

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tanaman cabai (*Capsicum Annuum L.*) yang terdiri atas cabai merah dan cabai rawit termasuk ke dalam sembilan bahan pokok dengan tingkat konsumsi tinggi di masyarakat Indonesia [1]. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2024, konsumsi cabai merah mencapai 1,768 ons dan cabai rawit mencapai 2,132 ons per-individu per-tahun [2]. Dengan jumlah penduduk sekitar 283 juta jiwa, maka total konsumsi cabai nasional diperkirakan sekitar 50.034 ton untuk cabai merah dan 60.336 ton untuk cabai rawit [3]. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, produksi cabai nasional tercatat sebesar 384.004 ton untuk cabai merah dan 1.568.756 ton untuk cabai rawit [4]. Angka tersebut menunjukkan bahwa secara nasional produksi cabai telah memadai untuk memenuhi kebutuhan domestik, namun fluktuasi harga cabai masih terjadi secara signifikan di sepanjang tahun [5].

Kondisi tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya adalah serangan organisme pengganggu tanaman (OPT) yang mengakibatkan tanaman cabai rentan terhadap penyakit, menurunkan produktivitas, bahkan menyebabkan risiko gagal panen [6]. Ketika produksi menurun akibat serangan OPT sementara tingkat konsumsi masyarakat tetap tinggi, maka terjadi ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan yang berdampak pada menurunnya ketersediaan cabai di pasaran dan memicu kenaikan harga. Serangan OPT yang mengakibatkan penyakit pada tanaman cabai dapat diidentifikasi secara visual melalui daunnya. Namun, kemiripan gejala antar kategori penyakit sering kali menyulitkan petani dalam melakukan diagnosis secara cepat dan tepat. Permasalahan serupa juga terjadi di Kabupaten Blora yang berperan aktif dalam budidaya tanaman cabai melalui program *Gerakan Tanam Cabai* [7].

Kabupaten Blora memiliki potensi pengembangan budidaya tanaman cabai dengan dukungan pemerintah daerah dalam meningkatkan produksinya sebagai langkah strategis untuk menjaga stabilitas pasokan dan harga cabai di daerah.

Dalam praktik budidaya di lapangan, masih ditemukan permasalahan baik dari sisi petani maupun penyuluh pertanian. Dari sisi petani, keterbatasan pengetahuan dalam mengidentifikasi kategori penyakit tanaman cabai sering mengakibatkan ketidaktepatan dalam pengambilan keputusan. Proses identifikasi penyakit tanaman yang dilakukan secara manual cenderung memakan waktu dan rentan terhadap kesalahan. Akibatnya, petani cenderung mengandalkan informasi dari sesama petani dan melakukan penyemprotan pestisida tanpa proses diagnosis yang tepat. Selain itu, penerapan solusi organik cenderung jarang diterapkan karena minimnya panduan praktis, sehingga dianggap kurang efektif dalam praktik budidaya. Kondisi tersebut mengakibatkan penggunaan pestisida kimia secara berlebihan yang berdampak pada penurunan kualitas tanah [8].

Di sisi lain, pemerintah melalui penyuluh pertanian mendorong adanya penerapan solusi organik yang lebih ramah lingkungan. Namun, upaya penerapan solusi organik di tingkat petani masih menghadapi berbagai kendala. Keterbatasan frekuensi penyuluhan yang hanya dilakukan satu kali setiap 36 hari untuk satu kelompok tani yang terdiri atas sembilan orang membatasi efektivitas penyampaian informasi. Kondisi tersebut menyulitkan penyuluh pertanian dalam memberikan pendampingan berkelanjutan, terutama dalam proses identifikasi penyakit tanaman dan penerapan solusi organik yang tepat. Akibatnya, pemahaman petani terhadap konsep dan praktik penerapan solusi organik masih rendah, serta penerapannya dianggap kurang praktis, terutama pada situasi darurat serangan OPT. Selain itu, belum tersedianya sarana yang menjembatani informasi solusi organik untuk setiap kategori penyakit tanaman cabai menyebabkan proses penerapan di lapangan belum berjalan secara optimal.

Solusi organik merupakan pendekatan yang memanfaatkan mekanisme alami untuk mengatasi dan mengendalikan serangan OPT tanpa menggunakan bahan kimia dengan tujuan untuk menjaga keseimbangan ekosistem pertanian, sehingga tercipta pertanian berkelanjutan [9]. Penerapan solusi organik dapat dilakukan melalui beberapa strategi pengendalian. Meliputi, pengendalian hayati dengan memanfaatkan musuh alami OPT, pengendalian mekanis dengan membatasi pergerakan OPT, praktik budidaya dengan rotasi tanaman dan sanitasi

lahan, serta penggunaan pestisida nabati dan pupuk organik untuk meningkatkan ketahanan tanaman [10]. Penerapan solusi organik tidak hanya relevan bagi praktik pertanian berkelanjutan, tetapi juga berpotensi untuk diintegrasikan ke dalam solusi berbasis teknologi. Sehingga, dapat mempermudah proses implementasi di tingkat petani melalui adanya informasi yang lebih sistematis terhadap kondisi lapangan.

Berdasarkan penjabaran tersebut, dapat diketahui bahwa diperlukan inovasi berbasis teknologi yang dapat membantu petani dalam melakukan identifikasi penyakit tanaman cabai secara cepat dan tepat, serta mendukung penyuluh pertanian dalam memberikan rekomendasi penanganan yang sesuai dengan prinsip pertanian berkelanjutan. Proses identifikasi penyakit tanaman dapat dilakukan melalui pendekatan klasifikasi. Klasifikasi merupakan salah satu contoh penerapan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) yang bertujuan untuk mengelompokkan objek data ke dalam kategori tertentu berdasarkan karakteristik atau fitur yang dimilikinya [11]. Pendekatan tersebut dapat diterapkan pada berbagai jenis data, baik terstruktur seperti numerik dan teks, maupun tidak terstruktur seperti citra dan suara [12].

Dalam penelitian ini, klasifikasi diterapkan pada data citra daun tanaman cabai untuk mengidentifikasi kategori penyakit berdasarkan karakteristik visual yang dimilikinya. Untuk mendukung proses tersebut, metode *deep learning* diterapkan karena dapat mempelajari dan mengenali pola kompleks melalui jaringan saraf tiruan bertingkat tanpa memerlukan proses ekstraksi fitur secara manual [13]. Salah satu metode yang banyak diterapkan dalam klasifikasi citra adalah *Convolutional Neural Network* (CNN). CNN merupakan metode *deep learning* berbasis jenis jaringan saraf tiruan yang dirancang khusus untuk mengolah data berbentuk grid, seperti data citra dua dimensi. Metode tersebut pertama kali diperkenalkan pada tahun 1980 dan dikembangkan secara signifikan pada awal tahun 1990-an. Melalui operasi konvolusi, CNN dapat mengenali berbagai fitur visual detail dari data citra secara bertahap dan efisien [14].

Salah satu penerapan metode tersebut dilakukan oleh penelitian Pratap dan Umar, mengklasifikasikan penyakit tanaman cabai ke dalam lima kategori menggunakan dataset berjumlah 2.000 gambar dengan berbagai arsitektur CNN,

yaitu *ResNet-50*, *DenseNet121*, *MobileNetV2*, dan *EfficientNetB4*. Hasil penelitian menunjukkan akurasi terbaik diperoleh dari *EfficientNetB4* yang telah di *fine tuning* sebesar 91,2% [15]. Meskipun CNN terbukti efektif dalam mengenali pola visual, metode tersebut memiliki keterbatasan dalam menangkap hubungan global antar piksel, karena sifat operasinya yang berfokus pada area detail lokal citra [16]. Akibatnya, CNN cenderung kehilangan konteks global, ketika terdapat citra dengan pola kompleks yang memiliki kemiripan visual antar kategori, seperti pada citra daun tanaman dengan kategori penyakit berbeda namun tampak serupa.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, terdapat metode *Vision Transformer* (ViT). ViT merupakan metode *deep learning* berbasis arsitektur *transformer* yang awalnya dikembangkan untuk pemrosesan bahasa (NLP) [17]. Metode tersebut pertama kali diperkenalkan pada tahun 2020. Berbeda dengan CNN yang beroperasi secara lokal, ViT menggunakan mekanisme *self-attention* untuk mempelajari hubungan global antar bagian citra. Dalam prosesnya, citra dibagi menjadi potongan (*patch*) berukuran tetap yang kemudian diubah menjadi vektor [18]. Dengan cara tersebut ViT dapat memahami fitur visual secara menyeluruh, yang sebelumnya menjadi keterbatasan pada CNN. Salah satu penerapan metode ViT yang menunjukkan keunggulannya dibandingkan CNN dilakukan oleh penelitian Silva dan Brown, mengklasifikasikan penyakit tanaman tomat, kentang, dan pepaya menggunakan dataset berjumlah 2.652 gambar dengan beberapa arsitektur CNN dan ViT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arsitektur *ViT-B16* secara signifikan mencapai akurasi tertinggi sebesar 83,3% [19].

Meskipun ViT dapat menangkap konteks global dengan baik, metode tersebut memiliki keterbatasan kurang efisien dalam mengekstraksi detail lokal, membutuhkan jumlah data yang besar, dan waktu komputasi tinggi untuk mencapai performa optimal [20]. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, beberapa penelitian mengusulkan pendekatan hibrida yang menggabungkan keunggulan dari CNN dalam ekstraksi fitur lokal dengan keunggulan dari ViT dalam representasi fitur global. Pendekatan tersebut umumnya dilakukan dengan membandingkan performa metode yang direpresentasikan dalam model tunggal terhadap model yang mengintegrasikan hibrida CNN dan ViT. Integrasi untuk pendekatan hibrida

tersebut dapat diterapkan secara sekuensial atau paralel, tergantung pada desain pemodelan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pendekatan hibrida dapat meningkatkan performa akurasi dibandingkan penggunaan metode tunggal.

Penelitian Sinamenye, dkk., mengklasifikasikan penyakit tanaman kentang ke dalam tujuh kategori menggunakan dataset berjumlah 3.076 gambar dengan pemodelan hibrida *EfficientNetV2B3* dan ViT pendekatan ekstraksi fitur paralel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil akurasi *EfficientNetV2B3* sebesar 79,55%, ViT sebesar 77,92%, dan hibrida *EfficientNetV2B3-ViT* sebesar 85,06% [21]. Penelitian Upadhyay dan Prasad, mengklasifikasikan penyakit tanaman padi ke dalam empat kategori menggunakan dataset berjumlah 16.000 gambar dengan pemodelan hibrida *EfficientNetB0* dan ViT pendekatan ekstraksi fitur sekuensial. Hasil penelitian menunjukkan bahwa akurasi *EfficientNetB0* sebesar 91,30%, ViT sebesar 97,0%, dan hibrida *EfficientNetB0-ViT* sebesar 99,13% [22]. Dan, penelitian Santoso, dkk., mengklasifikasikan penyakit tanaman apel ke dalam empat kategori menggunakan dataset berjumlah 7.200 gambar dengan pemodelan hibrida *EfficientNetV2* dan ViT pendekatan ekstraksi fitur sekuensial. Hasil penelitian menunjukkan hasil akurasi sebesar 98,56% [23].

Selain keterbatasan metode, penelitian terdahulu umumnya masih berfokus pada peningkatan akurasi menggunakan satu sumber data, tanpa mempertimbangkan variasi karakteristik data dari sumber yang berbeda. Dalam praktiknya, data citra daun tanaman cabai dapat berasal dari berbagai sumber dengan perbedaan karakteristik, seperti kondisi pencahayaan, latar belakang, dan sudut pengambilan gambar. Perbedaan tersebut berpotensi menyebabkan perbedaan distribusi data (*domain shift*) antara data pelatihan dengan data yang dihadapi model pada kondisi lapangan [24]. Sehingga, dapat menurunkan performa model ketika diimplementasikan pada kondisi lapangan, meskipun model menunjukkan akurasi yang tinggi pada proses pengujian internal. Hal tersebut telah dibuktikan oleh penelitian Sun, yang menunjukkan bahwa model *deep learning* cenderung mengalami penurunan performa secara signifikan ketika diuji pada data dari sumber yang berbeda dengan data pelatihannya [25].

Kondisi ini terjadi karena perbedaan karakteristik data antar sumber yang tidak dapat diatasi hanya melalui pemilihan cara pemodelan [26]. Untuk mengetahui dan mengevaluasi ketahanan model terhadap perbedaan karakteristik data, terdapat pendekatan pengujian berbasis kombinasi data dari beberapa sumber secara bertahap. Penelitian Krishna, dkk., menunjukkan bahwa model memiliki performa lebih tinggi ketika dilatih dan diuji pada dataset yang sama dibandingkan dengan pengujian lintas dataset. Penurunan performa paling signifikan terjadi ketika data pelatihan dan pengujian berasal dari sumber data yang berbeda. Namun, penggunaan data pelatihan yang lebih beragam terbukti meningkatkan kemampuan generalisasi model terhadap variasi kondisi [27]. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya berfokus pada peningkatan performa akurasi klasifikasi, tetapi juga mengevaluasi kemampuan generalisasi model. Selain itu, ketahanan model terhadap variasi data dianalisis melalui beberapa skenario pengujian yang menggunakan kombinasi antara data sekunder dengan data primer.

Berdasarkan permasalahan yang ditemukan di lapangan dan potensi metode yang telah dikaji, penelitian ini mengusulkan penerapan metode hibrida antara *EfficientNetB4* dan ViT. Bertujuan untuk mengklasifikasikan dan diharapkan dapat meningkatkan performa akurasi klasifikasi penyakit tanaman cabai menggunakan citra daun dengan memanfaatkan keunggulan dari masing-masing metode untuk menangkap fitur lokal dan global secara sekuensial. Alur prosesnya dimulai dengan *EfficientNetB4* untuk mengekstraksi fitur lokal data citra melalui blok MBConv dan mekanisme *compound scaling*, yang memungkinkan penyesuaian kedalaman, lebar, dan resolusi jaringan secara proposional untuk menangkap fitur detail. Hasil *feature map* dari *EfficientNetB4* akan diproyeksikan menggunakan *convolution* untuk menyeragamkan dimensi sebelum diubah menjadi representasi token melalui proses *reshaping*. Selanjutnya, representasi token tersebut diproses oleh blok *transformer encoder* yang terdiri atas *layer normalization*, *multi-head self-attention*, *multi-layer perceptron* atau *feed-forward network*, dan *residual connection* untuk menangkap hubungan antar bagian citra.

Output transformer encoder diringkas menggunakan *global average pooling* untuk menghasilkan representasi fitur global. Selanjutnya, fitur tersebut

diproses oleh *classifier* untuk menghasilkan klasifikasi kategori penyakit tanaman cabai. Melalui penerapan alur sekuensial tersebut, pendekatan hibrida dapat meningkatkan performa akurasi klasifikasi pada kategori penyakit tanaman cabai yang memiliki kemiripan visual. Data yang dipergunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder dan data primer berupa citra daun tanaman cabai dengan pengumpulan data berfokus pada pola dan warna daun sebagai indikator utama dalam mengklasifikasikan kategori penyakit. Setiap data citra merepresentasikan karakteristik visual dari berbagai gejala kategori penyakit diklasifikasikan ke dalam tiga kategori penyakit, yaitu *yellowish*, *curl leaf*, dan *spot leaf* serta satu kategori sehat, yaitu *healthy*.

Meskipun beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan peningkatan performa akurasi klasifikasi menggunakan metode hibrida antara CNN dan ViT untuk klasifikasi penyakit tanaman menggunakan citra daun. Namun, belum terdapat penelitian yang secara spesifik menggabungkan *EfficientNetB4* dan ViT untuk mengklasifikasikan penyakit pada tanaman cabai menggunakan citra daun. Selain itu, penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada peningkatan akurasi menggunakan satu sumber data, tanpa mengevaluasi kemampuan generalisasi model terhadap variasi distribusi data, dan tanpa adanya integrasi dengan rekomendasi solusi organik berbasis teknologi. Untuk mengisi *research gap* tersebut, penelitian ini mengusulkan penerapan pendekatan hibrida antara *EfficientNetB4* dan ViT dengan pendekatan pemrosesan sekuensial serta menerapkan beberapa skenario pengujian berbasis kombinasi data sekunder dan penambahan data primer secara bertahap untuk mengevaluasi kemampuan generalisasi model dan mengevaluasi apakah perbedaan performa yang dihasilkan signifikan secara statistik.

Selain itu, analisis distribusi kesalahan klasifikasi juga dilakukan untuk memahami pola kesalahan model pada setiap kategori penyakit. Lebih lanjut, penelitian ini juga mengintegrasikan hasil klasifikasi dengan rekomendasi solusi organik yang relevan. Hasil tersebut akan disajikan secara jelas dan informatif melalui aplikasi berbasis *website* bernama BotaniQ (*Botanical Intelligence & Quick Solution*) yang dikembangkan menggunakan *framework* Flask. BotaniQ

memungkinkan pengguna untuk mengunggah citra daun tanaman cabai, mendeteksi gejala penyakit, dan memperoleh hasil diagnosis secara cepat dan tepat. Selain itu, BotaniQ juga menyediakan rekomendasi solusi organik untuk setiap kondisi tanaman yang dirancang bersama Dinas Pertanian Kabupaten Blora, sehingga hasil yang diberikan tidak hanya akurat secara teknis, tetapi juga relevan dan aplikatif terhadap kondisi lapangan.

1.2. Rumusan Masalah

Merujuk pada penjelasan latar belakang yang telah disampaikan sebelumnya, terdapat beberapa rumusan masalah, diantaranya:

1. Bagaimana penerapan metode hibrida *EfficientNetB4* dan *Vision Transformer* dalam mengklasifikasikan penyakit tanaman cabai menggunakan citra daun?
2. Bagaimana pengaruh variasi proporsi data primer dalam skenario pengujian terhadap performa dan kemampuan generalisasi model hibrida *EfficientNetB4* dan *Vision Transformer*?
3. Bagaimana proses *deployment* model hibrida *EfficientNetB4* dan *Vision Transformer* ke dalam *platform* berbasis *website* BotaniQ untuk menampilkan hasil klasifikasi dan rekomendasi solusi organik?

1.3. Batasan Masalah

Berikut beberapa batasan masalah yang ditentukan dalam penelitian ini untuk memastikan memperoleh hasil yang relevan, diantaranya:

1. Penelitian ini mengklasifikasikan penyakit pada tanaman cabai menggunakan citra daun dengan tiga kategori penyakit, yaitu *yellowish*, *curl leaf*, dan *spot leaf* serta satu kategori sehat, yaitu *healthy*.
2. Data citra daun tanaman cabai diperoleh dari kondisi lapangan pada periode Agustus 2025, tanpa pengelompokan berdasarkan fase pertumbuhan. Sehingga, penelitian ini tidak mempertimbangkan pengaruh fase pertumbuhan terhadap jenis ataupun tingkat penyakit.

3. Data citra daun diperoleh dari tiga lokasi di Kabupaten Blora dan data sekunder untuk memperkaya varietas data dengan empat kategori tersebut.
4. Identifikasi penyakit dan pengujian model hanya dilakukan pada data citra daun, tanpa mempertimbangkan bagian lain serta parameter lingkungan lainnya.
5. Model yang dikembangkan menggunakan metode hibrida antara *EfficientNetB4* dan *Vision Transformer*, tanpa membandingkan hasilnya dengan metode tunggal.
6. Evaluasi performa model terbatas pada metrik kuantitatif, tanpa mempertimbangkan waktu komputasi dan efisiensi perangkat keras.
7. *Platform* berbasis *website* BotaniQ yang dikembangkan hanya berfungsi sebagai *prototype* dan belum diimplementasikan secara publik.
8. *Platform* berbasis *website* BotaniQ hanya menampilkan hasil klasifikasi penyakit tanaman cabai beserta rekomendasi solusi organik, tanpa mengukur tingkat efektivitas penerapan solusi tersebut di lapangan.
9. Rekomendasi solusi organik bersumber dari Dinas Pertanian Kabupaten Blora dan literatur pendukung yang relevan.

1.4. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan sebelumnya, penelitian ini memiliki beberapa tujuan, diantaranya:

1. Menerapkan metode hibrida *EfficientNetB4* dan *Vision Transformer* untuk mengklasifikasikan penyakit tanaman cabai menggunakan citra daun.
2. Mengevaluasi pengaruh variasi proporsi data primer dalam setiap skenario pengujian terhadap performa dan kemampuan generalisasi model hibrida *EfficientNetB4* dan *Vision Transformer*.
3. Menerapkan hasil model hibrida *EfficientNetB4* dan *Vision Transformer* ke dalam *platform* berbasis *website* BotaniQ untuk menampilkan hasil klasifikasi penyakit tanaman cabai beserta rekomendasi solusi organik.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang bermanfaat bagi berbagai pihak, diantaranya:

1. Bagi Bidang Keilmuan

Penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan penerapan *deep learning* melalui pendekatan pemodelan hibrida antara *EfficientNetB4* dan *Vision Transformer* untuk klasifikasi penyakit tanaman. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah dan acuan bagi penelitian selanjutnya dalam klasifikasi penyakit tanaman menggunakan citra daun.

2. Petani

Penelitian ini membantu mengidentifikasi dan mengklasifikasikan penyakit tanaman cabai secara cepat dan tepat, serta memperoleh rekomendasi solusi organik yang informatif dan aplikatif.

3. Bagi Pemerintah Dinas Pertanian

Penelitian ini menjadi solusi inovatif berbasis *website* sebagai sarana edukasi dan pengambilan keputusan dalam penanganan penyakit tanaman cabai yang ramah lingkungan