

INTISARI

PENINGKATAN KINERJA PREDIKSI GEMPA BUMI MELALUI MODIFIKASI MODEL HIBRIDA CNN–LSTM BERBASIS ANALISIS SPASIOTEMPORAL

Oleh
ARI FADLI
22/501221/SPA/00860

Gempa bumi umumnya terjadi di sepanjang zona sesar aktif dan menunjukkan pola spasial serta temporal yang saling berkaitan. Oleh karena itu, model prediksi dituntut untuk mampu mempelajari kedua dimensi tersebut secara simultan. Model *deep learning* pada penelitian terdahulu telah mampu mengenali pola spasiotemporal dari katalog gempa bumi, namun pendekatan yang digunakan masih bergantung pada informasi kejadian gempa semata tanpa memasukkan representasi spasial sesar aktif secara eksplisit sebagai fitur spasial. Akibatnya, variasi spasial yang dipengaruhi oleh kerapatan sesar aktif tidak dapat dimodelkan secara optimal.

Penelitian ini menitikberatkan pada pemanfaatan fitur spasial *Fault Density* (FD). Pada penelitian sebelumnya, FD dihitung menggunakan *Kernel Density Estimation* (KDE) dengan *bandwidth* optimum berbasis *bivariate* Moran's I yang bersifat global dan kurang sensitif terhadap variasi spasial lokal, khususnya pada wilayah dengan heterogenitas seismotektonik yang tinggi. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan perhitungan FD menggunakan KDE dengan *bandwidth* optimum berbasis *bivariate* LISA Index, sehingga representasi kerapatan sesar aktif menjadi lebih adaptif terhadap kondisi spasial lokal. Selain itu, penelitian ini mengusulkan modifikasi model hibrida CNN–LSTM untuk mengintegrasikan fitur spasial dan temporal secara simultan dalam memprediksi parameter gempa bumi, meliputi magnitudo, lokasi, kedalaman, dan waktu kejadian. Evaluasi dilakukan menggunakan data gempa bumi selama 50 tahun dari USGS dan NCEDC, serta data sesar aktif dari Global Active Fault Database dan PuSGeN.

Hasil menunjukkan bahwa integrasi fitur FD berbasis *bivariate* LISA Index secara konsisten meningkatkan performa prediksi, terutama pada parameter lokasi dan kedalaman. Prediksi *longitude* mengalami penurunan MAE sebesar 1,44% dan RMSE sebesar 2,45%, serta peningkatan R^2 sebesar 1,59% dan akurasi sebesar 0,55%. Peningkatan serupa juga terjadi pada prediksi *latitude*. Pada prediksi magnitudo, MAE dan RMSE masing-masing menurun sebesar 4,56% dan 2,90%. Peningkatan paling signifikan diperoleh pada prediksi kedalaman dengan penurunan MAE sebesar 7,20%. Sebaliknya, performa prediksi waktu kejadian masih terbatas, ditunjukkan oleh nilai R^2 yang tetap negatif (–12,18%) serta nilai akurasi, sensitivitas, dan F1-score yang rendah (0,074–0,19). Uji generalisasi lintas wilayah menggunakan katalog gempa Iran dan California menunjukkan degradasi performa yang signifikan pada seluruh parameter.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan fitur FD dengan *bandwidth* optimum berbasis *bivariate* LISA Index serta integrasi fitur spasial tersebut dengan fitur temporal dalam model hibrida CNN–BiLSTM mampu meningkatkan kinerja prediksi gempa bumi, terutama pada aspek spasial seperti lokasi dan kedalaman. Namun, prediksi waktu kejadian dan generalisasi lintas wilayah masih menjadi tantangan, sehingga diperlukan pengembangan pemodelan temporal yang lebih kompleks dan strategi adaptasi domain untuk meningkatkan *robustness* model.

Kata Kunci: Prediksi Gempa Bumi, Fitur Temporal, Fitur Spasial, Analisis Spasiotemporal

ABSTRACT

ENHANCING EARTHQUAKE PREDICTION PERFORMANCE THROUGH A MODIFIED CNN–LSTM HYBRID MODEL LEVERAGING SPATIOTEMPORAL ANALYSIS

By
ARI FADLI
22/501221/SPA/00860

Earthquakes generally occur along active fault zones and exhibit interrelated spatial and temporal patterns. Therefore, predictive models are required to be capable of learning both dimensions simultaneously. Previous deep learning approaches have successfully captured spatiotemporal patterns from earthquake catalogs; however, they primarily rely on historical seismic event data without explicitly incorporating spatial representations of active faults. As a result, spatial variability influenced by fault density has not been optimally modeled.

This study emphasizes the utilization of a spatial feature known as Fault Density (FD). In prior work, FD was estimated using Kernel Density Estimation (KDE) with an optimal bandwidth determined by a global bivariate Moran's I index, which is insufficiently sensitive to local spatial variations, particularly in regions with high seismotectonic heterogeneity. To overcome this limitation, we propose computing FD using KDE with an optimal bandwidth derived from the bivariate Local Indicators of Spatial Association (LISA) index, thereby enabling a more locally adaptive representation of active fault density. Additionally, we introduce a modified hybrid CNN–LSTM architecture that integrates spatial and temporal features simultaneously to predict earthquake parameters, including magnitude, location, depth, and occurrence time. The model is evaluated using 50 years of earthquake data from USGS and NCEDC, along with active fault data from the Global Active Fault Database and PuSGeN.

The results demonstrate that incorporating FD features based on the bivariate LISA index consistently enhances predictive performance, particularly for spatial parameters. Longitude prediction shows reductions of 1.44% in MAE and 2.45% in RMSE, alongside increases of 1.59% in R^2 and 0.55% in accuracy, with similar improvements observed for latitude. For magnitude prediction, MAE and RMSE decrease by 4.56% and 2.90%, respectively. The most notable improvement occurs in depth prediction, with a 7.20% reduction in MAE. In contrast, prediction of occurrence time remains challenging, as indicated by persistently negative R^2 values (–12.18%) and low accuracy, sensitivity, and F1-scores (0.074–0.19). Cross-regional generalization tests using earthquake catalogs from Iran and California reveal substantial performance degradation across all predicted parameters.

Overall, this study confirms that employing FD features with an optimal bandwidth derived from the bivariate LISA index, combined with spatial–temporal integration in a hybrid CNN–BiLSTM model, improves earthquake prediction performance, particularly for spatial attributes such as location and depth. Nevertheless, accurate prediction of occurrence time and robust cross-regional generalization remain open challenges, underscoring the need for more advanced temporal modeling techniques and domain adaptation strategies to enhance model robustness.

Keywords: Earthquake Prediction, Temporal Feature, Spatial Feature, Spatiotemporal Analysis