

## BAB V

### SIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Simpulan

Penelitian ini berhasil menerapkan metode *object detection* berbasis *Faster R-CNN* untuk melakukan deteksi dan klasifikasi tingkat intensitas penyakit garis kuning pada tanaman kelapa sawit menggunakan citra udara beresolusi tinggi. Proses pengembangan sistem deteksi dilakukan melalui enam tahap utama, yaitu pengumpulan data, pelabelan data, *Preprocessing dataset*, pelatihan model, evaluasi performa, dan pengujian inferensi. Dataset yang digunakan diperoleh melalui pencitraan udara menggunakan *drone* dan dilabeli menjadi empat kelas intensitas penyakit dengan bantuan ahli tanaman untuk memastikan akurasi anotasi. Selanjutnya, dilakukan *Preprocessing* berupa penyesuaian orientasi gambar, *resizing*, serta penyeimbangan data melalui kombinasi metode *undersampling* pada kelas mayoritas dan augmentasi pada kelas minoritas.

Model *Faster R-CNN* dilatih menggunakan empat variasi *backbone*, yaitu ResNet-50-FPN, ResNet-50-FPN-V2, MobileNetV3-Large-FPN, dan MobileNetV3-Large-320-FPN, dengan konfigurasi parameter pelatihan yang sama. Evaluasi dilakukan berdasarkan metrik evaluasi standar dalam deteksi objek, seperti *Precision*, *Recall*, *F1-Score*, *mean average Precision* (mAP), dan *Intersection over Union* (IoU). Berdasarkan hasil evaluasi, *backbone* ResNet-50-FPN-V2 menunjukkan performa terbaik di antara seluruh model yang diuji. Model ini menghasilkan nilai *F1-Score* dan mAP tertinggi serta memiliki stabilitas yang baik pada grafik *learning curve*, yang mengindikasikan keseimbangan antara kemampuan model dalam mengenali pola dari data latih dan melakukan generalisasi terhadap data uji.

Hasil pengujian inferensi pada data uji dan citra *drone* resolusi tinggi menunjukkan bahwa model dengan *backbone* ResNet-50-FPN-V2 mampu mendeteksi dan mengklasifikasikan objek dengan akurasi tinggi. Evaluasi per kelas juga memperlihatkan bahwa model memiliki performa terbaik pada kelas "Sedang" dan "Ringan", yang masing-masing menunjukkan nilai *F1-Score* yang tinggi. Namun, performa pada kelas "Berat" sangat rendah, dengan nilai

*precision*, *recall*, dan F1-Score sebesar 0.00. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh jumlah data yang sangat sedikit pada kelas tersebut, serta pembagian dataset yang tidak *stratified*, sehingga sebagian besar data dari kelas "Berat" tidak terwakili secara proporsional dalam data uji. Temuan ini menekankan pentingnya penerapan teknik pembagian data yang mempertahankan distribusi kelas secara seimbang dalam proses evaluasi model.

Secara keseluruhan, metode *Faster R-CNN* dengan *backbone* ResNet-50-FPN-V2 dapat disimpulkan sebagai pendekatan yang efektif dalam membangun sistem deteksi intensitas penyakit garis kuning pada tanaman kelapa sawit berbasis citra udara, meskipun tantangan terkait distribusi kelas minoritas dalam dataset masih perlu mendapatkan perhatian lebih lanjut pada penelitian selanjutnya.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan implementasi sistem deteksi intensitas penyakit garis kuning pada tanaman kelapa sawit menggunakan *Faster R-CNN*, terdapat beberapa saran yang dapat menjadi pertimbangan untuk pengembangan dan penelitian lanjutan di masa mendatang:

- **Penggunaan Dataset yang Lebih Luas dan Variatif:** Penelitian ini menggunakan dataset yang dikumpulkan dari satu lokasi perkebunan saja, sehingga cakupan kondisi lingkungan dan variasi tanaman masih terbatas. Untuk meningkatkan generalisasi model, disarankan agar penelitian selanjutnya melibatkan pengumpulan data dari berbagai lokasi dengan kondisi geografis, musim, dan pencahayaan yang berbeda.
- **Eksplorasi Arsitektur Two-Stage Lain seperti Cascade R-CNN atau Libra R-CNN:** Meskipun *Faster R-CNN* telah terbukti memberikan akurasi yang tinggi, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi arsitektur *two-stage* lainnya seperti Cascade R-CNN yang menawarkan peningkatan presisi melalui pendekatan bertingkat dalam proses klasifikasi dan regresi, atau Libra R-CNN yang menggabungkan strategi *balancing feature* untuk meningkatkan deteksi pada objek kecil dan tidak seimbang. Pendekatan-pendekatan ini masih berada dalam kategori

*two-stage detector*, namun menawarkan berbagai perbaikan struktural dan teknis yang berpotensi menghasilkan performa yang lebih optimal pada tugas deteksi objek yang kompleks seperti penyakit tanaman.

- **Integrasi dengan Sistem Rekomendasi Pemupukan Otomatis Berbasis Tingkat Keparahan dan Data Agronomi:** Penelitian ini berfokus pada klasifikasi tingkat intensitas penyakit garis kuning, namun belum dilengkapi dengan sistem rekomendasi tindakan agronomis lanjutan seperti pemupukan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan modul rekomendasi pemupukan otomatis yang bersifat adaptif, yaitu memberikan dosis dan jenis pupuk yang disesuaikan dengan tingkat keparahan penyakit (Sehat, Ringan, Sedang, Berat), jenis tanah, tingkat kesuburan, serta riwayat pemupukan sebelumnya. Sistem ini dapat didukung oleh data sensor lapangan seperti kelembaban tanah, pH, dan kandungan unsur hara, atau dari integrasi data uji laboratorium tanah. Rekomendasi dapat diberikan dalam bentuk panduan dosis per tanaman atau per blok lahan, serta waktu aplikasi yang tepat, sehingga petani dapat langsung mengambil tindakan berbasis data (*data-driven decision*). Pengembangan sistem ini akan sangat bermanfaat dalam mendukung pertanian presisi (*precision agriculture*) yang efisien dan berkelanjutan.
- **Implementasi Sistem Deteksi Berbasis *Edge Computing*:** Saat ini proses inferensi dilakukan di *cloud* (Google Colab). Untuk aplikasi nyata di lapangan, sistem deteksi sebaiknya dapat dijalankan langsung di perangkat *edge* seperti NVIDIA Jetson, Raspberry Pi + TPU, atau *drone* dengan komputasi terintegrasi agar lebih praktis dan dapat digunakan secara *real-time* tanpa ketergantungan koneksi internet. Dengan mempertimbangkan saran-saran di atas, diharapkan penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut sehingga mampu memberikan dampak nyata yang lebih luas dalam mendukung pertanian presisi dan pengelolaan kelapa sawit berbasis teknologi kecerdasan buatan.