

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	<b>iii</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN MOTTO</b>	<b>vi</b>
<b>PRAKATA</b>	<b>vii</b>
<b>INTISARI</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xvi</b>
<b>I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang . . . . .	1
1.2 Rumusan Masalah . . . . .	4
1.3 Tujuan Penelitian . . . . .	4
1.4 Batasan Masalah . . . . .	5
1.5 Manfaat Penelitian . . . . .	5
<b>II TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>6</b>
2.1 Konteks Seismotektonik Indonesia dan Potensi Bencana . . . . .	6
2.2 Sejarah Gempa Besar di Sekitar Pulau Jawa . . . . .	7
2.3 Sistem Peringatan Dini Gempa Bumi . . . . .	8
2.4 Program E3WS . . . . .	11
<b>III DASAR TEORI</b>	<b>14</b>
3.1 Mekanisme Gempa Bumi . . . . .	14
3.1.1 Tegangan dan Regangan . . . . .	14
3.1.2 Teori <i>Elastic Rebound</i> . . . . .	15
3.1.3 Teori Tektonika Lempeng . . . . .	15
3.2 Gelombang Seismik . . . . .	16
3.3 Sistem Perekaman Data Seismik . . . . .	16

3.3.1	Komponen Instrumentasi . . . . .	16
3.3.2	Standar Penamaan Kanal SEED . . . . .	17
3.4	Parameter Sumber Gempa . . . . .	18
3.4.1	Magnitudo . . . . .	18
3.4.2	Lokasi Hiposentrum . . . . .	19
3.4.3	Jarak Episentral . . . . .	19
3.4.4	Azimut Balik . . . . .	19
3.5	<i>Machine Learning</i> . . . . .	19
3.5.1	<i>Ensemble Learning</i> . . . . .	19
3.5.2	<i>Extreme Gradient Boosting (XGBoost)</i> . . . . .	20
3.6	Program <i>Ensemble Earthquake Early Warning System (E3WS)</i> . . . . .	22
3.6.1	Arsitektur E3WS . . . . .	22
3.6.2	Model Global . . . . .	23
3.6.3	Model Detektor Lokal . . . . .	23
3.6.4	Fitur Masukan Model E3WS . . . . .	24
3.6.5	Metrik Evaluasi . . . . .	26
<b>IV METODE PENELITIAN</b>		<b>27</b>
4.1	Wilayah Penelitian . . . . .	27
4.2	Perangkat Keras dan Perangkat Lunak . . . . .	28
4.2.1	Perangkat Keras dan Sensor . . . . .	28
4.2.2	Perangkat Lunak . . . . .	28
4.3	Tahapan Penelitian . . . . .	29
4.3.1	Pengumpulan Data Sinyal Seismik Kontinu . . . . .	30
4.3.2	Pembuatan Model Detektor (DET) . . . . .	30
4.3.3	Pengumpulan Data Uji Berbasis Katalog . . . . .	31
4.3.4	Prapemrosesan Data . . . . .	32
4.3.5	Inferensi Parameter Sumber dengan E3WS . . . . .	33
4.3.6	Pengujian Prediksi Parameter . . . . .	35
4.3.7	Evaluasi Kinerja . . . . .	36
4.3.8	Penentuan Konfigurasi Durasi Optimal . . . . .	36
4.3.9	Visualisasi dan Interpretasi . . . . .	36
4.4	Diagram Alur Penelitian . . . . .	36
<b>V HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		<b>38</b>
5.1	Katalog Data Uji . . . . .	38

5.2	Deteksi dan Distribusi Domain . . . . .	38
5.2.1	Tingkat Keberhasilan Deteksi . . . . .	38
5.2.2	Distribusi Data Uji (ID vs. OOD) . . . . .	40
5.3	Analisis Kinerja Estimasi Parameter . . . . .	41
5.3.1	Magnitudo . . . . .	41
5.3.2	Kedalaman . . . . .	43
5.3.3	Jarak Episentral . . . . .	48
5.3.4	Azimut Balik . . . . .	48
5.4	Penentuan Konfigurasi Durasi Optimal . . . . .	51
5.4.1	Analisis <i>Lead Time</i> dan Batas Optimasi . . . . .	51
5.4.2	Konfigurasi Durasi Optimal per Parameter . . . . .	51
5.5	Analisis Korelasi Statistik dari Kegagalan Sistematis . . . . .	55
5.6	Analisis Perbandingan Kinerja (Model Tercepat vs. Model Teroptimasi) . . . . .	65
5.7	Studi Kasus Gempa ID vs. OOD . . . . .	65
5.7.1	Kasus 1 (ID): Gempa 12 Juli 2020 19:50:41 UTC . . . . .	65
5.7.2	Kasus 2 (OOD): Gempa 13 September 2023 05:34:33 UTC . . . . .	68
5.7.3	Ringkasan Temuan Studi Kasus . . . . .	71
5.8	Validasi Kontekstual dan Kontekstualisasi Temuan . . . . .	71
5.8.1	Pengaruh Bias Spasial terhadap Kinerja Model . . . . .	71
5.8.2	Kontekstualisasi dengan Studi Global . . . . .	72
5.9	Keterbatasan Penelitian . . . . .	72
5.10	Rekomendasi Implementasi Berbasis Validasi Kontekstual . . . . .	73
<b>VI KESIMPULAN DAN SARAN</b>		<b>75</b>
6.1	Kesimpulan . . . . .	75
6.2	Saran . . . . .	75
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		<b>77</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Performa algoritme karakterisasi sumber ditinjau dari nilai <i>mean error</i> , <i>standard deviation error</i> (STD), <i>mean absolute error</i> (MAE), dan koefisien determinasi ( $R^2$ ) . . . . .	13
Tabel 3.1	Klasifikasi kode pita ( <i>band</i> ) dalam Standar Penamaan Kanal SEED . . . . .	18
Tabel 4.1	Spesifikasi stasiun seismik SMRI dan UGM . . . . .	28
Tabel 4.2	Respons seismometer Streckeisen STS-2 . . . . .	29
Tabel 5.1	Performa deteksi model setiap stasiun dalam mendeteksi gempa bumi . . . . .	39
Tabel 5.2	Rincian kategori gempa terdeteksi per stasiun (ID vs. OOD) . . . . .	40
Tabel 5.3	MAE estimasi magnitudo (dalam satuan magnitudo) . . . . .	42
Tabel 5.4	MAE estimasi kedalaman (dalam satuan kilometer) . . . . .	45
Tabel 5.5	MAE estimasi jarak episentral (dalam satuan kilometer) . . . . .	49
Tabel 5.6	MAE azimuth balik (dalam derajat) untuk berbagai durasi sinyal . . . . .	54
Tabel 5.7	Parameter model waktu gelombang P masing-masing stasiun untuk optimasi hasil estimasi parameter . . . . .	55
Tabel 5.8	Perbandingan MAE pada durasi 3 s dengan MAE durasi optimal . . . . .	65
Tabel 5.9	Perbandingan parameter katalog dengan prediksi model (durasi 3 s vs. durasi sesuai konfigurasi optimal) . . . . .	66
Tabel 5.10	Parameter Gempa dan Prediksi untuk Kasus 2 . . . . .	70

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Peta zona <i>hotspot</i> dan <i>coldspot</i> gempa bumi . . . . .	1
Gambar 1.2	Peta sebaran stasiun seismometer di Indonesia . . . . .	2
Gambar 2.1	Peta lempeng tektonik di Indonesia dan sekitarnya dengan arah pergerakannya . . . . .	6
Gambar 2.2	Peta sebaran sesar di Pulau Jawa dan potensi gempa bumi yang dapat terjadi . . . . .	7
Gambar 2.3	Peta distribusi seismisitas di Jawa Tengah, Jawa Timur, dan sekitarnya, periode 2009–2017 . . . . .	9
Gambar 2.4	Konsep kerja ShakeAlert® sebagai sistem peringatan dini gempa berbasis jaringan sensor . . . . .	10
Gambar 2.5	<i>Mean absolute error</i> dan $R^2$ dari parameter (a, b) magnitudo, (c, d) jarak episentral, (e, f) kedalaman, dan (g, h) azimuth balik, untuk durasi gelombang P sinyal masukan 3–46 s . . . . .	12
Gambar 3.1	Ilustrasi perbedaan pola getaran partikel pada gelombang P (atas) dan gelombang S (bawah) . . . . .	17
Gambar 3.2	Arsitektur model untuk karakterisasi sumber gempa bumi .	22
Gambar 4.1	Peta katalog gempa bumi 2020–2024 di wilayah penelitian	27
Gambar 4.2	Struktur direktori <i>input</i> . . . . .	32
Gambar 4.3	Diagram blok E3WS yang diterapkan pada sistem peringatan dini gempa bumi di Peru . . . . .	33
Gambar 4.4	Struktur direktori <i>results</i> . . . . .	35
Gambar 4.5	Alur metode penelitian . . . . .	37
Gambar 5.1	Distribusi parameter (a) magnitudo dan (b) kedalaman gempa bumi periode 2020–2024 . . . . .	38
Gambar 5.2	Distribusi jarak episentral gempa bumi dengan stasiun (a) stasiun UGM dan (b) stasiun SMRI . . . . .	39
Gambar 5.3	Kurva <i>mean absolute error</i> dari parameter magnitudo . . .	43
Gambar 5.4	Visualisasi <i>magnitude error</i> untuk SMRI dan UGM . . . .	44
Gambar 5.5	Visualisasi <i>depth error</i> untuk SMRI dan UGM . . . . .	47
Gambar 5.6	Kurva <i>mean absolute error</i> kedalaman . . . . .	48

Gambar 5.7	Visualisasi <i>distance error</i> untuk SMRI dan UGM . . . . .	50
Gambar 5.8	Kurva <i>mean absolute error</i> jarak episentral . . . . .	51
Gambar 5.9	Visualisasi <i>back-azimuth error</i> untuk SMRI dan UGM . . . . .	52
Gambar 5.10	Kurva <i>mean absolute error</i> azimuth balik . . . . .	53
Gambar 5.11	<i>Lead time heatmap</i> selisih gelombang S-P dengan model kecepatan 1D AK135 . . . . .	53
Gambar 5.12	Matriks korelasi pearson antara kesalahan optimal dan karakteristik gempa . . . . .	56
Gambar 5.13	Korelasi antara azimuth balik riil dan prediksi untuk stasiun UGM . . . . .	57
Gambar 5.14	Korelasi antara azimuth balik riil dan prediksi untuk stasiun SMRI . . . . .	58
Gambar 5.15	Korelasi antara kedalaman riil dan prediksi untuk stasiun SMRI . . . . .	59
Gambar 5.16	Korelasi antara kedalaman riil dan prediksi untuk stasiun UGM . . . . .	60
Gambar 5.17	Korelasi antara magnitudo riil dan prediksi untuk stasiun UGM . . . . .	61
Gambar 5.18	Korelasi antara magnitudo riil dan prediksi untuk stasiun SMRI . . . . .	62
Gambar 5.19	Korelasi antara jarak episentral riil dan prediksi untuk stasiun UGM . . . . .	63
Gambar 5.20	Korelasi antara jarak episentral riil dan prediksi untuk stasiun SMRI . . . . .	64
Gambar 5.21	Peta estimasi episentrum gempa antara model tercepat vs. model optimal pada gempa 12 Juli 2020 19:50:41 UTC . . . . .	67
Gambar 5.22	Peta estimasi episentrum gempa antara model tercepat vs. model optimal pada gempa 13 September 2023 05:34:33 UTC . . . . .	69