

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, evaluasi, dan analisis komparatif yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya, penelitian ini menarik kesimpulan yang menjawab rumusan masalah sebagai berikut:

1. Perancangan arsitektur model hibrida berhasil diimplementasikan dengan menggabungkan EfficientNetV2 sebagai *backbone* pengekstraksi fitur hierarkis spasial dan Vision Transformer (ViT) sebagai pengekstraksi relasi konteks global. Berdasarkan evaluasi komparatif, model hibrida terbukti menjadi arsitektur kompromi yang paling stabil. Meskipun pada pengujian data lokal model hibrida (97,88%) berada di bawah model pembandingnya, yakni EfficientNetV2 (99,29%) dan ViT (98,58%), arsitektur ini berhasil mengatasi kelemahan dari ViT saat dihadapkan pada data lapangan sesungguhnya (*domain shift*). Pada pengujian eksternal, performa tertinggi tetap dipegang oleh EfficientNetV2 (82,50%), dan model hibrida menyusul dengan mempertahankan stabilitas di angka 80,00%. Meskipun secara kuantitatif dan ketepatan *atensi visual* (Grad-CAM) model hibrida belum sepenuhnya melampaui EfficientNetV2 akibat keterbatasan skala data latih dan sensitivitas parameter Transformer, arsitektur ini secara fundamental berhasil menyempurnakan kedua model pembentuknya. Hibrida terbukti jauh lebih tangguh mengatasi degradasi ekstrem ViT (62,50%), sekaligus menutupi kelemahan spesifik CNN tunggal yang terbukti rentan salah klasifikasi pada kasus dengan kemiripan tekstur antar-kelas, sebagaimana dibuktikan pada analisis Grad-CAM Sub-bab 4.8. Meskipun arsitektur hibrida membutuhkan kompleksitas komputasi yang lebih tinggi dibandingkan model tunggal, beban komputasi tersebut terjustifikasi oleh ketahanannya terhadap kasus ambiguitas visual yang berpotensi terjadi di kondisi lapangan nyata, di mana kegagalan klasifikasi dapat berdampak langsung pada penanganan penyakit tanaman. Dengan potensi optimasi

yang masih sangat terbuka di masa depan, hal ini membuktikan efektivitas dan keunggulan jangka panjang model hibrida untuk sistem *computer vision* pada bidang pertanian di lingkungan yang nyata.

2. Penerapan teknik *Explainable AI* (XAI) menggunakan Grad-CAM berhasil mengatasi sifat "kotak hitam" (*black-box*) pada pengambilan keputusan model *deep learning*. Hasil visualisasi peta panas (*heatmap*) yang diekstrak dari lapisan *top_activation* membuktikan bahwa model hibrida mengambil keputusan klasifikasi berdasarkan pemahaman fitur yang lebih holistik (menyeluruh pada geometri lesi penyakit). Hal ini menutupi kelemahan arsitektur CNN yang cenderung agresif dan berfokus sempit hanya pada piksel tepi lesi, sehingga rentan mengalami distraksi visual saat menghadapi kemiripan tekstur di lapangan.

5.2 Saran

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan dan memvalidasi model hibrida untuk klasifikasi penyakit daun pisang. Namun, terdapat beberapa ruang pengembangan yang dapat dijadikan acuan untuk penelitian selanjutnya:

1. Penanganan Fenomena Atensi Melebar

Pada analisis Grad-CAM model hibrida, ditemukan fenomena di mana peta atensi terkadang menyebar berlebihan hingga ke area latar belakang daun. Penelitian selanjutnya disarankan menerapkan teknik prapemrosesan berupa segmentasi latar belakang (seperti *masking*) sebelum citra diproses, untuk memastikan atensi Transformer lebih fokus pada area daun.

2. Peningkatan Ketahanan Terhadap Data Lapangan

Meskipun model hibrida terbukti stabil di lapangan, masih terdapat penurunan akurasi dari pengujian internal ke pengujian eksternal. Peneliti selanjutnya dapat memperkaya skenario augmentasi dengan variasi pencahayaan yang lebih ekstrem untuk menjembatani perbedaan distribusi visual dengan kondisi lapangan. Selain itu, pembangunan dataset primer secara mandiri dalam skala besar yang merepresentasikan kondisi lapangan sesungguhnya, atau eksplorasi pada sumber dataset publik lain yang lebih

bervariasi, sangat direkomendasikan untuk menghasilkan kemampuan generalisasi model yang lebih maksimal.

3. Optimasi untuk Implementasi pada Perangkat

Arsitektur hibrida saat ini membutuhkan sumber daya komputasi yang cukup besar. Untuk mewujudkan alat diagnostik praktis pada perangkat ponsel petani secara *real-time*, disarankan untuk menguji penggantian *backbone* ke arsitektur CNN yang lebih ringan (seperti MobileNetV3) yang dipadukan dengan teknik kompresi model (*model quantization*).

4. Restrukturisasi Lapisan Penyandian Posisi dan Kalibrasi Regularisasi

Berdasarkan riwayat pelatihan, model hibrida memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap inialisasi parameter. Untuk memastikan stabilitas, penelitian selanjutnya disarankan untuk menyusun ulang lapisan *positional encoding* ke dalam *custom layer* berbasis OOP (*Object-Oriented Programming*) agar sistem lebih tangguh. Selain itu, kalibrasi ulang nilai *dropout* pada blok Transformer dan klasifikasi akhir perlu dilakukan untuk mencegah *overfitting* yang terjadi pada dinamika pelatihan dan memaksimalkan hasil outputnya.