

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan analisis data gempa bumi yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa model pengembangan berbasis *Long Short-Term Memory* (LSTM) berhasil dirancang untuk memprediksi magnitudo gempa bumi di Indonesia dengan memanfaatkan data spasial-temporal, termasuk lintang, bujur, kedalaman, dan waktu. Data yang hilang (699 nilai magnitudo) telah diimputasi menggunakan median dan dikonversi menjadi sekuensial dengan panjang time step 60. Arsitektur yang menunjukkan performa terbaik adalah model LSTM *Hybrid*, yang menggabungkan LSTM dengan *Attention Mechanism* dan *Residual Connection*. Penerapan mekanisme peningkatan performa ini terbukti meningkatkan stabilitas dan keandalan prediksi, di mana *Residual Connection* secara signifikan memperbaiki akurasi dan stabilitas (RMSE 0,672523), lebih efektif dibandingkan *Attention* murni (RMSE 0,678149), karena membantu menangkap dependensi jangka panjang serta memastikan aliran gradien yang stabil. Kombinasi keduanya dalam model Hybrid menghasilkan metrik terbaik dengan rata-rata *Cross-Validation* RMSE 0,6898 dan MAE 0,5468, menunjukkan kemampuan generalisasi unggul di antara semua model.

Penerapan *hyperparameter tuning*, berupa pengurangan unit LSTM dari 96 menjadi 32, menunjukkan *trade-off* penting antara efisiensi dan akurasi. Model Hybrid Tuned memiliki jumlah parameter jauh lebih sedikit (5.698), sehingga lebih ringan dan efisien secara komputasi, dengan penurunan akurasi minimal (RMSE 0,674657 vs 0,670612 pada model 96 Unit) dan kemampuan generalisasi yang tetap kompetitif (*Cross-Validation* RMSE 0,6907). Secara keseluruhan, model *Hybrid* menunjukkan keunggulan dibanding baseline LSTM Dasar (RMSE 0,674496), baik dari segi akurasi rata-rata maupun generalisasi. Namun, akurasi prediksi sangat bergantung

pada karakteristik wilayah seismik, dengan performa terbaik di Minahassa Peninsula, Sulawesi (RMSE 0,602878) dan terburuk di Southern Sumatra (RMSE 0,758958).

Keterbatasan utama tetap pada prediksi gempa bermagnitudo tinggi (*outlier*), di mana semua model cenderung melakukan prediksi konservatif, menghasilkan kesalahan hingga -1,7 unit magnitudo. Model cenderung memprioritaskan akurasi pada mayoritas data, yaitu gempa bermagnitudo kecil yang lebih sering muncul, sehingga performa pada kejadian ekstrem menjadi kurang optimal. Penggunaan *clustering* spasial juga terbukti membantu model mengenali pola wilayah rentan gempa sehingga meningkatkan akurasi prediksi. Walaupun *hyperparameter tuning* memberikan peningkatan performa, pengaruhnya relatif marginal dibandingkan kontribusi mekanisme arsitektural seperti *Attention* dan *Residual Connection*. Keterbatasan penelitian termasuk kurangnya data lengkap mengenai mekanisme fokus gempa serta belum diterapkannya uji statistik untuk validasi hasil.

Secara keseluruhan, Model LSTM Hybrid yang dikembangkan dapat diterapkan untuk kepentingan mitigasi bencana di Indonesia. Model yang ringan seperti Hybrid Tuned (5.698 parameter) memungkinkan integrasi ke dalam sistem peringatan dini *real-time* untuk memberikan estimasi magnitudo secara cepat, dengan catatan performa kurang stabil pada prediksi outlier. Hasil evaluasi antarwilayah juga dapat digunakan sebagai dasar penyesuaian strategi mitigasi. Wilayah dengan akurasi rendah, seperti Sumatera Selatan, memerlukan penyesuaian parameter atau model yang lebih spesifik untuk karakteristik lokal, sedangkan wilayah dengan akurasi tinggi, seperti Minahassa, dapat memanfaatkan prediksi model dengan tingkat kepercayaan lebih tinggi. Selain itu, ukuran model yang kecil memungkinkan implementasi pada perangkat keras dengan sumber daya terbatas, termasuk stasiun pengamatan BMKG di daerah terpencil.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian, pengembangan lebih lanjut masih sangat terbuka untuk dilakukan. Peningkatan kualitas dan kelengkapan data menjadi aspek utama, khususnya pada variabel mekanisme fokus gempa seperti strike, dip, dan rake yang masih banyak memiliki nilai kosong, sehingga representasi karakteristik sumber gempa dapat dimodelkan secara lebih akurat. Selain itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menerapkan pendekatan khusus dalam menangani kejadian ekstrem, seperti anomaly detection, teknik re-sampling data, atau penggunaan custom loss function yang memberikan penalti lebih besar pada kesalahan prediksi magnitudo tinggi. Dari sisi arsitektur model, eksplorasi metode yang lebih mutakhir, seperti Transformer atau model hibrida CNN–Transformer, juga berpotensi meningkatkan stabilitas dan presisi prediksi magnitudo gempa di masa mendatang.