

INTISARI

METODE DEEP LEARNING BERBASIS FITUR PERUBAHAN SPASIAL UNTUK SEGMENTASI MULTI-MINERAL PADA CITRA MICRO-CT BATUAN

Oleh

Ridho Adiwignyo Yusuf

24/546786/PPA/06855

Segmentasi mineral dari citra *micro-CT* merupakan komponen fundamental dalam karakterisasi batuan. Meskipun teknologi *deep learning* telah menunjukkan adanya kemajuan, pendekatan yang ada saat ini terbatas pada analisis irisan tunggal (2D) saja. Keterbatasan ini mengabaikan informasi perubahan spasial antar irisan dalam data volumetrik, sehingga membatasi kualitas segmentasi, terutama untuk kelas minoritas yang kompleks seperti Lempung dan Feldspar pada batuan pasir.

Penelitian ini mengusulkan solusi dengan mengevaluasi beberapa model *deep learning* yang memanfaatkan fitur perubahan spasial antar irisan. Dikembangkan tiga varian arsitektur U-Net yang memproses sekuensial citra sebagai input. Ketiga model diuji dengan variasi panjang sekuen dan dibandingkan secara komprehensif dengan model U-Net 2D standar serta U-Net dengan *Pixel-level Class Weighting* (PCW). Evaluasi dilakukan pada *dataset* citra *micro-CT* batuan dengan empat kelas: Kuarsa, Feldspar, Lempung, dan Pori.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi informasi perubahan spasial berhasil meningkatkan performa segmentasi secara signifikan. Model LSTM U-Net mencapai *F1-Score* tertinggi sebesar 0,9058, namun dengan waktu inferensi paling lambat (23 ms). Sebagai alternatif yang lebih efisien, model *Frame Difference* U-Net mencatat *F1-Score* terbaik kedua (0,897) dengan waktu inferensi tercepat (15 ms). Kedua model ini secara jelas mengungguli performa model U-Net standar (*F1-Score*: 0,8509) dan U-Net + PCW (*F1-Score*: 0,7115), dengan waktu inferensi yang lebih lambat (17 ms). Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi fitur perubahan spasial efektif untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi segmentasi untuk citra multi-mineral pada data volumetrik.

Kata Kunci: Fitur Perubahan Spasial, Citra *Micro-CT*, Segmentasi Multi-mineral, LSTM, U-Net, *Frame Difference*, *Pixel-level Class Weighting* (PCW)

ABSTRACT

A SPATIAL CHANGE FEATURE-BASED DEEP LEARNING METHOD FOR MULTI-MINERAL SEGMENTATION IN MICRO-CT ROCK IMAGES

By

Ridho Adiwignyo Yusuf

24/546786/PPA/06855

Mineral segmentation from micro-CT imagery is a fundamental component of rock characterization. Although deep learning has shown progress, current approaches are limited to single-slice (2D) analysis. This limitation ignores the spatial change information between slices in volumetric data, thus limiting segmentation quality, especially for complex minority classes such as Clay and Feldspar.

This study addresses this gap by evaluating deep learning models that leverage inter-slice spatial change features. Three different U-Net architectures capable of processing sequential images as input were developed. These models were tested with varying sequence lengths and comprehensively compared against a standard 2D U-Net and a U-Net with Pixel-level Class Weighting (PCW). The evaluation was conducted on a rock micro-CT image dataset with four classes: Quartz, Feldspar, Clay, and Pore.

The results demonstrate that integrating spatial change information successfully and significantly improves segmentation performance. The LSTM U-Net model achieved the highest F1-Score of 0.9058, albeit with the slowest inference time (23 ms). As a more efficient alternative, the Frame Difference U-Net model recorded the second-best F1-Score (0.897) with the fastest inference time (15 ms). Both models clearly outperform the previous SOTA models—the standard U-Net (F1-Score: 0.8509) and U-Net + PCW (F1-Score: 0.7115)—which have a slower inference time (17 ms). This research proves that integrating spatial change features is effective for improving the accuracy and efficiency of multi-mineral image segmentation in volumetric data.

Keywords: Spatial Change Features, *Micro*-CT Images, Multi-Mineral Segmentation, LSTM, U-Net, Frame Difference, Pixel-level Class Weighting (PCW)