

ABSTRAK

Defisiensi unsur hara makro Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) pada tanaman padi (*Oryza sativa* L.) dapat menurunkan hasil panen hingga 30%, sementara proses deteksi masih bersifat manual, subjektif, dan tidak konsisten. Penelitian ini mengusulkan model klasifikasi berbasis arsitektur Involution-Infused DenseNet-121 yang dipadukan dengan *Explainable AI* menggunakan *Grad-CAM++* untuk mengidentifikasi empat kondisi nutrisi daun padi: Healthy, defisiensi Nitrogen, Fosfor, dan Kalium. Model memanfaatkan *backbone* DenseNet-121 pretrained ImageNet yang diintegrasikan dengan dua lapisan Involution melalui residual connection, menghasilkan 9,2 juta parameter dengan *overhead* komputasi rendah. Set data yang digunakan berjumlah 1.530 citra dari dua sumber publik. Eksperimen dilakukan melalui tiga skenario *preprocessing* untuk mengevaluasi pengaruh background terhadap performa dan interpretabilitas model. Hasil menunjukkan bahwa skenario S3 *Boxcrop* memberikan performa terbaik dengan akurasi 97,83%, F1-Weighted 0,9785 dan AUC-ROC 0,9992. Analisis FG Activation Score mengungkap adanya *shortcut learning* pada skenario *baseline* yang tidak terdeteksi oleh metrik akurasi, sehingga menegaskan pentingnya evaluasi interpretabilitas secara kuantitatif. Visualisasi *Grad-CAM++* menunjukkan bahwa model berfokus pada area biologis yang relevan, seperti klorosis pada defisiensi Nitrogen, pigmentasi pada Fosfor, dan nekrosis tepi daun pada Kalium. Model kemudian diimplementasikan dalam aplikasi mobile berbasis *Flutter* dengan *backend FastAPI*. Validasi domain dilakukan melalui konsultasi dengan UPTD Pertanian, mencakup verifikasi pelabelan dataset, konfirmasi gejala agronomis, serta uji coba pada data nyata yang menunjukkan hasil positif. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan sistem deteksi nutrisi padi yang akurat, dan aplikatif untuk pertanian presisi.

Kata Kunci: DenseNet-121, Involution, *Grad-CAM++*, defisiensi nutrisi padi, *explainable AI*, klasifikasi citra daun

ABSTRACT

Macronutrient deficiencies of Nitrogen (N), Phosphorus (P), and Potassium (K) in rice (Oryza sativa L.) can reduce crop yields by up to 30%, while detection methods remain manual, subjective, and inconsistent. This study proposes an Involution-Infused DenseNet-121 architecture integrated with Grad-CAM++ Explainable AI to classify four rice leaf nutrient conditions: Healthy, Nitrogen deficiency, Phosphorus deficiency, and Potassium deficiency. The model utilizes an ImageNet-pretrained DenseNet-121 backbone enhanced with two Involution layers through residual connections, resulting in approximately 9.2 million trainable parameters with minimal computational overhead. A total of 1,530 images were collected from two public datasets. Experiments were conducted under three preprocessing scenarios to assess the impact of background handling on model performance and interpretability. Results show that the S3 Boxcrop scenario achieved the best performance, with 97.83% accuracy, 0.9785 F1-Weighted and 0.9992 AUC-ROC. FG Activation Score analysis revealed the presence of shortcut learning in the baseline scenario that was not captured by accuracy metrics alone, highlighting the importance of quantitative interpretability evaluation. Grad-CAM++ visualizations consistently focused on biologically relevant regions, including chlorosis for Nitrogen deficiency, pigmentation changes for Phosphorus, and leaf edge necrosis for Potassium. The best-performing model was deployed in a Flutter-based mobile application with a FastAPI backend. Domain validation was conducted through consultation with agricultural experts, including dataset label verification, confirmation of agronomic symptoms, and testing on real-world data, which produced positive feedback. This study contributes an accurate, and practical nutrient deficiency detection system to support precision agriculture in Indonesia.

Keywords: *DenseNet-121, Involution, Grad-CAM++, rice nutrient deficiency, explainable AI, leaf image classification*