

BAB I

PENDAHULUAN

Bab pendahuluan ini menyajikan fondasi konseptual penelitian yang mencakup latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, ruang lingkup, serta sistematika penulisan skripsi. Melalui bab ini, arah penelitian dijelaskan secara bertahap mulai dari urgensi ilmiah dan praktis persoalan yang dikaji, batasan kajian yang ditetapkan, hingga struktur pembahasan antarbab agar alur argumentasi penelitian tersusun logis dan mudah diikuti.

1.1 Latar Belakang

Gempa bumi merupakan bencana alam yang menyebabkan dampak sosial dan ekonomi sangat besar di seluruh dunia. Secara statistik, terdapat rata-rata 1.500 gempa bumi yang terjadi setiap tahunnya secara global (Kanamori & Brodsky, 2004), dengan total korban jiwa yang mencapai ribuan orang per dekade, terutama di wilayah-wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi dan konstruksi bangunan berkualitas rendah. Prediksi dan pemantauan aktivitas seismik dalam skala mikro menjadi krusial untuk memahami dinamika patahan dan potensi gempa yang lebih besar, sehingga dapat mendukung sistem peringatan dini dan mitigasi bencana. Data seismik mikro memberikan informasi detail mengenai getaran kecil yang seringkali menjadi cikal bakal gempa lebih besar, sehingga pengolahan dan analisis data ini sangat penting dalam mitigasi risiko bencana (Kanamori & Brodsky, 2004; Scholz, 2019). Dalam konteks tersebut, kemampuan membaca perubahan aktivitas seismik secara cepat dan konsisten menjadi kebutuhan utama dalam upaya pengurangan risiko. Untuk melakukan pengolahan dan analisis yang mendalam tersebut, dibutuhkan ketersediaan dataset seismik dengan resolusi dan presisi yang sangat tinggi.

Berkaitan dengan kebutuhan tersebut, salah satu representasi dataset presisi tinggi yang memenuhi kriteria adalah data sekuens gempa dari wilayah Amatrice, Italia. Wilayah Italia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu lempeng Eurasian, Afrika, dan Adriatic, dengan sistem sesar aktif utama mencakup Sesar Apennina (sejajar dengan Pegunungan Apennina), Sesar Periadriatic, dan beberapa sesar transformasi regional (Scholz, 2019). Sistem sesar-sesar ini menghasilkan aktivitas seismik yang tinggi di berbagai wilayah Italia, khususnya semenjak gempa utama berkekuatan M_w 6,08 pada 24 Agustus 2016 di Amatrice yang memicu rangkaian gempa susulan intensif. Wilayah Amatrice merupakan lokasi dengan aktivitas seismik tinggi yang pernah mengalami gempa besar berkekuatan 6.08 pada tahun 2016 (Scognamiglio et al., 2018). Kondisi tektonik yang kompleks tersebut

menjadikan Amatrice sebagai laboratorium alam yang relevan untuk menguji pendekatan prediksi aktivitas seismik berbasis data.

Lebih lanjut, dataset Amatrice mencakup hampir 1 juta kejadian gempa kecil yang diperoleh dari jaringan stasiun seismik yang sangat padat menggunakan teknologi *deep-neural-network-based phase picker* (Zhu & Beroza, 2019) serta *double-difference relocation* (Waldhauser & Ellsworth, 2000). Pendekatan ini menghasilkan katalog kejadian gempa dengan keakuratan lokasi yang luar biasa, dan memungkinkan analisis lebih mendalam terhadap struktur patahan (Cheloni et al., 2017). Kualitas katalog tersebut membuka peluang untuk pemodelan prediktif yang lebih rinci pada skala waktu pendek. Di saat yang sama, jumlah kejadian yang sangat besar memunculkan tantangan dalam menjaga efisiensi komputasi sekaligus mempertahankan ketelitian analisis. Akan tetapi, kelimpahan dan kompleksitas data beresolusi tinggi ini menuntut pendekatan komputasi canggih untuk dapat diolah menjadi sebuah sistem prediksi yang handal.

Di sisi lain, pendekatan pemodelan yang digunakan secara historis untuk prediksi aktivitas seismik umumnya sangat bergantung pada model statistik tradisional seperti *Epidemic-Type Aftershock Sequence* (ETAS) atau metode *machine learning* yang berfokus murni pada dimensi temporal seperti Long Short-Term Memory (LSTM) murni (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). Meskipun metode-metode tersebut mampu memetakan pola waktu kejadian gempa, pendekatan temporal murni ini memiliki kelemahan fundamental karena mengabaikan kompleksitas interaksi spasial dan transfer tegangan (*stress transfer*) antar lokasi patahan yang tersebar secara geografis. Keterbatasan dalam menangkap interaksi ruang dan waktu secara bersamaan ini seringkali membatasi akurasi model dalam memprediksi fluktuasi aktivitas seismik secara komprehensif. Dampaknya, informasi penting mengenai keterkaitan antarlokasi gempa tidak sepenuhnya dimanfaatkan dalam proses prediksi. Berangkat dari keterbatasan tersebut, penelitian ini memfokuskan target prediksi pada magnitudo maksimum mikroseismik, yaitu nilai magnitudo tertinggi yang muncul dalam setiap interval agregasi waktu tertentu, karena variabel ini merepresentasikan intensitas aktivitas seismik jangka pendek yang relevan untuk pemantauan kondisi patahan secara operasional.

Untuk menjawab tantangan tersebut, arsitektur *deep learning* berupa Graph Attention Network (GAT) dan Long Short-Term Memory (LSTM) dihadirkan. GAT mampu memproses data berstruktur graf dengan mekanisme *attention* yang adaptif untuk memodelkan hubungan spasial antar stasiun seismik secara dinamis (Veličković et al., 2018; Wu et al., 2020). Kombinasi GAT dengan LSTM menghasilkan arsitektur Spatio-Temporal GAT (ST-GAT) yang mampu menangkap dependensi spasial dan temporal dalam data seismik mikro secara simultan, yang turut diperkaya dengan teknik *skip connections* (He et al., 2016) dan *learnable*

node embeddings untuk stabilitas model (Ba et al., 2016). Arsitektur ini juga lebih sesuai untuk data seismik yang bersifat non-Euclidean karena relasi antarlokasi direpresentasikan secara eksplisit melalui struktur graf. Meskipun model *deep learning* ini dirancang untuk memetakan pola secara presisi, sebuah sistem prediksi untuk mitigasi bencana tetap mutlak memerlukan kejelasan tingkat kepercayaan agar hasil prediksinya tidak menjadi sekadar tebakan tanpa kepastian.

Secara keseluruhan, penelitian ini disusun menggunakan dataset presisi tinggi dari Amatrice dan metode *deep learning* berbasis ST-GAT untuk menjawab keterbatasan pendekatan konvensional. Pendekatan ini dipilih agar keterkaitan spasial dan temporal antar kejadian gempa dapat dimodelkan secara terpadu. Fokus prediksi diarahkan pada skenario *multi-step forecasting* magnitudo mikroseismik sehingga perubahan aktivitas dalam horizon waktu 1–24 jam dapat terpetakan. Selain mengejar akurasi, penelitian ini juga menekankan transparansi prediksi melalui kalibrasi ketidakpastian menggunakan *Deep Ensembles*. Dengan kerangka tersebut, penelitian diharapkan tidak hanya menghasilkan model dengan performa baik, tetapi juga memberikan dasar analitis yang lebih kuat untuk mendukung pemantauan aktivitas seismik secara berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah diuraikan, adanya tantangan dalam memprediksi magnitudo mikroseismik maksimum dan kebutuhan akan estimasi ketidakpastian yang terukur memunculkan beberapa pertanyaan kunci yang perlu dijawab dalam penelitian ini. Tantangan fundamental dalam prediksi seismik mencakup kompleksitas temporal dari pola gempa yang tidak stasioner, sifat spasial dari interaksi antar lokasi patahan, serta keterbatasan model konvensional dalam menangkap kedua dimensi tersebut secara bersamaan. Dengan fokus pada data seismik mikro Amatrice yang kaya informasi dan resolusi tinggi, pertanyaan penelitian diarahkan pada pengembangan metode yang dapat memanfaatkan struktur spasial dan dinamika temporal secara terpadu. Dengan kerangka kerja tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang alur pra-pemrosesan dan rekayasa fitur pada data seismik mikro Amatrice melalui agregasi temporal pada berbagai skala waktu agar informasi prediktif tetap terjaga?
2. Bagaimana mendesain dan melatih model ST-GAT (Spatio-Temporal Graph Attention Network) dengan *attention mechanism* untuk memprediksi nilai maksimum magnitudo mikroseismik dalam rentang waktu 1–24 jam ke depan?
3. Bagaimana mengintegrasikan metode estimasi ketidakpastian dalam model prediksi guna memberikan interval kepercayaan prediksi?

4. Bagaimana kinerja dan perbandingan strategi *multi-resolution* dan *multi-horizon* dalam memproyeksikan nilai maksimum magnitudo mikroseismik menggunakan data historis yang tersedia?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dirancang untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan melalui serangkaian tujuan yang terstruktur dan terukur. Setiap tujuan dirancang untuk memberikan kontribusi incremental terhadap pengembangan sistem prediksi seismik yang akurat, informatif, dan dapat diandalkan. Pencapaian tujuan-tujuan ini diharapkan menghasilkan metodologi holistik yang menggabungkan aspek teknis (pemrosesan data, desain model, optimisasi performa) dengan aspek praktis (estimasi ketidakpastian, interpretabilitas hasil). Adapun tujuan-tujuan utama dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan kerangka prediksi aktivitas mikroseismik maksimum berbasis spatio-temporal yang akurat dan informatif sebagai dukungan pengambilan keputusan pemantauan seismik, termasuk indikasi dini ketika terdeteksi tren peningkatan magnitudo.
2. Mengimplementasikan alur pra-pemrosesan dan agregasi data seismik mikro Amatrice dengan resolusi temporal bervariasi (1, 2, 4, 6, 12, dan 24 jam) untuk fitur prediksi.
3. Mengembangkan model prediksi berbasis ST-GAT (Spatio-Temporal Graph Attention Network) dengan *multi-head attention mechanism*, *skip connections*, dan *node embeddings* untuk memprediksi magnitudo maksimum mikroseismik dengan memanfaatkan dependensi spasial antar lokasi dan pola temporal aktivitas gempa.
4. Menganalisis kinerja pendekatan *multi-resolution* dan *multi-horizon* dalam prediksi magnitudo maksimum mikroseismik pada berbagai horizon waktu.
5. Mengaplikasikan teknik *Deep Ensembles* untuk estimasi ketidakpastian prediksi yang terkalibrasi.
6. Mengevaluasi kinerja model dengan metrik regresi, validasi ketepatan interval kepercayaan, dan studi ablasi komponen arsitektur.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan baik secara akademis maupun praktis dalam berbagai tingkatan. Implikasi penelitian ini meliputi pengembangan metodologi baru yang dapat diterapkan untuk domain prediksi

spatio-temporal lainnya, serta penciptaan peluang kolaborasi antara bidang pembelajaran mesin dan geofisika. Manfaat penelitian ini tercakup dalam beberapa aspek sebagai berikut:

1. Bagi mahasiswa, penelitian ini memberikan pengalaman langsung dalam pengembangan model pembelajaran mendalam berbasis graf untuk aplikasi geofisika, serta pemahaman mendalam mengenai prediksi deret waktu dengan estimasi ketidakpastian.
2. Bagi institusi kampus, hasil penelitian ini dapat memperkaya koleksi karya ilmiah dan menjadi referensi untuk penelitian lanjutan di bidang pembelajaran mesin untuk aplikasi mitigasi bencana.
3. Bagi dunia akademis secara luas, penelitian ini menyediakan metode prediksi gempa mikro yang lebih akurat dan informatif dengan integrasi *attention mechanism* dan estimasi ketidakpastian.
4. Secara praktis, luaran model prediksi ini dapat menjadi dasar pengembangan sistem peringatan dini berbasis data seismik mikro yang adaptif dan terpercaya, serta memberikan kontribusi dalam bidang pemodelan pembelajaran mesin untuk data seismik mikro dan peramalan deret waktu.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian mencakup aspek data, metode, dan evaluasi yang telah ditetapkan dengan jelas untuk memastikan fokus dan reproduktibilitas penelitian. Penetapan batasan lingkup penelitian penting untuk menghindari meluasnya cakupan masalah yang dapat mengurangi kedalaman analisis. Dengan menguraikan elemen-elemen yang termasuk dan dikecualikan dari penelitian, kami memastikan bahwa setiap aspek penelitian dapat dijelaskan dan dipertanggungjawabkan secara transparan. Rincian ruang lingkup penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan dataset seismik mikro Amatrice yang diagregasi dengan resolusi temporal bervariasi (1, 2, 4, 6, 12, dan 24 jam) dengan fitur dasar (*count*, magnitudo maksimum, *log energy*, *average depth*, *average ML*, *std ML*) dan fitur rekayasa (*b-value*, *event rate*, *time since last event*, *rolling max magnitude*).
2. Arsitektur yang dikembangkan berupa ST-GAT (Spatio-Temporal Graph Attention Network) dengan *multi-head attention mechanism*, *skip connections*, *learnable node embeddings*, dan *layer normalization* untuk pemrosesan spasial, serta Long Short-Term Memory (LSTM) untuk pemrosesan temporal, dengan prediksi *multi-resolution* untuk horizon 1–24 jam ke depan.
3. Proses normalisasi data menggunakan *Z-score normalization*, evaluasi model dilakukan terhadap dataset uji (20% data) dengan analisis metrik kuantitatif (MSE, RMSE, MAE,

R^2 , MAPE) serta analisis ketidakpastian menggunakan *Deep Ensembles* dengan 5 model independen per resolusi.

4. Penelitian ini mencakup studi ablasi komprehensif dengan 28 konfigurasi berbeda untuk membandingkan kontribusi komponen arsitektur, variasi fungsi loss (*weighted MSE*, *focal loss*, *multi-scale loss*), dan model dasar.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini disusun dalam lima bab yang saling berkesinambungan untuk menjelaskan alur penelitian secara ringkas dan logis. Uraian dimulai dari latar belakang masalah, dilanjutkan dengan landasan teori dan metodologi, kemudian hasil pembahasan, hingga kesimpulan dan saran. Dengan susunan ini, pembaca dapat mengikuti tahapan penelitian secara bertahap. Rincian pokok bahasan tiap bab disajikan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas landasan teori yang digunakan dalam penelitian, meliputi konsep gempa bumi dan seismik mikro, Graph Attention Network, *skip connections*, *node embeddings*, Long Short-Term Memory, fungsi loss untuk data *imbalanced*, serta metode estimasi ketidakpastian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tahapan penelitian yang dilakukan, mulai dari pengumpulan dan pra-pemrosesan data, pembangunan model ST-GAT, hingga proses pelatihan dan evaluasi model.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil eksperimen dan analisis performa model, termasuk perbandingan metrik evaluasi dan visualisasi hasil prediksi beserta estimasi ketidakpastian.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.