurun cukup signifikan dari 34.242 ton pada tahun 2021.

Salah satu faktor utama yang berkontribusi terhadap penurunan ini adalah masih dominannya sistem perkebunan rakyat yang menghadapi berbagai keterbatasan, terutama dalam penerapan teknologi budidaya. Banyak petani belum melakukan peremajaan tanaman secara teratur, sehingga tanaman yang sudah melewati masa produktif tetap dipertahankan. Tanaman yang menua umumnya mengalami penurunan fungsi fisiologis seperti fotosintesis, penyerapan unsur hara, dan efisiensi metabolisme internal (Aminuddin *et al.*, 2024). Selain itu, keterbatasan dalam praktik pemupukan dan pengendalian hama penyakit turut memperparah kondisi tanaman, sehingga berdampak langsung pada menurunnya kuantitas dan kualitas hasil panen.

Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk mengatasi masalah ini adalah meningkatkan sistem monitoring kondisi tanaman, khususnya dalam hal usia dan kesehatan fisiologisnya. **Umur tanaman** berkaitan erat dengan keputusan budidaya, seperti kapan dilakukan peremajaan atau jenis pemupukan yang tepat. Di sisi lain, **kandungan klorofil** pada daun mencerminkan tingkat aktivitas fotosintesis dan status kesehatan tanaman, termasuk indikasi adanya kekurangan nutrisi atau stres akibat penyakit. Sayangnya, sebagian besar petani kopi rakyat tidak memiliki akses ke fasilitas laboratorium atau alat ukur canggih untuk mengidentifikasi parameter-parameter tersebut. Oleh karena itu, diperlukan metode yang sederhana, murah, dan efisien agar petani dapat melakukan monitoring kondisi tanaman secara mandiri di lahan mereka.

Pendekatan digital farming kemudian menjadi relevan, khususnya melalui pemanfaatan teknologi **pengolahan citra digital (*image processing*)**. Hanya dengan mengambil gambar daun tanaman menggunakan kamera digital atau smartphone, dimungkinkan untuk memperkirakan umur tanaman serta kadar klorofil secara cepat dan non-destruktif. Pemanfaatan teknologi pengolahan citra digital ini telah dikaji dalam berbagai penelitian sebelumnya, seperti Palgunadi & Pratiwi (2015) yang memprediksi kandungan klorofil tanaman teh melalui analisis warna daun, atau Septiarini *et al.* (2022) yang mengklasifikasikan kematangan tomat berbasis citra visual.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini memanfaatkan teknik pengolahan citra digital untuk memprediksi umur dan kandungan klorofil tanaman kopi Arabika.

Hasil prediksi ini diharapkan dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan budidaya, seperti menentukan waktu peremajaan tanaman, mengevaluasi kecukupan nutrisi, serta mendeteksi gangguan fisiologis secara dini.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya bertujuan mengembangkan metode praktis untuk monitoring tanaman kopi berbasis citra digital, tetapi juga membuka peluang untuk pengembangan penelitian lanjutan dengan cakupan yang lebih luas dan parameter pengamatan yang lebih beragam. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi solusi yang aplikatif dalam membantu petani meningkatkan produktivitas tanaman kopi, sekaligus menjawab persoalan penurunan hasil panen akibat praktik budidaya yang kurang optimal.

1.2. Landasan Teori

1.2.1 Klorofil dan Umur Tanaman

Klorofil merupakan pigmen hijau yang berperan penting dalam proses fotosintesis, memungkinkan tanaman menyerap energi cahaya untuk sintesis karbohidrat. Kandungan klorofil dalam daun dapat mencerminkan status fisiologis dan umur tanaman (Bauerle *et al.*, 2020).

Penelitian oleh He *et al.* (2022) menunjukkan bahwa pada tanaman *Haloxylon ammodendron*, kandungan klorofil total (Chl a+b) menunjukkan pola berbentuk "V" seiring bertambahnya umur tanaman. Kandungan klorofil tertinggi ditemukan pada tanaman muda (5 tahun), menurun pada usia menengah (22 tahun), dan meningkat kembali pada usia tua (34–46 tahun). Hal ini menunjukkan bahwa kandungan klorofil dapat digunakan sebagai indikator umur tanaman, terutama pada fase pertumbuhan aktif.

1.2.2 Pengolahan Citra Digital

Citra digital adalah data visual dua dimensi yang disimpan dalam bentuk digital, dan biasanya direpresentasikan dalam sistem koordinat baris dan kolom, serta memiliki resolusi yang ditentukan oleh jumlah pikselnya yang dapat merepresentasikan warna atau tingkat keabuan. Citra ini dapat diolah, dianalisis, dan dimanipulasi menggunakan perangkat lunak komputer untuk berbagai tujuan, seperti ekstraksi ciri atau klasifikasi objek (Yuniarti & Kusuma, 2021).

Pengolahan citra digital merupakan suatu teknik yang digunakan untuk menganalisis, memodifikasi, dan mengekstraksi informasi dari gambar digital melalui bantuan algoritma komputer. Proses ini melibatkan beberapa tahapan, mulai dari akuisisi citra, pra-pemrosesan (seperti pengurangan noise dan peningkatan kontras), segmentasi, ekstraksi ciri, hingga klasifikasi atau interpretasi data visual yang diperoleh dari citra tersebut (Gonzalez & Woods, 2020).

Dalam bidang pertanian, pengolahan citra digital telah menjadi metode non-destruktif yang efisien untuk menganalisis kondisi tanaman, salah satunya adalah dalam menentukan kadar klorofil atau bahkan memprediksi umur tanaman melalui warna daun dan fitur tekstur lainnya (Mikołajczyk *et al.*, 2021). Citra daun tanaman dapat digunakan untuk memperkirakan kandungan klorofil dengan mengandalkan nilai intensitas warna RGB atau model warna lain seperti HSV, yang kemudian diproses lebih lanjut dengan metode regresi atau klasifikasi (Huang *et al.*, 2021).

Kombinasi pengolahan citra digital dengan kecerdasan juga telah diterapkan secara luas untuk mengidentifikasi parameter fisiologis tanaman secara akurat, cepat, dan berbiaya rendah (Zhang *et al*, 2022). Pendekatan ini mendukung sistem monitoring pertanian presisi dalam skala besar.

1.2.3 Penggunaan Regresi dalam Prediksi

Regresi merupakan metode statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara variabel independen dan dependen. Dalam konteks ini, regresi digunakan untuk memprediksi kandungan klorofil berdasarkan umur tanaman atau sebaliknya. Salah satu bentuk regresi yang sering digunakan dalam fenomena biologis adalah regresi logaritmik, yang mampu menangkap hubungan yang tidak linier antara dua variabel.

Regresi logaritmik memiliki bentuk umum:

$$y = a \ln(x) + b \quad (1)$$

Dengan y sebagai variabel dependen (klorofil), x sebagai variabel independen (umur), dan a serta b adalah koefisien regresi. Model ini cocok untuk menggambarkan pertumbuhan yang cepat pada awal dan melambat seiring waktu, sebagaimana sering terjadi pada tanaman.

1.2.4 Nearest Mean Classifier (NMC)

Nearest Mean Classifier (NMC) adalah metode klasifikasi yang mengklasifikasikan data uji berdasarkan kedekatannya dengan rata-rata (mean) dari masing-masing kelas pada data latih. Kelas dengan rata-rata yang paling dekat dengan data uji akan dipilih sebagai hasil klasifikasi (Rahman *et al.*, 2022).

Metode ini efektif digunakan pada data yang terdistribusi secara normal atau memiliki sebaran nilai yang relatif homogen dalam tiap kelas. Dalam penelitian ini, NMC digunakan untuk memprediksi umur tanaman berdasarkan nilai klorofil, dengan cara membandingkan nilai klorofil uji terhadap rata-rata klorofil setiap kelompok umur. Kelebihan utama dari NMC adalah kesederhanaannya serta kecepatan komputasi yang tinggi.

1.3. Tujuan dan Manfaat

Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi umur dan kandungan klorofil tanaman kopi Arabika menggunakan metode pengolahan citra digital. Serta mengeksplorasi keterkaitan antara kedua variabel tersebut sebagai dasar pengambilan keputusan budidaya.

Kegunaan penelitian ini yaitu diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pertanian digital dan menyediakan metode praktis bagi petani untuk memantau kondisi tanaman secara efisien tanpa bantuan laboratorium. Sebagai studi awal, penelitian ini masih dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan parameter pengamatan lain yang lebih kompleks dan aplikatif di lapangan.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1. Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan di perkebunan kopi rakyat yang terletak di Desa Topidi, Kelurahan Bontolerung, Kecamatan Tinggimoncong, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan. Lokasi ini berada pada ketinggian sekitar 1.200 meter di atas permukaan laut (mdpl), yang merupakan salah satu wilayah dataran tinggi dengan kondisi lingkungan yang sesuai untuk budidaya kopi Arabika. Secara geografis, desa ini terletak pada koordinat 5°17' Lintang Selatan (LS) dan 119°52' Bujur Timur (BT).

Seluruh tahapan pengolahan gambar hingga analisis data dilakukan secara digital menggunakan software pengolah citra. Penelitian dilaksanakan pada bulan Mei hingga Juli 2023, yang bertepatan dengan awal musim kemarau. Periode ini dipilih karena berpengaruh terhadap kondisi fisiologis tanaman, termasuk dalam proses produksi klorofil.

2.2 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan berupa hasil dokumentasi yang merupakan citra daun yang terdiri dari beberapa klasifikasi umur.

Alat yang digunakan yaitu Kamera DSLR sebagai perangkat pengambilan data citra di lapangan, Klorofilmeter SPAD 502 Plus untuk mengecek kandungan klorofil daun, dan Adobe Photoshop serta Matlab sebagai software pengolah citra yang mendukung dalam proses pengolahan gambar.

2.3 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode pengamatan dan analisis citra digital. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian berfokus pada pengolahan data numerik yang diperoleh dari citra digital daun tanaman kopi Arabika untuk memodelkan hubungan antara umur tanaman dan kandungan klorofilnya.

Metode pengamatan dilakukan dengan pengambilan sampel berupa gambar daun kopi dari beberapa kelompok umur tanaman yang berbeda. Selanjutnya, gambar tersebut diproses secara digital menggunakan perangkat lunak pengolah citra untuk memperoleh data numerik yang dapat dianalisis. Data numerik hasil pengolahan citra kemudian digunakan dalam pemodelan regresi logaritmik untuk memprediksi kandungan klorofil. Selain itu, teknik klasifikasi Nearest Mean Classifier diterapkan untuk memperkirakan umur tanaman berdasarkan data citra yang diperoleh.

2.4 Pelaksanaan Penelitian

2.4.1 Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dalam penelitian ini bertujuan untuk memperoleh data citra daun tanaman kopi Arabika (*Coffea arabica* L.) dari berbagai kelompok umur, guna dianalisis kandungan klorofil dan diprediksi umurnya melalui pengolahan citra digital. Meskipun daun bersifat temporer dan mengalami siklus gugur-tumbuh, pemilihan daun sebagai objek pengamatan didasarkan pada fungsinya sebagai organ utama dalam proses fotosintesis, yang sangat erat kaitannya dengan

kandungan klorofil. Pada fase dewasa, daun mencerminkan kondisi fisiologis tanaman secara umum, termasuk tingkat kematangan dan produktivitas metaboliknya. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kandungan klorofil pada daun memiliki korelasi yang signifikan terhadap umur dan kondisi fisiologis tanaman secara keseluruhan. Sebagai contoh, penelitian oleh Djangaopa *et al.* (2020) menemukan bahwa konsentrasi klorofil pada daun puring (*Codiaeum variegatum* L.) bervariasi tergantung pada umur tanaman, tanaman yang lebih tua memiliki konsentrasi klorofil yang lebih tinggi dibandingkan daun yang lebih muda.

Sampel yang digunakan berupa **daun dewasa**, sesuai dengan kriteria dari Alberto *et al.* (2024), yang menyatakan bahwa daun dewasa adalah daun yang telah berkembang sempurna dan umumnya terletak pada metamer ketiga atau keempat dari ujung cabang plagiotropik orde kedua. Daun ini dipilih dari bagian tengah tanaman dan menghadap ke ruang antar barisan, untuk memastikan pencahayaan yang memadai serta konsistensi fisiologis. Daun dewasa dianggap paling stabil dalam kandungan klorofil, sehingga cocok sebagai objek pengukuran.

Pengambilan sampel dikelompokkan berdasarkan **empat klasifikasi umur tanaman**, yaitu: 5 tahun, 10 tahun, 15 tahun, dan 20 tahun. Untuk setiap kelompok umur, dilakukan dua jenis pengambilan sampel:

1. **Sampel Ciri (Training Set)**

Kelompok umur untuk sampel ciri diwakili dengan kode A1 hingga A4 secara berturut-turut seperti yang dapat dilihat pada lampiran gambar 6a hingga gambar 21d. Sampel diambil dari 4 pohon berbeda per kelompok umur (diberi kode U1 hingga U4) dan dari masing-masing pohon diambil 4 helai daun dewasa, sehingga total daun per kelompok umur: $4 \text{ pohon} \times 4 \text{ daun} = 16 \text{ daun}$. Sampel ini digunakan untuk ekstraksi ciri dan pembentukan model klasifikasi.

2. **Sampel Uji (Testing Set)**

Kelompok umur untuk sampel uji diwakili dengan kode V1 hingga V4 secara berturut-turut, diambil dari 2 pohon berbeda (diberi kode V1 dan V2), yang tidak digunakan pada sampel ciri untuk mencegah overfitting. Masing-masing pohon juga diambil 4 daun dewasa sehingga total daun per kelompok umur: $2 \text{ pohon} \times 4 \text{ daun} = 8 \text{ daun}$, seperti yang dapat dilihat pada lampiran gambar 22a hingga gambar 29d. Sampel ini digunakan untuk menguji kinerja model yang telah dibentuk.

Dengan demikian, setiap kelompok umur menghasilkan total 24 daun (16 daun training dan 8 daun uji), sehingga total keseluruhan sampel penelitian ini adalah 96 daun dari berbagai kelompok umur.

Proses pengambilan citra dilakukan menggunakan kamera DSLR dengan pencahayaan yang merata. Sebelum pengambilan gambar, kandungan klorofil pada tiap daun terlebih dahulu diukur menggunakan **alat klorofilmeter SPAD 502 plus** untuk memperoleh data referensi yang valid. Data nilai kandungan klorofil secara lengkap dapat dilihat pada lampiran tabel 1. Pengambilan dilakukan pada waktu pagi hari untuk menjaga kondisi fisiologis daun tetap optimal (menghindari kekurangan air atau dehidrasi). Teknik ini bertujuan agar data citra yang diperoleh stabil dan tidak terpengaruh oleh fluktuasi cahaya atau perubahan kandungan air daun.

2.4.2 Pengumpulan Data

Tahapan awal dalam pengolahan citra melibatkan proses pembersihan (data cleaning) untuk memastikan keseragaman dan ketepatan area yang dianalisis. Mengacu pada metode yang digunakan oleh Palgunadi & Pratiwi (2015), setiap citra daun dipotong menggunakan frame berukuran 2 x 3 cm untuk memastikan bahwa bagian tengah daun yang representatif menjadi fokus utama. Setelah itu, citra yang telah dibersihkan diubah ukurannya (*resize*) agar seluruh gambar memiliki dimensi piksel yang seragam, seperti yang dapat dilihat pada lampiran gambar 30 hingga gambar 39. Penyeragaman ini penting untuk menjaga konsistensi dalam proses ekstraksi data numerik selanjutnya.

2.4.3 Pembuatan Matriks Warna Hijau dan Vektor Ciri

Citra daun yang telah seragam kemudian dikonversi menjadi data numerik dalam bentuk matriks saluran hijau (green matrix) menggunakan perangkat lunak MATLAB seperti yang terlihat pada lampiran gambar 54. Konversi ini bertujuan untuk mengekstraksi nilai intensitas warna hijau dari setiap piksel, karena warna hijau merupakan indikator utama kandungan klorofil dalam daun. Data numerik ini kemudian disimpan dalam format spreadsheet (.xls) agar dapat digunakan dalam proses analisis lanjutan.

Selanjutnya, hasil ekstraksi ciri seperti yang disajikan dalam lampiran tabel 2 dibuat vektor ciri untuk masing-masing kelompok umur tanaman dengan menghitung nilai rata-rata intensitas piksel dari setiap kolom dalam matriks. Rata-rata ini mencerminkan karakteristik visual daun untuk setiap kategori umur dan berfungsi sebagai dasar klasifikasi.

2.4.4 Pemodelan Persamaan Klorofil dengan Umur

Pemodelan hubungan antara umur tanaman dan kandungan klorofil dilakukan dengan pendekatan regresi logaritmik. Menurut Susanti *et al.* (2019), analisis regresi merupakan salah satu metode statistik yang digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variabel bebas (x) terhadap variabel respon (y). Dalam penelitian ini, variabel bebas adalah umur tanaman kopi, sedangkan variabel respon adalah kandungan klorofil yang diukur menggunakan alat SPAD. Persamaan yang dihasilkan dari analisis regresi ini digunakan sebagai dasar untuk memprediksi kandungan klorofil berdasarkan umur tanaman.

2.4.5 Tahap Pengujian (Testing)

Tahap pengujian dimulai dengan menghitung elemen vektor dari citra daun uji menggunakan prosedur yang sama seperti pada data training. Selanjutnya, digunakan metode *Nearest Mean Classifier* untuk membandingkan vektor ciri daun uji dengan vektor ciri dari masing-masing kelompok umur. Hasil pengklasifikasian dapat dilihat pada lampiran tabel 3. Prediksi umur ditentukan berdasarkan nilai selisih terkecil antara vektor citra uji dan vektor ciri kelompok umur. Umur yang diprediksi ini kemudian dimasukkan ke dalam persamaan regresi sebelumnya untuk memperkirakan kandungan klorofil daun.