

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup	5
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Gempa Bumi	7
2.1.1 Magnitudo dan Skala Pengukuran	7
2.1.2 Seismik Mikro (<i>Microseismic</i>)	8
2.1.3 Relasi Gutenberg-Richter dan b-value	10
2.2 Graph Neural Networks (GNN)	11
2.2.1 Representasi Graf	12
2.2.2 Message Passing Framework	13
2.2.3 Graph Convolutional Network (GCN)	13
2.3 Graph Attention Networks (GAT)	15
2.3.1 Mekanisme Attention pada Graf	15
2.3.2 Multi-Head Attention	16
2.3.3 Query-Key-Value Attention	17
2.3.4 Skip Connections dan Residual Learning	17
2.3.5 <i>Learnable Node Embeddings</i>	18
2.3.6 GATv2: <i>Attention Statis</i> vs <i>Dinamis</i>	18

2.4	Spatio-Temporal GAT (ST-GAT)	19
2.5	Long Short-Term Memory (LSTM)	20
2.5.1	Arsitektur LSTM	20
2.5.2	LSTM untuk Peramalan Deret Waktu	23
2.6	Representasi Data Seismik	23
2.6.1	<i>Gridding</i> Spasial	24
2.6.2	<i>Temporal Binning</i> dan Agregasi	25
2.6.3	<i>Adjacency Matrix</i> Berbasis Jarak	26
2.6.4	Normalisasi Data	27
2.7	Estimasi Ketidakpastian	28
2.7.1	Jenis Ketidakpastian	28
2.7.2	<i>Monte Carlo Dropout</i>	28
2.7.3	<i>Deep Ensembles</i>	29
2.8	Metrik Evaluasi	30
2.8.1	<i>Mean Squared Error</i> (MSE)	30
2.8.2	<i>Root Mean Squared Error</i> (RMSE)	31
2.8.3	<i>Mean Absolute Error</i> (MAE)	31
2.8.4	<i>Coefficient of Determination</i> (R^2)	31
2.9	Model <i>Baseline</i> untuk Prediksi Seismik	32
2.9.1	Model ETAS (<i>Epidemic-Type Aftershock Sequence</i>)	32
2.9.2	<i>Moving Average</i> (MA)	33
2.9.3	<i>Naive Baseline</i> (<i>Persistence</i>)	33
2.10	Fungsi <i>Loss</i> untuk Data <i>Imbalanced</i>	33
2.10.1	<i>Focal Loss</i>	34
2.10.2	<i>Multi-Scale Loss</i>	34
2.10.3	<i>Asymmetric Loss</i>	34
2.11	Studi Kasus: Gempa Amatrice, Italia	35
2.11.1	Karakteristik Geologis	35
2.11.2	Katalog Amatrice	35
2.12	Penelitian Terkait	36
2.12.1	Prediksi Gempa dengan Graph Neural Networks	37
2.12.2	Prediksi Gempa dengan LSTM	38
2.12.3	Model Hybrid CNN-LSTM dan CNN-GNN	39
2.12.4	Prediksi Gempa di Wilayah Amatrice	40
2.12.5	Perbandingan dengan Penelitian Ini	40
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		42
3.1	Alur Penelitian	42
3.2	Pengumpulan Data dan Pra-pemrosesan	43

3.2.1	Pengumpulan Dataset Seismik Mikro Amatrice	43
3.2.2	Alur Pra-pemrosesan	45
3.2.3	Pemilihan Area Studi (<i>Spatial Cropping</i>)	46
3.2.4	Pemilihan Resolusi Grid (Grid Size)	48
3.2.5	Konstruksi Graf dan Pemilihan Radius Adjacency	50
3.2.6	Agregasi Fitur	52
3.2.7	Multiresolusi	53
3.2.8	Normalisasi Data	54
3.2.9	Pembagian Data	55
3.3	Arsitektur Model ST-GAT	56
3.3.1	Gambaran Umum Arsitektur	56
3.3.2	Learnable Node Embeddings	57
3.3.3	Multi-Head Graph Attention Layer	58
3.3.4	<i>Warm Start Blending</i>	60
3.3.5	LSTM untuk Pemrosesan Temporal	61
3.3.6	Temporal Skip Connection	62
3.3.7	Multi-Step Output Layer	63
3.3.8	Detail Arsitektur Model	63
3.3.9	Ringkasan Hyperparameter Model	65
3.4	Pelatihan Model	65
3.4.1	Fungsi Loss	65
3.4.2	Optimizer dan Scheduler	66
3.4.3	<i>Early Stopping</i>	67
3.4.4	<i>Gradient Clipping</i>	68
3.5	Estimasi Ketidakpastian dengan Deep Ensembles	68
3.5.1	Implementasi Deep Ensembles	68
3.5.2	Agregasi Prediksi	69
3.5.3	Interval Kepercayaan	70
3.5.4	Kalibrasi Post-Hoc	70
3.6	Evaluasi Model	71
3.6.1	Metrik Evaluasi	71
3.7	Studi Ablasi	72
3.7.1	Konfigurasi Ablasi	72
3.7.2	Model <i>Baseline</i>	72
3.8	Lingkungan Pengembangan	73
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		75
4.1	Hasil <i>Preprocessing</i> Data	75
4.1.1	Statistik <i>Dataset</i>	75

4.1.2	Proses <i>Cropping Area</i> Studi	76
4.1.3	Analisis Eksploratori Data	77
4.1.4	Struktur <i>Grid</i> dan Graf	81
4.2	Hasil Pelatihan Model	81
4.3	Evaluasi Performa Model	83
4.3.1	Metrik Evaluasi Keseluruhan	83
4.3.2	Performa Deteksi <i>Peak</i>	84
4.3.3	Performa Klasifikasi	84
4.3.4	Prediksi <i>Time Series</i>	85
4.4	Pendekatan Multi-Resolusi	86
4.4.1	Hasil Multi-Resolusi	86
4.4.2	Visualisasi Multi-Resolusi	88
4.5	Studi Ablasi	90
4.5.1	Hasil Studi Ablasi - Arsitektur	90
4.5.2	Hasil Studi Ablasi - Loss Function	92
4.5.3	Perbandingan dengan Baseline	93
4.6	Analisis Mekanisme <i>Attention</i>	94
4.6.1	Distribusi Bobot <i>Attention</i>	94
4.6.2	Koneksi <i>Attention</i> Tertinggi	95
4.7	Evaluasi Performa Spasial	96
4.8	Perbandingan Multi-Resolusi vs Multi-Horizon	97
4.8.1	Perbandingan Metrik Evaluasi	97
4.8.2	Visualisasi Perbandingan Performa	99
4.8.3	Analisis Degradasi Performa	100
4.9	Analisis Ketidakpastian dengan Deep Ensemble	101
4.9.1	Hasil Deep Ensemble	101
4.9.2	Kalibrasi dan Coverage	102
4.9.3	Korelasi Uncertainty-Error	102
4.9.4	Visualisasi Interval Kepercayaan	103
4.9.5	Analisis Kalibrasi	104
4.10	Pembahasan	104
4.10.1	Interpretasi Hasil	105
4.10.2	Perbandingan dengan <i>Baseline</i>	105
4.10.3	Limitasi	105
4.10.4	Implikasi Praktis	106
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	107
5.1	Kesimpulan	107
5.2	Saran	108

LAMPIRAN 1.	Perhitungan Manual Preprocessing Data	113
LAMPIRAN 2.	Perhitungan Manual Graph Attention Network	118
LAMPIRAN 3.	Perhitungan Manual LSTM	125
LAMPIRAN 4.	Perhitungan Manual Deep Ensembles	128
LAMPIRAN 5.	Perhitungan Manual Metrik Evaluasi.....	131
LAMPIRAN 6.	Detail Arsitektur Model	133