

ABSTRAK

Osteoporosis merupakan penyakit penurunan kepadatan tulang yang berisiko menyebabkan patah tulang sehingga deteksi dini melalui citra *X-ray* penting dilakukan. Namun, sebagian besar penelitian klasifikasi osteoporosis masih berfokus pada peningkatan akurasi tanpa mempertimbangkan biaya komputasi yang merupakan aspek penting untuk penerapan pada lingkungan dengan sumber daya terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini membandingkan dan menganalisis performa serta biaya komputasi dua arsitektur *deep learning*, yaitu EfficientNetV2 dan ConvNeXt dalam mengklasifikasikan osteoporosis lutut berbasis citra *X-ray* ke dalam tiga kelas, yaitu normal, osteoporosis dan osteopenia. Penelitian ini dibatasi pada varian EfficientNetV2-S dan ConvNeXt-Tiny menggunakan *dataset* publik berjumlah 1.947 citra yang diproses dengan *median filter*, CLAHE, normalisasi dan augmentasi tiga kali lipat. Kedua arsitektur dilatih menggunakan tiga strategi, yaitu pelatihan dari awal, *feature extraction* dan *fine-tuning* kemudian digabungkan dengan *ensemble soft voting*. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan *confusion matrix* yang meliputi akurasi, presisi, *recall* dan *F1-score* serta analisis biaya komputasi, seperti jumlah parameter, FLOPs, latensi, *throughput*, waktu pelatihan, RAM dan GPU. Hasil penelitian menunjukkan ConvNeXt-Tiny dengan strategi *fine-tuning* memperoleh akurasi tertinggi sebesar 92% sedangkan *ensemble model* hanya mencapai 90% sehingga tidak melampaui model individual terbaik meskipun biaya komputasinya tinggi. Dengan demikian, peningkatan biaya komputasi pada *ensemble model* tidak sebanding dengan manfaatnya dan ConvNeXt-Tiny *fine-tuning* menjadi model dengan keseimbangan terbaik antara akurasi dan efisiensi komputasi.

Kata kunci: osteoporosis lutut, *deep learning*, EfficientNetV2, ConvNeXt, efisiensi komputasi

ABSTRACT

Osteoporosis is a disease characterized by a decrease in bone density that increases the risk of fractures; therefore, early detection via X-ray imaging is crucial. However, most studies on osteoporosis classification still focus on improving accuracy without considering computational costs, which are a critical aspect for implementation in resource-limited settings. Therefore, this study compares and analyzes the performance and computational costs of two deep learning architectures EfficientNetV2 and ConvNeXt in classifying knee osteoporosis based on X-ray images into three classes: normal, osteoporosis, and osteopenia. This study is limited to the EfficientNetV2-S and ConvNeXt-Tiny variants using a public dataset of 1,947 images processed with a median filter, CLAHE, normalization, and three-fold data augmentation. Both architectures were trained using three strategies—scratch training, feature extraction, and fine-tuning—and then combined using soft voting ensemble. Evaluation was conducted using a confusion matrix that included accuracy, precision, recall, and F1-score, as well as an analysis of computational costs, such as the number of parameters, FLOPs, latency, throughput, training time, RAM, and GPU usage. The results show that ConvNeXt-Tiny with the fine-tuning strategy achieved the highest accuracy of 92%, while the ensemble model only reached 90%, failing to outperform the best individual model despite its high computational cost. Thus, the increase in computational cost for the ensemble model is not commensurate with its benefits, and the fine-tuned ConvNeXt-Tiny model offers the best balance between accuracy and computational efficiency.

Keywords: knee osteoporosis, deep learning, EfficientNetV2, ConvNeXt, computational efficiency