UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

TESIS

PENERAPAN *TRANSFORMER EARTHQUAKE ALERTING MODEL* (TEAM) DAN TEAM-*LOCATION AND MAGNITUDE* UNTUK PERINGATAN DINI GEMPA BUMI DI SUMATRA BARAT

APPLYING THE TRANSFORMER EARTHQUAKE ALERTING MODEL (TEAM) AND TEAM-LOCATION AND MAGNITUDE FOR EARTHQUAKE EARLY WARNING IN WEST SUMATRA

SIGIT EKO KURNIAWAN
22/508843/PPA/06449

PROGRAM STUDI S2 FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS GADJAH MADA
YOGYAKARTA

2025

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

TESIS

PENERAPAN *TRANSFORMER EARTHQUAKE ALERTING MODEL* (TEAM) DAN TEAM-*LOCATION AND MAGNITUDE* UNTUK PERINGATAN DINI GEMPA BUMI DI SUMATRA BARAT

APPLYING THE TRANSFORMER EARTHQUAKE ALERTING MODEL (TEAM) AND TEAM-LOCATION AND MAGNITUDE FOR EARTHQUAKE EARLY WARNING IN WEST SUMATRA

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh derajat

Master of Science Fisika

SIGIT EKO KURNIAWAN

22/508843/PPA/06449

PROGRAM MAGISTER FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS GADJAH MADA
YOGYAKARTA

2025

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

HALAMAN PENGESAHAN

TESIS

PENERAPAN *TRANSFORMER EARTHQUAKE ALERTING MODEL* (TEAM) DAN TEAM-*LOCATION AND MAGNITUDE* UNTUK PERINGATAN DINI GEMPA BUMI DI SUMATRA BARAT

Telah dipersiapkan dan disusun oleh

SIGIT EKO KURNIAWAN
22/508843/PPA/06449

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji
pada tanggal 7 Juli 2025

Susunan Tim Penguji

Pembimbing I

Dr. Theodosius Marwan Irnaka,S.Si., M.Sc
NIP. 111198903201608101

Penguji

Dr.rer.nat. Ade Anggraini, S.Si., M.Si
NIP. 197305012005012001

Penguji

Dr. Sudarmaji, M.Si
NIP. 197412122002121003

Penguji

Dr. Eddy Hartantyo, M.Si
NIP. 197602052002121002

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
Untuk memperoleh gelar *Master of Science*
Tanggal 17 Juli 2025
Pengelola Program Studi Magister Fisika

Mirza Satriawan, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 197211171997021001

Mengetahui,
a.n. Dekan FMIPA UGM
Wakil Dekan Bidang Pendidikan, Pengajaran dan Kemahasiswaan

Prof. Drs. Roto, M.Eng., Ph.D.
NIP. 196711171993031020

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	: Sigit Eko Kurniawan
NIM	: 22/508843/PPA/06449
Tahun terdaftar	: 2025
Program Studi	: Magister Fisika
Fakultas	: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Menyatakan bahwa dalam dokumen ilmiah Tesis ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah lain yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu Lembaga Pendidikan Tinggi,dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/lembaga lain,kecuali yang secara tertulis disitasi dalam dokumen ini dan disebutkan sumbernya secara lengkap dalam daftar pustaka.

Dengan demikian saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi dan apabila dokumen ilmiah Tesis ini dikemudian hari terbukti merupakan plagiasi dari hasil karya penulis lain dan/atau dengan sengaja mengajukan karya atau pendapat yang merupakan hasil karya penulis lain,maka penulis bersedia menerima sanksi akademik dan/atau sanksi hukum yang berlaku.

Yogyakarta, Juli 2025
Yang membuat pernyataan



Sigit Eko Kurniawan
22/508843/PPA/06449

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan barokah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul *Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat*. Laporan tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar *Master of Science (M.Sc.)* pada Program Studi S2 Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Gadjah Mada.

Dalam melakukan penelitian dan penyusunan laporan tesis ini penulis telah mendapatkan banyak dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada:

1. Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah dengan penuh kesabaran dan ketulusan memberikan ilmu dan bimbingan terbaik kepada penulis.
2. Prof. Dr. Sismanto, M.Si., Dr.rer.nat. Ade Anggraini, S.Si., M.Si., dan Dr. Sudarmaji, M.Si. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik membangun untuk kebaikan penelitian yang dilakukan penulis
3. Mirza Satriawan, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Ketua dan Dr.rer.nat. Mochamad Nukman, S.T., M.Sc. selaku sekretaris Program Studi Magister Fisika Fakultas MIPA Universitas Gadjah Mada yang memberikan izin kepada penulis untuk belajar.
4. Para Dosen Program Studi Magister Fisika Fakultas MIPA Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan bekal ilmu kepada penulis.
5. Para Tenaga Kependidikan Program Studi S2 Magister Fisika Fakultas MIPA Universitas Gadjah Mada yang telah membantu penulis dalam proses belajar.
6. Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia BMKG yang telah memberikan beasiswa kepada penulis untuk belajar dan melanjutkan studi hingga jenjang magister.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

7. Dr. Suaidi Ahadi, S.T., M.T. selaku kepala Stasiun Geofisika Kelas I Padang Panjang yang telah memberikan izin dan bantuan kepada penulis dalam jenjang studi.
8. Orang tua dan keluarga besar yang selalu mendoakan dan memberikan motivasi untuk menyelesaikan studi.
9. Istri dan putri penulis yang telah memberikan izin dan bersikap sabar dalam mengatur kebutuhan rumah tangga, serta mendukung sepenuhnya studi yang penulis tempuh.
10. Arif, Ayun, Siti, Pak Hendrik, teman seangkatan, teman KBK Geosains, HMPF dan rekan-rekan lain yang tidak bisa disebutkan satu per satu.
11. Pihak-pihak yang telah berkontribusi yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa laporan tesis ini masih jauh dari sempurna, untuk itu semua jenis saran, kritik dan masukan yang bersifat membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata, semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat dan memberikan wawasan tambahan bagi para pembaca dan khususnya bagi penulis sendiri.

Yogyakarta, Juni 2025

Penulis

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iii
PRAKATA iv
DAFTAR ISI vi
DAFTAR GAMBAR viii
DAFTAR TABEL xv
INTISARI xvi
ABSTRACT xvii

BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang Masalah 1
1.2 Rumusan Masalah 6
1.3 Batasan Masalah 6
1.4 Tujuan 7
1.5 Manfaat 7

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 8
2.1 Peringatan Dini Gempa Bumi 8
2.2 Kondisi Tektonik Sumatra Barat 13

BAB III LANDASAN TEORI 19
3.1 Gempa Bumi 19
3.1.1 Pecuplikan Waktu Kedatangan Gelombang Gempa Bumi 21
3.1.2 Interpolasi Interpolasi Sinyal Seismograf 23
3.1.3 Respon Alat Seismograf 24
3.1.4 *Envelope* dari Seismogram 25
3.1.5 Waktu asal (*Origin Time)* 26
3.1.6 Hiposenter 27
3.1.7 Magnitudo 27
3.1.8 Percepatan Puncak Tanah 27
3.2 Peringatan Dini Gempa Bumi 28
3.2.1 Parameter τ_c 29
3.2.2 Parameter Pd 30
3.3 *Machine Learning* 30
3.4 *Deep Learning* (DL) 32
3.4.1 Jaringan Saraf Tiruan 33

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.4.2 *Convolutional Neural Network* (CNN) 38
3.5 Transformer 42
3.6 *Transformer Earthquake Alerting Model* (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude 49
3.7 Metrik Evaluasi Performa Model 53
3.7.1 Precision 53
3.7.2 Recall 54
3.7.3 F1-*Score* 54
3.7.4 AUC (Area Under the Curve) 54
3.7.5 R^2 (*R-squared*) 55
3.7.6 *Root Mean Squared Error* (RMSE) 55
3.7.7 *Mean Absolute Error* (MAE) 55
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN 57
4.1 Lokasi dan Data Penelitian 57
4.2 Metode Pengolahan 59
4.3 Perangkat Keras dan Lunak yang Digunakan 68
4.4 Diagram Alir Penelitian 70
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 71
5.1 Pelatihan dan Pengujian Model 71
5.1.1 Magnitudo 73
5.1.2 Hiposenter 77
5.1.3 Performa PGA dan Peringatan 80
5.2 Validasi Model 82
5.2.1 Performa Estimasi Magnitudo 82
5.2.2 Performa Estimasi Hiposenter 88
5.2.3 PGA dan Waktu Peringatan 95
5.2.4 Performa Model pada Beberapa Kejadian Gempa Bumi 105
5.3 Perbandingan Model dengan InaTEWS 125
BAB VI KESIMPULAN 127
6.1 Kesimpulan 127
6.2 Saran 128
DAFTAR PUSTAKA 129
LAMPIRAN 139

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Ilustrasi sistem peringatan dini gempa bumi (Zuccolo dkk., 2021).....3
Gambar 1.2 Gambaran Konseptual dari Proses EEW (Cremen & Galasso, 2020).....4
Gambar 1.3 Tampilan skematik dari alur kerja peringatan dini TEAM untuk kejadian Norcia pada Oktober 2016 (Mw = 6,5) 2,5 detik setelah pick gelombang P pertama. (a) Sebuah kejadian terdeteksi melalui pemicu di beberapa stasiun seismik. (b) *Waveform* dan koordinat stasiun digunakan untuk memperkirakan probabilitas untuk PGA target (c) Probabilitas melebihi ambang batas untuk sekumpulan ambang batas PGA yang ditetapkan dihitung berdasarkan distribusi probabilitas PGA yang diperkirakan. Jika probabilitas melebihi ambang batas α, maka peringatan akan dikeluarkan. (d) Peta tingkat PGA tertinggi di mana peringatan dikeluarkan (Münchmeyer dkk., 2021b). 5
Gambar 2.1 Sistem peringatan dini gempa Meksiko (Sumber cires.org.mx diakses 14 Agustus 2024 dengan modifikasi). Bintang merah merupakan lokasi episenter gempa Meksiko 1985. Kotak biru merupakan kota Meksiko. Lingkaran oranye merupakan ketersedian waktu peringatan dini gempa. 8
Gambar 2.2 Perbandingan peta intensitas gempa Tohoku-Oki 2011 dari hasil observasi di lapangan (a) dengan hasil EEW (b) (Wald, 2020) 9
Gambar 2.3 Kondisi Tektonik di Pulau Sumatra yaitu zona subduksi, Sesar Mentawai, dan Sesar Sumatra (Natawidjaja, 2018) 14
Gambar 2.4 (a) Peta episenter dan mekanisme sumber gempa Pasaman Barat 2022. Garis hijau putus-putus menunjukkan perkiraan lokasi patahan. Potongan melintang barat daya-timur laut yang mengilustrasikan Sesar Kajai (Supendi dkk., 2023b). (b) Peta guncangan gempa bumi Solok Selatan. Bintang dengan garis merah adalah episenter gempa bumi, garis merah adalah Sesar Sumatra, dan garis abu-abu adalah batas kabupaten (Sumber: BMKG).....16
Gambar 2.5 Peta yang menunjukkan lokasi kemungkinan adanya lempengan busur belakang di Pulau Sumatra (Widiyantoro dkk., 2024) 17
Gambar 3.1 Deformasi elastis, patahan, dan pemulihan elastis (Panchuk, 2021).....19
Gambar 3.2 Konsep sistem deteksi pertama oleh Dr. Cooper (Nakamura, 1988).....29

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 3.3 Aplikasi *machine learning* dalam seismologi gempa bumi (Kubo dkk., 2024).....31
Gambar 3.4 Berbagai sifat DNN digunakan untuk membangun model yang kuat untuk berbagai tugas seismologi (Mousavi & Beroza, 2022).....33
Gambar 3.5 Struktur ANN (Sumber https://www.codespeedy.com/understanding-artificial-neural-network-ann, diakses 14 Agustus 2024).....37
Gambar 3.6 Arsitektur CNN (Billinghurst dkk., 2015).....41
Gambar 3.7 Arsitektur Model Transformer (Vaswani dkk., 2017).....45
Gambar 3.8 Gambaran umum model arsitektur TEAM yang menunjukkan input, ekstraksi fitur, kombinasi fitur, estimasi PGA, dan output(Münchmeyer dkk., 2021b).....51
Gambar 3.9 Gambaran umum model arsitektur TEAM-LM yang menunjukkan input, ekstraksi fitur, kombinasi fitur, estimasi PGA, dan output (Münchmeyer dkk., 2021a) 52
Gambar 4.1 (a) Lokasi dan data gempa bumi dan (b) stasiun perekaman di wilayah penelitian..... 58
Gambar 4.2 Lokasi dan data gempa bumi Jepang..... 58
Gambar 4.3 Seismogram gempa 19 Desember 2024 pukul 01:17:17 UTC di stasiun TMSM yang waktu tiba gelombang P (garis putus-putus berwarna merah) dicuplik dengan AR-AIC di sekitar waktu hasil dari STA/LTA dan perhitungan prediksi waktu tiba gelombang P. *E-N-Z component* merupakan komponen *waveform*. 61
Gambar 4.4 (a) Contoh *waveform* gempa bumi Mentawai 23 Februari 2024 dengan magnitudo *Mw* 5,3 yang terekam di stasiun PBSI. (b) *Waveform* dalam bentuk *envelope* yang sudah beri tanda untuk waktu kedatangan gelombang P (warna biru) dan waktu ketika waktu PGA melebihi batas 1% g (warna hijau), 2% g (oranye), 5% g (warna cyan)..... 62
Gambar 4.5 Peta percepatan puncak di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 1% dalam 100 tahun (Irsyam dkk., 2017) 63
Gambar 4.6 Contoh data akhir yang dipakai untuk membuat dataset gempa bumi Sumatra Barat dari *waveform* gempa bumi Mentawai 23 Februari 2024 dengan magnitudo *Mw* 5,3 yang terekam di stasiun PBSI. Garis putus-putus berwarna biru merupakan waktu kedatangan gelombang P. Garis putus-putus berwarna hijau merupakan waktu ketika PGA melebih 1% g. Garis putus-

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

putus berwarna merah merupakan waktu ketika PGA melebih 2% g. 64
Gambar 4.7 Diagram alir pengolahan *dataset* 66
Gambar 4.8 Diagram alir penelitian 70
Gambar 5.1 Histogram distribusi frekuensi dari selisih waktu tempuh gelombang P dari stasiun pertama ke stasiun lain. Histogram digambar diagram batang warna biru. Sumbu horizontal menunjukkan waktu tempuh dalam detik dan sumbu vertikal menunjukkan jumlah kejadian dalam setiap rentang waktu tertentu. Garis putus-putus berwarna merah menunjukan nilai rata-rata, garis putus-putus berwarna hijau menunjukan nilai rentang batas atas dan bawah berdasarkan standar deviasi. 72
Gambar 5.2 Histogram distribusi jumlah magnitudo gempa bumi dan hasil sampel ulang 73
Gambar 5.3 Grafik perubahan nilai *learning rate* (sumbu y) magnitudo selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi 74
Gambar 5.4 Grafik perubahan nilai *loss* magnitudo (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi 75
Gambar 5.5 Grafik perubahan nilai *loss* pelatihan dan *loss* validasi magnitudo (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi. Keterangan *train* di legenda adalah *loss* pelatihan dan val adalah validasi. 76
Gambar 5.6 Dinamika *learning rate* lokasi (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi 77
Gambar 5.7 Perbandingan kurva *loss* lokasi (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi 78
Gambar 5.8 Perbandingan antara nilai *loss* pelatihan dan validasi lokasi (sumbu y) untuk setiap konfigurasi selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x). Train menunjukan nilai *loss* pada data pelatihan dan Val menunjukan nilai *loss* pada data validasi. 79
Gambar 5.9 Grafik perubahan nilai *learning rate* PGA (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi 80
Gambar 5.10 Perbanding kurva *loss* PGA (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi 81
Gambar 5.11 Kurva perbandingan loss PGA antara data pelatihan dan validasi (sumbu y) terhadap 100 *epoch* pelatihan (sumbu x). *Train* menunjukan nilai *loss* pada data pelatihan dan *Val* menunjukan nilai *loss* pada data validasi. 82

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.12 Perbandingan nilai RMSE dari prediksi rata-rata magnitudo untuk masing-masing konfigurasi model. Gaya dan warna garis menunjukkan jenis konfigurasi. Sumbu y adalah RMSE dinyatakan dalam unit magnitudo dan sumbu x adalah waktu setelah gelombang P pertama tiba dalam satuan detik. 83

Gambar 5.13 Perbandingan nilai MAE dari prediksi rata-rata magnitudo untuk masing-masing konfigurasi model. Gaya dan warna garis menunjukkan jenis konfigurasi. Sumbu y adalah MAE dinyatakan dalam unit magnitudo dan sumbu x adalah waktu setelah gelombang P pertama tiba dan dinyatakan dalam satuan detik. 84

Gambar 5.14 Perbandingan nilai R^2 dari prediksi rata-rata magnitudo untuk masing-masing konfigurasi model EEW. Gaya dan warna garis menunjukkan jenis konfigurasi. Sumbu y adalah R^2 dan sumbu x adalah waktu setelah gelombang P pertama tiba dan dinyatakan dalam satuan detik.....85

Gambar 5.15 Perbandingan magnitudo sebenarnya (sumbu x) dan magnitudo prediksi (sumbu y) yang diprediksi tanpa sampel ulang (a), dengan sampel ulang (b), dan dengan sampel ulang serta *transfer learning* (c). Semua plot menunjukkan prediksi pada detik ke-22 setelah gelombang P tiba di stasiun pertama. Garis berwarna hijau menunjukkan persentil ke-5, ke-50 (median prediksi), dan ke-95 dalam rentang 0.2 m.u. Garis persentil hanya ditampilkan jika terdapat cukup banyak titik data. 87

Gambar 5.16 Perbandingan nilai MAE dari prediksi rata-rata hiposenter untuk masing-masing konfigurasi model. Gaya dan warna garis menunjukkan jenis konfigurasi. Sumbu y adalah MAE dalam satuan km dan sumbu x adalah waktu setelah gelombang P pertama tiba dan dinyatakan dalam satuan detik. 89

Gambar 5.17 Perbandingan nilai RMSE dari prediksi rata-rata hiposenter untuk masing-masing konfigurasi. Gaya dan warna garis menunjukkan jenis konfigurasi. Sumbu y adalah RMSE dalam satuan km dan sumbu x adalah waktu setelah gelombang P pertama tiba dan dinyatakan dalam satuan detik. 90

Gambar 5.18 Perkembangan prediksi lokasi gempa dan area kepercayaan (90%) dari lima kejadian gempa bumi. Setiap panel menunjukkan episenter (bintang) dan area kepercayaan (elips) pada waktu t 0,5 hingga 39,0 detik setelah gelombang P pertama tiba. Warna elips menunjukkan masing-masing gempa. 91

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.19 100 gempa dengan galat lokasi tertinggi ditampilkan di atas kepadatan kejadian spasial dalam data pelatihan. Estimasi lokasi menggunakan data pada detik ke-22. Titik kuning menunjukkan lokasi hasil prediksi, tanda silang hijau menunjukkan lokasi sebenarnya, dan garis abu-abu menghubungkan keduanya. Segitiga merah menandai posisi stasiun seismik. Kepadatan kejadian dihitung menggunakan estimasi kepadatan kernel Gaussian dan tidak memperhitungkan kedalaman kejadian. Inset grafik menunjukkan kepadatan gempa di lokasi sebenarnya dibandingkan dengan kepadatan gempa di lokasi estimasi. 93

Gambar 5.20 Perbandingan antara lokasi gempa sebenarnya dan hasil prediksi model dalam *latitude* atau lintang (kiri), *longitude* atau bujur (tengah), dan kedalaman (kanan) pada detik ke-22. Garis putus-putus merah menunjukkan garis identitas $y=x$ sebagai referensi kesesuaian dan garis titik-titik berwarna merah menunjukkan nilai ± standar deviasi (σ). 94

Gambar 5.21 Perbandingan nilai MAE (sumbu y) terhadap waktu prediksi (sumbu x) dalam detik setelah waktu tiba gelombang P di stasiun pertama untuk enam konfigurasi model *ensemble* 95

Gambar 5.22 Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) (sumbu y) terhadap waktu prediksi (sumbu x) dalam detik setelah waktu tiba gelombang P di stasiun pertama untuk enam konfigurasi model *ensemble* 96

Gambar 5.23 Grafik R^2 (sumbu y) terhadap waktu prediksi (sumbu x) dalam detik setelah waktu tiba gelombang P di stasiun pertama untuk enam konfigurasi model *ensemble* 97

Gambar 5.24 Evaluasi presisi, *recall*, dan skor F1 terhadap nilai ambang batas probabilitas α pada masing-masing ambang batas PGA. Ambang batas 20% g tidak terdapat peringatan. 100

Gambar 5.25 Hubungan antara *lead time* (detik) dan *distance* (km) atau jarak stasiun ke hiposenter untuk setiap ambang batas PGA dengan nilai α optimal per *threshold*. Garis putus-putus menunjukkan hasil regresi linier. Ambang batas 20% g tidak terdapat peringatan. N adalah jumlah stasiun. 101

Gambar 5.26 Histogram waktu peringatan dari kejadian yang berhasil diprediksi (*true alerts*) untuk tiap ambang batas PGA. N adalah jumlah stasiun di mana sistem memberi peringatan yang benar dan tepat waktu. *Warning time* adalah waktu selisih antara waktu dikeluarkannya peringatan dan saat ambang batas PGA

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

terlampaui. *Fraction of true alerts* adalah proporsi peringatan yang benar (*true alerts*) dalam setiap interval waktu peringatan. 103
Gambar 5.27 Nilai AUC (sumbu y) terhadap waktu minimum peringatan (sumbu x) dalam detik untuk setiap ambang batas PGA.....105
Gambar 5.28 (a) Perbandingan estimasi magnitudo prediksi terhadap waktu untuk berbagai konfigurasi model. Garis menunjukkan bagaimana prediksi magnitudo dari masing-masing model berkembang terhadap waktu. (b) Evaluasi prediksi magnitudo terbaik dibandingkan dengan magnitudo sebenarnya (garis putus-putus hitam) terhadap waktu dalam satuan detik. 107
Gambar 5.29 (a) Evaluasi prediksi episenter terbaik untuk gempa Mentawai 24 April 2023 dibandingkan episenter sebenarnya (bintang hitam). Garis menunjukkan bagaimana perubahan prediksi episenter dari masing-masing model terhadap waktu. (b) Evaluasi prediksi kedalaman terbaik dibandingkan kedalaman sebenarnya (bintang hitam) terhadap waktu dalam satuan detik..108
Gambar 5.30 Peta PGA prediksi pada detik ke 1, 10, 15, 22, 39 dan PGA sebenarnya gempa Mentawai 24 April 2023 dengan Mw6,9 yang merupakan gempa terbesar dalam set pengujian Sumatra Barat. X adalah episenter gempa dan lingkaran adalah stasiun seismik. Skala warna menunjukan besarnya nilai prediksi PGA dalam satuan % g.....110
Gambar 5.31 Grafik distribusi waktu peringatan (*warning time*) dalam detik terhadap jumlah stasiun untuk gempa Mentawai 24 April 2023 Mw6,9. Ambang batas 5%, 10%, dan 20% g tidak terdapat data yang valid. 112
Gambar 5.32 (a) Perbandingan estimasi magnitudo prediksi terhadap waktu untuk berbagai konfigurasi model. Garis menunjukkan bagaimana prediksi magnitudo dari masing-masing model berkembang terhadap waktu. (b) Evaluasi prediksi magnitudo terbaik dibandingkan dengan magnitudo sebenarnya (garis putus-putus hitam) terhadap waktu dalam satuan detik. 114
Gambar 5.33 (a) Evaluasi prediksi episenter terbaik untuk gempa Pasaman Barat 25 Februari 2022 dibandingkan episenter sebenarnya (bintang hitam) terhadap waktu dalam satuan detik. (b) Evaluasi prediksi kedalaman terbaik dibandingkan kedalaman sebenarnya (bintang hitam) terhadap waktu dalam satuan detik..115
Gambar 5.34 Peta PGA prediksi pada detik ke 1, 5, 15, 22, 39 dan PGA aktual gempa Pasaman Barat 25 Februari 2022 dengan Mw6,2. X

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

adalah episenter gempa dan lingkaran adalah stasiun seismik. Skala warna menunjukan besarnya nilai prediksi PGA dalam satuan %g.....117
Gambar 5.35 Grafik distribusi waktu peringatan minimum (*warning time*) dalam detik terhadap jumlah stasiun untuk setiap ambang batas PGA gempa Pasaman Barat 25 Februari 2022 $Mw6{,}2$. Ambang batas 20% g tidak terdapat data yang valid. 118
Gambar 5.36 (a) Perbandingan estimasi magnitudo prediksi terhadap waktu (detik) untuk berbagai konfigurasi model. Garis menunjukkan bagaimana prediksi magnitudo dari masing-masing model berkembang terhadap waktu. (b) Evaluasi prediksi magnitudo terbaik dibandingkan dengan magnitudo sebenarnya (garis putus-putus hitam) terhadap waktu dalam satuan detik. 120
Gambar 5.37 (a) Evaluasi prediksi episenter terbaik (titik) dibandingkan episenter sebenarnya (bintang hitam) terhadap waktu dalam satuan detik. (b) Evaluasi prediksi kedalaman terbaik dibandingkan kedalaman sebenarnya (bintang hitam) terhadap waktu dalam satuan detik. 122
Gambar 5.38 Peta PGA prediksi pada detik ke 1, 10, 15, 22, 39 dan PGA aktual gempa Mentawai 8 Januari 2024 dengan $Mw5{,}0$ yang merupakan gempa terbesar dalam set pengujian Sumatra Barat. X adalah episenter gempa dan lingkaran adalah stasiun seismik. Skala warna menunjukan besarnya nilai prediksi PGA dalam satuan % g.....123
Gambar 5.39 Grafik distribusi waktu peringatan (*warning time*) dalam detik terhadap jumlah stasiun untuk gempa Mentawai 8 Januari 2024 $Mw5{,}0$.....124
Gambar 5.40 Gambar distribusi waktu pemrosesan untuk membuat parameter gempa bumi dari TEAM-LM dan InaTEWS BMKG.....125

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Korelasi hubungan antara magnitudo momen dan beberapa skala magnitudo di Indonesia (Diantari dkk., 2018).....65
Tabel 4.2 Perbandingan dataset yang digunakan dalam penelitian.....65

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

INTISARI

Penerapan *Transformer Earthquake Alerting Model* (TEAM) dan TEAM-*Location and Magnitude* untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat

Oleh

Sigit Eko Kurniawan
22/508843/PPA/06449

Sumatra Barat merupakan wilayah dengan aktivitas seismik tinggi yang rentan terhadap dampak gempa bumi. Untuk memitigasi risiko gempa, dilakukan penelitian dengan mengimplementasikan *Transformer Earthquake Alerting Model* (TEAM) dan TEAM-*Location and Magnitude* (TEAM-LM) yang merupakan model *deep learning* untuk peringatan dini gempa bumi. Model dilatih ulang menggunakan data gempa dari jaringan BMKG dan dilakukan *joint training* dan *transfer learning* dari dataset gempa Jepang.

Hasil penelitian menunjukkan TEAM dan TEAM-LM dapat memberikan estimasi parameter gempa secara progresif sejak 0,5 detik setelah kedatangan gelombang P. Hasil estimasi magnitudo mencapai performa terbaik pada detik ke-10, dengan galat MAE 0,14 dan RMSE 0,18. Estimasi lokasi mengalami peningkatan signifikan setelah 22 detik dengan RMSE hiposenter mencapai 60,19 km. Prediksi percepatan puncak tanah (PGA) menunjukkan akurasi tertinggi pada detik ke-39 dengan nilai R^2 0,58, MAE 0,49, dan RMSE 0,69. Estimasi magnitudo dan PGA cukup andal untuk gempa dengan magnitudo kecil dan intensitas rendah (1–5% g), namun performa menurun untuk gempa besar dengan PGA tinggi (10–20% g). Hal tersebut ditandai keterbatasan dalam menghasilkan waktu peringatan sebelum ambang batas PGA tercapai.

Secara keseluruhan model TEAM dan TEAM-LM menunjukkan keunggulan signifikan dalam kecepatan proses dibandingkan sistem operasional InaTEWS BMKG. Model mampu melakukan estimasi awal sejak 0,5 detik dan mencapai frekuensi pemrosesan maksimum pada 20–40 detik. Waktu proses ini tidak mencakup latensi sistem secara penuh, namun tetap menunjukkan efisiensi dibandingkan waktu keluaran katalog operasional InaTEWS yang umumnya berada pada rentang 60–120 detik. Pendekatan ini menunjukkan potensi untuk pengembangan EEW di wilayah rawan gempa seperti Sumatra Barat.

Kata Kunci: Peringatan Dini Gempa, TEAM, TEAM-LM, Transformer, Sumatra Barat

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

Applying The Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) and TEAM-Location and Magnitude for Earthquake Early Warning in West Sumatra

Oleh

Sigit Eko Kurniawan

22/508843/PPA/06449

West Sumatra is a region with high seismic activity and is vulnerable to the impacts of earthquakes. To mitigate earthquake risk, this study implements the Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) and TEAM-Location and Magnitude (TEAM-LM), which are deep learning-based models for earthquake early warning (EEW). The models were retrained using earthquake data from the BMKG network, with joint training and transfer learning from a Japanese earthquake dataset.

The results show that TEAM and TEAM-LM can provide progressive estimates of earthquake parameters starting from 0.5 seconds after the arrival of the P-wave. Magnitude estimation achieved its best performance at 10 seconds, with a mean absolute error (MAE) of 0.14 and root mean square error (RMSE) of 0.18. Location estimation improved significantly after 22 seconds, reaching a hypocenter RMSE of 60.19 km. Peak ground acceleration (PGA) prediction reached its highest accuracy at 39 seconds, with an R^2 value of 0.58, MAE of 0.49, and RMSE of 0.69. Magnitude and PGA estimates were reliable for small earthquakes and low-intensity shaking (1–5% g), but performance declined for large events with high PGA (10–20% g), indicating limitations in generating timely positive warnings before threshold exceedance.

Overall, the TEAM and TEAM-LM models demonstrate a significant advantage in processing speed compared to the operational InaTEWS BMKG system. The models are capable of providing initial estimations as early as 0.5 seconds after the P-wave arrival and reach maximum processing frequency between 20–40 seconds. Although this processing time does not include the full system latency, it still indicates greater efficiency compared to the output times of the operational InaTEWS catalog, which generally range between 60–120 seconds. This approach shows strong potential for the development of EEW in earthquake-prone regions such as West Sumatra.

Keywords: Earthquake Early Warning, TEAM, TEAM-LM, Transformer, West Sumatra

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sumatra Barat merupakan daerah tektonik aktif. Hal tersebut karena lokasinya berada di dekat zona subduksi Lempeng Indo-Australia yang menunjam ke bawah Lempeng Eurasia dengan kecepatan 5−6 cm/tahun (Prawirodirdjo dkk., 2000). Zona subduksi atau zona *megathrust* tersebut tersegmentasi menjadi beberapa segmen. Sebanyak dua segmen melewati Sumatra Barat, yaitu Segmen Mentawai Siberut dan Segmen Mentawai Pagai.

Berdasarkan riwayat kegempaan, segmen Mentawai Siberut dan segmen Mentawai menimbulkan gempa dan tsunami pada tahun 1797 dengan M_w 8,7 yang merusak pesisir barat Sumatra (Irsyam dkk., 2017). Segmen Mentawai Pagai pernah menimbukan gempa dan tsunami pada tahun 1833 dengan perkiraan magnitudo M_w 8,8−9,2 (Natawidjaja dkk., 2006), gempa Bengkulu tahun 2007 dengan magnitudo M_w 8,5, gempa Mentawai tahun 2010 dengan M_w 7,8. Menurut Irsyam dkk., (2017) potensi magnitudo maksimum yang mungkin terjadi di segmen Mentawai Siberut sebesar 8,7, sedangkan segmen Mentawai Pagai sebesar 8,9. Jika kedua segmen tersebut patah bersamaan, maka potensi magnitudo maksimum menjadi 9,0.

Kepulauan Mentawai memiliki fitur unik yang ditandai dengan adanya zona *seismic gap* yang merupakan area gempa tahun 1797 dengan zona *rupture* di seluruh Mentawai dan 1833 yang terjadi di bagian selatan Mentawai (Sieh dkk., 2008). Kondisi *coupling* yang tinggi di zona *seismic gap* Mentawai belum dilepaskan oleh gempa-gempa yang signifikan di sekitarnya seperti gempa ganda Batusangkar M 6,0 tahun 2007, gempa Padang M_w 7,9 tahun 2009, dan gempa Mentawai M_w 7,9 tahun 2010 (McCloskey dkk., 2010). Penelitian Konca dkk. (2008) menggunakan metode *intercoupling* menunjukan bahwa di Mentawai khususnya Siberut terjadi *full coupling* yang menandakan daerah tersebut mempunyai potensi terjadinya gempa di masa mendatang. Menurut McCloskey dkk. (2010), gempa ini terjadi dengan mekanisme *oblique*.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Sumatra Barat juga dilalui oleh Sesar Mentawai dan Sesar Sumatra. Sesar Sumatra tersegmentasi menjadi beberapa segmen yang mana terdapat tujuh segmen yang berada di Sumatra Barat. Segmen-segmen tersebut yaitu Segmen Angkola, Barumun, Sumpur, Sianok, Sumani, Suliti, dan Siulak. Dari ke tujuh segmen tersebut, Sianok dan Sumani menjadi segmen yang paling aktif. Segmen Sianok dan Sumani memiliki riwayat gempa *doublet* yang merusak tahun 1822, 1926, dan 2007 (Daryono dkk., 2012).

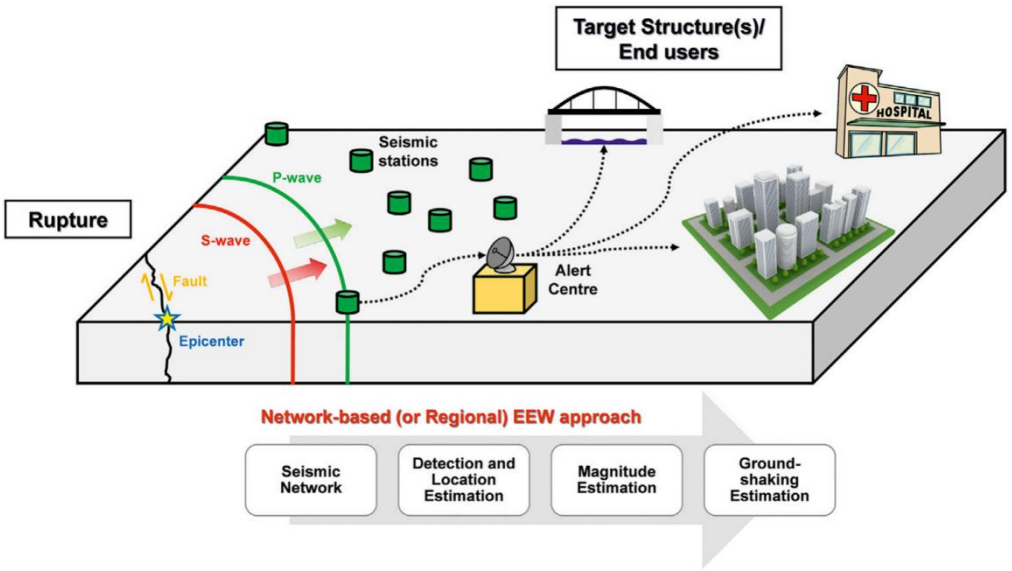
Beberapa kejadian gempa dari sumber yang belum terpetakan dalam Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 pernah terjadi di Sumatra Barat. Gempa tersebut adalah gempa magnitudo M_w 6,1 di Pasaman Barat 2022 (Supendi dkk., 2023a) dan gempa magnitudo M_w 5,3 di Solok Selatan 2019.

Meskipun termasuk daerah dengan aktivitas seismik yang tinggi, Sumatra Barat giat melakukan pembangunan. Di Padang, ibukota Sumatra Barat terdapat dua gedung dengan kategori gedung bertingkat tinggi *(high rise building)*. *High rise building* adalah gedung dengan ketinggian 40 – 150 meter atau 10 – 40 lantai. Selain itu, di Padang banyak berdiri gedung bertingkat menengah (*middle rise building*) yaitu gedung dengan ketinggian 15 – 40 meter atau 5 – 10 lantai (Manalip dkk., 2014). Gedung-gedung tersebut dibangun pascagempa Padang 2009. Selain itu, terdapat beberapa pembangunan Proyek Strategis Nasional (PSN) seperti pembangunan jalan tol Padang – Pekanbaru yang salah satu trasenya akan membuat terowongan pada seksi Payakumbuh – Pangkalan dan Jembatan Layang Sitinjau Lauik yang berada di Bukit Barisan. Sumatra Barat juga memiliki kawasan industri Padang *Industrial Park* (PIP) yang berada di Padang Pariaman.

Sehubungan dengan tingginya aktivitas gempa bumi di Sumatra Barat, perlu dilakukan mitigasi untuk mengurangi dampak gempa bumi. Salah satu langkah tersebut adalah pengembangan peringatan dini gempa bumi. Peringatan dini gempa bumi atau *Earthquake Early Warning* (EEW) didasarkan pada dua konsep utama, yaitu: (1) informasi peringatan yang disampaikan melalui gelombang elektromagnetik bergerak lebih cepat daripada gelombang seismik dan (2) sebagian besar energi gempa dibawa oleh gelombang S dan gelombang permukaan yang tiba

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

setelah gelombang P yang memiliki kecepatan lebih cepat dan beramplitudo lebih rendah (Cremen & Galasso, 2020).



Gambar 1.1 Ilustrasi sistem peringatan dini gempa bumi (Zuccolo dkk., 2021)

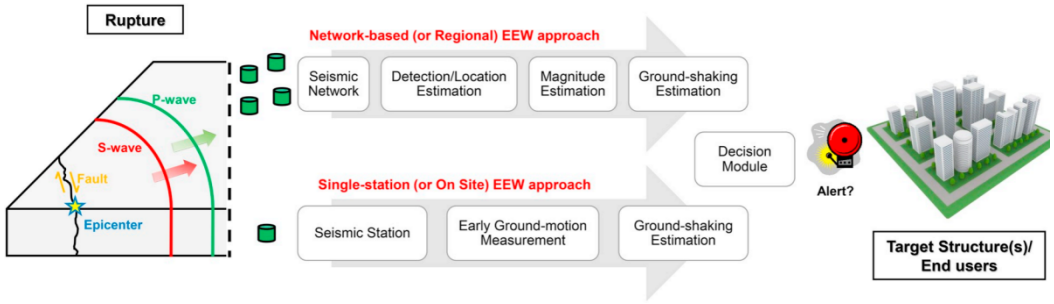
Peringatan dini gempa bumi bertujuan memberikan pemberitahuan awal mengenai prakiraan guncangan gempa yang akan terjadi agar dampak dapat diminimalkan terutama terhadap infrastruktur umum (Gambar 1.1). Meskipun waktu peringatan singkat, hal ini dapat mengurangi dampak gempa pada berbagai sektor. Sebagai contoh, masyarakat dapat mengambil tindakan perlindungan *drop, hold,* dan *cover* sebelum guncangan gempa terjadi. Selain itu, beberapa sistem dapat melakukan otomatisasi seperti penghentian kereta berkecepatan tinggi dan penutupan pipa gas untuk mencegah kecelakaan dan kebakaran.

Seiring dengan perkembangan teknologi, metode pemelajaran mesin (*machine learning*) dan metode pemelajaran mendalam (*deep learning*) muncul sebagai alat untuk kaji cepat gempa bumi. Metode ini memberikan peningkatan dalam berbagai tugas, misalnya estimasi magnitudo (Mousavi & Beroza, 2022) dan *Peak Ground Acceleration* (PGA) atau percepatan puncak tanah (Jozinović dkk., 2022). Selain itu, untuk penentuan hiposenter dapat dilakukan berbasis waktu perjalanan atau *travel time* dengan menggunakan *machine learning*, termasuk

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

random forest (Chen dkk., 2022; Saad dkk., 2022) dan jaringan saraf yang terhubung sepenuhnya atau *fully connected neural network* (Anikiev dkk., 2022). Pendekatan ini mungkin efektif untuk peringatan dini gempa bumi di mana hiposenter harus diperkirakan secara kasar menggunakan data waktu tiba dalam jumlah yang kecil dan sedini mungkin (Saad dkk., 2022).

Metode peringatan dini gempa dibagi menjadi dua kelas utama, yaitu berbasis estimasi regional dan berbasis *onsite*. Kedua metode tersebut diilustrasikan pada Gambar 1.2. Metode berbasis estimasi regional memperkirakan sifat-sifat sumber dari sebuah gempa, yaitu lokasi, luas sesar dan magnitudonya. Metode tersebut kemudian menggunakan persamaan prediksi guncangan tanah atau *ground motion prediction equation* (GMPE) untuk memperkirakan guncangan di lokasi target. Metode ini memberikan waktu peringatan yang lama, tetapi menimbulkan ketidakpastian aleatorik karena asumsi sederhana dalam estimasi sumber dan GMPE (Kodera dkk., 2018). Metode berbasis propagasi memperkirakan guncangan di lokasi tertentu dari pengukuran di stasiun seismik terdekat. Prediksi lebih akurat, tetapi waktu peringatannya berkurang karena peringatan memerlukan pengukuran guncangan kuat di stasiun terdekat (Meier dkk., 2020).

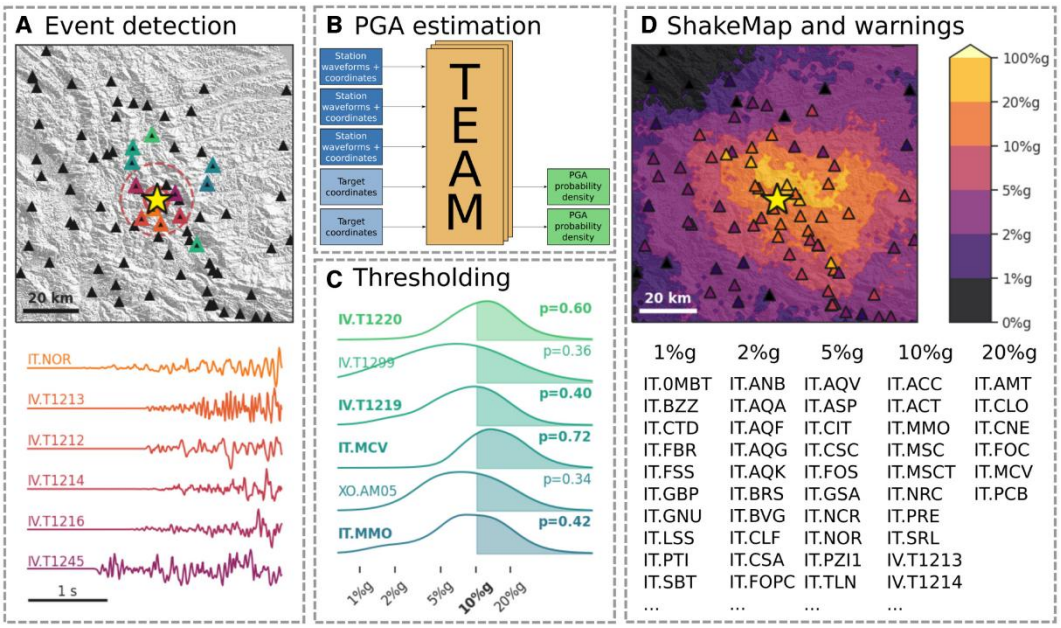


Gambar 1.2 Gambaran konseptual dari proses EEW (Cremen & Galasso, 2020)

Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) merupakan metode *deep learning* untuk peringatan dini gempa yang menggabungkan kelebihan kedua kelas EEW (Münchmeyer dkk., 2021b). Proses peringatan dini TEAM melibatkan tiga langkah, yaitu deteksi gempa bumi, estimasi PGA, dan penentuan ambang batas (Gambar 1.3). Gempa bumi akan terdeteksi beberapa detik setelah terdeteksi di

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

beberapa stasiun seismik. Estimasi PGA akan menghasilkan distribusi probabilitas PGA untuk sekumpulan lokasi target yang diberikan. Pada langkah terakhir, TEAM mengeluarkan peringatan untuk setiap lokasi target di mana probabilitas melebihi ambang batas yang diprediksi untuk PGA yang telah ditetapkan.



Gambar 1.3 Tampilan skematik dari alur kerja TEAM untuk gempa Norcia Oktober 2016 (M_w 6,5) 2,5 detik setelah gelombang P pertama tiba. (a) Sebuah kejadian terdeteksi melalui pemicu di beberapa stasiun seismik. (b) *Waveform* dan koordinat stasiun digunakan untuk memperkirakan probabilitas untuk PGA target (c) Probabilitas melebihi ambang batas untuk sekumpulan ambang batas α yang ditetapkan. Jika probabilitas melebihi ambang batas, maka peringatan akan dikeluarkan. (d) Peta tingkat PGA tertinggi di mana peringatan dikeluarkan (Münchmeyer dkk., 2021b).

Münchmeyer dkk. (2021a) mengembangkan model untuk estimasi magnitudo dan lokasi gempa secara *real-time* berdasarkan ide-ide inti dari TEAM yang diberi nama TEAM-Location and Magnitudo (TEAM-LM). TEAM-LM terdiri dari tiga komponen utama, yaitu: (a) ekstraksi fitur yang menghasilkan fitur dari *waveform* di setiap stasiun, (b) kombinasi fitur yang menggabungkan fitur dari beberapa stasiun, dan (c) estimasi *output*.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Dengan melihat kondisi tektonik, riwayat kegempaan, dan pembangunan di Sumatra Barat, penulis akan melakukan penelitian peringatan dini gempa menggunakan algoritma TEAM dan TEAM-LM. Penulis akan mengoptimalkan model tersebut dengan membuat ulang model menggunakan data gempa bumi dari jaringan Indonesia Tsunami *Early Warning System* (InaTEWS) Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) di Sumatra Barat dan sekitarnya. Model tersebut diharapkan mampu menghasilkan magnitudo, hiposenter, PGA dan waktu peringatan gempa bumi untuk EEW di Sumatra Barat.

Penelitian ini sejalan dengan roadmap EEW Indonesia sebagaimana dirancang oleh BMKG yang saat ini memasuki fase pengembangan menuju sistem masa depan bernama InaEEWS (Indonesia *Earthquake Early Warning System*) pada tahun 2030. Fase tersebut menekankan pentingnya integrasi teknologi sensor baru, transfer data *real-time*, komputasi kompleks, serta penerapan metode kecerdasan buatan (*artificial intelligence*). Dengan memanfaatkan model *deep learning* berbasis arsitektur transformer seperti TEAM dan TEAM-LM, penelitian ini berkontribusi langsung terhadap pengembangan *information-intelligence-based* EEWS.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dikaji diantaranya:

a. Bagaimana cara mengimplementasikan algoritma TEAM dan TEAM-LM dalam peringatan dini gempa bumi di Sumatra Barat?
b. Bagaimana efektivitas TEAM-LM dibandingkan dengan sistem pengolahan gempa bumi yang digunakan BMKG?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang dibuat, perlu ada batasan pembahasan agar sesuai dengan tujuan akhir penelitian. Ruang lingkup pembahasan dibatasi pada beberapa hal di antaranya adalah:

a. Sistem dianggap memiliki nilai latensi nol
b. Waktu tiba gelombang P sudah tercuplik dan tidak dilakukan pemeriksaan kualitas pencuplikan secara kuantitatif.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

c. Model dibatasi hanya untuk Sumatra Barat.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini sebagai berikut:

a. Mengimplementasikan algoritma TEAM dan TEAM-LM dalam peringatan dini gempa bumi di Sumatra Barat.
b. Mengevaluasi efektivitas TEAM dan TEAM-LM dibandingkan dengan sistem pengolahan gempa bumi yang digunakan BMKG.

1.5 Manfaat

Berikut ini beberapa manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini :

a. Memberikan studi kasus, memperkaya literatur ilmiah dengan data relevan dengan penelitian gempa bumi di Sumatra Barat.
b. Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi perencanaan pembangunan peringatan dini gempa bumi di Indonesia

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Peringatan Dini Gempa Bumi

Konsep peringatan dini gempa bumi telah ada selama lebih dari satu abad, tetapi instrumen dan metodologi yang diperlukan baru dikembangkan dalam tiga dekade terakhir (Allen & Melgar, 2019). Penerapan EEW didorong oleh munculnya instrumentasi seismik digital dan komunikasi digital untuk mengumpulkan data dan mengeluarkan peringatan. Ketersediaan teknologi ini memacu perluasan jaringan seismik dan data yang dihasilkan menyempurnakan model gempa untuk menyediakan kerangka kerja guna menghasilkan peringatan.

Perkembangan Sistem EEW didorong oleh beberapa gempa bumi kunci. Salah satu yang paling signifikan adalah gempa bumi Meksiko M8,1 tahun 1985 yang menyebabkan lebih dari 20.000 kematian. Gempa ini menunjukkan adanya jeda waktu lebih dari satu menit antara deteksi oleh stasiun seismik di pesisir pantai dan dirasakannya guncangan di kota Meksiko (Gambar 2.1). Gempa tersebut mendorong pengoperasian sistem EEW di Meksiko pada tahun 1991.

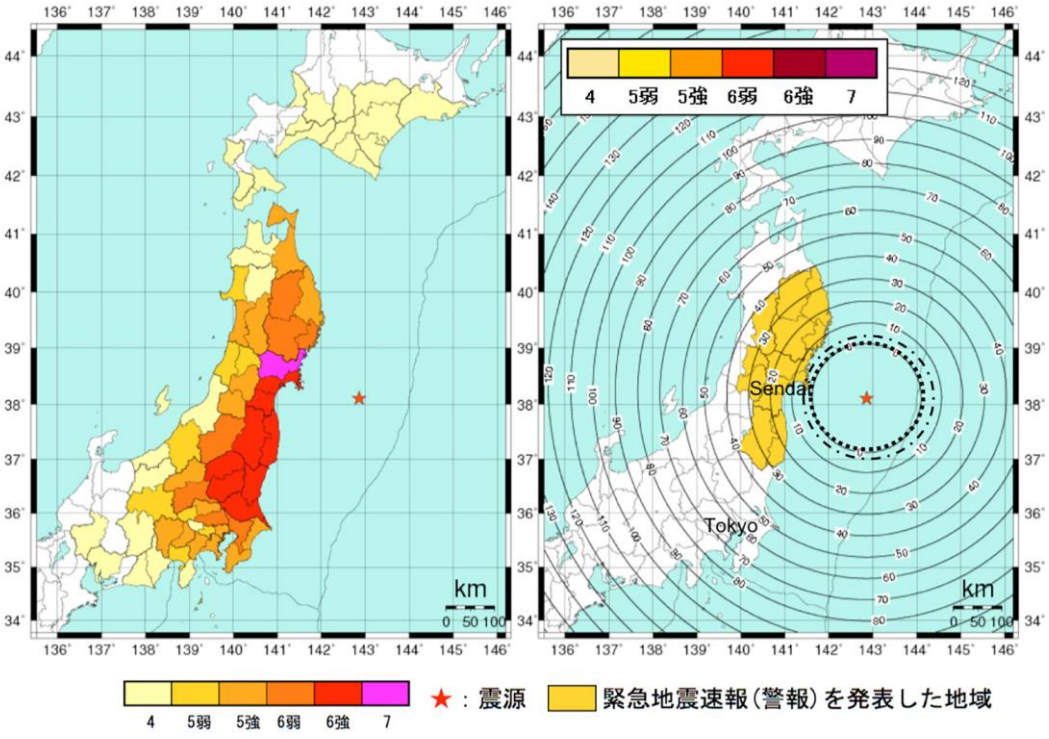


Gambar 2.1 Sistem peringatan dini gempa Meksiko (Sumber cires.org.mx diakses 14 Agustus 2024 dengan modifikasi). Bintang merah merupakan lokasi episenter gempa Meksiko 1985. Kotak biru merupakan kota Meksiko. Lingkaran oranye merupakan ketersedian waktu peringatan dini gempa.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gempa kedua adalah gempa Kobe M6,9 pada tahun 1995 yang menewaskan lebih dari 6.000 orang. Gempa tersebut memotivasi peningkatan jaringan seismik di Jepang. Hasilnya Jepang mulai menyediakan informasi peringatan dini gempa kepada publik pada tahun 2007. Gempa selanjutnya adalah gempa M 7,9 di Wenchuan, Tiongkok pada tahun 2008 yang menewaskan 70.000 orang. Gempa tersebut juga memacu pengembangan sistem EEW di negara tersebut.

Gempa keempat adalah gempa M9,1 Tohoku 2011 di Jepang menjadi ujian sistem EEW. Korban jiwa akibat gempa tersebut jauh lebih sedikit dibandingkan dengan yang disebabkan oleh gempa-gempa mematikan lainnya (M_w > 6,6) pada abad ini (Tajima & Hayashida, 2018). Banyak negara lain mengaitkan jumlah korban jiwa yang lebih sedikit dengan sistem EEW skala besar dan berencana untuk memasang sistem yang serupa dengan Jepang.



(a) (b)

Gambar 2.2 Perbandingan peta intensitas gempa Tohoku-Oki 2011 dari hasil observasi di lapangan (a) dengan hasil EEW (b) (Wald, 2020)

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Pada tahun 2011, sistem EEW *Japan Meteorological Agency* (JMA) menggunakan algoritma berbasis sumber yang berupa titik untuk menentukan lokasi gempa berdasarkan waktu kedatangan gelombang P dan memperkirakan magnitudo dari beberapa detik awal gelombang tersebut. Peringatan EEW diberikan di Sendai dengan intensitas JMA 5 bawah, tetapi intensitas yang terjadi justru JMA 7 yang mana terjadi kerusakan yang cukup parah (Gambar 2.2). Gempa menyebabkan getaran yang lebih luas daripada yang diprediksi oleh algoritma EEW karena perkiraan magnitudo mencapai batas maksimal di M 8.1 dan tidak ada informasi mengenai panjang patahan yang memicu gempa. Padahal patahan gempa tersebut memanjang hingga 400 km ke selatan dan menyebabkan getaran kuat di Kanto, Tokyo. Selain itu, algoritma sering salah melakukan asosiasi rangkaian gempa susulan dengan gempa lain yang terjadi bersamaan. Hal tersebut mengakibatkan peringatan berkualitas rendah selama beberapa minggu (Hoshiba, 2014). Gempa Tohoku 2011 menunjukkan perlu pengembangan EEW.

Terakhir, gempa bumi M 7,1 di Puebla, Meksiko pada tahun 2017. Gempa ini mengakibatkan kerusakan di Puebla, Morelos, dan Kota Meksiko. Gempa ini terjadi bertepatan dengan peringatan 32 tahun gempa bumi Kota Meksiko 1985. Gempa ini menjadi ujian signifikan bagi sistem EEW di Meksiko. Peringatan dini berhasil diberikan ke masyarakat, memberikan wawasan berharga tentang respons publik dan sikap terhadap sistem peringatan dini gempa.

Böse dkk. (2018) memperkenalkan *Finite-Fault Rupture Detector* atau Finder yang merupakan metode peringatan dini gempa berbasis sumber pendekatan. Finder melakukan pemodelan yang menghasilkan serangkaian parameter *output* dan estimasi ketidakpastian yang konsisten untuk gempa kecil atau moderat ($\leq M$6,5) dan besar ($> M$6,5). Pendekatan ini menganggap gempa sebagai patahan garis dengan dimensi yang bervariasi sesuai dengan besarnya gempa. Panjang patahan diperkirakan dari amplitudo percepatan puncak frekuensi tinggi yang diamati pada jaringan seismik lokal. Pola gerakan tanah yang diamati dibandingkan dengan yang dimodelkan dari persamaan prediksi gerakan tanah empiris untuk menentukan sumber terbaik dan ketidakpastian yang terkait.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Finder diuji secara luring untuk gempa M7,0 Kumamoto, Jepang 2016 dan gempa M6,0 Napa Selatan, California 2014, serta untuk sekitar 100 gempa lokal yang terdeteksi secara waktu nyata atau *real time* ($2{,}2 \leq M \leq 5{,}1$) di California. Finder dapat menentukan sebagian besar gempa bumi panjang patahan dalam beberapa detik (< 10 detik) dari waktu kejadian. Finder memungkinkan pemberian peringatan hingga beberapa puluh detik sebelum gempa besar terjadi, menyelesaikan ambiguitas bidang patahan dan mengidentifikasi patahan yang aktif untuk gempa kecil M2,5.

Kodera dkk. (2018) memperkenalkan *Propagation of Local Undamped Motion* (PLUM) yang merupakan metode peringatan dini gempa berbasis propagasi. Metode ini didasari gempa bumi Tohoku di Jepang tahun 2011. metode PLUM memakai pendekatan estimasi medan gelombang sederhana yang memprediksi intensitas seismik langsung dari intensitas seismik *real time* yang diamati di dekat lokasi target. Metode PLUM dapat mengungguli pendekatan model sumber yang berupa titik dalam hal (a) prediksi guncangan yang akurat untuk gempa besar dengan patahan terbatas dan (b) mendeteksi gempa kuat dalam rangkaian gempa yang kompleks. Di sisi lain, waktu peringatan yang tersedia yang disediakan oleh metode PLUM tidak lama.

Kodera dkk. (2018) memperkenalkan metode hibrida yang merupakan gabungan metode PLUM dan pendekatan model sumber yang berupa titik untuk memaksimalkan waktu peringatan yang tersedia dan menghindari kehilangan deteksi gerakan kuat. Metode PLUM dan hibrida diterapkan pada gempa Tohoku-Oki 2011. Kedua metode tersebut mampu memprediksi gerakan kuat yang akurat dan memberikan waktu peringatan yang cukup di sebagian besar area. Untuk rangkaian gempa susulan, metode PLUM mendeteksi dan memproses gempa besar meskipun ada aktivitas seismik yang sangat intens. Analisis statistik menggunakan gempa susulan dan gempa induksi menunjukkan bahwa metode PLUM dan hibrida dapat memprediksi guncangan kuat lebih akurat daripada pendekatan model sumber yang berupa titik dari JMA.

Münchmeyer dkk. (2021b) memperkenalkan TEAM yang merupakan sebuah metode *deep learning* untuk peringatan dini yang menggabungkan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

keunggulan dari kedua strategi peringatan klasik. TEAM dievaluasi pada himpunan data atau *dataset* Jepang dan Italia. TEAM dibandingkan dengan dua metode peringatan terkini yang satu prototipikal untuk peringatan berbasis sumber dan berbasis propagasi.

TEAM secara konsisten mengungguli kedua metode pada berbagai waktu peringatan yang dibutuhkan dan terlepas dari ambang batas PGA. Selisih keunggulan TEAM dibandingkan *baseline* lebih kecil untuk Italia dibandingkan Jepang. Metode dengan pendekatan sumber titik berkinerja lebih buruk pada waktu peringatan pendek dan pendekatan berbasis PLUM berkinerja lebih buruk pada waktu peringatan lebih lama. Hal ini disebabkan oleh konsep utama PLUM yang membuat metode ini hanya kompetitif pada ambang batas PGA tinggi, di mana waktu peringatan maksimum pendek karena kedekatan antara stasiun dengan guncangan kuat dan episenter. TEAM juga mengungguli metode dengan pendekatan sumber titik dan pendekatan berbasis PLUM untuk kedua *dataset* dan semua ambang batas PGA.

Münchmeyer dkk. (2021a) mengembangkan model TEAM-Location and Magnitude (TEAM-LM) untuk estimasi magnitudo dan hiposenter berdasarkan model TEAM yang hanya dapat memperkirakan PGA di lokasi target. TEAM-LM telah diuji pada tiga *dataset* besar dan beragam yaitu Chili, Jepang, dan Italia.

Kinerja estimasi magnitudo TEAM-LM mengungguli *baseline* klasik dalam estimasi magnitudo di semua *dataset*. TEAM-LM 0,5 detik lebih akurat dibanding *baseline* klasik dengan 25 detik di *dataset* Chili dan Italia, sedangkan di *dataset* Jepang membutuhkan seperempat waktu dibanding *baseline* klasik untuk mencapai presisi yang sama dan mencapai presisi lebih tinggi setelah 25 detik.

Kinerja estimasi lokasi TEAM-LM mampu mengungguli baseline *deep learning* (van den Ende & Ampuero, 2020). TEAM-LM menunjukkan kinerja terbaik pada *dataset* Chili dengan sedikit *outlier*, sementara pada *dataset* Italia dan Jepang terdapat lebih banyak *outlier* akibat distribusi pelatihan yang kurang padat di beberapa wilayah. Di *dataset* Jepang, *outlier* terbesar terkait dengan banyaknya gempa di lepas pantai yang menyebabkan cakupan azimutal yang buruk.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Pengurangan jumlah data pelatihan berpengaruh signifikan terhadap peningkatan akar kuadrat dari rata-rata kesalahan kuadrat atau *root mean square error* (RMSE) dalam estimasi magnitudo. Pengurangan *dataset* hingga seperempat menyebabkan peningkatan dua kali lipat RMSE di waktu akhir. Untuk konteks peringatan dini, pengurangan dataset empat kali lipat menyebabkan peningkatan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai presisi yang sama hingga empat kali lipat.

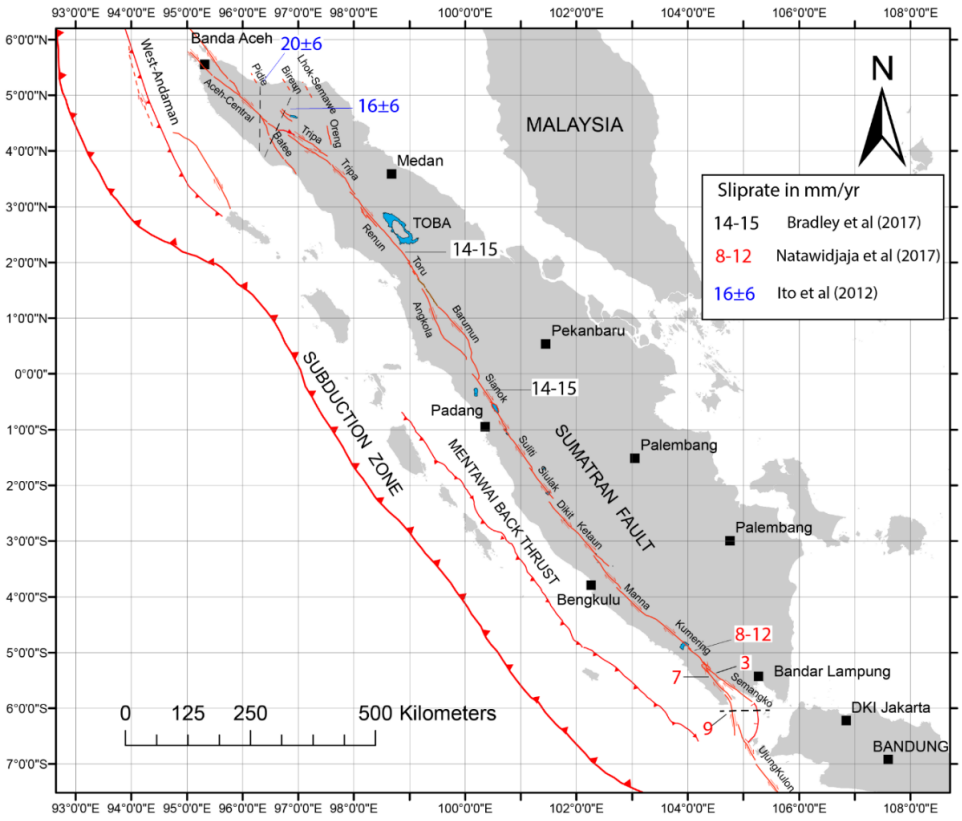
Chang dkk., (2023 mengoptimalkan model TEAM menggunakan data seismik dari 1.259 gempa Taiwan untuk membuat *Taiwan Transformer Shaking Alert Model* (TTSAM). Model ini diuji dengan 129 gempa bumi pada tahun 2016 yang mana terdapat gempa Meinong M_W 6,4 dan Taitung M 6,15. Hasil uji peringatan dini menunjukan TTSAM mulai melakukan estimasi intesitas 3 detik setelah inisial gelombang P terdeteksi. Nilai presisi dan *recall* dari TTSAM adalah 59% dan 56% setelah 5 detik. Untuk gempa Meinong, nilai presisi dan *recall* masing-masing mencapai 96% dan 55%. Selain itu, rata-rata waktu peringatan adalah 12,4 detik. TTSAM memberikan analisis cepat dengan tingkat presisi yang tinggi, sehingga sangat bermanfaat untuk sistem peringatan dini gempa.

2.2 Kondisi Tektonik Sumatra Barat

Sumatra Barat merupakan bagian dari Pulau Sumatra yang merupakan zona busur Sunda bagian barat. Pulau Sumatra adalah hasil dari tumbukan benua yang terjadi sejak akhir Paleozoikum hingga akhir Mesozoikum. Barber & Crow (2008) menyimpulkan bahwa tumbukan antara Blok Indochina dan Blok Sibumasu terjadi pada akhir Permian. Tumbukan ini tidak ditandai dengan sutura, melainkan oleh zona akresi luas yang dikenal sebagai Kompleks Akresi Bentong-Raub. Blok Sumatra Barat terpisah dari Blok Indochina Tenggara sepanjang sesar geser mendatar kanan (Barber dkk., 2005), yang kemudian dikenal sebagai Zona Tektonik Medial Sumatra. Penyebaran Meso-Tethys memberikan mekanisme tektonik untuk propagasi Zona Tektonik Medial Sumatra pada awal Trias. Obduksi Napal Woyla di atas Blok Sumatra Barat pada akhir Kapur menandai berakhirnya penggabungan Sumatra.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Penunjaman Lempeng Indo-Australia dari arah selatan di busur Sunda bagian barat membuat sudut miring dengan arah subduksi adalah N 30° E di sebelah barat Sumatra (Gambar 2.3). Penunjaman yang miring terhadap arah interaksi menimbulkan pola struktur perpaduan antara bentuk palung-busur dan sesar mendatar. Pola palung-busur membentuk Jalur Benioff atau jalur subduksi yang lebar dengan deretan pulau-pulau sebelah barat Sumatra yang terdiri dari melange. Diperkirakan bahwa komponen konvergensi palung-normal adalah ~45 mm/tahun, dan komponen paralel palung adalah ~29 mm/tahun (Natawidjaja, 2007).



Gambar 2.3 Kondisi Tektonik di Pulau Sumatra yaitu zona subduksi, Sesar Mentawai, dan Sesar Sumatra (Natawidjaja, 2018)

Komponen paralel palung sebagian besar diakomodasi oleh *dip-slip* pada Sesar Besar Sumatra atau *Great Sumatra Fault (GSF)* yang terdiri dari jaringan kompleks patahan geser di darat dan lepas pantai, beberapa di antaranya tampak

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

terkunci (Ghosal dkk., 2012). Sesar ini terbentuk pada Miosen Tengah karena mekanisme tektonik rotasi berlawanan arah jarum jam dari Sundaland (Hall & Blundell, 1996).

Sesar Besar Sumatra membentuk zona sesar yang kompleks dengan depresi-depresi dan tinggian-tinggian setempat. Sesar ini berasosiasi dengan busur vulkanik Sumatra yang di antaranya terdapat beberapa gunungapi aktif seperti Gunung Marapi, Gunung Tandikat, Gunung Talang, dan Gunung Kerinci di Sumatra Barat. Selain itu, di sepanjang sesar ini terdapat beberapa cekungan tarik-ulur atau *pull-apart basin*. *Pull-apart basin* terbentuk sebagai ekspresi dari tikungan yang melonggar dalam pengaturan tektonik transkurent. Secara keseluruhan, di Sumatra terdapat 14 *pull-apart basin* (Sutrisno dkk., 2019), di mana ada empat *pull-apart basin* yang berada di Sumatra Barat, yaitu Rao Graben, Singkarak, Gunung Talang dan Muaralabuh.

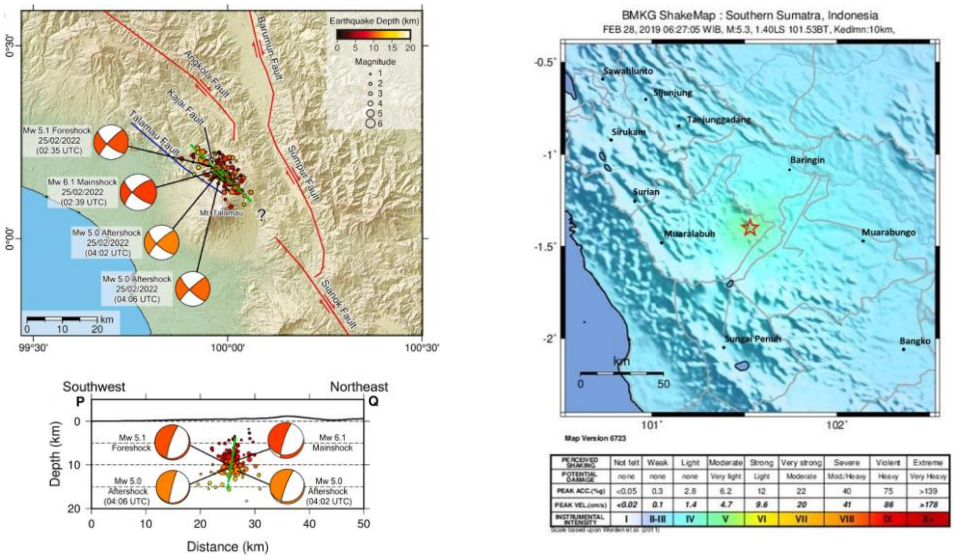
Sesar Sumatra terdiri dari 55 segmen (Irsyam dkk., 2017). Sebanyak tujuh segmen di antaranya terdapat di wilayah Sumatra Barat, yaitu Segmen Siulak, Segmen Suliti, Segmen Sumani, Segmen Sianok, Segmen Sumpur, Segmen Barumun dan Segmen Angkola. Berdasarkan Irsyam dkk. (2017), nilai *slip rate* Segmen Sumpur, Segmen Sianok, Segmen Sumani, Segmen Suliti dan Siulak memiliki nilai 14 mm/tahun, sedangan Segmen Angkola 6 mm/tahun dan Segmen Barumun 6,5 mm/tahun. Potensi magnitudo maksimum yang terjadi pada masing-masing segmen berbeda-beda dengan potensi tertinggi di Segmen Angkola sebesar 7,7 dan yang terendah di Segmen Sumpur dengan magnitudo sebesar 6,9 (Irsyam dkk., 2017).

Beberapa gempa bumi yang sumbernya belum terpetakan di dalam Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017 pernah terjadi di Sumatra Barat. Gempa bumi tersebut adalah gempa Solok Selatan M_w 5,3 pada 28 Februari 2019 dan Pasaman Barat M_w 6,1 pada 25 Februari 2022. Kedua gempa tersebut disebabkan oleh sesar geser mendatar ke kanan (*dextral strike-slip fault*).

Supendi dkk. (2023b) melakukan relokasi gempa pendahuluan, gempa utama, dan gempa susulan Pasaman Barat 2022 untuk mengungkapkan segmen baru sepanjang sekitar 20 km dari Sesar Sumatra sebagai hasil dari *dextral strike-*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

slip dengan arah N 132° E dan kemiringan 72° SW di sepanjang lokasi yang disebut sebagai Sesar Kajai (Gambar 2.4). Model inversi patahan menunjukkan satu asperitas kompak dengan kisaran kedalaman sekitar 2 – 11 km. Asperitas ini memanjang sekitar 14 km sepanjang jalur sesar dan sekitar 9 km ke arah bawah.

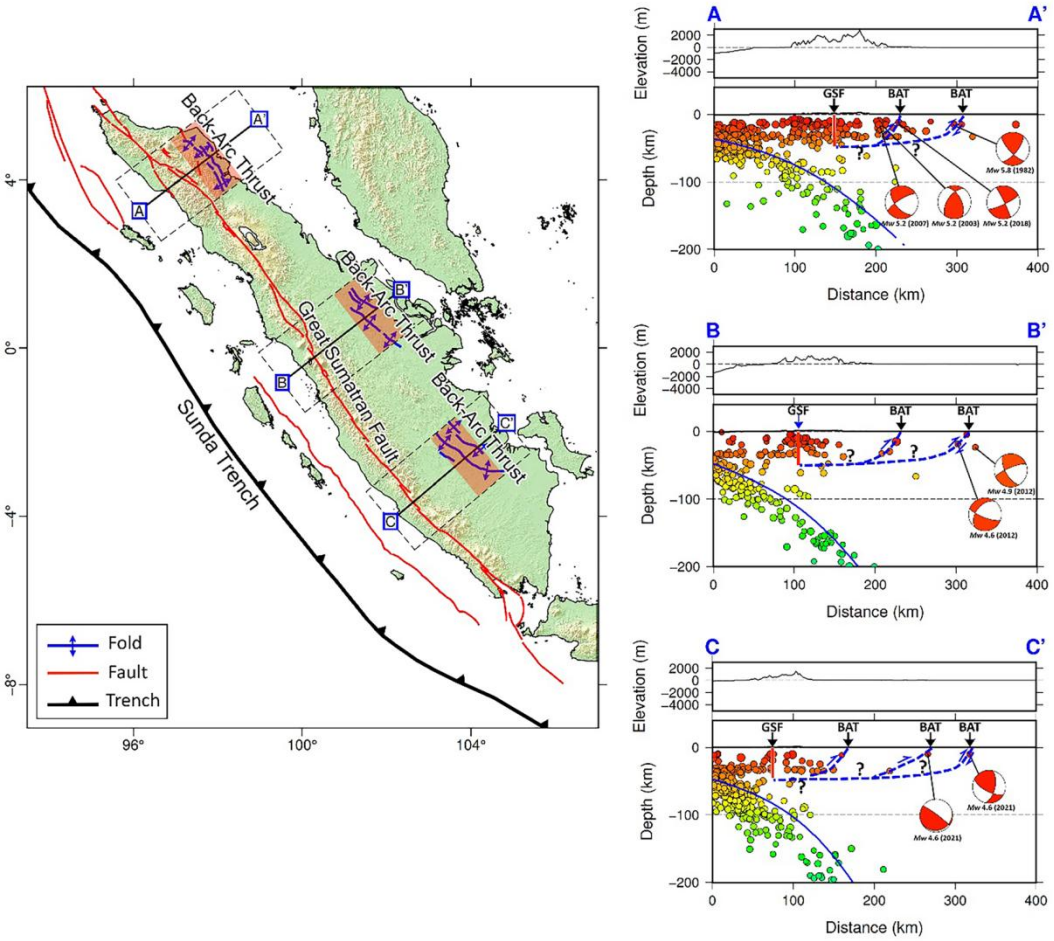


(a) (b)

Gambar 2.4 (a) Peta episenter dan mekanisme sumber gempa Pasaman Barat 2022. Garis hijau putus-putus menunjukkan perkiraan lokasi patahan. Potongan melintang barat daya-timur laut yang mengilustrasikan Sesar Kajai (Supendi dkk., 2023b). (b) Peta guncangan gempa bumi Solok Selatan. Bintang dengan garis merah adalah episenter gempa bumi, garis merah adalah Sesar Sumatra, dan garis abu-abu adalah batas kabupaten (Sumber: BMKG).

Sesar Mentawai terbentuk sebagai *backthrust* yang menjadi batas antara prisma akresi dan cekungan busur muka (Mukti dkk., 2012). Sesar ini tumbuh akibat mekanisme sistem sesar anjak yang bergerak maju ke arah busur sehingga struktur yang paling muda terbentuk di bagian timur. Proses penunjaman miring di sekitar Pulau Sumatra menyebabkan penyebaran vektor tegasan tektonik, yaitu slip vektor yang hampir tegak lurus dengan arah zona penunjaman. Vektor tegasan ini diakomodasi oleh mekanisme sistem sesar anjak dan terutama terletak di prisma akresi (Mukti dkk., 2012).

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 2.5 Peta yang menunjukkan lokasi kemungkinan adanya lempengan busur belakang di Pulau Sumatra (Widiyantoro dkk., 2024)

Penelitian terbaru dari Widiyantoro dkk. (2024) menyelidiki kemungkinan keberadaan patahan dorong busur belakang atau *back-arc thrust* di Sumatra. Widiyantoro dkk. (2024) memeriksa data gempa regional yang dilaporkan oleh BMKG, serta data gempa global yang dilaporkan oleh *International Seismological Centre* (ISC) dan *United States Geological Survey* (USGS). Patahan dorong busur belakang di daerah penelitian tidak berkembang secara luas dan tidak seperti di Busur Sunda timur. Hal tersebut mungkin disebabkan oleh subduksi miring di bawah busur depan Sumatra. Tekanan yang terkait dengan komponen palung-paralel dari subduksi sebagian besar diakomodasi oleh zona patahan geser menganan dari Sesar Sumatra Besar. Namun, data seismisitas dari berbagai sumber

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

menunjukkan bahwa ada zona seismogenik yang menurun di beberapa bagian wilayah busur belakang Sumatra dan berlawanan arah dengan subduksi lempeng Indo-Australia.

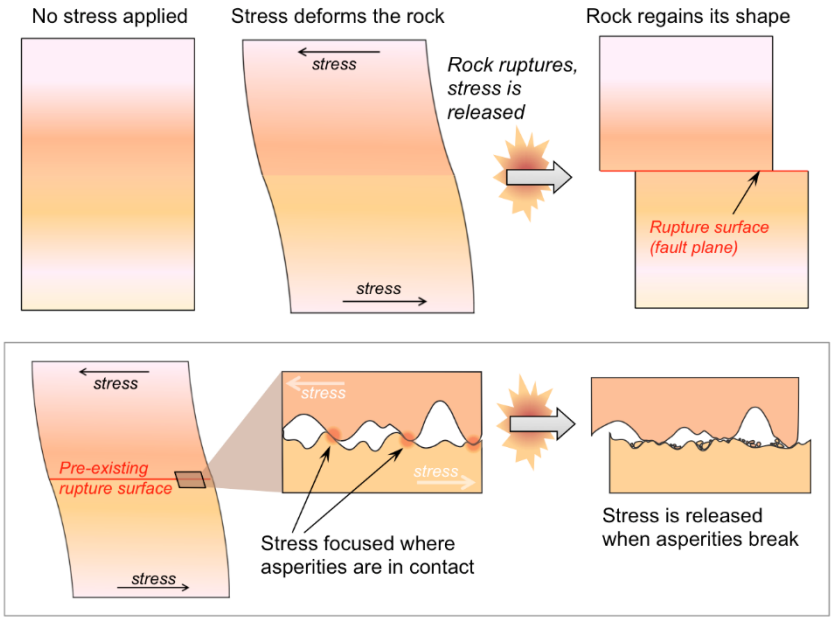
Back-arc thrust di Sumatra dapat dilihat di Gambar 2.5. Pada gambar tersebut area yang diarsir merah adalah perkiraan lokasi wilayah busur belakang. Panel di sebelah kanan menunjukkan penampang vertikal dengan interpretasi kemungkinan busur belakang yang ditunjukkan oleh garis putus-putus biru. Dalam gambar tersebut terdapat singkatan, yaitu Sesar Besar Sumatra untuk GSF dan *back-arc thrust* untuk BAT.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah peristiwa getaran yang terjadi di permukaan bumi akibat pelepasan energi yang mendadak di dalam bumi dan ditandai dengan retakan atau patahnya lapisan batuan di kerak bumi. Energi yang memicu terjadinya gempa bumi terkumpul dari pergerakan lempeng tektonik. Energi tersebut menyebar ke segala arah dalam bentuk gelombang seismik sehingga dampaknya dapat dirasakan hingga ke permukaan bumi.



Gambar 3.1 Deformasi elastis, patahan, dan pemulihan elastis (Panchuk, 2021)

Mekanisme gempa bumi dapat dijelaskan seperti pada Gambar 3.1. Pada gambar tersebut, jika terdapat dua gaya yang bekerja secara berlawanan pada batuan di kerak bumi, batuan tersebut akan terdeformasi karena sifat elastisitasnya. Jika gaya ini berlangsung dalam jangka waktu yang lama, daya dukung batuan akan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

mencapai batas maksimum dan mengakibatkan pergeseran dan patahan mendadak sepanjang bidang patahan. Setelah itu, batuan akan kembali stabil dan kembali ke bentuk aslinya melalui proses yang disebut pemulihan elastis, tetapi dengan bentuk atau posisi yang telah berubah. Pada saat batuan mengalami gerakan mendadak akibat pergeseran ini, energi *stress* yang tersimpan dilepaskan dalam bentuk getaran yang dikenal sebagai gempa bumi. Pada Gambar 3.1 bawah, pada patahan yang sudah ada, asperitas atau permukaan kasar mencegah batu di kedua sisi patahan untuk meluncur. Tekanan mendistorsi batu sampai asperitas pecah, melepaskan tekanan, dan menyebabkan batu tersebut kembali ke bentuk aslinya.

Energi gempa bumi dilepaskan dalam bentuk gelombang P (Primer) dan gelombang S (Sekunder) yang merambat melalui kerak bumi. Gelombang P merupakan gelombang kompresional yang dapat bergerak melalui medium padat dan fluida. Gelombang S merupakan gelombang geser yang hanya dapat melalui medium padat dan bergerak lebih lambat daripada gelombang P. Secara matematis, kecepatan gelombang P dan gelombang S dapat dinyatakan dengan rumus:

$$v_p = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4}{3}G}{\rho}} \tag{3.1}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{3.2}$$

di mana κ adalah modulus bulk (Pa), G adalah modulus geser (Pa), dan ρ adalah densitas (kg/m³).

Gempa bumi yang terjadi dicatat dalam seismogram yang dihasilkan oleh alat seismograf. Seismograf ini mencatat getaran tanah yang terjadi akibat lepasnya energi gempa dalam bentuk gelombang seismik. Beberapa parameter penting dari gempa yang dapat ditentukan dari seismogram antara lain waktu asal gempa (*origin time*), lokasi hiposenter dan magnitudo.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.1.1 Pecuplikan Waktu Kedatangan Gelombang Gempa Bumi

Secara tradisional, seismologis akan melakukan pencuplikan waktu kedatangan dengan mengamati secara visual pada seismogram. Hasil dari pencuplikan waktu kedatangan bergantung pada subyektifitas seismologis. Proses pencuplikan manual memberikan hasil yang baik, namun proses ini memakan waktu karena jumlah data seismik yang besar. Selain itu, proses pencuplikan manual terkadang mengalami kesulitan ketika memiliki rasio sinyal terhadap noise atau *signal to noise ratio* (SNR) yang rendah.

Banyak penelitian telah mengusulkan algoritma pencuplikan waktu kedatangan otomatis. Salah satu metode yang sering digunakan adalah pendekatan berdasarkan rasio *short-term average* (STA) terhadap *long-term average* (LTA) atau STA/LTA dan *Autoregressive* Akaike Information Criterion (AR-AIC).

a. STA/LTA

STA/LTA mengukur rata-rata nilai absolut dari serangkaian sinyal menggunakan dua jendela waktu bergerak, yaitu jendela rata-rata waktu pendek (STA) dan jendela rata-rata waktu panjang (LTA). Jendela STA lebih sensitif terhadap peristiwa seismik karena mengukur amplitudo dalam waktu yang singkat. Jendela LTA berfungsi untuk memperoleh informasi *background noise* yang biasanya memiliki periode yang lebih panjang.

Waktu kedatangan gempa bumi di dalam STA/LTA dapat dinyatakan ketika rasio melebihi parameter ambang batas tertentu yang dihitung pada jendela geser yang bergerak. Secara visual, identifikasi waktu kedatangan gempa dari kurva STA/LTA ditunjukkan oleh lonjakan yang lebih tinggi dari kurva secara keseluruhan. STA/LTA terdapat beberapa jenis, yaitu klasik, *carl* (Polkowski dkk., 2016), dan *recursive* STA/LTA (Grigoli dkk., 2014). Persamaan klasik STA/LTA ditunjukkan di bawah ini:

$$STA_{(i)} = \frac{1}{N_{STA}} \left(\sum_{j=i-N_{STA}}^{i} A_j \right) \tag{3.3}$$

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$$LTA_{(i)} = \frac{1}{N_{LTA}} \left(\sum_{j=i-N_{LTA}}^{i} A_j \right) \quad (3.4)$$

$$RSL_{(i)} = \frac{(STA)_{(i)}}{(LTA)_{(i)}} \quad (3.5)$$

Di mana STA adalah jendela waktu yang pendek, N_{STA} adalah panjang jendela STA, A_j adalah amplitudo sinyal dalam jendela waktu, LTA adalah jendela waktu yang panjang, N_{LTA} adalah panjang jendela LTA, dan RSL adalah rasio dari STA dan LTA, i adalah indeks waktu saat ini, dan j adalah indeks iterasi untuk menghitung rata-rata amplitudo.

Recursive STA/LTA merupakan modifikasi dari *classic* STA/LTA yang lebih efisien dalam menghitung rasio karena menggunakan pendekatan rekursif untuk memperbarui nilai STA dan LTA. Hal ini mengurangi jumlah operasi perhitungan yang diperlukan. *Recursive* STA/LTA memiliki rumus dasar:

$$STA_{(i+1)} = \frac{1}{N_{STA}} (A_i - STA_i) + STA_i \quad (3.6)$$

$$LTA_{(i+1)} = \frac{1}{N_{LTA}} (A_i - LTA_i) + LTA_i \quad (3.7)$$

$$RSL_{(i+1)} = \frac{(STA)_{(i+1)}}{(LTA)_{(i+1)}} \quad (3.8)$$

di mana i menyatakan waktu ke-*i,* $STA_{(i)}$adalah jendela waktu pendek pada waktu ke-*i*, N_{STA} adalah panjang jendela *STA*, A_i adalah amplitudo sinyal pada waktu ke-*i*, $LTA_{(i)}$adalah jendela waktu panjang pada waktu ke-*i*, N_{LTA} adalah panjang jendela LTA, dan RSL adalah rasio STA dan LTA.

b. AR-AIC

Metode AR-AIC menggunakan model *autoregresif* untuk menyesuaikan diri dengan karakteristik sinyal dan mengidentifikasi titik perubahan dalam sinyal menggunakan kriteria informasi Akaike.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$$AIC = n \ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2k \tag{3.9}$$

di mana n adalah jumlah data, SSE adalah jumlah dari galat kuadrat dari model autoregresif, dan k adalah jumlah parameter.

3.1.2 Interpolasi Sinyal Seismograf

Sinyal seismograf adalah representasi digital dari getaran tanah akibat aktivitas seismik yang biasanya direkam dalam domain waktu. Data ini sering kali berbentuk deret waktu diskrit dengan interval sampling tetap. Namun, keterbatasan interval sampling, ketidaksesuaian antara sinyal dari berbagai stasiun, dan kehilangan data yang membuat data tidak kontinyu menyebabkan adanya kebutuhan interpolasi.

Salah satu metode interpolasi adalah metode lanczos yang yang menggunakan fungsi sinc terpotong (*truncated sinc*) sebagai inti (kernel) interpolasi. Metode ini banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk analisis sinyal, gambar, dan data seismograf. Interpolasi Lanczos didasarkan pada fungsi kernel Lanczos yang merupakan fungsi sinc yang dimodulasi untuk mengurangi efek aliasing (Lanczos, 1950, 1952). Kernel Lanczos didefinisikan sebagai:

$$L(x) = \begin{cases} sinc(x) \cdot sinc\left(\frac{x}{a}\right), & jika - a < x < a \\ 0, & lainnya \end{cases} \tag{3.10}$$

di mana $sinc(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ untuk x $\neq$ 0, $sinc(0) = 1$, $sinc\left(\frac{x}{a}\right)$ adalah fungsi jendela yang membuat kernel Lanczos terbatas dan lebih *smooth*, x adalah jarak terhadap pusat kernel, $L(x)$ sebagai fungsi bobot kernel Lanczos, dan a adalah parameter panjang kernel Lanczos.

Interpolasi Lanczos menawarkan fleksibilitas melalui parameter kernel α yang memungkinkan pengguna menyesuaikan antara kecepatan dan akurasi sesuai kebutuhan. Kernel pendek menghasilkan interpolasi cepat, sedangkan kernel panjang meningkatkan akurasi untuk sinyal kompleks. Metode ini sangat cocok untuk data dengan variasi cepat atau osilasi tinggi, seperti gelombang P dan S dalam

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

data seismograf serta dapat diterapkan secara efektif pada data berdimensi tinggi seperti data seismik 3D atau citra digital.

Interpolasi Lanczos memiliki beberapa keterbatasan yaitu komputasi lebih mahal karena membutuhkan perhitungan kernel yang lebih kompleks, sehingga lebih lambat untuk dataset besar. Selain itu, interpolasi Lanczos sensitif terhadap parameter kernel. Pemilihan parameter a sangat memengaruhi hasil interpolasi. Kernel yang terlalu pendek dapat mengurangi akurasi, sedangkan kernel yang terlalu panjang dapat memperkenalkan noise tambahan.

3.1.3 Respon Alat Seismograf

Respon alat dalam seismograf memengaruhi bagaimana gelombang seismik direkam dan dianalisis. Setiap seismograf memiliki karakteristik respon yang harus dikalibrasi dan dikoreksi selama proses analisis data seismik. Kalibrasi ini penting untuk memastikan bahwa data yang direkam mencerminkan gerakan tanah yang sebenarnya tanpa distorsi yang diakibatkan oleh karakteristik mekanik atau elektronik alat.

Respon alat dari data seismograf dalam analisis dapat dihilangkan untuk memperoleh sinyal yang merepresentasikan pergerakan tanah sebenarnya. Respon alat dapat mencakup faktor-faktor seperti penguatan sinyal dan respons frekuensi, yang harus dihilangkan untuk analisis yang akurat. Proses ini umumnya dilakukan menggunakan fungsi transfer dari instrumen yang menggambarkan bagaimana alat tersebut merespons berbagai frekuensi. Dengan menerapkan invers dari fungsi transfer ini pada data yang direkam, seismolog dapat memperoleh sinyal yang lebih mencerminkan gerakan tanah yang sebenarnya.

Langkah pertama menghilangkan respon alat adalah menghitung transformasi fourier dari seismograf. Rumus transformasi fourier sebagai berikut:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \tag{3.11}$$

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Di mana $F(\omega)$ adalah fungsi dalam domain frekuensi dari $f(t)$, ω adalah frekuensi angular (dalam radian per detik), t adalah waktu, dt adalah elemen diferensial waktu, i adalah unit imajiner.

Langkah kedua adalah menghitung fungsi transfer menggunakan informasi *poles-zeros* dan *gain* dari alat. *Poles* adalah titik di mana fungsi transfer menjadi tak terdefinisi (denominator sama dengan nol). *Zeros* adalah titik di mana output menjadi nol (numerator sama dengan nol). *Gain* menentukan seberapa besar penguatan sistem dan mempengaruhi respons sistem terhadap sinyal input. Fungsi transfer $H(s)$dari seismograf dapat diwakili dalam bentuk seperti berikut:

$$H(s) = K\frac{\prod_{i=1}^{M}(s - z_i)}{\prod_{i=1}^{M}(s - p_i)} \tag{3.12}$$

di mana K adalah *gain*, z_i adalah *zeros* dari fungsi transfer, p_i adalah *poles* dari fungsi transfer, s adalah variabel kompleks, M adalah jumlah *zeros* dan *poles* dalam sistem, dan i adalah indeks iterasi.

Untuk menghilangkan respon instrumen dari data seismograf, perlu mengalikan data dalam domain frekuensi dengan invers dari fungsi transfer ini:

$$D_{corr}(s) = D(s) \cdot \frac{1}{H(s)} \tag{3.13}$$

Di mana $D(s)$ adalah data seismograf yang direkam dalam domain frekuensi dan $D_{corr}(s)$ adalah data seismograf yang sudah dihilangkan respon instrumen

3.1.4 *Envelope* Seismogram

Envelope seismogram adalah representasi matematis yang menggambarkan amplitudo maksimum dari sinyal seismik pada setiap titik waktu. *Envelope* memiliki fungsi untuk menunjukkan bentuk gelombang seismogram dengan lebih jelas, memudahkan pengenalan karakteristik umum dari sinyal tersebut seperti durasi getaran, dan untuk mengidentifikasi sinyal dari *noise*.

Envelope dapat dihitung dari sinyal asli dengan menggunakan beberapa metode matematika, salah satunya menggunakan transformasi Hilbert (Kanasewich, 1981). Transformasi Hilbert adalah operator linear yang dihitung

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

dengan mengonvolusi suatu fungsi dengan operator 1/πt. Dalam domain frekuensi, transformasi Hilbert hanya menambahkan pergeseran fase sebesar 90° pada spektrum fase dari transformasi Fourier. Berikut ini adalah rumus transformasi Hilbert:

$$y(t) = x(t) * \frac{1}{\pi t} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \tag{3.14}$$

di mana * adalah operasi konvolusi yang mengintegrasikan produk dari $x(\tau)$ dan fungsi kernel yang digeser sepanjang sumbu waktu. Tujuannya adalah untuk menghasilkan komponen imajiner dari sinyal yang akan digabung dengan sinyal asli untuk membentuk sinyal analitik. $x(t)$ adalah sinyal seismik asli pada waktu t. $\frac{1}{\pi t}$ adalah fungsi kernel Transformasi Hilbert yang memiliki bentuk singular di t = 0 dan berperilaku seperti fungsi filter yang mengubah fase semua komponen frekuensi sinyal $s(t)$ sebanyak 90 derajat.

Penerapan transformasi Hilbert pada jejak seismik $x(t)$, menghasilkan jejak seismik kompleks $z(t)$, sebagai berikut:

$$z(t) = x(t) + iy(t) \tag{3.15}$$

di mana $y(t)$ adalah jejak seismik yang diputar 90° yang dihasilkan oleh transformasi Hilbert. *Envelope* dihitung sebagai berikut:

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \tag{3.16}$$

3.1.5 Waktu Asal (*Origin Time)*

Origin time adalah waktu ketika gempa bumi terjadi di sumbernya pada lokasi tertentu di dalam lapisan bumi. Waktu tersebut dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, dan detik. Ketepatan dalam menentukan *origin time* sangat krusial bagi sistem peringatan dini gempa bumi.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.1.6 Hiposenter

Hiposenter adalah titik di dalam bumi yang menjadi sumber gempa. Lokasi hiposenter dibuat dalam sistem koordinat kartesian bola bumi atau sistem koordinat geografis dan dinyatakan dalam derajat lintang, bujur, dan kedalaman. Ketepatan dalam menentukan hiposenter sangat krusial bagi sistem peringatan dini gempa.

3.1.7 Magnitudo

Magnitudo adalah ukuran kekuatan gempa bumi yang menggambarkan besarnya energi yang terlepas pada saat gempa bumi terjadi. Skala yang umum digunakan meliputi magnitudo Richter (M_l) dan skala magnitudo momen (M_w). Magnitudo membantu dalam menilai potensi dampak gempa bumi, PGA dan bahaya seismik secara keseluruhan.

3.1.8 Percepatan Puncak Tanah

Percepatan Puncak Tanah atau PGA adalah nilai terbesar percepatan tanah pada suatu tempat akibat getaran gempa bumi dalam periode waktu tertentu yang biasanya dinyatakan dalam satuan m/s^2. PGA ini lebih mudah untuk diukur karena kebanyakan instrumen yang digunakan untuk mengukur getaran tanah menghasilkan nilai percepatan tanah. Sebagian besar akselerogram terdiri dari tiga komponen yang saling ortogonal: dua komponen horizontal dan satu komponen vertikal. Menurut Douglas (2003) terdapat beberapa cara berbeda untuk menggabungkan komponen horizontal dan vertikal yang telah diteliti, antara lain:

a. Rata-rata Aritmetika (*Arithmetic mean*)

$$a_M = \frac{max|a_1(t)| + max|a_2(t)| + max|a_3(t)|}{3} \qquad (3.17)$$

di mana $max|a_1(t)|$ dan $max|a_2(t)|$ adalah PGA dari akselerogram komponen horizontal, $max|a_3(t)|$ adalah PGA dari akselerogram komponen vertikal.

b. Ketiganya

$$a_{B,1} = max|a_1(t)|, a_{B,2} = max|a_2(t)|, dan\ a_{B,3} = max|a_3(t)| \qquad (3.18)$$

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

di mana $max|a_1(t)|$ dan $max|a_2(t)|$ adalah PGA dari akselerogram komponen horizontal, $max|a_3(t)|$ adalah PGA dari akselerogram komponen vertikal.

c. Rata-rata Geometrik (*Geometric mean*)

$$a_G = \sqrt[3]{max|a_1(t)| \times max|a_2(t)| \times max|a_3(t)|} \quad (3.19)$$

di mana $max|a_1(t)|$ dan $max|a_2(t)|$ adalah PGA dari akselerogram komponen horizontal, $max|a_3(t)|$ adalah PGA dari akselerogram komponen vertikal.

d. Komponen Terbesar (*Largest component*):

$$a_L = max[max|a_1(t)|, max|a_2(t)|, max|a_3(t)|] \quad (3.20)$$

di mana $max|a_1(t)|$ dan $max|a_2(t)|$ adalah PGA dari akselerogram komponen horizontal, $max|a_3(t)|$ adalah PGA dari akselerogram komponen vertikal.

e. Acak (*Random*):

$$a_r = max|a_1(t)| \; atau \; max|a_2(t)| \; atau \; max|a_3(t)| \quad (3.21)$$

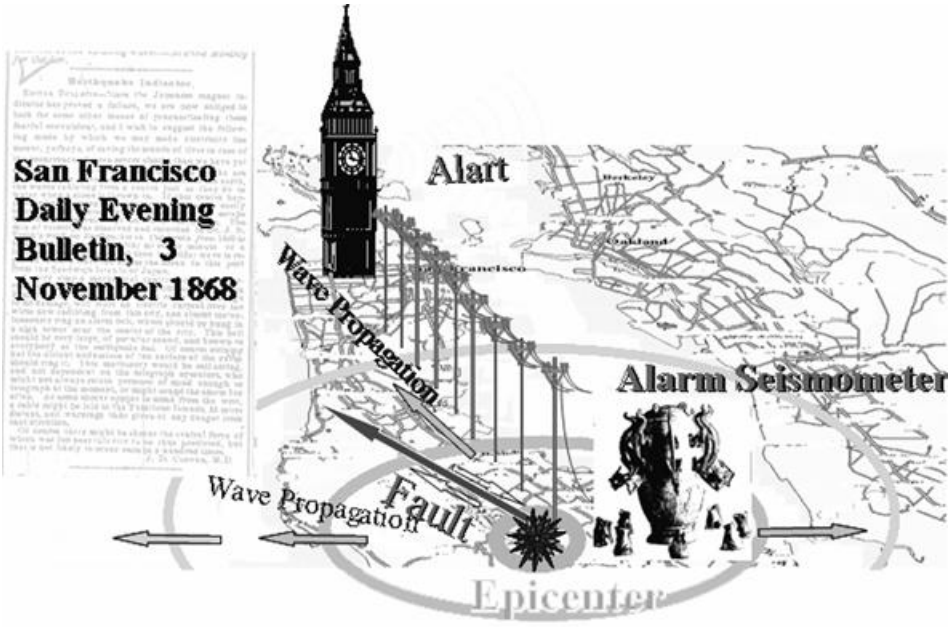
di mana $max|a_1(t)|$ dan $max|a_2(t)|$ adalah PGA dari akselerogram komponen horizontal, $max|a_3(t)|$ adalah PGA dari akselerogram komponen vertikal.

3.2 Peringatan Dini Gempa Bumi

Konsep dasar dari sistem peringatan dini gempa bumi pertama kali diperkenalkan oleh Dr. Cooper dalam San Francisco *Daily Evening Bulletin* pada 3 November 1868. Dalam laporan ini, Dr. Cooper menjelaskan sebuah perangkat mekanis sederhana yang dapat dipasang pada berbagai lokasi sekitar 10 hingga 100 mil dari San Francisco. Perangkat ini dirancang untuk mendeteksi gelombang bumi yang cukup kuat untuk menyebabkan kerusakan dan akan mengirimkan arus listrik melalui kabel yang seketika akan membunyikan lonceng alarm di kota tersebut. Lonceng ini dikenal sebagai lonceng gempa bumi yang memiliki suara yang khas dan hanya akan berbunyi ketika gelombang bumi terdeteksi. Perangkat ini dirancang untuk bekerja secara otomatis tanpa memerlukan bantuan operator telegraf. Namun, pada masa itu, belum ada sistem yang mampu merealisasikan ide tersebut. Ide tersebut baru diimplementasikan pada tahun 1960-an oleh otoritas

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Kereta Api Nasional Jepang. Gambar 3.2 menggambarkan konsep sistem deteksi dini berdasarkan ide Dr. Cooper.



Gambar 3.2 Konsep sistem deteksi pertama oleh Dr. Cooper (Nakamura, 1988)

EEW memiliki dua parameter penting, yaitu τ_c dan P_d. Kedua parameter tersebut diperoleh dari beberapa detik pertama gelombang P. Parameter ini membantu dalam estimasi cepat magnitudo dan intensitas gempa. Berikut ini adalah penjelasan untuk kedua parameter tersebut:

3.2.1 Parameter τ_c

τ_c adalah ukuran periode rata-rata gerakan tanah dalam beberapa jendela waktu tertentu. τ_c berkaitan dengan durasi gelombang P awal yang diamati pada seismogram. Parameter ini digunakan untuk memperkirakan magnitudo gempa dalam tahap sangat awal setelah gempa terjadi. Durasi ini biasanya dihitung dengan menganalisis interval waktu tertentu dari gelombang P awal setelah gempa terdeteksi.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Kanamori (2005) dan merupakan bentuk modifikasi dari metode yang dikembangkan oleh Nakamura (1988). Parameter periode τc, dari 3 detik awal gelombang P. τ_c ditentukan sebagai berikut:

$$\tau_c = \frac{2\pi}{\sqrt{r}} \tag{3.22}$$

di mana $r = \frac{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t)dt}{\int_0^{\tau_0} u(t)dt}$, τ_0= durasi rekaman yang digunakan (umumnya 3 detik), $\dot{u}(t)$ = kecepatan, dan $u(t)$= perpindahan yang diperoleh dari rekaman gerakan tanah pada integrasi ganda. Nilai τ_c yang lebih besar cenderung menunjukkan gempa dengan magnitudo lebih besar. Hal ini karena gempa besar cenderung memiliki gelombang P yang panjang dan kompleks dibandingkan gempa kecil.

3.2.2 Parameter P_d

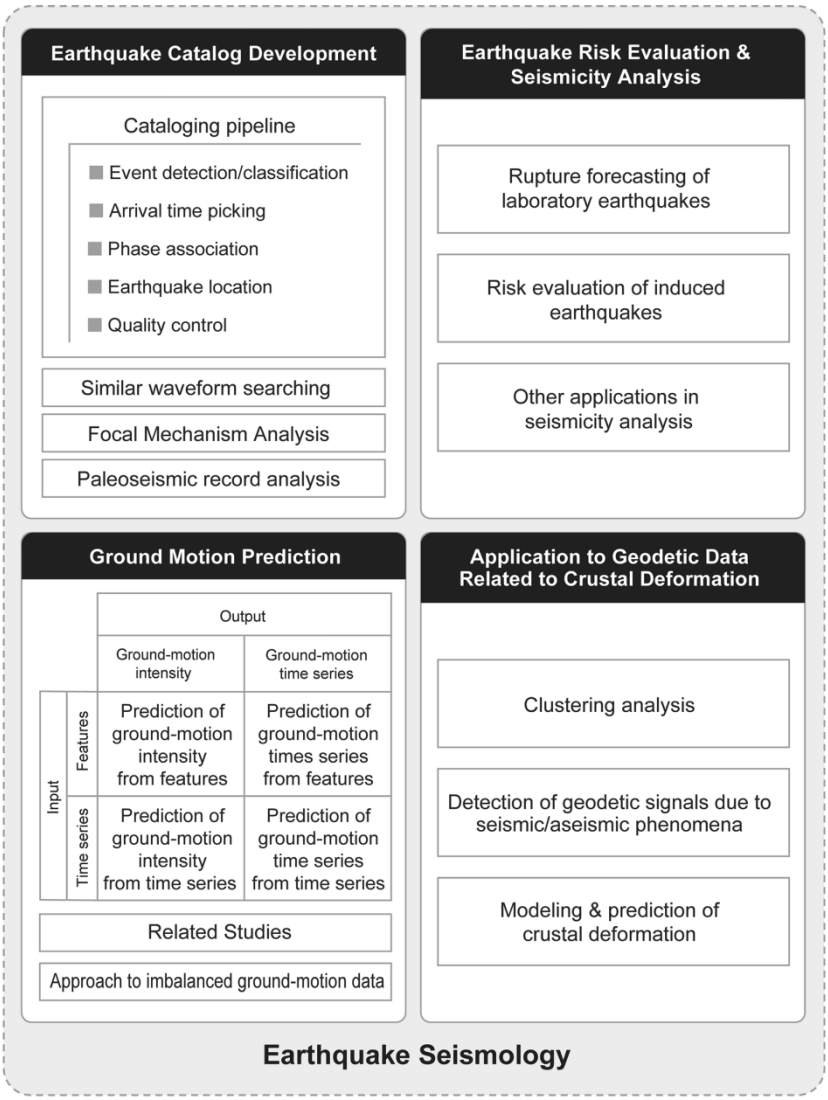
P_d merupakan amplitudo perpindahan puncak gelombang P yang dihitung dalam jangka waktu tertentu dalam metodologi ElarmS (Wurman dkk., 2007) untuk estimasi magnitudo. P_d digunakan untuk memperkirakan intensitas guncangan di lokasi tertentu. P_d diukur dari seismogram dengan mengambil nilai puncak gelombang P dari *waveform* percepatan atau kecepatan selama beberapa detik pertama setelah gelombang P terdeteksi. Nilai P_d yang lebih besar menunjukkan potensi guncangan yang lebih kuat di lokasi pengamatan. Wu & Kanamori (2005) menunjukkan bahwa P_d berkorelasi baik dengan kecepatan puncak gerakan tanah atau *peak ground velocity* (PGV) di lokasi yang sama.

3.3 *Machine Learning*

Machine learning adalah sub-bidang kecerdasan buatan atau *Artificial Intelligence* (AI) yang fokus pada pengembangan algoritma dan teknik yang memungkinkan komputer belajar dan membuat keputusan berdasarkan data. Menurut Farnham dkk. (2019), manfaat *machine learning* untuk manusia, yaitu

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

a. *Machine learning* dapat menyederhanakan kode dan memberikan kinerja yang lebih baik pada masalah yang memerlukan banyak penyetelan manual atau daftar aturan yang panjang.
b. *Machine learning* dapat menemukan solusi masalah kompleks yang tidak memiliki solusi yang baik dengan pendekatan tradisional.
c. *Machine learning* dapat beradaptasi dengan lingkungan yang berubah-ubah dan data baru.
d. Mendapatkan wawasan tentang masalah kompleks dan data dalam jumlah besar.



Gambar 3.3 Aplikasi *machine learning* dalam seismologi gempa bumi (Kubo dkk., 2024)

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Teknologi *machine learning* telah menunjukkan kemajuan luar biasa di berbagai bidang ilmiah, termasuk seismologi gempa bumi. Kubo dkk. (2024) meninjau aplikasi *machine learning* di bidang seismologi dan membahas kelebihan serta tantangan dalam penggunaannya. Aplikasi *machine learning* dalam seismologi dapat diterapkan pada pengembangan katalog dasar seperti deteksi atau klasifikasi gempa, penentuan waktu kedatangan, pencarian gelombang seismik yang mirip, analisis mekanisme fokus, dan analisis catatan paleoseismik. Selain itu, *machine learning* dapat digunakan untuk studi evaluasi risiko gempa bumi, analisis seismisitas, prediksi gerakan tanah, dan analisis data geodetik terkait deformasi kerak bumi dan deteksi sinyal geodetik yang disebabkan oleh fenomena seismik/non-seismik. Untuk lebih jelas dapat dilihat di Gambar 3.3.

3.4 *Deep Learning* (DL)

Deep learning adalah cabang *machine learning* yang didasarkan pada arsitektur jaringan saraf buatan. Jaringan saraf buatan atau *Artificial Neural Network* (ANN) menggunakan lapisan-lapisan yang terdiri dari *node-node* yang saling terhubung yang disebut neuron. Neuron bekerja sama untuk memproses dan belajar dari data *input*.

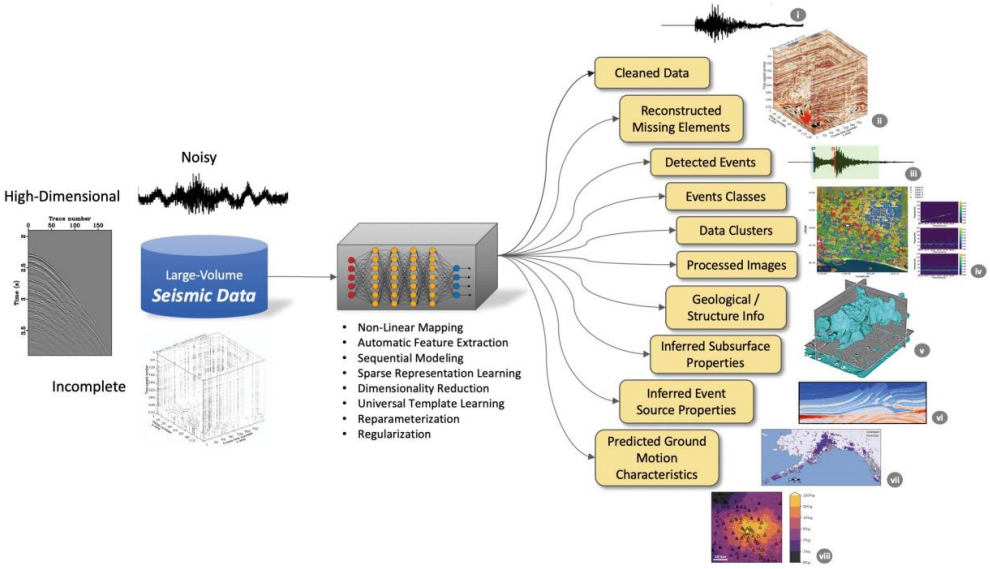
Dalam *Deep Neural Network* (DNN) yang sepenuhnya terhubung, terdapat satu lapisan *input* dan satu atau lebih lapisan tersembunyi atau *hidden layer* yang terhubung secara berurutan. Setiap neuron menerima *input* dari neuron-neuron pada lapisan sebelumnya atau dari lapisan *input*. *Output* dari satu neuron menjadi *input* bagi neuron-neuron lain di lapisan berikutnya dan proses ini berlanjut hingga lapisan terakhir menghasilkan *output* dari jaringan. Lapisan-lapisan jaringan saraf ini mengubah data *input* melalui serangkaian transformasi nonlinier yang memungkinkan jaringan untuk mempelajari representasi yang kompleks dari data *input* tersebut.

Dalam bidang seismologi, *deep learning* telah menunjukkan kemampuan untuk mengungguli pendekatan klasik. Keunggulan di bidang seismologi telah diuji coba pada kegiatan *denoising*, deteksi gempa, pemilihan fase, pemrosesan dan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

interpretasi citra seismik, serta pemodelan inversi dan maju. Beberapa sifat dari DNN seperti kemampuan aproksimasi universal, ekstraksi fitur otomatis, dan pengurangan dimensi telah terbukti sangat menguntungkan dalam memproses rekaman seismik berdimensi tinggi yang sering kali *noisy* dan tidak lengkap.

Mousavi & Beroza (2022) menyajikan tinjauan sistematis tentang metode *deep learning* dalam seismologi dengan meninjau keadaan terkini serta melalui meta-analisis dari 637 makalah jurnal yang diterbitkan antara Januari 1988 dan Januari 2022 (Gambar 3.4). *Deep learning* dalam seismologi mampu memproses sejumlah besar pengamatan seismik dengan cakupan spasiotemporal yang belum pernah terjadi sebelumnya sehingga dapat menghasilkan wawasan dan penemuan baru. *Deep learning* mungkin sangat efektif untuk masalah seismologi di mana proses fisik yang mendasarinya tidak sepenuhnya dipahami, tetapi datanya melimpah dan berkualitas tinggi.



Gambar 3.4 Berbagai sifat DNN digunakan untuk membangun model yang kuat untuk berbagai tugas seismologi (Mousavi & Beroza, 2022)

3.4.1 Jaringan Saraf Tiruan

Jaringan Saraf Tiruan atau *Artificial Neural Network* (ANN) adalah suatu model komputasi yang terinspirasi dari struktur dan fungsi jaringan saraf biologis

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

dalam otak manusia. Sejumlah literatur menganggap bahwa konsep jaringan saraf tiruan bermula pada artikel dari Waffen McCulloch dan Walter Pitts tahun 1943.

ANN memiliki beberapa kelebihan yang membuatnya sangat efektif dalam berbagai aplikasi. Pertama, ANN memiliki kemampuan belajar adaptif yang berarti jaringan ini dapat menyesuaikan diri dan belajar melakukan tugas berdasarkan data yang diberikan selama proses pelatihan atau pengalaman sebelumnya. Kedua, ANN juga memiliki kemampuan untuk melakukan *self-organization* atau jaringan dapat belajar, mengatur, dan merepresentasikan informasi yang diterima secara mandiri selama proses pembelajaran. Selain itu, ANN bekerja secara paralel, memungkinkan operasi *real time* yang efisien, terutama ketika menggunakan perangkat keras khusus yang dirancang untuk memanfaatkan kemampuan ini. Terakhir, ANN juga dapat berfungsi sebagai *universal function approximator*, yang berarti jaringan ini mampu mendekati fungsi apa pun dengan presisi tinggi dan membuatnya sangat fleksibel dalam berbagai bidang aplikasi.

ANN memiliki struktur dasar yang terdiri dari beberapa lapisan (Gambar 3.5). Komponen utama ANN terdiri dari:

1. Lapisan *Input* (*Input Layer*)

   Lapisan ini menerima data *input*. Setiap neuron di lapisan *input* mewakili fitur dari data *input*. Jumlah neuron sesuai dengan jumlah fitur pada data *input*. Misalnya dalam tugas pengenalan gambar, setiap nilai piksel gambar dapat dianggap sebagai fitur.

2. Lapisan Tersembunyi (*Hidden Layers*)

   Lapisan ini melakukan komputasi dan transformasi *intermediate*. Jumlah lapisan dan neuron di setiap lapisan dapat bervariasi sehingga mempengaruhi kemampuan jaringan untuk mempelajari pola yang kompleks. Semakin banyak jumlah lapisan memerlukan komputasi waktu lebih lama. *Hidden layers* dapat menangkap kompleksitas data melalui representasi yang dipelajari.

   Semakin banyak jumlah *node* (neuron) memungkinkan *hidden layers* mempelajari pola yang lebih rumit. Jumlah neuron pada *hidden layer* umumnya lebih banyak daripada jumlah neuron di *output layer*. Untuk mencegah *overfitting* sebaiknya menambah jumlah *node* secara bertahap.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3. Lapisan *Output* (*Output Layer*)

   Lapisan ini menghasilkan *output* yang biasanya mewakili prediksi. Jumlah neuron di lapisan *output* biasanya sesuai dengan jumlah kelas dalam tugas klasifikasi atau dimensi *output* dalam tugas regresi. Pada permasalahan klasifikasi biner dan regresi bisa menggunakan hanya satu neuron. Pada permasalahan klasifikasi multikelas, jumlah neuron sesuai jumlah label kelasnya.

4. Neuron dan Bobot (*Weights*)

   Setiap neuron dalam suatu lapisan terhubung ke setiap neuron di lapisan berikutnya. Hubungan antar neuron pada ANN adalah *fully connected network* (FCN*).* Koneksi antar neuron memiliki bobot yang merupakan parameter yang dapat disesuaikan dan dipelajari oleh jaringan selama pelatihan. Setiap neuron menghitung jumlah bobot dari *input*, menambahkan bias, dan menerapkan fungsi aktivasi untuk menghasilkan *output*. Rumus umum untuk menghitung input yang masuk ke sebuah neuron adalah:

$$z = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_i + b \tag{3.4.23}$$

   di mana x_i adalah input ke neuron, w_i adalah bobot yang terkait dengan input tersebut, dan b adalah bias.

5. Fungsi Aktivasi (*Activation Functions*)

   Fungsi aktivasi memperkenalkan nonlinearitas ke dalam jaringan dan memungkinkan memodelkan hubungan yang kompleks. Beberapa fungsi aktivasi umum meliputi:

   - Sigmoid

     Sigmoid berguna untuk mengubah nilai *input* menjadi rentang 0 hingga 1 yang bisa diinterpretasikan sebagai probabilitas. SigmOid sering digunakan di lapisan *output* pada tugas klasifikasi biner. Rumus Sigmoid adalah sebagai berikut:

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \tag{3.24}$$

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

di mana z adalah *input* ke fungsi aktivasi, e adalah bilangan Euler, dan $\sigma(z)$ adalah output dari fungsi sigmoid yang bernilai antara 0 hingga 1.

- ReLU (*Rectified Linear Unit*)

  ReLU menghasilkan output z jika z positif dan 0 jika z negatif. Fungsi aktivasi ini paling banyak digunakan karena kecepatannya dalam konvergensi dan kemampuan mengurangi masalah *vanishing gradient* pada kasus tertentu. ReLU sering digunakan di lapisan tersembunyi untuk mengatasi masalah gradien yang menghilang. Rumus untuk ReLU adalah sebagai berikut:

  $$f(z) = \max(0, z) \tag{3.25}$$

  di mana *z* merupakan *input* ke fungsi aktivasi, dan *f(z)* adalah nilai keluaran fungsi ReLU yang mengembalikan nilai *z* jika *z*>0, atau 0 jika *z*≤*0*.

- Tanh (*Hyperbolic Tangent*)

  Tanh adalah versi terkalibrasi dari Sigmoid yang memetakan nilai *input* ke rentang -1 hingga 1. Tanh lebih baik dalam praktik karena menghasilkan nilai positif dan negatif. Rumus untuk Tanh adalah sebagai berikut:

  $$f(z) = tanh\,(z) \tag{3.26}$$

  di mana *z* adalah *input* ke fungsi aktivasi, dan $f(z) = tanh\,(z)$ merupakan fungsi aktivasi *hyperbolic* tangent yang memetakan nilai z ke rentang antara -1 hingga 1.

6. Pelatihan ANN

   Pelatihan ANN melibatkan penyesuaian bobot dan bias untuk meminimalkan perbedaan antara *output* yang diprediksi dan nilai target sebenarnya. Proses ini menggunakan metode *backpropagation* dengan algoritma optimisasi seperti *gradient descent*. Formula untuk penyesuaian bobot secara umum adalah:

   $$w = w - \alpha \cdot \frac{\partial L}{\partial w} \tag{3.27}$$

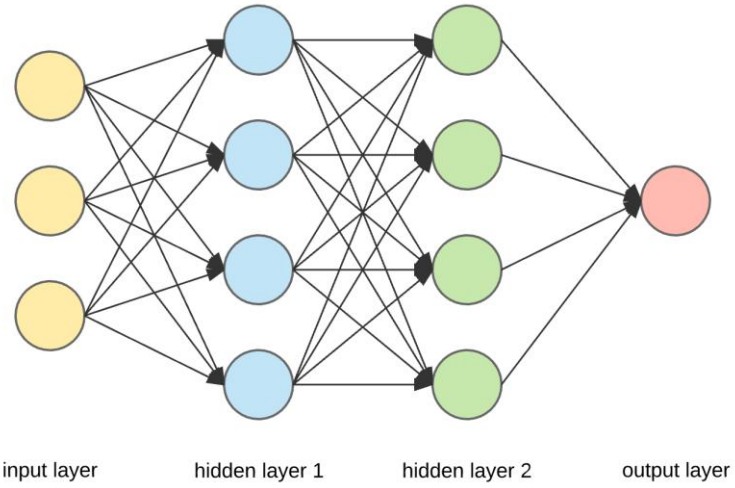
   di mana w adalah bobot, $\frac{\partial L}{\partial w}$ adalah *gradient loss*, dan α adalah *learning rate.*

   Pelatihan ANN juga melibatkan perhitungan fungsi galat atau *loss function*. Fungsi galat digunakan untuk mengukur seberapa baik jaringan saraf tiruan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

melakukan prediksi dibandingkan dengan nilai sebenarnya. Beberapa fungsi *loss* yang sering digunakan seperti *mean squared error* (MSE), *cross-entropy loss* untuk klasifikasi, dan *binary cross-entropy* untuk klasifikasi biner.

Arsitektur ANN dapat bervariasi dengan disesuaikan untuk tugas-tugas tertentu. Arsitektur yang paling umum digunakan dalam kemometrika adalah jaringan saraf *multilayer feed-forward* (MLF) dan *supervised kohonen network* (SKN). MLF terdiri dari beberapa lapisan neuron di mana informasi bergerak dalam satu arah dari *input* ke *output* dan memungkinkan aproksimasi fungsi yang kompleks. Sebaliknya, SKN dirancang untuk tugas-tugas *unsupervised learning* di mana jaringan mengorganisasi data *input* ke dalam klaster berdasarkan kesamaan.



Gambar 3.5 Struktur ANN (Sumber https://www.codespeedy.com/understanding-artificial-neural-network-ann, diakses 14 Agustus 2024)

Arsitektur lain seperti jaringan saraf konvolusi atau *convolutional neural network* (CNN) dan jaringan saraf rekuren atau *recurrent neural network* (RNN) juga merupakan bagian integral dari lanskap ANN. CNN sangat efektif untuk memproses data grid terstruktur seperti gambar dengan secara otomatis mendeteksi fitur melalui lapisan konvolusi. RNN dirancang untuk mengenali pola dalam data urutan yang membuatnya cocok untuk tugas-tugas seperti pemodelan bahasa dan analisis deret waktu.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.4.2 *Convolutional Neural Network* (CNN)

Convolutional Neural Network (CNN) adalah jenis jaringan saraf dalam *deep learning* yang merupakan salah satu jenis arsitektur ANN. CNN memberikan hasil terbaik untuk memetakan data gambar dan memiliki efisiensi komputasi yang tinggi. Jaringan ini sangat berguna untuk menemukan pola dalam gambar guna mengenali objek, kelas, dan kategori. Selain itu, CNN juga efektif dalam mengklasifikasikan data audio, deret waktu, dan sinyal.

CNN menggunakan operasi konvolusi untuk mengekstraksi fitur dari gambar. Konvolusi melibatkan filter (kernel) yang bergerak melintasi gambar dan mengalikan nilai piksel dengan bobot filter. Hasil dari konvolusi ini adalah peta fitur yang menyoroti pola dan karakteristik dalam gambar. Setelah konvolusi, *layer pooling* digunakan untuk mengurangi dimensi peta fitur dan mengontrol *overfitting*. *Max pooling* dan *average pooling* adalah dua jenis *pooling* yang umum digunakan. Selama proses pelatihan CNN, parameter filter dioptimalkan melalui *backpropagation* untuk meminimalkan *loss function*. Pada tahap akhir, lapisan *fully connected* menghubungkan semua neuron dari satu lapisan ke lapisan berikutnya untuk melakukan klasifikasi akhir. *Fully connected layer* menghubungkan fitur-fitur yang diekstraksi dengan label kelas. CNN menghasilkan probabilitas kelas dengan menggunakan *softmax* pada *layer output*. Kelas dengan probabilitas tertinggi adalah prediksi akhir.

Arsitektur CNN terdiri dari beberapa jenis lapisan yang bekerja bersama untuk mengekstraksi fitur dari *input* dan membuat prediksi (Gambar 3.6). Berikut adalah komponen utama dari arsitektur CNN:

1. *Convolutional Layer* (Lapisan Konvolusi)

   Convolutional Layer adalah lapisan operasi konvolusi yang mana merupakan inti dari CNN. Lapisan ini menggunakan filter (kernel) untuk mengekstraksi fitur seperti tepi, tekstur, atau pola dari *input* data. Setiap filter menghasilkan fitur map yang menyoroti keberadaan pola tertentu dalam *input*. Operasi konvolusi dapat dirumuskan sebagai:

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$$S(i,j) = (I * K)(i,j) = \sum_m \sum_n I(i+m, j+n) \times K(m,n) \tag{3.28}$$

di mana I adalah matriks input, K adalah kernel konvolusi, $S(i,j)$ adalah nilai pada lokasi (i,j) dari fitur map hasil, m dan n adalah indeks yang menunjukkan dimensi kernel.

2. *Pooling Layer* (Lapisan *Pooling*)

Setelah konvolusi, lapisan *pooling* diterapkan untuk mengurangi dimensi dari fitur dan jumlah parameter dalam jaringan. *Max pooling* adalah metode yang paling umum digunakan dengan mengambil nilai maksimum dari jendela tertentu dalam fitur sehingga mengurangi ukuran dimensi dari *input*. Rumus untuk *Max pooling* adalah sebagai berikut:

$$P(i,j) = \max_{k,l \in W} S(i \cdot k, j \cdot l) \tag{3.29}$$

di mana $P(i,j)$ adalah hasil dari operasi *max pooling* yang mengambil nilai maksimum dari hasil konvolusi S dalam jendela W. Indeks k dan l mewakili posisi relatif dalam jendela pooling, sedangkan i dan j menunjukkan lokasi jendela pada peta fitur.

Max pooling dapat diterapkan dalam berbagai dimensi, tergantung pada jenis data yang diproses. Berikut penjelasan *Max pooling* menurut dimensinya:

a. *MaxPooling* 1D

MaxPooling 1D digunakan untuk data sekuensial atau satu dimensi seperti data sinyal atau teks. *MaxPooling* 1D bekerja dengan mengambil jendela (*window*) sepanjang satu dimensi, misalnya sepanjang urutan (*sequence*), dan memilih nilai maksimum dari jendela tersebut. Misalnya, jika kita memiliki vektor [2, 3, 1, 5], dengan ukuran jendela 2, maka hasilnya adalah [3, 5]. *MaxPooling* 1D biasa digunakan untuk *natural language program* (NLP) dan analisis sinyal.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

b. *MaxPooling* 2D

MaxPooling 2D digunakan untuk data dua dimensi seperti gambar. *MaxPooling* 2D bekerja dengan jendela dua dimensi yang bergerak di atas fitur dua dimensi. Pada setiap langkah, nilai maksimum dalam jendela diambil dan disimpan dalam fitur yang diringkas. *MaxPooling* 2D biasa diaplikasikan untuk pengolahan gambar dan visi komputer.

c. *MaxPooling* 3D

MaxPooling 3D digunakan untuk data tiga dimensi seperti video (memiliki tinggi, lebar, dan waktu) atau data volumetrik. *MaxPooling* 3D bekerja menggunakan jendela tiga dimensi untuk memilih nilai maksimum di dalam volume kecil. *MaxPooling* 3D sering diaplikasikan untuk pengolahan video dan analisis data volumetrik.

3. ReLU (*Rectified Linear Unit*)

ReLU adalah lapisan aktivasi yang memperkenalkan nonlinearitas ke dalam model. ReLU menggantikan semua nilai negatif dalam *output* dari lapisan konvolusi dengan nol. Penggantian tersebut membantu model untuk belajar dan mengakselerasi proses pelatihan.

4. *Fully Connected Layer* (Lapisan Terhubung Penuh)

Di akhir jaringan, fitur diratakan (*flattened*) untuk mengubah *output* dari lapisan konvolusi atau *pooling* yang biasanya berbentuk tensor multidimensi menjadi vektor dalam jumlah tertentu. Proses *flattening* dapat menjadi 0D, 1D, 2D, dan 3D bergantung pada tensor dimensi data. *Fully connected layer* bertanggung jawab untuk membuat keputusan akhir seperti klasifikasi atau regresi. Mirip dengan lapisan dalam ANN tradisional, *output* dari lapisan ini dihitung dengan:

$$y = W\,x + b \tag{3.30}$$

di mana x adalah *input* yang telah di-*flatten* (dibentangkan menjadi satu dimensi), W adalah bobot, dan b adalah bias.

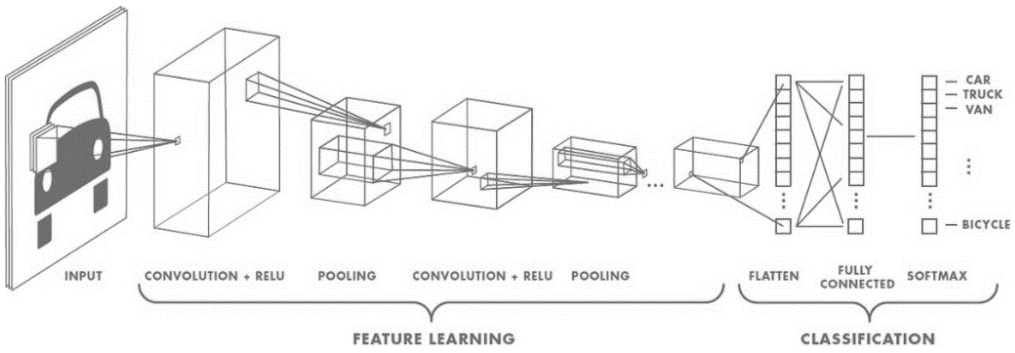
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5. *Softmax Layer*

Untuk masalah klasifikasi, lapisan *softmax* sering diterapkan di akhir jaringan untuk mengubah *output* menjadi probabilitas untuk setiap kelas yang mungkin.

$$\sigma(z_i) = \frac{e^{z_i}}{\sum_i e^{z_j}} \tag{3.4.31}$$

di mana z_i adalah *input* ke neuron i dari lapisan *output* dan $\sigma(z_i)$ adalah hasil normalisasi.



Gambar 3.6 Arsitektur CNN (Billinghurst dkk., 2015)

CNN dapat dikategorikan berdasarkan dimensi data yang diproses. Masing-masing jenis CNN ini dirancang untuk menangani tipe data yang berbeda dengan efisiensi yang optimal dalam mengekstraksi fitur dan melakukan tugas-tugas yang spesifik. CNN berdasarkan dimensi dapat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Conv1D (*Convolutional* 1D) adalah lapisan konvolusi satu dimensi yang digunakan untuk memproses data sekuensial seperti sinyal waktu, teks, atau urutan angka. Lapisan konvolusi ini berfungsi untuk mengaplikasikan filter konvolusi sepanjang satu dimensi data *input* untuk menangkap fitur lokal. Conv1D umumnya digunakan dalam pemrosesan sinyal, analisis teks, dan data sekuensial lainnya.
2. Conv2D (*Convolutional* 2D) adalah lapisan konvolusi dua dimensi yang digunakan untuk data grid dua dimensi seperti gambar. Dalam Conv2D, filter

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

konvolusi bergerak di sepanjang dua dimensi untuk mengekstraksi fitur spasial seperti tepi, tekstur, dan objek. Penggunaan Konvolusi ini sangat umum dalam visi komputer, seperti pengenalan gambar, segmentasi citramedis, dan deteksi objek dalam sebuah video.

3. Conv3D (*Convolutional* 3D) adalah lapisan konvolusi tiga dimensi yang digunakan untuk data volumetrik atau data grid tiga dimensi. Dalam Conv3D, filter konvolusi bergerak di sepanjang tiga dimensi (misalnya tinggi, lebar, dan kedalaman) untuk mengekstraksi fitur spasial dalam volume data. Conv3D sering digunakan dalam pemrosesan video dan data medis tiga dimensi seperti MRI atau CT scan.

Keutamaan CNN termasuk kemampuannya dalam mengenali pola dan fitur kompleks yang mengurangi kebutuhan untuk rekayasa fitur manual. CNN dapat memproses data secara paralel, yang memungkinkan pelatihan model yang lebih besar dan kompleks dengan lebih cepat. CNN dapat meniru cara manusia melihat dan mengenali objek dengan menggunakan hierarki fitur, yaitu mengenali pola tingkat rendah terlebih dahulu dan kemudian menggabungkannya untuk mengenali pola tingkat tinggi. Namun, CNN memiliki kekurangan seperti kebutuhan akan kualitas dan kuantitas data latih serta sumber daya komputasi yang besar. Selain itu, kinerja CNN dapat menurun jika ada ketidakstabilan *input*.

3.5 Transformer

Transformer adalah jaringan saraf berbasis *self-attention* sebagai mekanisme utama untuk menghitung representasi *input* dan *output* tanpa menggunakan *recurrent neural networks* (RNN) atau *convolution*. Dibandingkan dengan model sebelumnya seperti *Extended Neural* GPU, ByteNet, dan ConvS2S yang menggunakan CNN dan membutuhkan lebih banyak operasi untuk menghubungkan sinyal antara posisi *input* atau *output* yang jauh, Transformer mengurangi jumlah operasi ini menjadi konstan. *Self-attention* memungkinkan transformer untuk lebih efektif dalam memahami dependensi antara posisi-posisi yang berbeda dalam sebuah urutan sehingga lebih efisien dalam memproses data

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

secara paralel. Transformer diperkenalkan oleh Vaswani dkk. pada tahun 2017 dalam makalah berjudul *Attention is All You Need*.

Transformer memiliki konsep kerja utama mekanisme *self-attention* yang memungkinkan model untuk memperhatikan semua elemen dalam urutan *input* secara bersamaan. *Self-attention* menghitung bobot perhatian (*attention weights*) untuk setiap elemen terhadap elemen lainnya sehingga mampu mengidentifikasi dan menekankan informasi yang paling penting dalam urutan tersebut. *Self-attention* menawarkan kemampuan untuk menginterpretasi konteks dalam urutan tanpa ketergantungan pada posisi relatif antar data.

Untuk mendetailkan proses transformer secara lebih teknis dalam *self-attention*, kita dapat melihat langkah-langkah berikut:

a. Proyeksi *Query, Key*, dan *Value*:

$$Q = XW^Q, K = XW^K, K = VW^V \tag{3.32}$$

Di mana Q adalah *Query,* K adalah *Key,* V adalah *Value,* X adalah matriks input yang merepresentasikan urutan simbol, $W^Q, W^K,$ dan W^V adalah matriks bobot yang dipelajari. Proyeksi ini mengubah *input* menjadi tiga komponen penting yang memfasilitasi perhitungan *attention*. *Query* berguna untuk mengukur kebutuhan informasi, *key* menentukan sumber informasi yang relevan, dan *value* menyediakan informasi aktual yang diperlukan.

b. Penghitungan *Attention Scores* dan *Softmax Normalization*:

$$Attention(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \tag{3.33}$$

Setiap elemen *Query* Q dihitung skornya terhadap setiap *Key* K melalui produk dot, yang diikuti dengan pembagian dengan akar kuadrat dari dimensi d_k untuk stabilisasi numerik. Fungsi *softmax* kemudian mengonversi skor-skor ini menjadi distribusi probabilitas, yang mengindikasikan pentingnya setiap *Value* V dalam konteks *Query* yang diberikan.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

c. *Output* dari *Multi-Head Attention*

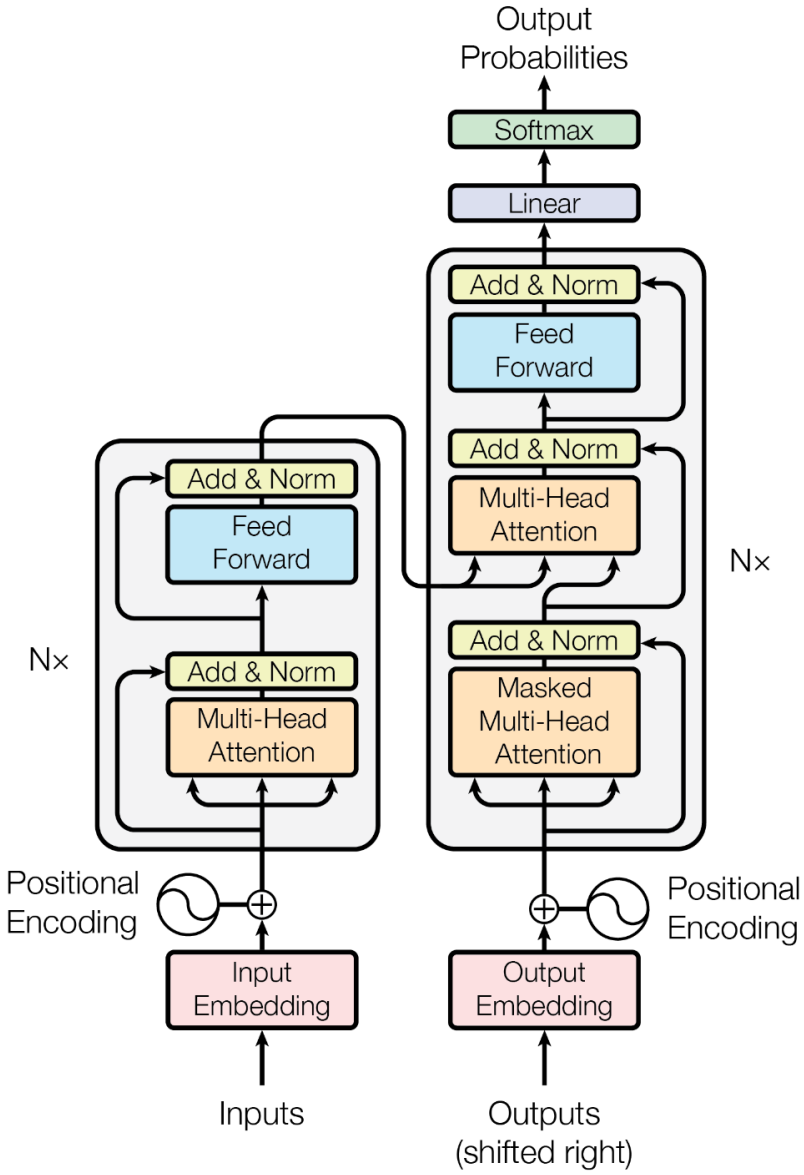
$$MultiHead(Q, K, V) = Concat(head_1, \dots, head_h)W^O \quad (3.34)$$

Di mana setiap $head_i$ adalah aplikasi dari mekanisme *attention* pada proyeksi yang berbeda dari *Query, Key, Value*, dan W^O adalah matriks bobot yang digunakan untuk menggabungkan informasi dari semua head. Hal ini memungkinkan model untuk menangkap hubungan yang lebih kompleks dan beragam antar bagian dari data input.

Transformer terdiri dari dua komponen utama, yaitu *encoder* dan *decoder*. *Encoder* berfungsi memetakan urutan *input* dari representasi simbol $(x_1, \dots, x_n)$ menjadi urutan representasi kontinu $z = (z_1, \dots, z_n)$, sementara *decoder* menggunakan representasi z untuk menghasilkan *output* $(z_1, \dots, z_n)$ dari simbol satu elemen dalam satu waktu. Pada setiap langkah, model bersifat *auto-regressive*, yaitu menggunakan simbol-simbol yang telah dihasilkan sebelumnya sebagai *input* tambahan ketika menghasilkan simbol berikutnya. Setiap lapisan dalam *encoder* dan *decoder* mengandung sub-lapisan seperti *multi-head self-attention* dan *feed-forward neural network*. *Multi-head self-attention* memungkinkan pemrosesan yang lebih mendalam, sedangkan *feed-forward neural network* bertugas melakukan transformasi nonlinear pada representasi *input*.

Transformer memanfaatkan kombinasi mekanisme *self-attention* dan ANN *feed-forward* di dalam lapisan *encoder* dan *decoder* untuk memproses urutan *input* serta menghasilkan urutan *output*. Pendekatan ini memungkinkan transformer secara efisien menangkap hubungan kompleks antara token dalam urutan, baik untuk tugas pemahaman maupun pembangkitan bahasa.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 3.7 Arsitektur Model Transformer (Vaswani dkk., 2017)

Gambar 3.7 menjelaskan mengenai arsitektur yang ada pada transformer. Transformer menggunakan lapisan *self-attention* yang ditumpuk dan lapisan *fully connected* secara *point-wise* baik untuk *encoder* berada di sebelah kiri maupun *decoder* yang berada di sebelah kanan. Baik *encoder* maupun *decoder* dalam arsitektur Transformer terdiri dari modul-modul yang dapat ditumpuk satu sama lain beberapa kali, yang dijelaskan oleh Nx atau N *layer* dalam diagram arsitektur Transformer. Pada bagian *encoder* terdapat tiga proses utama yang meliputi:

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

1. *Input Embedding*

   Input dalam bentuk urutan token pertama kali diubah menjadi vektor *embedding* melalui lapisan *embedding*. Vektor ini merepresentasikan token dalam ruang vektor berdimensi tinggi, sehingga model dapat bekerja dengan representasi numerik yang lebih mudah diproses.

2. *Positional Encoding*

   Transformer tidak memiliki mekanisme sekuensial bawaan seperti RNN, sehingga *positional encoding* ditambahkan ke *embedding* untuk memberikan informasi posisi urutan kepada model. Hal ini memungkinkan model memahami urutan dan posisi token dalam kalimat yang penting untuk menangkap konteks dalam data sekuensial

3. *N-Layer Encoder*

   Encoder terdiri dari N lapisan identik, yang masing-masing terdiri dari tiga sub-lapisan utama:

   a. *Multi-Head Attention*

      Multi-Head Attention berfungsi menghitung bobot perhatian (*attention weights*) untuk setiap token terhadap token lain dalam urutan *input* melalui mekanisme *self-attention*. *Multi-head attention* memungkinkan model menangkap berbagai jenis hubungan antartoken dalam data sehingga model dapat memahami konteks lebih baik.

   b. *Feed-Forward Neural Network*

      Feed-Forward Neural Network adalah ANN *feed-forward* yang diterapkan secara independen pada setiap posisi token. Sub-lapisan ini membantu dalam memproses informasi lebih lanjut setelah *self-attention* melakukan transformasi nonlinear untuk meningkatkan representasi data.

   c. *Add & Norm*

      Residual connection (penjumlahan hasil sub-lapisan dengan *input* awal) dan *layer normalization* diterapkan setelah setiap sub-lapisan untuk menjaga stabilitas dan efisiensi pelatihan. Hal ini membantu mengatasi masalah gradien yang menghilang atau meledak yang sering terjadi pada pelatihan *deep neural network*.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Pada bagian *decoder* terdapat dua proses utama, yaitu:

1. *Output Embedding*

   Target atau *output* diubah menjadi vektor *embedding* dan ditambahkan *positional encoding* seperti pada proses *encoder*. Vektor *embedding* ini memberikan representasi numerik dari token *output*, sementara *positional encoding* membantu *decoder* dalam memahami urutan dan posisi token dalam *output* yang dihasilkan.

2. *N-Layer Decoder*

   Decoder terdiri dari N lapisan yang identik, di mana setiap lapisan mencakup empat sub-lapisan utama:

   a. *Masked Multi-Head Attention*

      Sub-lapisan ini mirip dengan *multi-head attention* di *encoder*, tetapi dengan *masking*. *Masking* digunakan untuk memastikan bahwa setiap posisi hanya dapat memperhatikan posisi sebelumnya, bukan posisi setelahnya, guna menjaga keterurutan saat proses *decoding*. Hal ini mencegah model melihat token yang akan dihasilkan di masa depan sehingga memastikan prediksi dilakukan secara berurutan dan sesuai konteks.

   b. *Multi-Head Attention*

      Sub-lapisan ini berfungsi untuk menerapkan perhatian pada *output* dari *encoder*. Sub-lapisan ini memungkinkan *decoder* untuk fokus pada bagian penting dari *input* selama proses menghasilkan *output*. Dengan cara ini, *decoder* dapat mengintegrasikan informasi relevan dari *encoder* untuk memprediksi token berikutnya dalam urutan *output*.

   c. *Feed-Forward Neural Network*

      Sub-lapisan ini adalah ANN *feed-forward* yang diterapkan secara independen pada setiap posisi dalam urutan. Sub-lapisan ini membantu memproses representasi yang diperoleh dari mekanisme *attention* sehingga memungkinkan model untuk melakukan transformasi nonlinear.

   d. *Add & Norm*

      Setelah setiap sub-lapisan, dilakukan *residual connection* (penjumlahan hasil dari sub-lapisan dengan *input* awal) dan *layer normalization* untuk menjaga

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

stabilitas dan efisiensi pelatihan. *Residual connection* membantu mengatasi masalah seperti hilangnya gradien, sementara *layer normalization* menjaga agar distribusi aktivasi tetap stabil selama pelatihan.

Setelah melalui semua lapisan *decoder*, *output* kemudian diteruskan ke lapisan linear yang berfungsi mengubah representasi vektor menjadi *logits*, yaitu skor yang menunjukkan kecocokan untuk setiap token dalam kosakata. Selanjutnya, fungsi *softmax* diterapkan pada *logits* ini untuk mengubahnya menjadi probabilitas. Probabilitas ini menunjukkan seberapa besar kemungkinan setiap token muncul sebagai token berikutnya dalam urutan *output*. Proses ini memungkinkan model untuk memilih token yang paling sesuai urutan *output* yang diinginkan.

Transformer memiliki beberapa kelebihan, di antaranya:

1. Mengatasi Keterbatasan Urutan

   Transformer dapat memproses urutan data secara paralel. Hal ini memungkinkan model untuk menangani dependensi jarak jauh dalam teks dengan lebih efektif.
2. Efisiensi Komputasi

   Transformer dapat mengurangi waktu pelatihan dan pemrosesan data dengan menggunakan komputasi paralel. Hal ini memungkinkan pelatihan *large language model* (LLM) yang kompleks dengan lebih cepat.
3. Mengingat Konteks

   Transformer menggunakan mekanisme *self-attention* untuk mengingat konteks antara bagian-bagian dalam urutan data sehingga mempertahankan informasi yang lebih luas dan kompleks.

Transformer juga memiliki beberapa kekurangan, di antaranya:

1. Kompleksitas

   Transformer memiliki banyak parameter yang memerlukan komputasi yang lebih besar dan memori yang lebih banyak. Hal ini membuatnya lebih sulit untuk diimplementasikan pada perangkat keras yang sederhana.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2. Biaya Komputasi

   Meskipun lebih efisien dalam jangka panjang, pelatihan model Transformer memerlukan biaya komputasi yang lebih besar karena memerlukan banyak sumber daya komputasi untuk memproses data secara paralel.

3. Ketergantungan pada Data

   Transformer sangat bergantung pada kualitas dan kuantitas data pelatihan. Jika data yang digunakan tidak representatif atau terlalu kecil, maka model Transformer tidak akan dapat menghasilkan hasil yang baik.

4. Ketergantungan pada Arsitektur

   Transformer memerlukan arsitektur yang kompleks dan spesifik untuk berfungsi dengan baik. Ini membuatnya lebih sulit untuk diintegrasikan dengan sistem yang sudah ada dan memerlukan perubahan yang signifikan dalam infrastruktur komputasi.

Transformer memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam bidang seismologi. Seismologi melibatkan pengolahan data urutan yang panjang dan kompleks dari aktivitas seismik yang tercatat oleh seismograf. Transformer dapat digunakan untuk mendeteksi deteksi pola atau fase dalam data seismik, memperkirakan hiposenter gempa, serta memprediksi magnitudo dan PGA. Beberapa contoh dan aplikasi Transformer dalam bidang seismologi, yaitu *Earthquake Transformer* (EQT) (Mousavi dkk., 2020), *Blockly Earthquake Transformer* (Mai dkk., 2023), dan *Siamese Earthquake Transformer*(Xiao dkk., 2021) dalam memilih fase gempa (gelombang P dan S) secara otomatis yang merupakan langkah penting dalam analisis seismik. Transformer memiliki keunggulan dalam menangani konteks yang panjang dan kompleks yang mana dalam analisis data seismik diperlukan pemahaman urutan waktu dan hubungan spasial.

3.6 *Transformer Earthquake Alerting Model* (TEAM) dan TEAM-L*ocation and Magnitude*

Transformer Earthquake Alerting Model (Münchmeyer dkk., 2021b) adalah sebuah model *deep learning* untuk estimasi probabilistik PGA berdasarkan

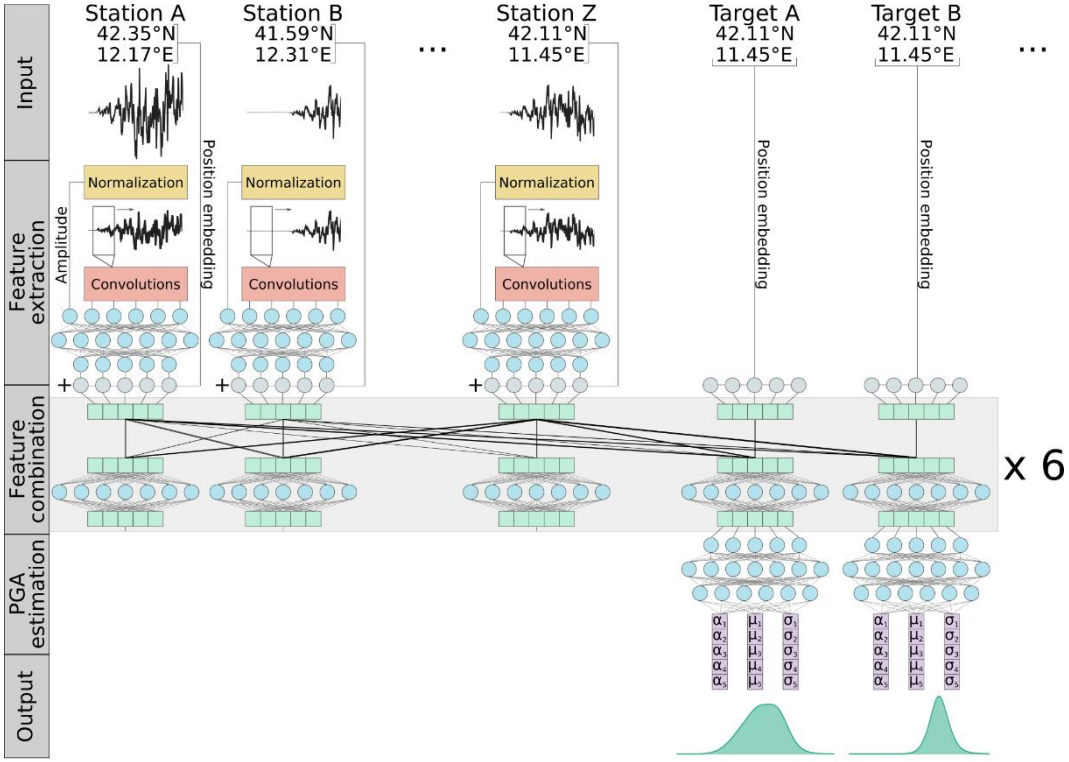
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

waveform yang diterima dari serangkaian stasiun dengan jumlah yang bervariasi. Model ini menggabungkan keunggulan dari kedua strategi peringatan dini tradisional yang mengandalkan estimasi sifat sumber atau pemodelan propagasi guncangan.

TEAM memiliki beberapa kelebihan. Pertama, TEAM menggunakan jaringan transformer sehingga dapat menggabungkan data dari serangkaian stasiun yang bervariasi dan secara eksplisit mengodekan lokasi stasiun tersebut. Hal ini memungkinkan penerapan pada *dataset* yang heterogen dan stasiun yang tidak ada selama pelatihan. Kedua, TEAM memberikan prediksi *real time* dengan menggunakan kombinasi *zero-padding* dan augmentasi data pelatihan. Ketiga, TEAM memberikan prediksi yang akurat bahkan untuk gempa besar yang dicapai melalui kombinasi augmentasi data pelatihan dan strategi adaptasi domain.

Penilaian PGA dapat dibagi menjadi tiga komponen, yaitu: (a) ekstraksi fitur, (b) kombinasi fitur, dan (c) estimasi kepadatan (*density estimation*) (Gambar 3.8). TEAM menggabungkan vektor fitur dan memetakannya ke representasi di target menggunakan transformer. Untuk mengkodekan lokasi stasiun perekaman serta target prediksi digunakan representasi vektor sinusoidal. Data dari stasiun input diolah menjadi vektor fitur berdasarkan komponennya, sementara data dari stasiun target langsung dimasukkan ke dalam Transformer tanpa proses pengubahan tersebut. Arsitektur ini memproses jumlah *input* yang bervariasi bersama dengan lokasi yang dikodekan secara eksplisit. Hal tersebut memungkinkan TEAM menangani stasiun dan target yang dinamis. Transformer mengembalikan satu vektor untuk setiap target yang mewakili prediksi pada target PGA.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



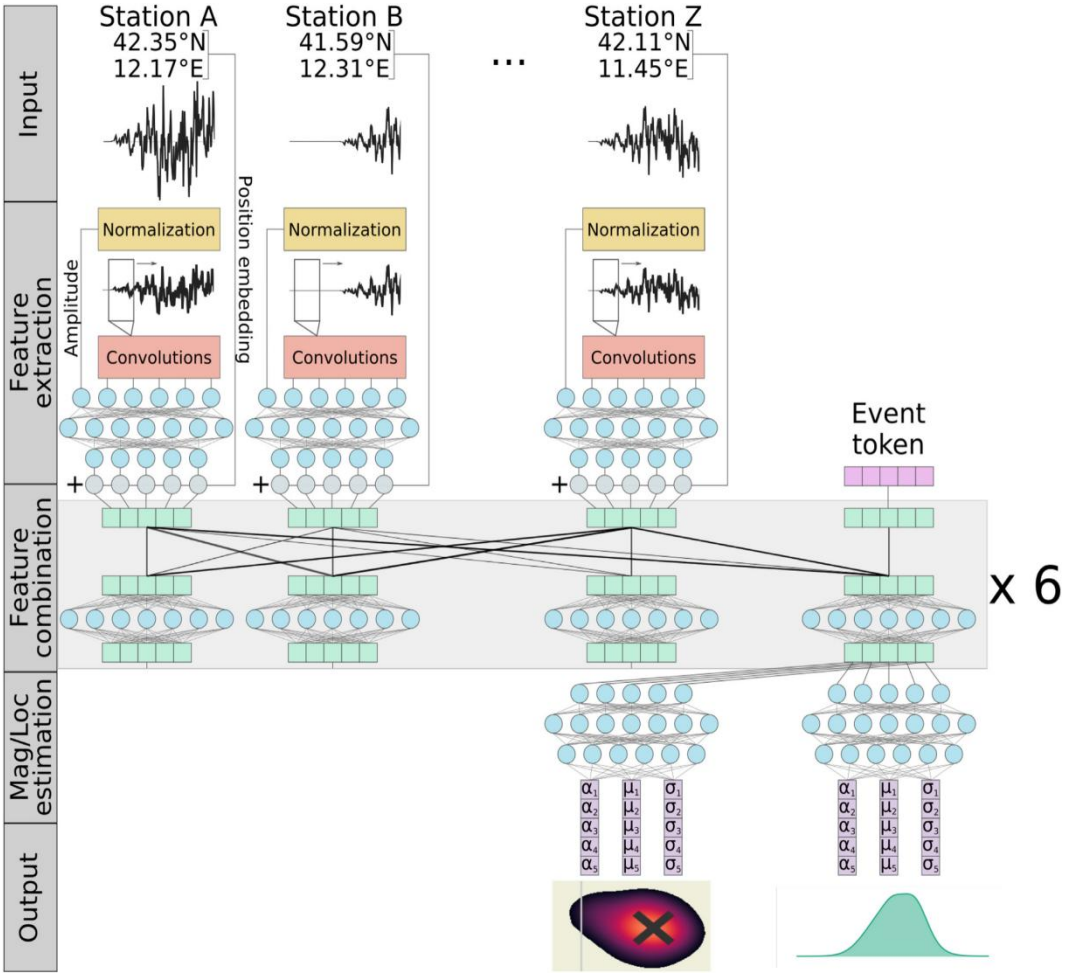
Gambar 3.8 Gambaran model arsitektur TEAM yang menunjukkan *input*, ekstraksi fitur, kombinasi fitur, estimasi PGA, dan output (Münchmeyer dkk., 2021b)

Dari setiap vektor yang dikembalikan oleh transformer, TEAM menghitung prediksi PGA pada satu target. Prediksi PGA diterapkan secara terpisah pada setiap target, tetapi identik untuk semua target. TEAM menggunakan jaringan kepadatan campuran atau *mixture density networks* (Bishop, 1994) yang mengembalikan campuran gaussian untuk menghitung distribusi kepadatan PGA. Campuran gaussian memungkinkan TEAM untuk memprediksi distribusi yang lebih kompleks dan menangkap ketidakpastian yang lebih realistis.

Münchmeyer dkk, (2021a) mengembangkan model untuk estimasi magnitudo dan lokasi gempa secara *real-time* berdasarkan ide-ide inti dari TEAM yang diberi nama TEAM-Location and Magnitudo (TEAM-LM) (Gambar 3.9). *Input* untuk TEAM-LM terdiri dari tiga komponen seismogram dari beberapa stasiun dan lokasi. TEAM-LM menyelaraskan semua seismogram agar dimulai dan berakhir pada waktu yang sama t_0 dan t_1. Waktu t_0 ditandai pada 5 detik sebelum

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

kedatangan pertama gelombang P di stasiun manapun untuk memungkinkan model untuk memahami kondisi kebisingan di semua stasiun. Waktu t_1 paling lambat t_0 + 25 detik.



Gambar 3.9 Gambaran umum model arsitektur TEAM-LM yang menunjukkan input, ekstraksi fitur, kombinasi fitur, estimasi PGA, dan output (Münchmeyer dkk., 2021a)

TEAM-LM menggunakan arsitektur CNN untuk ekstraksi fitur, yang diterapkan secara terpisah di setiap stasiun. Arsitektur ini terdiri dari beberapa lapisan konvolusi, *pooling* dan diikuti oleh *multilayer perceptron*. Setiap masukan *waveform* akan dinormalisasi dengan membaginya dengan amplitudo puncak untuk menghindari masalah skala. TEAM-LM menyediakan logaritma dari amplitudo

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

puncak sebagai *input* tambahan ke *multilayer perceptron* di dalam jaringan ekstraksi fitur karena amplitudo menjadi prediktor kunci untuk magnitudo gempa bumi. Ekstraksi fitur penuh mengembalikan satu vektor untuk setiap stasiun yang mewakili pengukuran di stasiun tersebut.

Vektor fitur dari beberapa stasiun digabungkan menggunakan jaringan Transformer. TEAM-LM mengenkripsikan lintang, bujur, dan ketinggian stasiun menggunakan *embedding* sinusoidal dan menambahkan *embedding* ini ke vektor fitur untuk memberikan Transformer gagasan tentang posisi stasiun. TEAM-LM juga menambahkan *embedding* posisi dari target PGA sebagai *input* tambahan ke Transformer. Untuk mengekstrak informasi tentang gempa bumi ditambahkan token gempa bumi yang merupakan vektor dengan dimensi yang sama seperti *embedding* posisi lokasi stasiun dan dapat dianggap sebagai vektor kueri. *Output* transformer yang digunakan hanya yang sesuai dengan token gempa bumi atau *embedding event* dan yang diteruskan melalui *multilayer perceptron* lainnya untuk memprediksi parameter.

3.7 Metrik Evaluasi Performa Model

Evaluasi performa model *machine learning* merupakan langkah krusial dalam pengembangan dan implementasi model yang efektif. Proses ini melibatkan beberapa teknik dan metrik yang digunakan untuk mengukur seberapa baik model memprediksi data baru yang belum pernah dilihat sebelumnya. Berikut adalah komponen utama dalam evaluasi performa model *machine learning*:

3.7.1 *Precision*

Precision adalah metrik yang mengukur ketepatan prediksi positif model. *Precision* menunjukkan seberapa banyak dari semua prediksi positif yang benar-benar relevan. *Precision* yang tinggi menunjukan model memiliki sedikit *false positive*s (kesalahan positif). Nilai *Precision* dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Positives (TP)}}{\text{True Positives (TP)} + \text{False Positives (FP)}} \tag{3.35}$$

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

di mana *True Positives* (TP) adalah prediksi positif yang benar, dan *False Positives* (FP) adalah prediksi positif yang salah.

3.7.2 *Recall*

Recall atau *True Positive Rate* adalah metrik untuk mengukur seberapa baik model dapat menemukan semua contoh positif yang relevan di data. *Recall* yang tinggi menunjukan model memiliki sedikit *false negative*s (kesalahan negatif). Nilai *Recall* dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Recall} = \frac{\text{True Positives (TP)}}{\text{True Positives (TP)} + \text{False Negatives (FN)}} \tag{3.36}$$

di mana *True Positives* (TP) adalah prediksi positif yang benar, dan *False Negatives* (FN) adalah prediksi negatif yang salah.

3.7.3 F1-*Score*

F1-*Score* adalah metrik harmonis antara *Precision* dan *Recall*. Metrik ini memberikan keseimbangan ketika ingin mempertimbangkan aspek *precision* dan *recall* secara bersamaan. Nilai *F1-Score* dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{F1 Score} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \tag{3.37}$$

3.7.4 AUC (*Area Under the Curve*)

AUC adalah metrik yang digunakan untuk mengukur luas di bawah kurva *precision-recall*. Nilai AUC yang tinggi, makin baik model dalam mendeteksi kejadian penting. Nilai AUC dirumuskan sebagai berikut:

$$AUC = \sum_{n} (R_n - R_{n-1}) \cdot P_n \tag{3.38}$$

di mana $R_n - R_{n-1}$ adalah perubahan *recall* antara dua *threshold*, P_n adalah *precision* pada ambang batas ke-*n*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.7.5 R^2 (*R-squared*)

R^2 adalah koefisien determinasi berguna untuk mengukur seberapa baik model regresi menjelaskan variabilitas data dependen sekitar rata-rata. Nilai R^2 dirumuskan sebagai berikut:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{3.39}$$

di mana y_i adalah nilai observasi aktual, $\hat{y}_i$ adalah nilai prediksi dari model, dan $\bar{y}$ adalah nilai rata-rata dari observasi.

Nilai R^2 berkisar antara 0 s.d. 1. Jika $R^2 = 1$, maka menunjukkan bahwa model menjelaskan semua variabilitas data (semua data jatuh tepat pada garis regresi). Jika $R^2 = 0$, maka menunjukkan model tidak menjelaskan variabilitas data sama sekali. Makin tinggi nilai R^2, makin baik model dalam menjelaskan variabilitas data.

3.7.6 *Root Mean Squared Error* (RMSE)

RMSE adalah metrik yang mengukur akar dari rata-rata kuadrat dari kesalahan prediksi. RMSE mengukur seberapa besar kesalahan yang dibuat model dalam prediksi, dalam satuan yang sama dengan variabel yang diprediksi. Nilai RMSE dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{3.40}$$

di mana y_i adalah nilai sebenarnya, $\hat{y}_i$ adalah nilai prediksi, dan n adalah jumlah pengamatan.

RMSE sensitif terhadap *outlier*. RMSE memberikan penilaian yang lebih besar terhadap galat besar karena galat dipangkatkan sebelum diambil rata-rata. Nilai RMSE yang lebih rendah menunjukkan kinerja model yang lebih baik.

3.7.7 *Mean Absolute Error* (MAE)

MAE adalah metrik yang mengukur rata-rata kesalahan absolut antara nilai prediksi dan nilai sebenarnya. MAE menunjukkan seberapa besar kesalahan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

prediksi model dalam satuan yang sama dengan data asli. Nilai MAE dirumuskan sebagai berikut:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \tag{3.41}$$

di mana y_i adalah nilai sebenarnya, $\hat{y}_i$ adalah nilai prediksi, dan n adalah jumlah pengamatan.

MAE memberikan ukuran kesalahan yang lebih intuitif karena menggunakan nilai absolut. MAE memberikan kesalahan rata-rata tanpa memperhitungkan arah galat (positif atau negatif). Nilai MAE yang lebih rendah menunjukkan kinerja model yang lebih baik. MAE tidak memberikan penalti tambahan untuk galat besar seperti RMSE, sehingga lebih *robust* terhadap *outliers*.

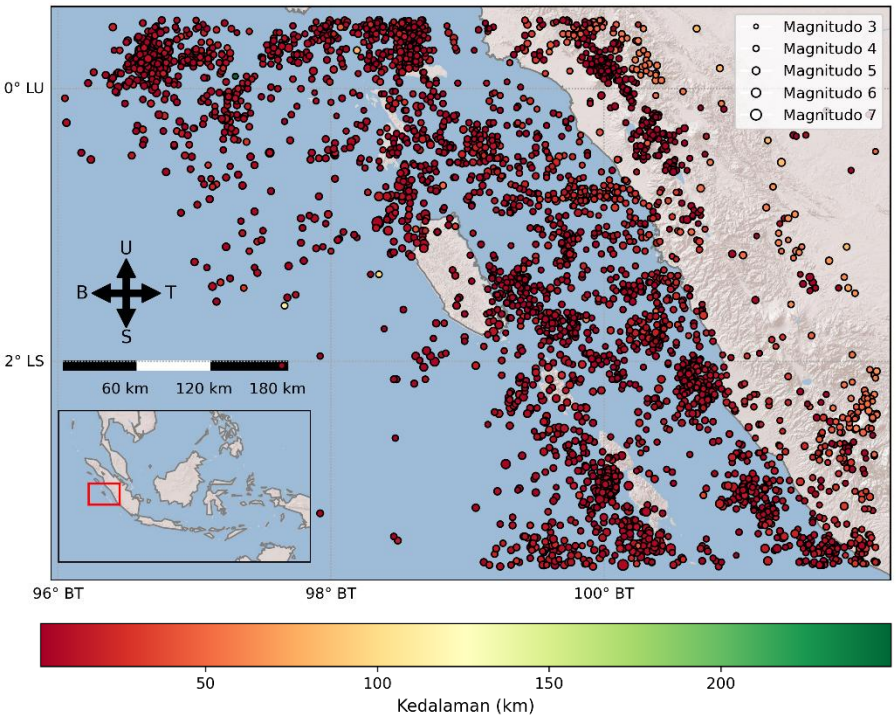
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

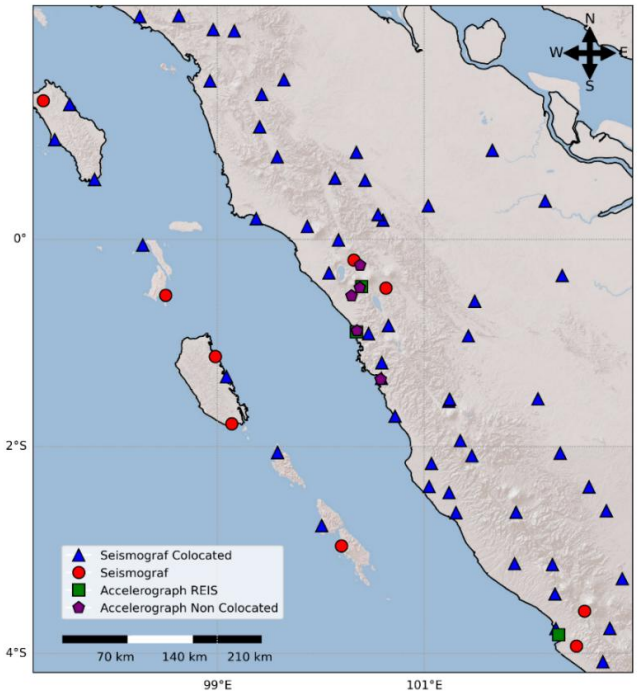
4.1 Lokasi dan Data Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di Sumatra Barat dengan koordinat lokasi penelitian 0,5 ° LU – 3,5 ° LS dan 96° BT – 102° BT. Data penelitian menggunakan data katalog dan *waveform* gempa bumi tanggal 1 Januari 2010 s.d. 31 Desember 2024 yang bersumber dari BMKG. Data terdiri dari 3.332 gempa bumi dengan rentang magnitudo 3,0 – 7,1 dari 68 stasiun seismik. Stasiun seismik tersebut dapat dibagi menjadi 5 kategori yaitu seismograf, seismograf *collocated* yang lokasinya berdampingan dengan akselerograf, akselerograf REIS (*Rapid Earthquake Information System*), dan akselerograf *non collocated*. Seluruh stasiun perekaman menggunakan instrumen 3 komponen. Persebaran lokasi stasiun dan gempa bumi ditunjukkan pada Gambar 4.1.



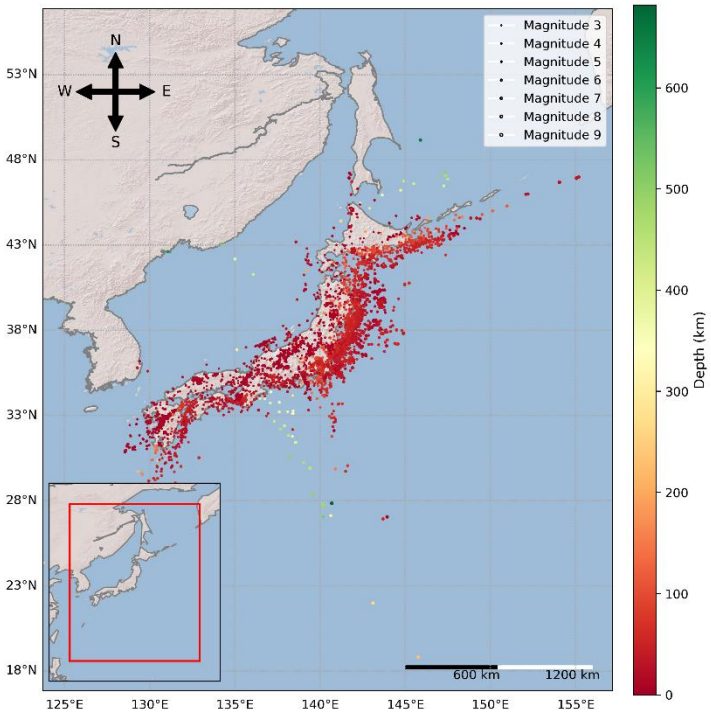
(a)

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



(b)

Gambar 4.1 (a) Lokasi dan data gempa bumi dan (b) stasiun perekaman di wilayah penelitian



Gambar 4.2 Lokasi dan data gempa bumi Jepang.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Penelitian ini juga memakai *dataset* gempa bumi Jepang tahun 2006–2018 sebagai data dukung pelatihan model (Gambar 4.2). *Dataset* Jepang dipilih sebagai data pendukung karena menawarkan beberapa keuntungan metodologis yang tidak dapat dipenuhi sepenuhnya oleh katalog gempa di Sumatra Barat. Pertama, rentang magnitudonya sangat luas ($1{,}7<M_{JMA}<9{,}0$) sehingga dapat memberikan contoh gempa *megathrust* $M \geq 8$ yang masih jarang terekam di wilayah studi tetapi krusial untuk melatih model agar tidak bias ke kejadian bermagnitudo menengah. Kedua, jaringan 697 stasiun KiK-net dan K-NET memiliki kerapatan tinggi yang memperkaya ragam pola seismogram pada fase awal gelombang P. Ketiga, kondisi tektonik Jepang didominasi subduksi lempeng mirip dengan zona Mentawai. Keempat, data gempa Jepang relatif mudah diakses oleh publik. Kelima, studi Münchmeyer dkk. (2021b, 2021a) menunjukkan bahwa strategi *domain-adaptation* yang menggabungkan data Jepang ke dataset target secara signifikan meningkatkan stabilitas prediksi besaran magnitudo dan PGA pada gempa besar, tanpa menurunkan akurasi untuk kejadian kecil. Dengan demikian, memakai *dataset* gempa Jepang memungkinkan model TEAM dan TEAM-LM belajar distribusi probabilitas PGA yang lebih realistis, mengurangi *underestimation* pada magnitudo besar, dan akhirnya menghasilkan parameter magnitudo, hiposenter, serta PGA yang lebih andal ketika diaplikasikan pada data Sumatra Barat.

4.2 Metode Pengolahan

Prosedur pengolahan data pada penelitian ini meliputi:

1. Pembuatan *Dataset* Gempa Bumi Sumatra Barat
   a. Mengunduh data gempa bumi

      Data gempa bumi diunduh dari alamat https://geof.bmkg.go.id/webdc3/ atas izin BMKG. Data diunduh dengan memilih penyedia katalog (*catalog service*) dari BMKG. Pengunduhan dilakukan dengan memilih data gempa berdasarkan interval waktu dan parameter penelitian seperti magnitudo, kedalaman, dan koordinat. Stasiun yang dipilih berasal dari semua jaringan dengan filter jarak 1° dari pusat gempa dan azimut 0–360°. Jenis kanal yang

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

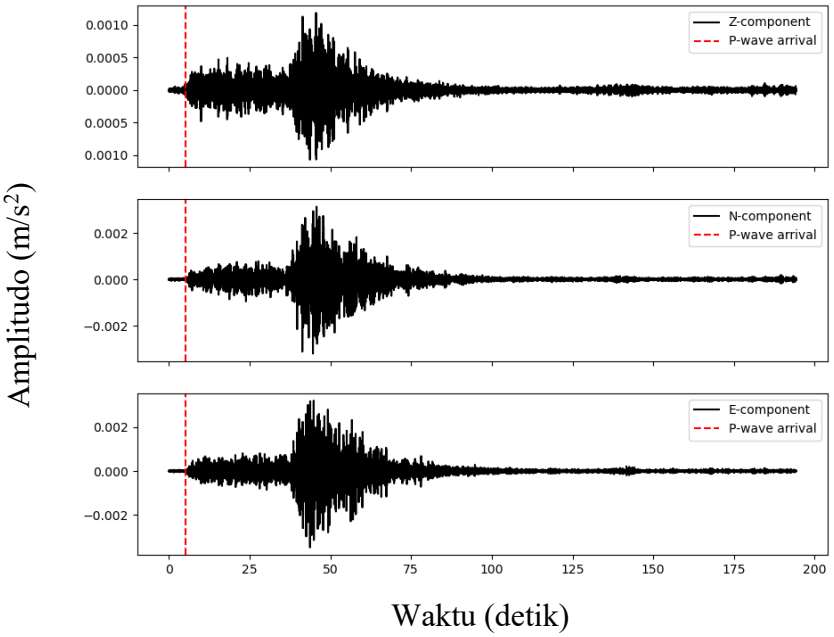
digunakan meliputi HN, BH, dan SH. Jendela waktu pengambilan data disesuaikan secara relatif terhadap waktu tiba gelombang P, yaitu mulai dari 1 menit sebelum hingga 10 menit setelah kedatangan gelombang P. Data yang diunduh terdiri dari waveform dalam format Mini-SEED dan metadata dalam format StationXML.

b. Pengolahan sinyal

Waveform gempa bumi yang sudah diunduh ada yang masih berupa kecepatan dan ada yang sudah dalam bentuk percepatan. *Waveform* yang masih berupa kecepatan akan diturunkan menjadi percepatan. Selanjutnya *waveform* akan dikoreksi *baseline* dan dihilangkan respon instrumen menggunakan metadata yang sudah diunduh untuk mendapatkan percepatan dalam m/s^2.

Waveform dari masing-masing stasiun akan dicek dengan data waktu tiba gelombang P dari katalog *arrival* BMKG. Jika data waktu tiba gelombang P ada, maka *waveform* akan ditandai dengan waktu tiba gelombang P dari data tersebut. Jika data gelombang P tidak tersedia, maka akan dilakukan perhitungan prediksi waktu tiba gelombang P. Prediksi tersebut dihitung secara dengan menggunakan informasi lokasi dan waktu kejadian dari katalog BMKG. Selanjutnya, waktu tersebut akan dikoreksi menggunakan metode STA/LTA rekursif dan AR-AIC dari pustaka ObsPy (Beyreuther dkk., 2010) di sekitar perkiraan kedatangan gelombang P (Gambar 4.3). Jika *waveform* tidak memenuhi nilai ambang batas yang ditetapkan, maka *waveform* tidak akan dipakai.

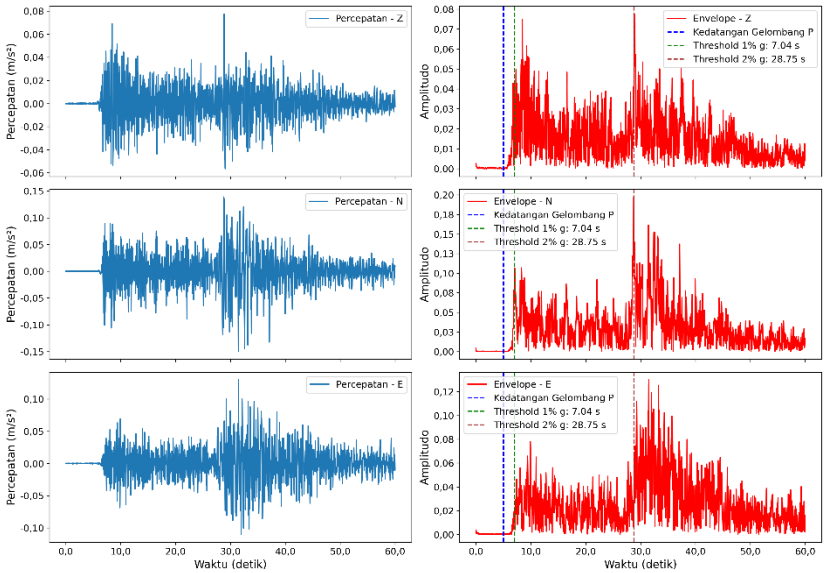
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 4.3 Seismogram gempa 19 Desember 2024 pukul 01:17:17 UTC di stasiun TMSM yang waktu tiba gelombang P (garis putus-putus berwarna merah) dicuplik dengan AR-AIC di sekitar waktu hasil dari STA/LTA dan perhitungan prediksi waktu tiba gelombang P. *E-N-Z component* merupakan komponen *waveform*.

Selanjutnya *waveform* akan dibuat dalam bentuk *envelope* untuk memudahkan dalam menghitung nilai PGA. Nilai PGA dihitung dari *envelope* masing-masing komponen dan selanjutnya dihitung menggunakan rata-rata geometrik (Gambar 4.4). Kemudian *envelope* juga akan digunakan untuk pencarian sampel yang melebihi ambang batas 1% g, 2% g, 5% g, 10% g, dan 20% g. Penentuan ambang batas PGA sebesar 1% g, 2% g, 5% g, 10% g, dan 20% g, yang secara kasar sesuai dengan Modified Mercalli Intensity (MMI) III (ringan) hingga VII (sangat kuat) (Wald dkk., 1999). Nilai PGA dihitung dari nilai rata-rata geometrik komponen horizontal.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

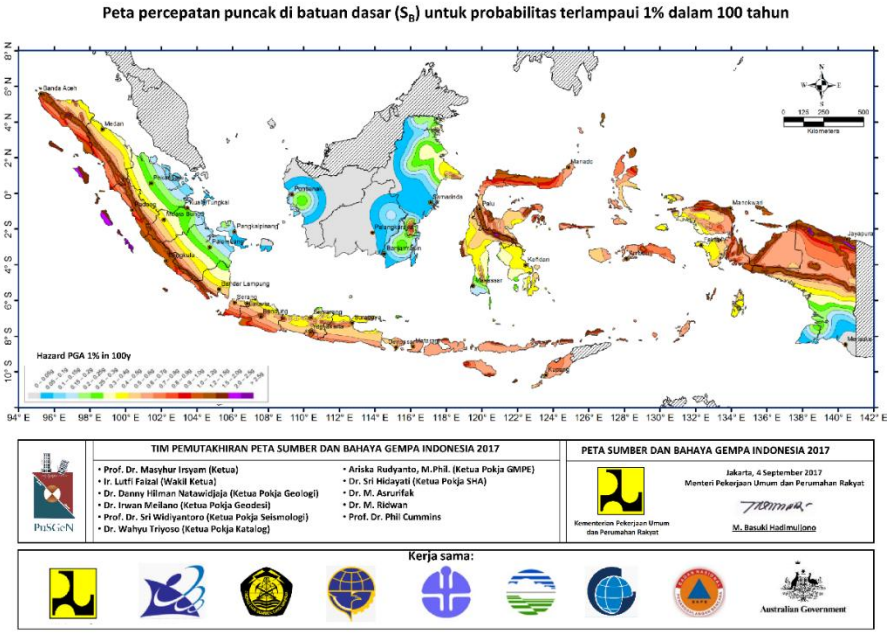


(a) (b)

Gambar 4.4 (a) Contoh *waveform* gempa bumi Mentawai 23 Februari 2024 dengan magnitudo M_w 5,3 yang terekam di stasiun PBSI. (b) *Waveform* dalam bentuk *envelope* yang sudah beri tanda untuk waktu kedatangan gelombang P (warna biru) dan waktu ketika waktu PGA melebihi batas 1% g (warna hijau), 2% g (oranye), 5% g (warna cyan).

Nilai PGA kemudian akan disaring dengan melakukan pemeriksaan buatan atau *artificial check*. Pemeriksaan tersebut dilakukan dengan menggunakan kriteria PGA untuk masing-masing komponen. Jika ada salah satu komponen PGA nilainya sama dengan 0 atau PGA di atas 250% g maka *waveform* akan dihapus, meskipun dua komponen lainnya memiliki nilai yang *valid*. Pemilihan nilai di atas 250 %, mengacu pada Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar untuk Probabilitas Terlampaui 1% dalam 100 tahun dari Irsyam dkk., (2017) yang menunjukkan bahwa di Sumatra Barat potensi terjadinya PGA maksimal dengan nilai tersebut (Gambar 4.5).

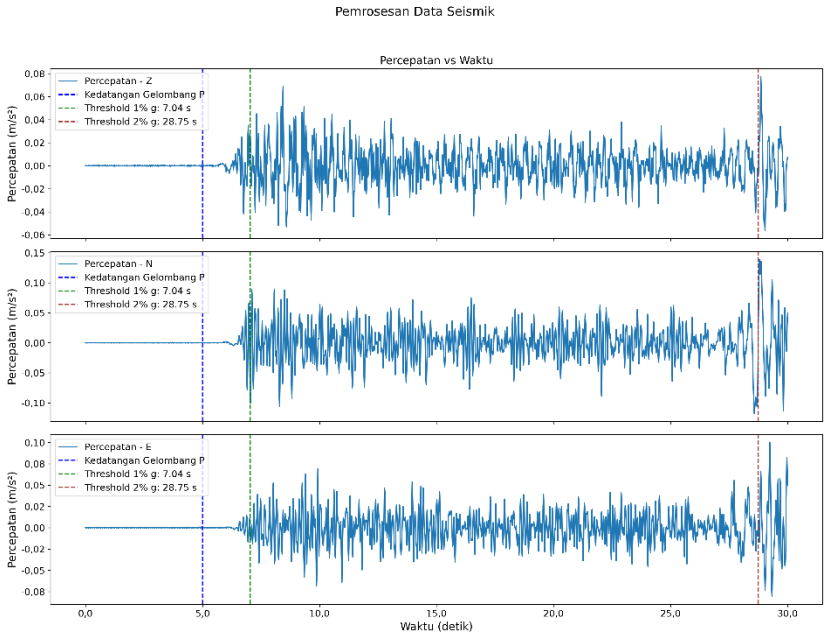
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 4.5 Peta percepatan puncak di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 1% dalam 100 tahun (Irsyam dkk., 2017)

Waveform selanjutnya akan diinterpolasi menjadi 100 Hz dan diaplikasikan filter untuk meningkatkan kualitas sinyal. Selanjutnya, sinyal tersebut dipotong 5 detik sebelum dan 25 detik setelah kedatangan gelombang P (Gambar 4.6). Pemotongan ini dilakukan untuk memfokuskan analisis pada data awal gempa bumi.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 4.6 Contoh data akhir yang dipakai untuk membuat dataset gempa bumi Sumatra Barat dari *waveform* gempa bumi Mentawai 23 Februari 2024 dengan magnitudo M_w 5,3 yang terekam di stasiun PBSI. Garis putus-putus berwarna biru merupakan waktu kedatangan gelombang P. Garis putus-putus berwarna hijau merupakan waktu ketika PGA melebih 1% g. Garis putus-putus berwarna merah merupakan waktu ketika PGA melebih 2% g.

c. Konversi magnitudo

Data kejadian gempa yang diperoleh dari BMKG memiliki berbagai skala magnitudo. Skala-skala tersebut meliputi magnitudo gelombang permukaan (M_s), magnitudo lokal Richter (M_l), magnitudo gelombang badan (M_b), dan magnitudo momen (M_w). Untuk memastikan konsistensi dalam analisis seismik, dilakukan konversi skala magnitudo menjadi magnitudo momen M_w memakai rumusan Diantari dkk. (2018) (Tabel 4.1).

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 4.1 Korelasi hubungan antara magnitudo momen dan beberapa skala magnitudo di Indonesia (Diantari dkk., 2018)

Rumus Empiris	Jumlah Gempa	Koefisien R^2	Rentang Data
M_w = 0,707 M + 1,3684	1.393	0,6435	3,8 ≤ M ≤ 6,5
M_w = 0,7946 m_B + 0,9046	1.445	0,6932	3,9 ≤ M ≤ 6,3
M_w = 0,5468 MLv + 2,076	1.144	0,5357	3,8 ≤ MLv ≤ 6,2
M_w = 0,8981 $M_w(m_B)$ + 1,3684	476	0,9164	4,7 ≤ $M_w(m_B)$ ≤ 7,9

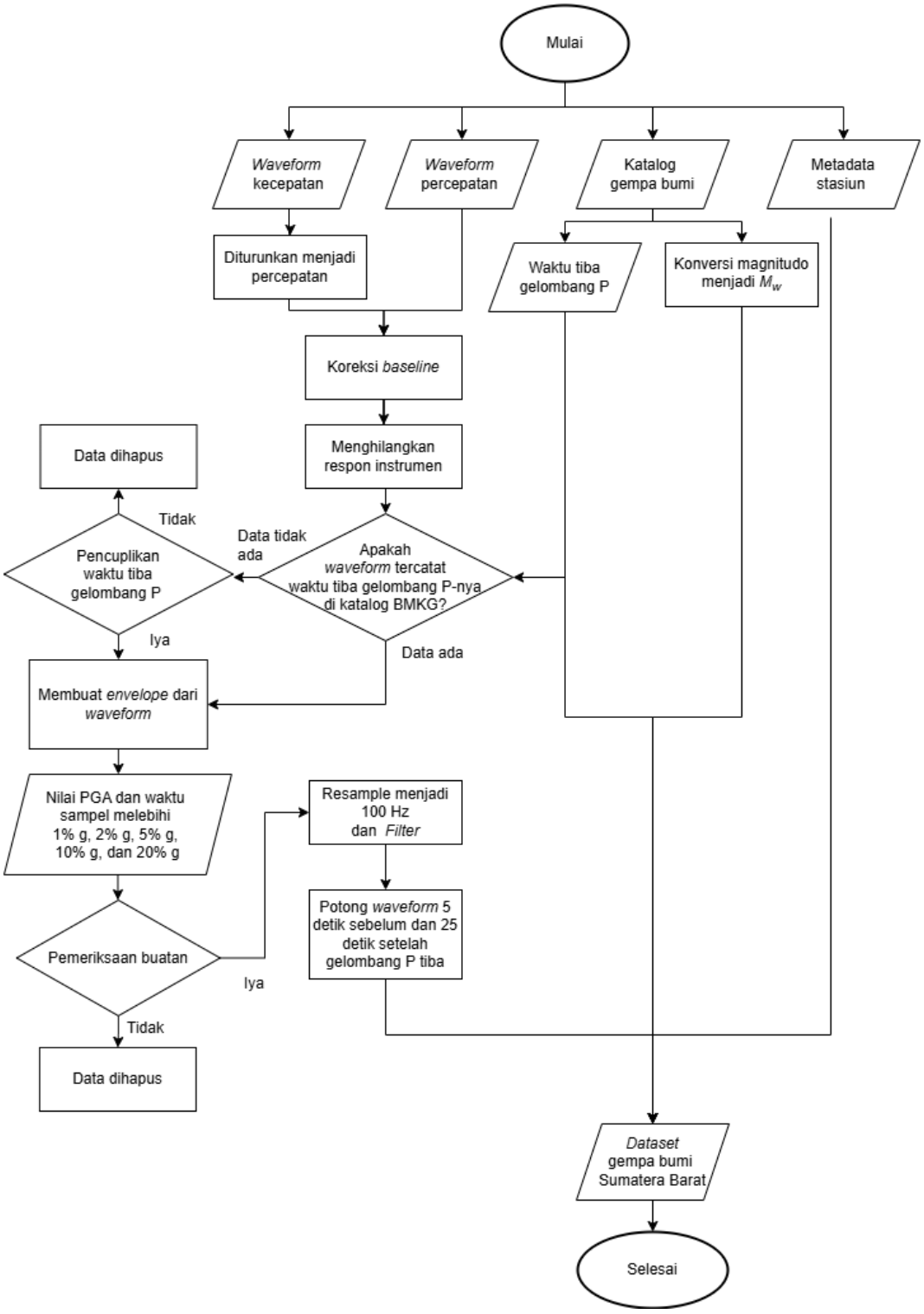
d. Menyusun *dataset*

Data-data yang sudah dihasilkan akan dibuat *dataset* dalam *file* dengan ekstensi *The Hierarchical Data Format* versi 5 (HDF5). HDF5 dirancang untuk menangani struktur data yang kompleks dan mendukung berbagai jenis data termasuk *array*, struktur, dan objek. Secara umum isi *dataset* yang digunakan dapat dilihat di Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan *dataset* yang digunakan dalam penelitian

	Jepang		**Sumatra Barat**	
Periode	2006–2018		2010–2024	
Magnitudo	1,7–9,0		3,0–7,1	
Skala Magnitudo	M_{JMA}		$M, M_{Lv}, m_B, M_w(m_B)$	
Jumlah Gempa	10.121		3.332	
Jumlah Stasiun	697		68	
Waveform	295.352		42.177	
Waveform per Gempa	29,18		12,59	
PGA [g]	Gempa	*Waveform*	Gempa	*Waveform*
1%	6.677	42.286	911	1.728
2%	4.037	18.415	441	686
5%	1.534	5.022	129	156
10%	577	1.595	34	38
20%	180	434	8	8
Tipe Sensor	SM dan SM-borehole		BB dan SM	
Sumber Katalog	NIED		BMKG	

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 4.7 Diagram alir pengolahan *dataset*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2. Pelatihan Model

Pelatihan model dilakukan berdasarkan konfigurasi dalam *file* JSON yang mencakup parameter pelatihan dan arsitektur. Konfigurasi untuk model magnitudo, lokasi dan PGA terdapat beberapa eksperimen yang dapat dilihat di bagian lampiran Tabel 1.

3. Evaluasi Model

Peringatan gempa di suatu lokasi dikeluarkan jika ambang batas PGA terlampaui di lokasi tersebut. Dalam mengeluarkan peringatan, yang perlu dihitung adalah waktu peringatan. Waktu tersebut didefinisikan sebagai selisih waktu antara dikeluarkannya peringatan dan waktu di saat ambang batas terlampaui pertama kali.

Evaluasi peringatan mencakup kategori *true positive, false negative, false positive,* dan *true negative*. Peringatan gempa dianggap benar (*true positive*) jika peringatan untuk ambang batas tertentu dikeluarkan dan ambang batas terlampaui selama gempa. Peringatan yang terlewat (*false negative*) terjadi jika ambang batas PGA terlampaui, tetapi tidak ada peringatan yang dikeluarkan setelah ambang batas terlampaui. Sebuah peringatan dianggap salah (*false positive*) jika peringatan dikeluarkan, tetapi ambang batas tidak terlampaui. Semua kasus yang tersisa dianggap sebagai *true negative*. Jumlah *true negative* sangat bergantung pada cakupan dalam katalog.

Kinerja sistem peringatan dinilai berdasarkan ambang batas PGA, mulai dari guncangan ringan (1% g) hingga guncangan sangat kuat (20% g). Penilaian dilakukan dengan menggunakan dua metrik utama yaitu *precision* dan *recall*. Sesuai dengan penelitian sebelumnya dari Meier dkk., (2017) dan Minson dkk., (2019), terdapat hubungan yang saling berlawanan antara *precision* dan *recall*. Kedua nilai dipengaruhi oleh penyesuaian nilai ambang batas α dalam sistem peringatan. Nilai ambang batas memainkan peran penting dalam mengatur keseimbangan antara kedua jenis metrik tersebut. Selain itu, skor F1 digunakan sebagai statistik

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

gabungan. AUC juga digunakan untuk analisis independen dari ambang batas.

Evaluasi model untuk target magnitudo, lokasi, dan PGA mencakup nilai-nilai metrik kinerja, di antaranya:

a. R^2, RMSE, MAE untuk magnitudo
b. RMSE dan MAE untuk hiposenter
c. R^2, RMSE, MAE untuk PGA

4. Perbandingan hasil model

   Hasil dari model akan dibandingkan dengan sistem pengolahan gempa bumi yang digunakan BMKG. Perbandingan tersebut meliputi magnitudo, hiposenter, PGA dan waktu parameter gempa bumi dibuat.

4.3 Perangkat Keras dan Lunak yang Digunakan

TEAM dan TEAM-LM dibangun menggunakan TensorFlow 1.14 dengan CUDA 10.0. Perkembangan Linux dan GPU dengan arsitektur terbaru membuat TensorFlow versi 1.14 sudah tidak dapat dijalankan dengan GPU. TEAM dan TEAM-LM hanya mendukung kartu grafis Nvidia GTX 1000 series atau lebih lama. Oleh karena itu, perlu modifikasi kode agar lebih kompatibel.

Pada penelitian ini TEAM dan TEAM-LM dimodifikasi agar bisa berjalan menggunakan TensorFlow 2.15. TensorFlow 2.x menawarkan kompatibilitas yang lebih baik dengan perangkat keras dan perangkat lunak modern, termasuk dukungan untuk CUDA 12.x dan arsitektur GPU terbaru seperti NVIDIA RTX 3000 series. TEAM yang sudah dimutakhirkan dapat diakses di https://github.com/sigiteko/TEAM_Sumbar.

Berikut merupakan perangkat keras dan perangkat lunak yang dipergunakan sebagai sarana penunjang terlaksananya penelitian ini:

1. Perangkat keras
   a. *Notebook* dengan prosesor 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12500H (16 CPUs), ~2.5GHz, RAM 16 GB DDR4, NVIDIA GeForce RTX 3050 Laptop GPU, sistem operasi Windows 11 Home untuk pengolahan *dataset*.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

b. Komputer yang dijalankan dalam lingkungan mesin virtual berbasis KVM (*Kernel-based Virtual Machine*). Mesin virtual ini menggunakan prosesor virtual QEMU Virtual CPU versi 2.5+ dengan 12 core logi, RAM 94 GB, NVIDIA GeForce RTX 3060 Ti Lite Hash Rate 8.192 Mb, sistem operasi Ubuntu 22.04.4 LTS untuk pelatihan model.

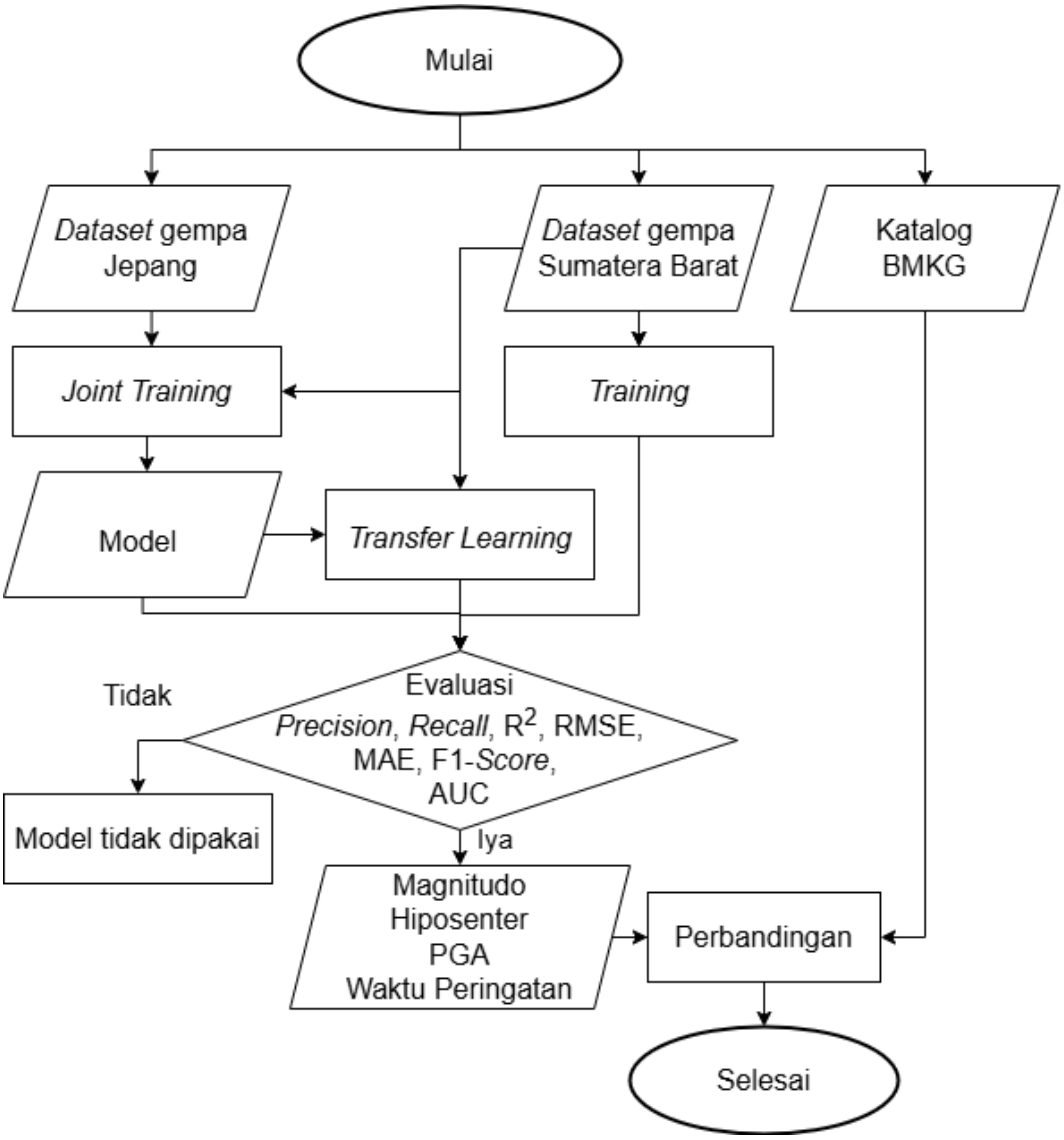
2. Perangkat lunak

a. Basemap 1.4.1
b. Cuda-Version 12.2
c. Cudnn 8.9.7.29
d. H5py 3.8.0
e. Matplotlib 3.7.5
f. Numpy 1.24.4
g. Obspy 1.4.1
h. Pandas 2.2.3
i. Pyrocko 2025.1.21
j. Python 3.9.21
k. Requests 2.28.2
l. Scikit-Learn 1.2.2
m. Scipy 1.10.1
n. Seaborn 0.13.2
o. Tables 3.9.2
p. Tqdm 4.65.2
q. TensorFlow 2.15

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.4 Diagram Alir Penelitian

Dalam penyusunan penelitian ini, penulis melaksanakan tahapan-tahapan pengolahan data yang terangkum dalam diagram alir penelitian berikut:



Gambar 4.8 Diagram alir penelitian

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB V
HASIL DAN PEMBAHASAN

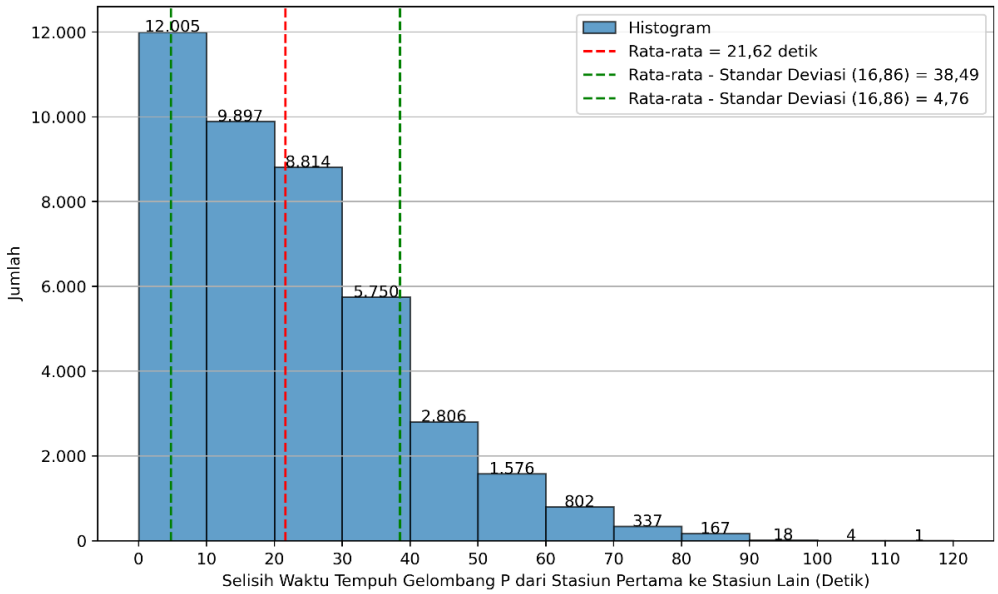
5.1 Pelatihan dan Pengujian Model

Dataset dibagi secara acak dengan rasio 60:10:30 untuk data pelatihan, pengembangan, dan pengujian. Pembagian acak untuk memastikan skenario mirip dengan aplikasi aktual dalam pengaturan peringatan dini. Pembagian menjadi data pelatihan, pengembangan, dan pengujian memberikan keseimbangan antara pelatihan model, penyetelan *hyperparameter*, dan evaluasi akhir. Stasiun yang digunakan dalam pelatihan sebanyak 35 stasiun dengan waktu kedatangan tercepat.

Kinerja model magnitudo, hiposenter, PGA dan waktu peringatan dievaluasi berdasarkan satuan waktu setelah gelombang P pertama kali terdeteksi di stasiun terdekat. Penentuan evaluasi waktu dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi data selisih waktu tempuh gelombang P antara stasiun dengan stasiun terdekat dari sumber gempa bumi. Berdasarkan Gambar 5.1, mayoritas data terkonsentrasi pada selisih waktu tempuh kurang dari 10 detik, dengan jumlah mencapai 12.005 stasiun. Rata-rata selisih waktu tempuh ini sebesar 21,62 detik yang merepresentasikan pusat distribusi, sedangkan standar deviasi sebesar 16,86 detik menunjukkan sebaran data. Berdasarkan nilai standar deviasi, rentang waktu dominan berada pada kisaran 4,76 hingga 38,49 detik. Nilai 4,76 detik sebagai batas bawah di mana data masih padat dan 38,49 detik sebagai batas atas distribusi dengan jumlah data yang masih signifikan.

Distribusi histogram Gambar 5.1 menunjukkan bahwa sebagian besar selisih waktu tempuh antarstasiun relatif singkat, meskipun masih terdapat data di bagian kanan akibat waktu tempuh yang lebih lama pada stasiun yang berjarak lebih jauh dari sumber gempa. Dengan mempertimbangkan temuan data tersebut, rentang waktu yang digunakan adalah 0,5; 1; 2; 5; 10; 15; 22; dan 39 detik. Rentang ini dipilih karena mencakup nilai-nilai penting dari distribusi dan mampu merepresentasikan dinamika waktu tempuh gelombang P secara lebih komprehensif berdasarkan data historis.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



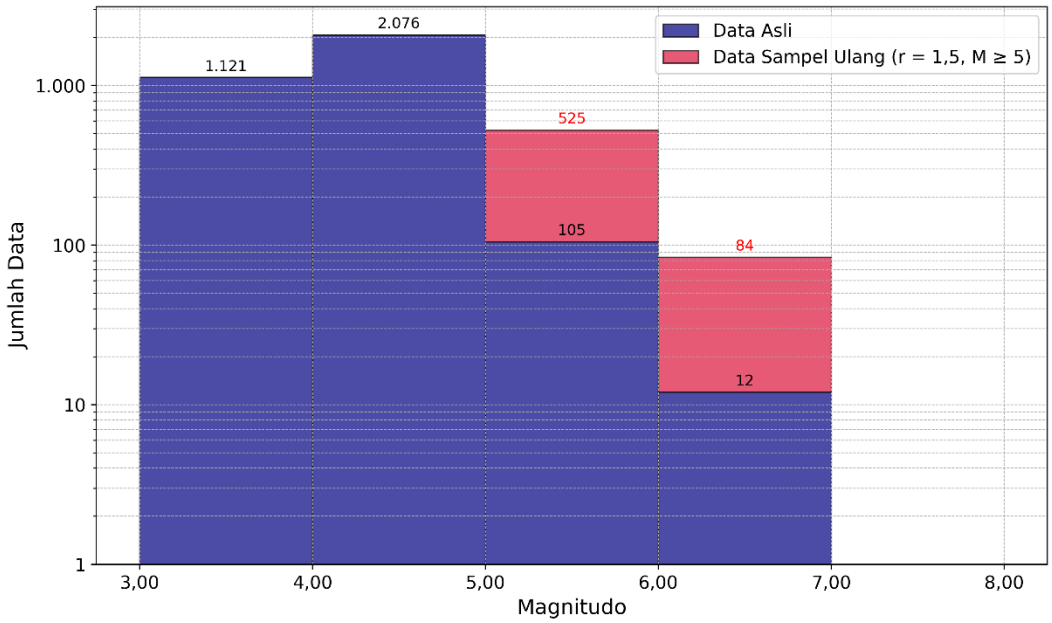
Gambar 5.1 Histogram distribusi frekuensi dari selisih waktu tempuh gelombang P dari stasiun pertama ke stasiun lain. Histogram digambar diagram batang warna biru. Sumbu horizontal menunjukkan waktu tempuh dalam detik dan sumbu vertikal menunjukkan jumlah kejadian dalam setiap rentang waktu tertentu. Garis putus-putus berwarna merah menunjukan nilai rata-rata, garis putus-putus berwarna hijau menunjukan nilai rentang batas atas dan bawah berdasarkan standar deviasi.

Dalam analisis data seismik, distribusi kejadian gempa bumi sering kali tidak merata dengan jumlah kejadian gempa kecil jauh lebih banyak dibandingkan gempa besar. Ketidakseimbangan ini dapat menyebabkan bias dalam model yang digunakan untuk memprediksi parameter gempa seperti magnitudo dan PGA. Untuk mengatasi hal tersebut, perlu dilakukan teknik sampel ulang. Teknik ini digunakan untuk meningkatkan jumlah sampel dari kelas yang kurang terwakili dalam dataset yang mana dalam studi ini adalah gempa bumi dengan magnitudo besar. Selain itu, teknik ini bertujuan untuk memastikan bahwa model tidak hanya belajar dari gempa dengan magnitudo kecil tetapi juga dapat secara akurat mengenali pola dari magnitudo gempa yang lebih besar.

Dalam pembuatan model, dilakukan proses sampel ulang deterministik bertingkat terhadap data dengan magnitudo ≥ 5 menggunakan skema eksponensial dengan faktor $r = 1{,}5$, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.2. Hasil dari proses

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ini divisualisasikan dalam bentuk histogram yang memperlihatkan distribusi jumlah data berdasarkan nilai magnitudo. Warna biru mewakili distribusi data asli, sedangkan warna merah muda menunjukkan tambahan data hasil sampel ulang. Dengan metode ini, *dataset* menjadi lebih seimbang dibandingkan dengan data asli dan diharapkan dapat meningkatkan kemampuan model dalam mengenali gempa pada kelas magnitudo tinggi yang sebelumnya kurang terwakili.



Gambar 5.2 Histogram distribusi jumlah magnitudo gempa bumi dan hasil sampel ulang

5.1.1 Magnitudo

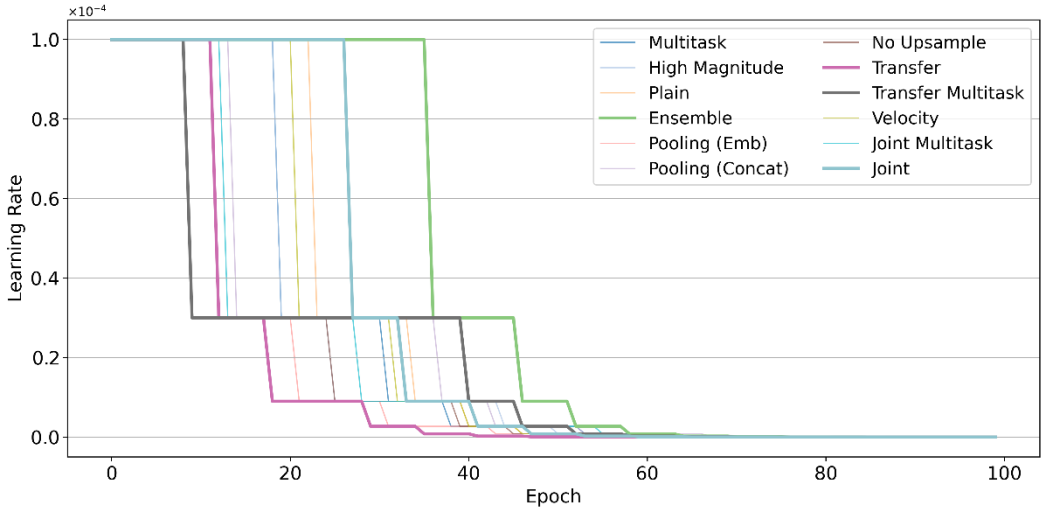
Strategi pelatihan dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah prapelatihan pada data *single-station* selama 35 *epoch* untuk mempercepat konvergensi dan stabilisasi fitur awal. Tahap kedua adalah pelatihan penuh menggunakan data *multi-station* selama 100 *epoch*. Ukuran *batch* ditetapkan sebesar 64 berdasarkan penelitian Münchmeyer dkk. (2021a) untuk menjaga keseimbangan antara kecepatan komputasi dan kestabilan pembaruan parameter.

Seluruh eksperimen menggunakan teknik pengacakan (*shuffle*) data latih dan validasi untuk mencegah *overfitting* terhadap urutan data. Selain itu, diterapkan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

metode *trigger-based training* yaitu pembelajaran difokuskan pada segmen data yang berdekatan dengan waktu kedatangan gelombang seismik utama sesuai dengan pendekatan yang diperkenalkan dalam studi pelatihan berbasis *event triggers* pada data seismik (Münchmeyer dkk., 2021a). Teknik *selection skew* sebesar 1.000 digunakan untuk menekankan sampel dengan karakteristik tertentu yang dinilai kritis terhadap performa model.

Proses pelatihan diawali dengan penerapan laju pembelajaran atau *learning rate.* Secara umum, dinamika *learning rate* ini mencerminkan perbedaan kapasitas generalisasi dan kecepatan konvergensi antarmodel untuk dipertimbangkan dalam strategi pelatihan dan pemilihan model akhir. *Learning rate* dalam penelitian ini sebesar 10^{-4} yang dioptimalkan lebih lanjut melalui pemantauan validasi. Teknik *gradient clipping* dengan batas maksimum 1,0 diterapkan guna menghindari masalah *exploding gradient* dan menjaga stabilitas selama *back propagation*. Skema penurunan *learning rate* berbasis performa validasi (*ReduceLROnPlateau*). Skema tersebut secara otomatis menurunkan nilai *learning rate* saat tidak ada peningkatan *loss* validasi dalam beberapa *epoch*.

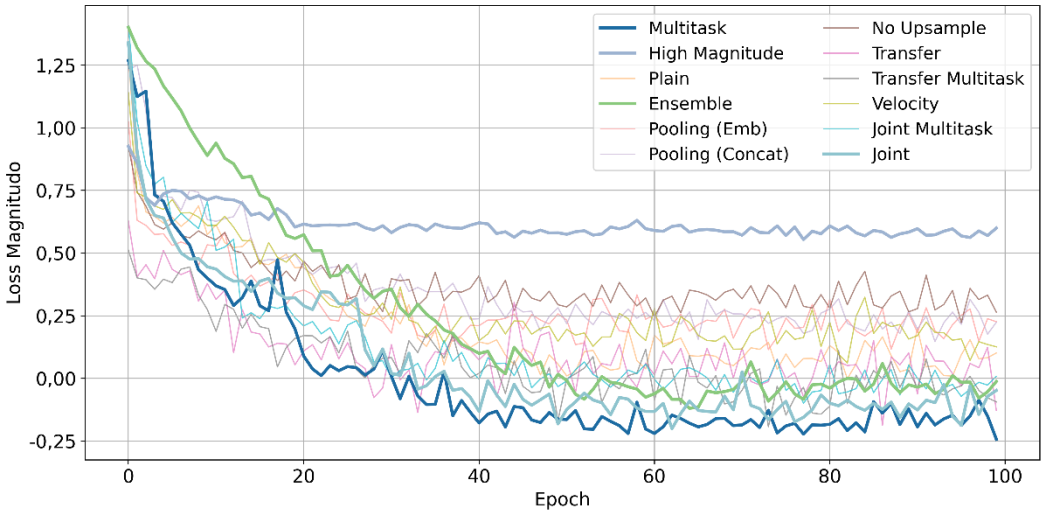


Gambar 5.3 Grafik perubahan nilai *learning rate* (sumbu y) magnitudo selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Penurunan *learning rate* pertama di Gambar 5.3 umumnya terjadi antara *epoch* ke-10 hingga ke-40 menyesuaikan karakteristik konfigurasi pelatihan masing-masing. Konfigurasi *Transfer Multitask* mengalami penurunan paling awal sebelum *epoch* ke-10, sedangkan *Ensemble* mempertahankannya hingga sekitar *epoch* ke-40. *Transfer* menjadi konfigurasi yang pertama stabil sebelum *epoch* ke-40, yang mencerminkan penyesuaian dari parameter pralatih terhadap data baru.

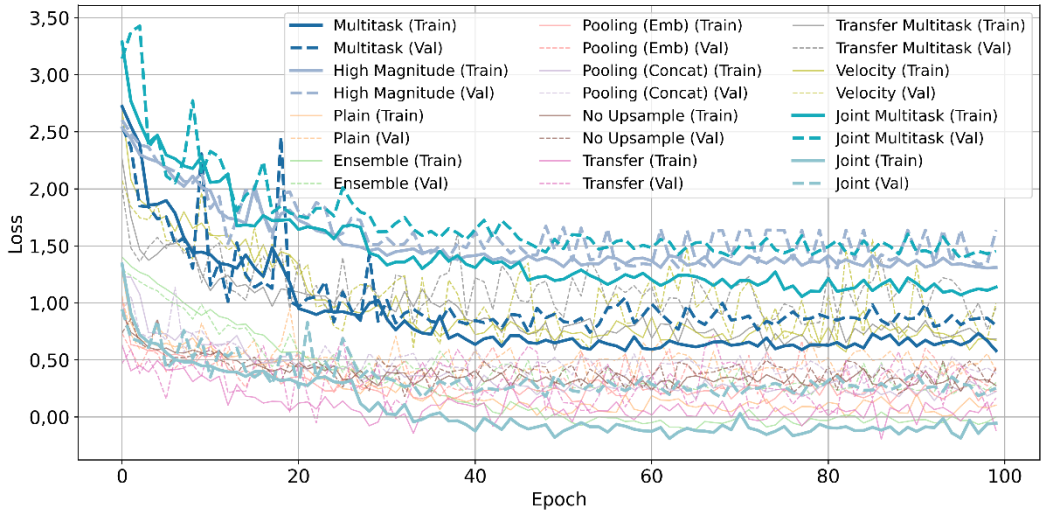
Berdasarkan *loss* pelatihan (Gambar 5.4), *Multitask* menonjol dengan penurunan *loss* yang stabil dan mencapai nilai paling rendah. Hal tersebut menunjukkan efektivitas strategi pembelajaran simultan untuk prediksi magnitudo dan lokasi. *Joint* menjadi konfigurasi ke dua yang memiliki nilai *loss* terendah. *Ensemble* juga menunjukkan performa pelatihan yang sangat baik dengan tren penurunan yang konsisten dan stabil. Hal tersebut mencerminkan manfaat dari rata-rata prediksi antaranggota model. Sebaliknya, *High Magnitude* mengalami stagnasi pada nilai *loss* yang relatif tinggi sejak awal pelatihan, kemungkinan akibat terbatasnya variasi data yang hanya mencakup gempa besar. Sementara itu, konfigurasi- konfigurasi lain secara umum menunjukkan penurunan loss yang lebih lambat dan berfluktuatif.



Gambar 5.4 Grafik perubahan nilai *loss* magnitudo (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Berdasarkan kurva perbandingan antara *training* dan *validation loss* pada Gambar 5.5, beberapa konfigurasi model menunjukkan karakteristik yang menonjol. *Multitask* dan *Joint* memiliki nilai yang stabil dengan selisih kecil antara *training* dan *validation loss* setelah *epoch* ke-20. Hal ini mencerminkan proses pelatihan yang konvergen dan kemampuan generalisasi terhadap data validasi. Hal ini sesuai dengan temuan (Belkin dkk., 2019) yang menyebut bahwa overparameterisasi tidak selalu buruk selama model dipilih berdasarkan kinerja validasi. *High Magnitude* cenderung mengalami *underfitting* yang ditandai dengan *training loss* dan *validation loss* yang stagnan sejak awal pelatihan. Hal tersebut kemungkinan akibat keterbatasan variasi data yang dilatih hanya dengan gempa magnitudo > 4,5. Konfigurasi lainnya secara umum menunjukkan fluktuasi dan tidak seoptimal konfigurasi terbaik.



Gambar 5.5 Grafik perubahan nilai *loss* pelatihan dan *loss* validasi magnitudo (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi. Keterangan *train* di legenda adalah *loss* pelatihan dan val adalah validasi.

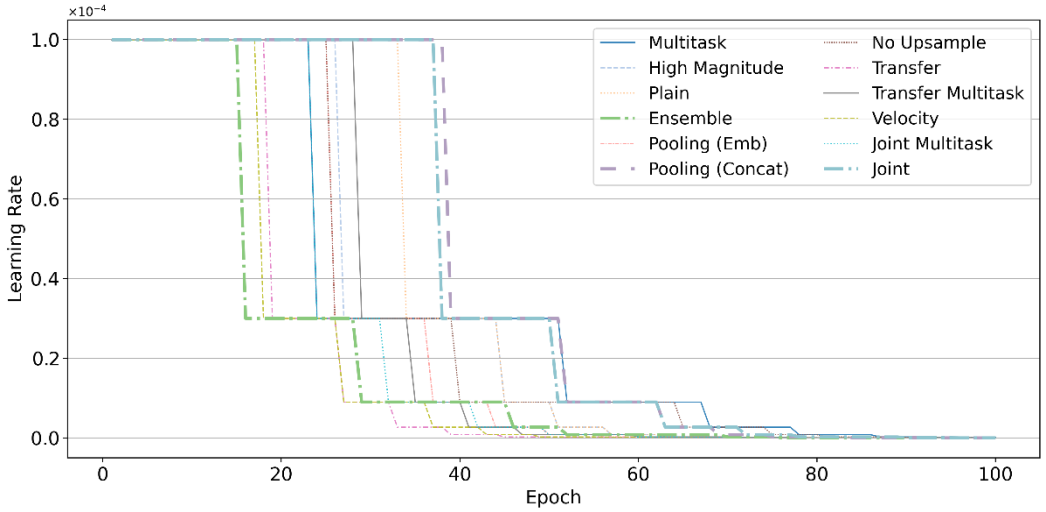
Secara keseluruhan, dari seluruh rangkaian grafik, dapat disimpulkan bahwa *Multitask* dan *Joint* merupakan kandidat terbaik dalam prediksi magnitudo. Keduanya menunjukkan kombinasi konvergensi yang stabil, nilai *loss* yang rendah,

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

dan kesesuaian antara data pelatihan dan validasi. *Ensemble* menunjukkan performa sedang, sementara *High Magnitude* mengalami *underfit*.

5.1.2 Hiposenter

Selama proses pelatihan hiposenter (Gambar 5.6), konfigurasi *Ensemble* mengalami penurunan *learning rate* lebih awal yang mengindikasikan bahwa model cepat mencapai titik konvergensi. Sementara itu, model *Joint* dan *Pooling (Concat)* mempertahankan *learning rate* awal lebih lama dan baru mengalami penurunan mendekati *epoch* ke-40. Hal tersebut menandakan bahwa kedua model ini mampu mempertahankan pembelajaran lebih lama. *Transfer* dan *Velocity* juga mengalami penurunan dini (sekitar *epoch* 15–20). Hal tersebut mencerminkan sensitivitas terhadap data validasi dan karakteristik arsitektur yang lebih sederhana. Sementara itu, model lain mulai menurunkan *learning rate* pada rentang *epoch* 20 s.d. 35.



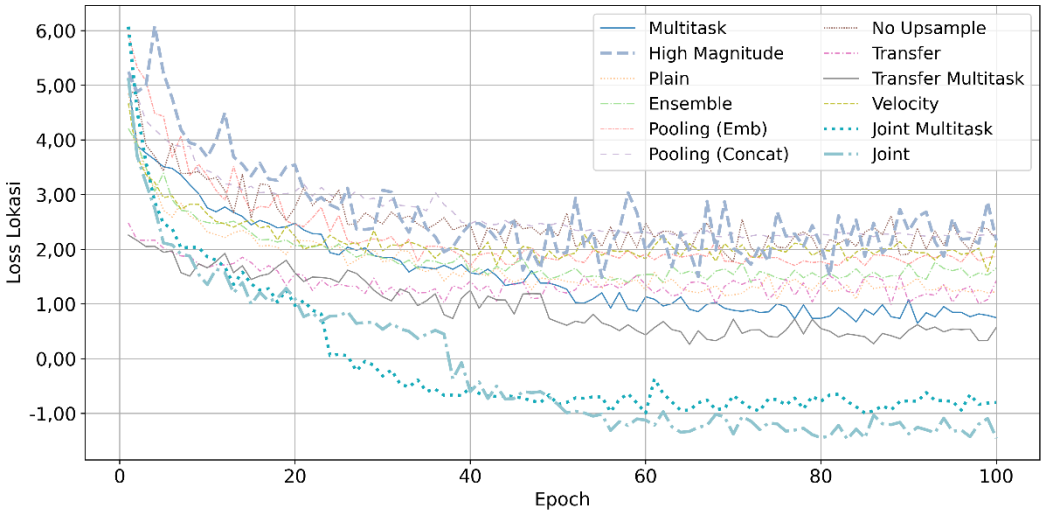
Gambar 5.6 Dinamika *learning rate* lokasi (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi

Pola penurunan *loss* lokasi menunjukkan variasi konvergensi berbeda-beda (Gambar 5.7). *Joint* dan *Joint Multitask* tampil paling menonjol dengan tren penurunan *loss* yang konsisten hingga mencapai nilai negatif. Hal tersebut mencerminkan kapasitas baik dalam estimasi spasial melalui integrasi pelatihan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

dataset Jepang dan Sumatra Barat secara bersamaan. *Multitask* dan *Transfer Multitask* juga menunjukkan performa stabil dengan *loss* akhir di bawah 1,0.

Konfigurasi *High Magnitude, No Upsample*, dan *Pooling (Concat)* mengalami *loss* yang tinggi dan tidak stabil setelah pertengahan pelatihan. Hal tersebut menunjukkan keterbatasan dalam menangkap struktur spasial kompleks, terutama saat data terbatas. *Pooling (Emb)* sedikit lebih baik dengan penurunan *loss* yang lambat dan berakhir di kisaran 2,0. *Velocity* menunjukkan tren awal yang baik dan stagnan setelah *epoch* ke-30. Adapun *Ensemble* memberikan hasil kompetitif dengan *loss* akhir sekitar 1,5. Temuan ini menunjukan bahwa pendekatan integratif seperti *Joint* dan *Joint Multitask* paling efektif menurunkan kesalahan spasial.



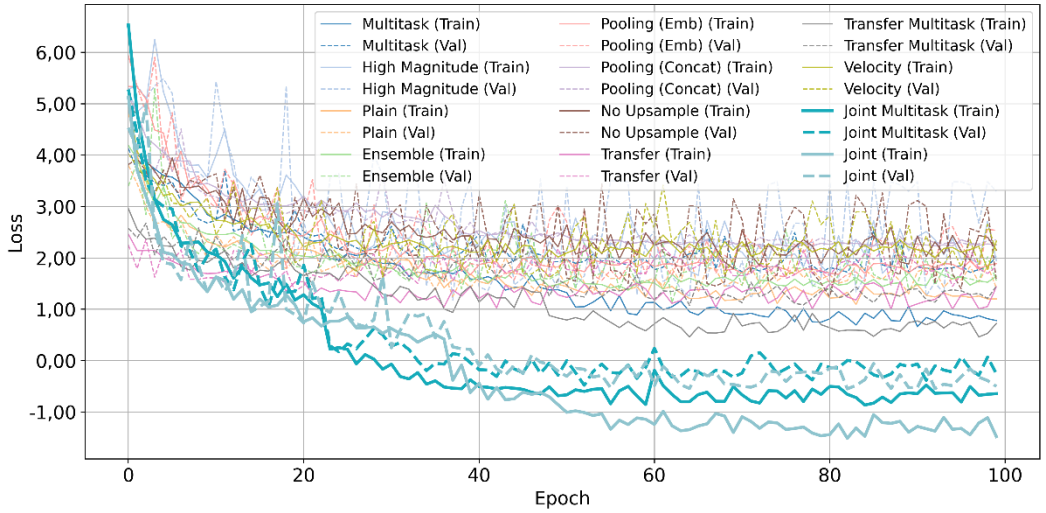
Gambar 5.7 Perbandingan kurva *loss* lokasi (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi

Evaluasi kurva *loss* pada data pelatihan dan validasi merupakan komponen penting dalam menilai stabilitas dan kemampuan generalisasi model *machine learning*. Kurva yang menurun secara konsisten pada kedua data tanpa celah yang signifikan mencerminkan proses pembelajaran yang stabil dan kemampuan adaptasi terhadap data yang belum pernah dilihat sebelumnya (Geron, 2019).

Kurva perbandingan antara *training loss* dan *validation loss* dari kedua belas konfigurasi menunjukkan variasi stabilitas (Gambar 5.8). *Joint* dan *Joint Multitask*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

menampilkan konvergensi paling stabil dengan *validation loss* yang mendekati *training loss* dan keduanya menurun hingga negatif. Hal tersebut mencerminkan kemampuan tinggi dalam menyerap pola spasial. *Multitask* dan *Transfer Multitask* juga menunjukkan penurunan yang konsisten, tetapi terdapat celah yang lebih besar antara *training* dan *validation loss* terutama pada *epoch* akhir. Hal tersebut mengindikasikan kemungkinan *overfitting* ringan.



Gambar 5.8 Perbandingan antara nilai *loss* pelatihan dan validasi lokasi (sumbu y) untuk setiap konfigurasi selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x). Train menunjukan nilai *loss* pada data pelatihan dan Val menunjukan nilai *loss* pada data validasi.

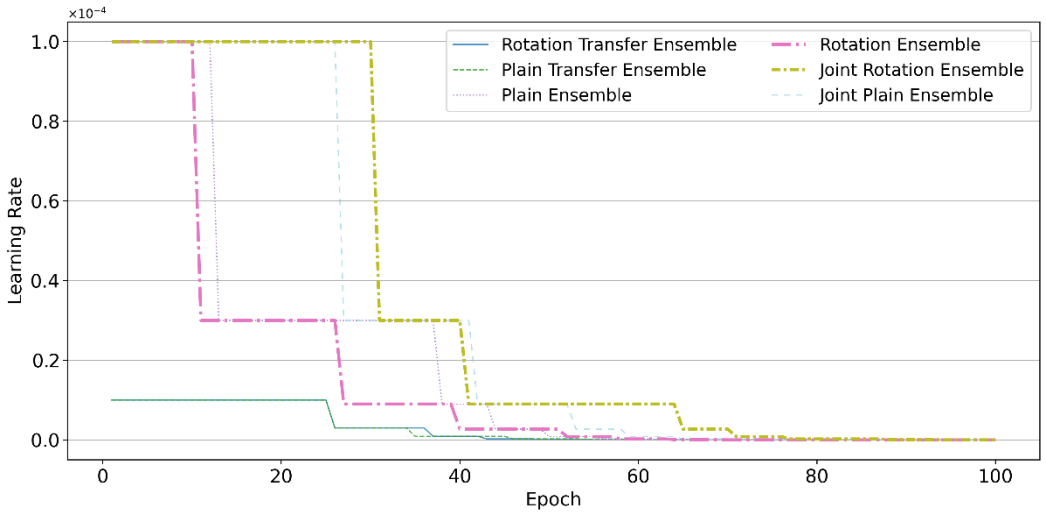
Konfigurasi *No Upsample, Pooling (Concat)*, dan *Pooling (Emb)* menunjukkan performa validasi yang tidak stabil dengan fluktuasi besar, meskipun pelatihan tampak cukup konvergen. *Velocity* menghasilkan *training* dan *validation loss* yang cukup sejalan, tetapi terjebak dalam *plateau* setelah *epoch* 40. *Ensemble* terdapat variasi di awal pelatihan dan mencapai *validation loss* akhir sekitar 1,8. Sementara itu, *High Magnitude* memperlihatkan *validation loss* yang sangat fluktuatif dan jarang lebih baik dari *training loss*. Hal tersebut menandakan kesulitan model dalam menangani data magnitudo besar. Secara keseluruhan, model dengan pendekatan integratif seperti *Joint* dan *Joint Multitask* secara konsisten menunjukkan kemampuan generalisasi terbaik dalam estimasi spasial.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.1.3 Performa PGA dan Peringatan

Pelatihan model estimasi PGA dilakukan selama 100 *epoch* dengan *early stopping* berbasis *validation loss* dan menggunakan *learning rate* awal 10^{-5} untuk konfigurasi *transfer* dan 10^{-4} yang lainnya (Gambar 5.9). Nilai *learning rate* akan dikurangi tiga kali lipat apabila *validation loss* tidak membaik selama 5 *epoch*. Model akhir diambil dari *epoch* dengan *validation loss* terendah. Optimisasi dilakukan dengan *Adam* dan teknik *gradient clipping* sebesar 1,0 untuk mencegah *exploding gradient*. Ukuran *batch* yang digunakan adalah 64. Pelatihan model estimasi PGA mengimplementasikan teknik *ensemble learning* berdasarkan pendekatan (Snoek dkk., 2019) yang mana sepuluh model independen dilatih dan hasil prediksi probabilitasnya dirata-rata untuk meningkatkan kalibrasi distribusi.

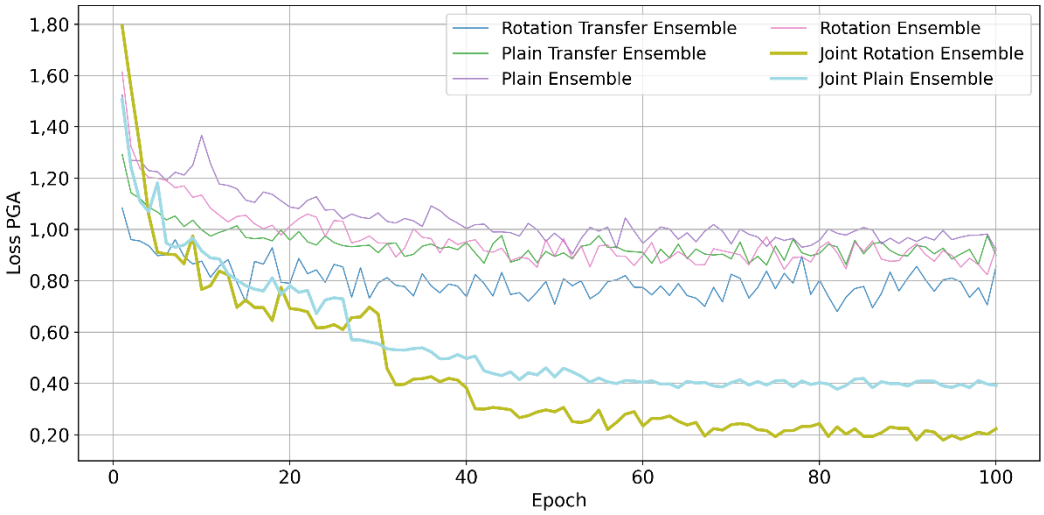
Plain Ensemble dan *Rotation Ensemble* menunjukkan penurunan learning rate lebih awal, umumnya antara *epoch* ke-10 hingga 30. Pola ini mencerminkan deteksi dini terhadap stagnasi *loss*. Konfigurasi *Plain Transfer Ensemble* dan *Rotation Transfer Ensemble* mengalami penurunan setelahnya pada di sekitar *epoch* ke-25. Hal tersebut mengindikasikan sensitivitas terhadap *overfitting* atau konvergensi cepat. *Joint Rotation Ensemble* menunjukkan penurunan paling lambat dan bertahap setelah *epoch* ke-30 dan proses eksplorasi parameter yang panjang.



Gambar 5.9 Grafik perubahan nilai *learning rate* PGA (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Berdasarkan grafik *loss* PGA selama pelatihan (Gambar 5.10), *Joint Rotation Ensemble* menunjukkan performa terbaik dengan penurunan *loss* yang signifikan dan stabil hingga mencapai nilai mendekati 0,2. Konfigurasi ini unggul dalam hal konvergensi yang cepat. Sementara itu, *Joint Plain Ensemble* juga menampilkan performa yang baik dengan tren penurunan yang konsisten hingga sekitar 0,40. Keduanya layak untuk diberi sorotan karena menggabungkan strategi arsitektur *joint* dan *ensemble* secara efektif. Konfigurasi *Plain Ensemble* dan *Rotation Ensemble* memiliki penurunan *loss* yang lebih lambat dan stagnan di atas 0,9. Hal tersebut menandakan keterbatasan dalam mengoptimalkan prediksi PGA. *Plain Transfer Ensemble* dan *Rotation Transfer Ensemble* cenderung fluktuatif dan kurang stabil, meskipun memiliki nilai awal yang rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi arsitektur *joint* dan augmentasi rotasi memberikan keuntungan signifikan dalam mempercepat dan menstabilkan proses pelatihan PGA.

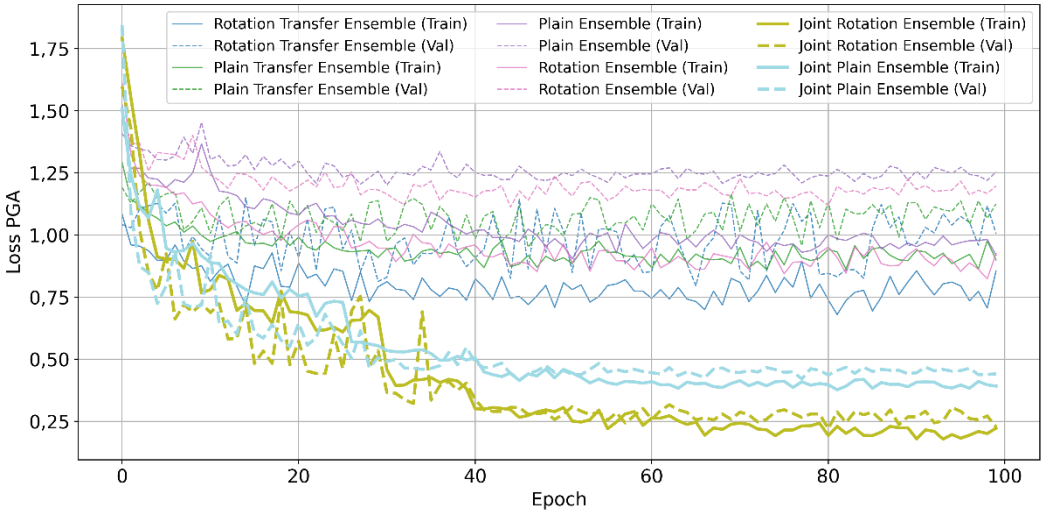


Gambar 5.10 Perbanding kurva *loss* PGA (sumbu y) selama 100 *epoch* pelatihan (sumbu x) untuk masing-masing konfigurasi

Berdasarkan kurva perbandingan *loss* PGA antara data pelatihan dan validasi (Gambar 5.11), *Joint Rotation Ensemble* menunjukkan performa paling stabil dengan jarak antargrafik yang kecil dan penurunan *loss* validasi yang konsisten

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

hingga akhir pelatihan. Konfigurasi ini juga mencatat nilai *loss* validasi akhir terendah yang menandakan generalisasi yang baik terhadap data baru. Selain itu, *Joint Plain Ensemble* menunjukan tren sama, meskipun nilai *training* dan *validation loss* sedikit lebih besar dibanding *Joint Rotation Ensemble*. Konfigurasi *Plain Transfer Ensemble* dan *Rotation Transfer Ensemble* menunjukkan fluktuasi signifikan dan tidak stabil pada *loss* validasi, menandakan potensi *overfitting* dan generalisasi yang buruk. Pola ini terlihat dari *loss* validasi yang tidak menurun meski *loss* pelatihan terus turun.



Gambar 5.11 Kurva perbandingan loss PGA antara data pelatihan dan validasi (sumbu y) terhadap 100 *epoch* pelatihan (sumbu x). *Train* menunjukan nilai *loss* pada data pelatihan dan *Val* menunjukan nilai *loss* pada data validasi.

5.2 Validasi Model

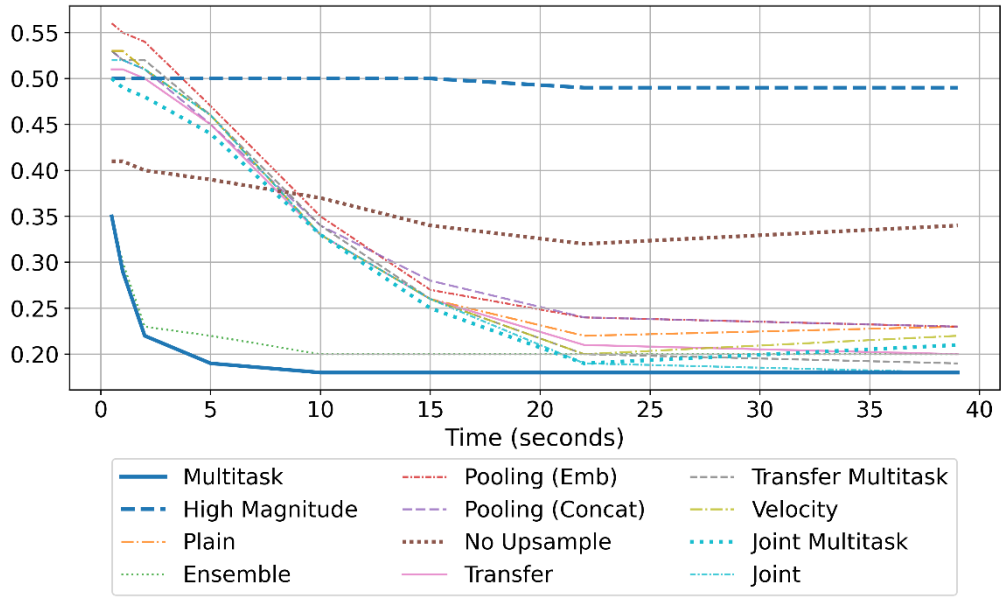
5.2.1 Performa Estimasi Magnitudo

Berdasarkan hasil evaluasi RMSE (Gambar 5.12), konfigurasi *Multitask* memiliki RMSE terendah dibandingkan konfigurasi lain. Konfigurasi ini menurun secara signifikan sejak detik ke-0,5 s.d. 5 dan mencapai kestabilan di kisaran 0,17 mulai detik ke-15 hingga akhir periode evaluasi. Hal ini menunjukkan kemampuan konfigurasi dalam menghasilkan estimasi akurat dengan kesalahan minimum.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Konfigurasi *Ensemble* memiliki kecenderungan yang sama dengan *Multitask,* namun nilai RMSE-nya berada di sekitar 0,20. Konfigurasi *Joint* memiliki nilai RMSE yang nilainya mendekati *Multitask* pada detik ke-39.

Secara umum konfigurasi-konfigurasi lain mencapai titik terendah pada detik ke-22 dalam rentang 0,20–0,25. Temuan ini konsisten dengan hasil yang dilaporkan oleh Münchmeyer dkk., (2021a) di mana model berbasis transformer mencapai stabilitas estimasi dalam waktu sekitar 20 detik.



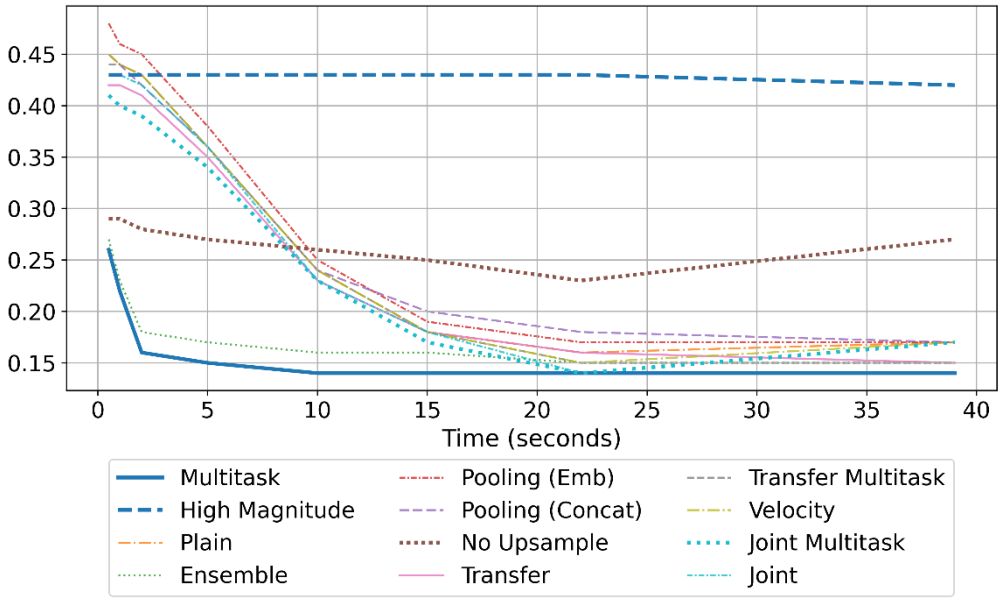
Gambar 5.12 Perbandingan nilai RMSE dari prediksi rata-rata magnitudo untuk masing-masing konfigurasi model. Gaya dan warna garis menunjukkan jenis konfigurasi. Sumbu y adalah RMSE dinyatakan dalam unit magnitudo dan sumbu x adalah waktu setelah gelombang P pertama tiba dalam satuan detik.

Konfigurasi *No Upsample* menunjukkan RMSE yang lebih tinggi secara keseluruhan dengan laju penurunan yang lebih lambat. Adapun model *High Magnitude* menunjukkan RMSE yang hampir mendatar sepanjang waktu yang kemungkinan berkaitan dengan keterbatasan dalam representasi kejadian bermagnitudo besar selama pelatihan. Fenomena ini sejalan dengan hukum Gutenberg–Richter yang mana gempa besar lebih jarang terjadi, sehingga

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

pembelajaran model menjadi kurang optimal tanpa strategi augmentasi atau penyeimbangan data.

Evaluasi metrik MAE memperlihatkan bahwa *Multitask* secara konsisten mencatatkan performa terbaik (Gambar 5.13). Nilai MAE *Multitask* menurun drastis dari detik 0,5 s.d. 2 dan mencapai nilai terendah sekitar 0,14 sejak detik ke-15 detik hingga akhir periode evaluasi. Hal ini menunjukkan kemampuan model dalam menghasilkan estimasi magnitudo yang akurat dan tidak terlalu terpengaruh oleh *outlier*. *Ensemble* juga mengalami hal yang sama, tetapi nilai terendahnya sekitar 0,16.



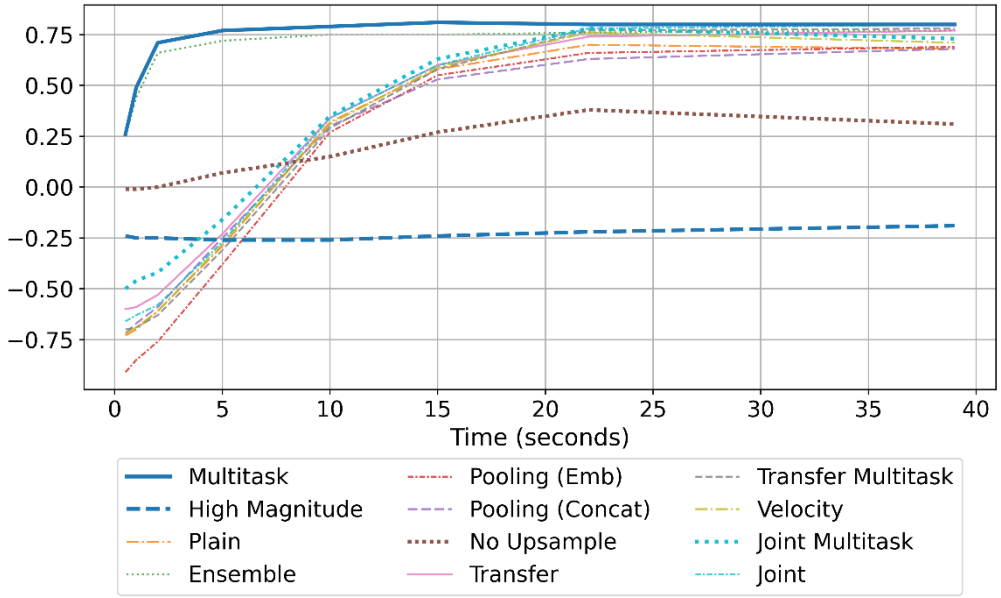
Gambar 5.13 Perbandingan nilai MAE dari prediksi rata-rata magnitudo untuk masing-masing konfigurasi model. Gaya dan warna garis menunjukkan jenis konfigurasi. Sumbu y adalah MAE dinyatakan dalam unit magnitudo dan sumbu x adalah waktu setelah gelombang P pertama tiba dan dinyatakan dalam satuan detik.

Konfigurasi lain secara umum menunjukkan performa yang kompetitif, dengan MAE di bawah 0,23 setelah waktu prediksi memasuki fase stabil. Konfigurasi-konfigurasi tersebut lebih lambat menuju konvergen dan baru stabil setelah detik ke-22. *Transfer Multitask* secara konseptual menggabungkan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

pendekatan *multitask* dan *transfer learning*, performanya tidak menunjukkan keunggulan signifikan sepanjang periode evaluasi. Hal ini selaras dengan pandangan Ruder (2017) yang menekankan bahwa keberhasilan *multitask learning* sangat tergantung pada kekuatan keterkaitan antartugas yang dioptimalkan. Jika keterkaitan tersebut lemah, integrasi *multitask* justru dapat menimbulkan interferensi dan menghambat kinerja model. Konfigurasi *No Upsample* dan *High Magnitude* memiliki pola nilai MAE yang sama seperti hasil RMSE.

Evaluasi terhadap metrik R^2 menunjukkan *Multitask* memiliki performa terbaik dalam menangkap variasi magnitudo (Gambar 5.14). Nilai R^2 pada konfigurasi ini meningkat tajam dari nilai 0,25 menjadi lebih dari 0,75 dalam 5 detik pertama. Hal ini menandakan kemampuannya dalam merepresentasikan struktur variasi magnitudo secara global. Konfigurasi *Ensemble* juga memiliki peningkatan yang tajam dalam 5 detik pertama, tetapi nilainya tidak setinggi *Multitask.*



Gambar 5.14 Perbandingan nilai R^2 dari prediksi rata-rata magnitudo untuk masing-masing konfigurasi model EEW. Gaya dan warna garis menunjukkan jenis konfigurasi. Sumbu y adalah R^2 dan sumbu x adalah waktu setelah gelombang P pertama tiba dan dinyatakan dalam satuan detik.

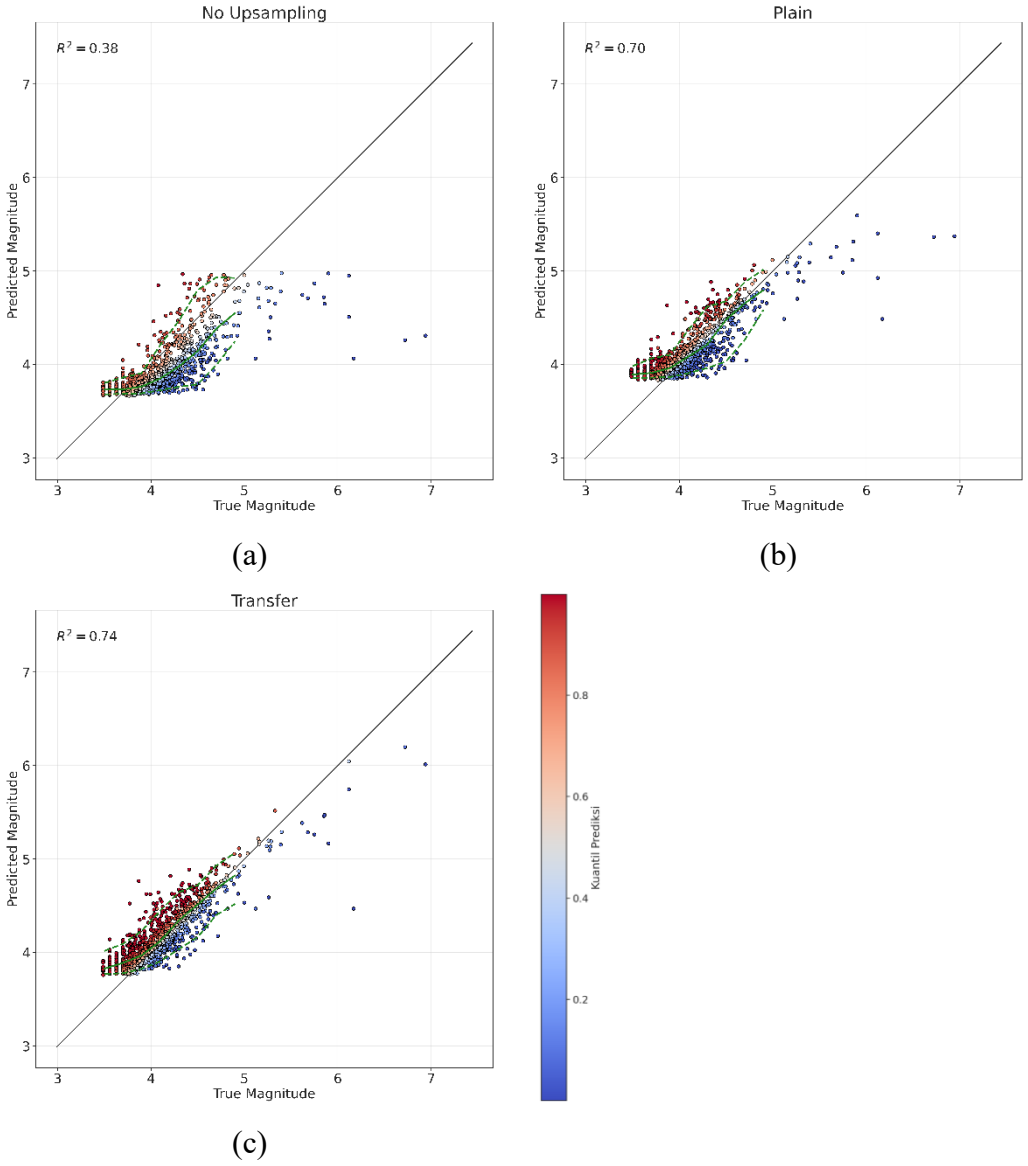
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Konfigurasi lain seperti *Plain, Pooling (Emb), Pooling (Concat), Transfer, Transfer Multitask, Velocity, Joint Multitask,* dan *Joint* secara umum menunjukkan performa yang kompetitif juga mencatatkan performa yang baik dengan nilai R^2 stabil di atas 0,75, meskipun sedikit di bawah model *Multitask*. Konfigurasi tersebut menunjukkan nilai R^2 negatif pada awal waktu. Hal ini menunjukkan bahwa model-model tersebut kurang mampu menangkap struktur data secara efisien pada fase awal gempa. Konfigurasi *High Magnitude* dan *No Upsample* tetap menjadi yang terendah dalam evalusi metrik ini.

Penelitian Münchmeyer dkk. (2021a) menunjukan bahwa performa R^2 sangat bergantung pada kepadatan dan distribusi spasial stasiun seismik. Di dataset Jepang, jaringan stasiun yang sangat padat dan merata memungkinkan peningkatan R^2 yang cepat dan mencapai nilai tinggi sejak awal. Di sisi lain, Chile memiliki keterbatasan jaringan yang menyebabkan peningkatan R^2 lebih lambat dan nilai akhir yang lebih rendah. Dalam konteks Sumatra Barat, distribusi stasiun yang cukup baik di Pulau Sumatra tidak sepenuhnya menjangkau zona *megathrust* di laut yang mana tempat sebagian besar gempa besar terjadi. Hal ini diduga menjadi faktor utama keterlambatan peningkatan R^2 dan bias prediksi pada awal estimasi magnitudo.

Hasil semua konfigurasi model, nilai prediksi magnitudo untuk gempa magnitudo besar lebih rendah daripada gempa sedang dan kecil. Terdapat penurunan performa pada model disebabkan oleh jumlah stasiun dan magnitudo gempa pelatihan yang lebih kecil daripada gempa uji terbesar (M_w = 6.9). Pada Gambar 5.15, model yang dilatih tanpa sampel ulang untuk gempa besar selama pelatihan, kinerjanya menurun dengan hasil magnitudo prediksi cenderung lebih rendah baik untuk magnitudo besar, sedang, dan kecil. Hal tersebut digambarkan dari median prediksi (garis berwarna hijau) yang berada di bawah garis referensi (y=x). Setelah dilakukan sampel ulang sebanyak 1,5 untuk magnitudo di atas 4,5 pada konfigurasi *Plain*, hasilnya memberikan peningkatan tetapi tidak sepenuhnya mengatasi masalah ini.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 5.15 Perbandingan magnitudo sebenarnya (sumbu x) dan magnitudo prediksi (sumbu y) yang diprediksi tanpa sampel ulang (a), dengan sampel ulang (b), dan dengan sampel ulang serta *transfer learning* (c). Semua plot menunjukkan prediksi pada detik ke-22 setelah gelombang P tiba di stasiun pertama. Garis berwarna hijau menunjukkan persentil ke-5, ke-50 (median prediksi), dan ke-95 dalam rentang 0.2 m.u. Garis persentil hanya ditampilkan jika terdapat cukup banyak titik data.

Untuk mengatasi hal tersebut, nilai prediksi magnitudo yang rendah pada gempa besar dapat dikurangi menggunakan *transfer learning* dengan menggunakan *dataset* dari gempa Jepang. *Transfer learning* adalah strategi umum yang digunakan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

untuk mengatasi kelangkaan data dengan menyuntikkan informasi tambahan dari kumpulan data terkait (Pan & Yang, 2010). Dalam kasus ini, digunakan *dataset* gempa Jepang untuk menyuntikkan informasi tambahan ke *dataset* Sumatra Barat. Dengan cara ini, model memiliki lebih banyak contoh pelatihan yang relevan untuk gempa besar yang jarang terjadi.

Hasil *transfer learning* menunjukkan pengurangan saturasi untuk magnitudo besar, walaupun nilainya belum mendekati magnitudo aktual (Gambar 5.15). Dampak positif dari *transfer learning* juga tercermin dalam penurunan RMSE. Hasil ini juga menjadi bukti lebih lanjut bahwa kelangkaan data adalah alasan utama terjadinya magnitudo dengan nilai rendah.

Berdasarkan ketiga metrik evaluasi, konfigurasi *Multitask, Ensemble,* dan *Joint* muncul sebagai kandidat terkuat untuk diimplementasikan dalam model magnitudo sistem peringatan dini gempa di Sumatra Barat. Ketiganya menunjukkan performa tinggi dalam hal akurasi dan kemampuan menjelaskan variabilitas data, bahkan sejak waktu prediksi yang sangat awal. Sebaliknya, model seperti *High Magnitude* dan *No Upsample* mencatatkan nilai R^2 yang rendah bahkan negatif pada waktu awal, yang menunjukkan bahwa prediksi kurang mampu merepresentasikan variabilitas magnitudo aktual. Temuan ini mendukung kesimpulan dalam Münchmeyer dkk. (2021a) bahwa penggunaan mekanisme *attention* dalam arsitektur transformer memberikan keuntungan dalam mengidentifikasi informasi dari stasiun-stasiun yang relevan yang pada akhirnya meningkatkan kualitas prediksi.

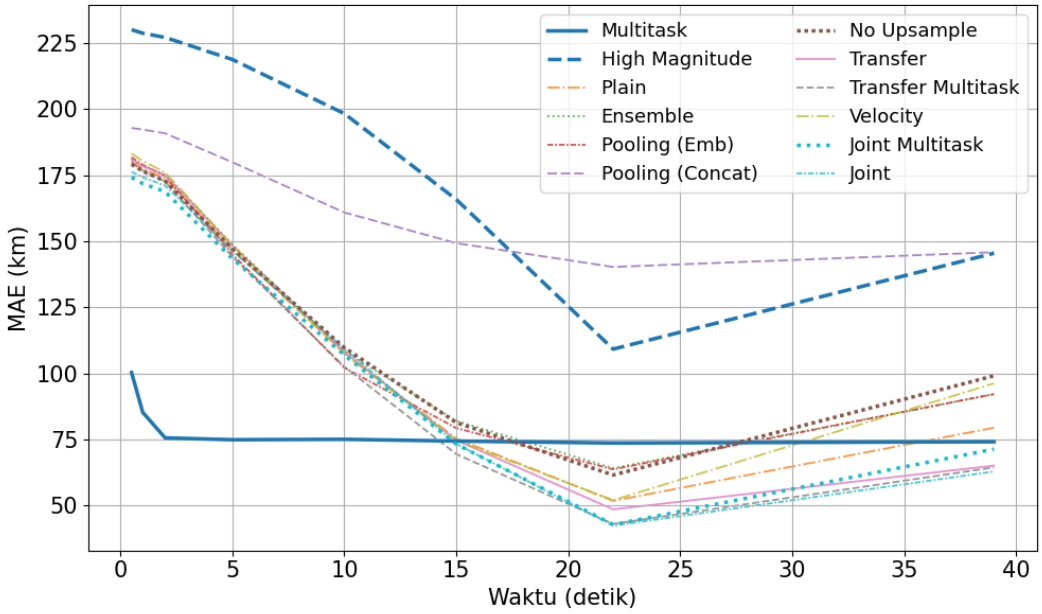
5.2.2 Performa Estimasi Hiposenter

Berdasarkan evaluasi MAE dari estimasi lokasi hiposenter, sebagian besar konfigurasi menunjukkan penurunan MAE yang signifikan dalam 10 detik pertama (Gambar 5.16). Hal ini menandakan bahwa sinyal awal sudah cukup informatif untuk memperkirakan lokasi awal gempa. Namun, hanya *Joint, Joint Multitask*, *Transfer, Transfer Multitask* dan *Multitask* yang konsisten mempertahankan MAE < 80 km setelah 22 detik. Sebaliknya, model seperti *Pooling (Concat)* dan *High*

Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Magnitude tidak mampu mencapai akurasi tersebut hingga akhir waktu evaluasi. Hal tersebut mencerminkan keterbatasan representasi spasial.

Secara umum, sebagian besar konfigurasi mampu menunjukkan kinerja spasial yang unggul dalam estimasi lokasi episenter dengan kemampuan memusatkan prediksi ke lokasi sebenarnya dalam waktu 22 detik. Temuan ini sejalan dengan hasil Münchmeyer d. (2021a), yang menunjukkan bahwa TEAM-LM mampu menurunkan kesalahan episentral secara signifikan. Namun, kualitas estimasi ini sangat bergantung pada kepadatan dan kualitas data pelatihan seperti wilayah dengan cakupan *azimuth* yang buruk atau data yang terbatas lebih rentan menghasilkan *outlier* dan menurunkan akurasi model.

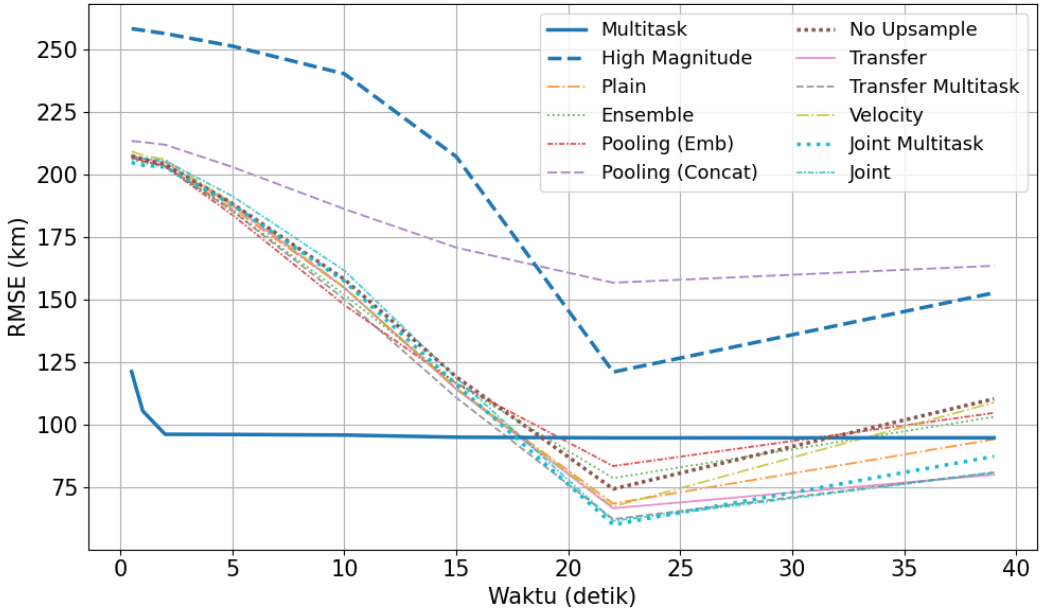


Gambar 5.16 Perbandingan nilai MAE dari prediksi rata-rata hiposenter untuk masing-masing konfigurasi model. Gaya dan warna garis menunjukkan jenis konfigurasi. Sumbu y adalah MAE dalam satuan km dan sumbu x adalah waktu setelah gelombang P pertama tiba dan dinyatakan dalam satuan detik.

Berdasarkan evaluasi RMSE lokasi hiposenter, polanya menyerupai MAE, namun deviasinya lebih besar (Gambar 5.17). Konfigurasi *Joint, Multitask*, *Transfer, Transfer Multitask* dan *Joint Multitask* mempertahankan RMSE di bawah 100 km setelah detik ke-15 s.d. 39 detik. Sebaliknya, *High Magnitude* dan *Pooling*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

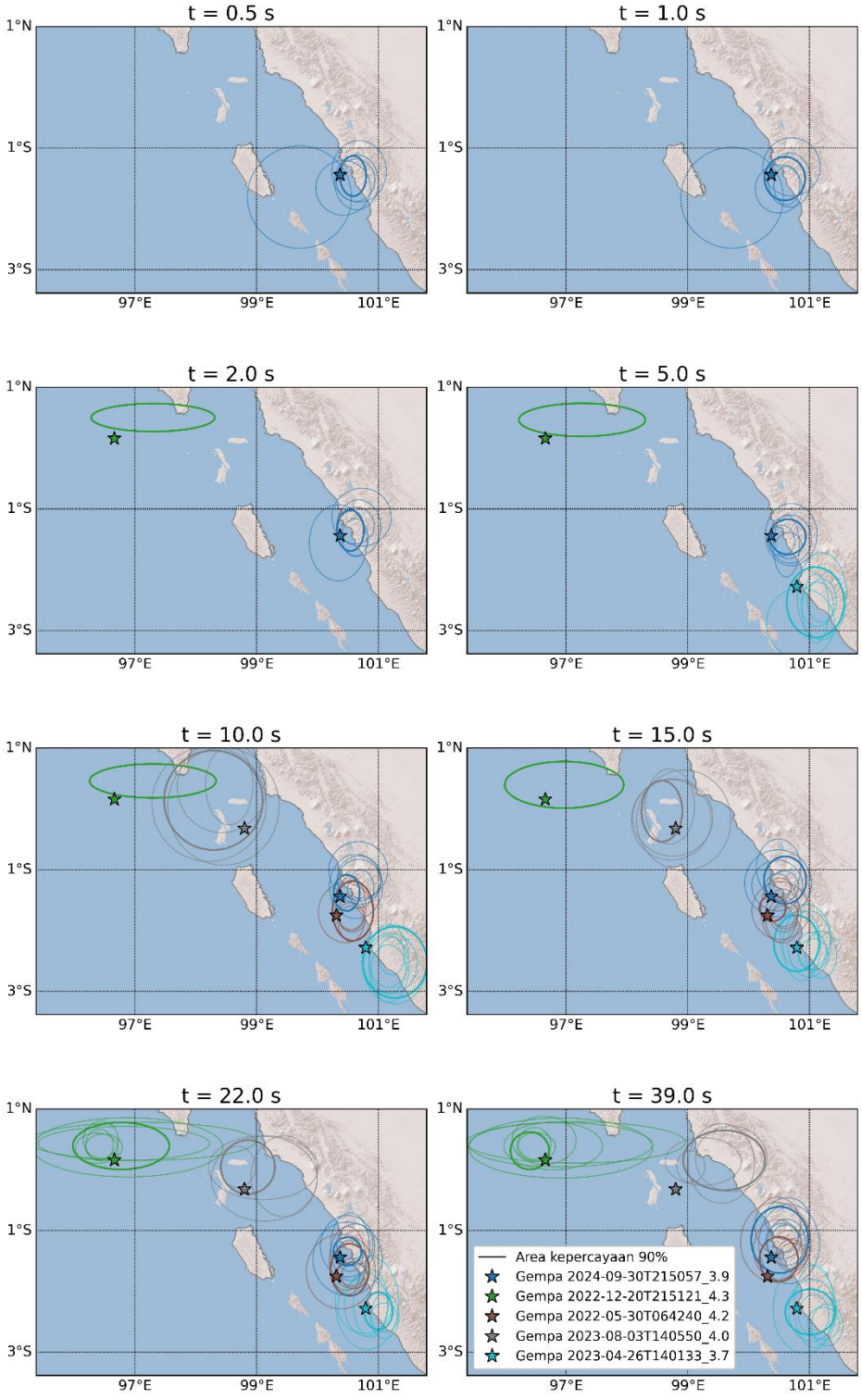
(Concat), menunjukkan RMSE yang fluktuatif bahkan meningkat pada waktu akhir evaluasi dan menunjukkan potensi *overfitting* dan ketidakseimbangan data.



Gambar 5.17 Perbandingan nilai RMSE dari prediksi rata-rata hiposenter untuk masing-masing konfigurasi. Gaya dan warna garis menunjukkan jenis konfigurasi. Sumbu y adalah RMSE dalam satuan km dan sumbu x adalah waktu setelah gelombang P pertama tiba dan dinyatakan dalam satuan detik.

Untuk mengevaluasi dinamika prediksi lokasi gempa secara spasial dan temporal, dilakukan analisis terhadap lima kejadian gempa (Gambar 5.18). Setiap panel menggambarkan hasil prediksi lokasi dan ketidakpastian spasialnya. Pada waktu-waktu awal, area masih sangat luas. Hal tersebut menandakan bahwa model memiliki ketidakpastian tinggi terhadap posisi sumber gempa akibat terbatasnya informasi dari stasiun terdekat.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 5.18 Perkembangan prediksi lokasi gempa dan area kepercayaan (90%) dari lima kejadian gempa bumi. Setiap panel menunjukkan episenter (bintang) dan area kepercayaan (elips) pada waktu t 0,5 hingga 39,0 detik setelah gelombang P pertama tiba. Warna elips menunjukkan masing-masing gempa.

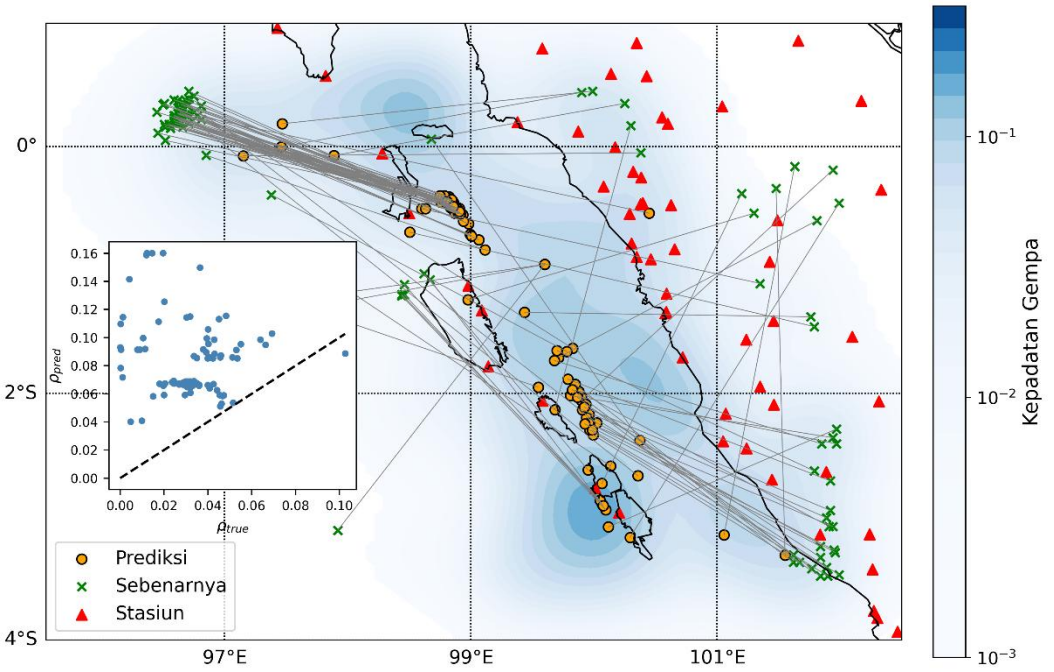
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Seiring bertambahnya waktu, terlihat bahwa elips secara bertahap menyempit dan bergerak mendekati posisi sebenarnya. Pada waktu t = 10 detik ke atas, sebagian besar prediksi mulai terkonsolidasi di sekitar sumber yang benar, walaupun tingkat ketepatannya bervariasi antar kejadian. Beberapa gempa seperti Gempa 2023-08-03T140550_4.0 dan Gempa 2024-09-30T215057_3.9 menunjukkan proses konvergensi yang relatif cepat, dengan area yang mulai stabil dalam waktu 15 detik. Sebaliknya, gempa di wilayah barat laut, seperti Gempa 2022-05-30T064200_4.2, menunjukkan ketidakpastian yang lebih lama bertahan. Hal tersebut kemungkinan besar akibat posisi episenter yang cakupan stasiunnya buruk dan minimnya cakupan data awal.

Pola ini menunjukkan bahwa akurasi spasial model sangat dipengaruhi oleh lokasi episenter relatif terhadap jaringan seismik, serta jumlah stasiun yang aktif dalam waktu-waktu awal. Oleh karena itu, perluasan jaringan stasiun ke Mentawai dan peningkatan kecepatan akuisisi data dari stasiun yang lebih jauh akan sangat membantu dalam menurunkan ketidakpastian spasial pada tahap paling kritis dalam sistem peringatan dini gempa.

RMSE merupakan indikator penting untuk menilai kemampuan model dalam mengekstraksi informasi spasial dari sinyal awal. Pada penelitian (Münchmeyer dkk., 2021a), *dataset* Jepang mengalami penurunan RMSE yang berlangsung cepat berkat jaringan stasiun yang sangat padat dan merata sehingga memungkinkan representasi spasial yang banyak sejak tahap awal prediksi. Sebaliknya, di *dataset* Italia dengan sebaran gempa yang terlokalisasi di bagian tengah dan jaringan stasiun yang lebih jarang membuat penurunan RMSE terjadi lebih lambat. Di dataset Chili, keterbatasan jumlah stasiun membuat RMSE relatif lebih tinggi.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



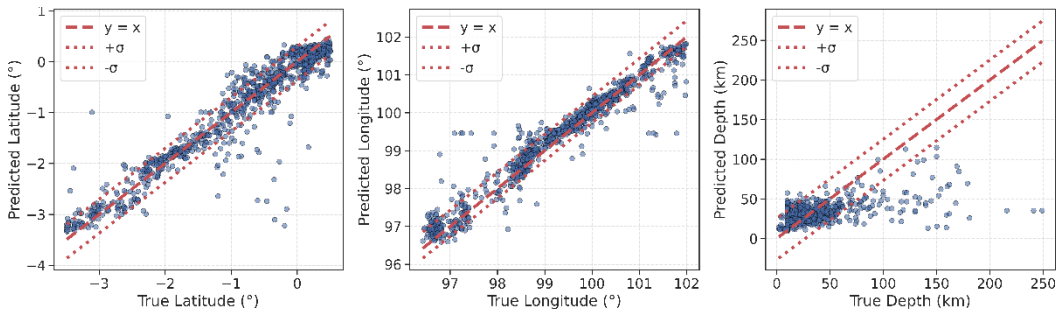
Gambar 5.19 100 gempa dengan galat lokasi tertinggi ditampilkan di atas kepadatan kejadian spasial dalam data pelatihan. Estimasi lokasi menggunakan data pada detik ke-22. Titik kuning menunjukkan lokasi hasil prediksi, tanda silang hijau menunjukkan lokasi sebenarnya, dan garis abu-abu menghubungkan keduanya. Segitiga merah menandai posisi stasiun seismik. Kepadatan kejadian dihitung menggunakan estimasi kepadatan kernel Gaussian dan tidak memperhitungkan kedalaman kejadian. Inset grafik menunjukkan kepadatan gempa di lokasi sebenarnya dibandingkan dengan kepadatan gempa di lokasi estimasi.

Kondisi serupa terlihat di data Sumatra Barat seperti divisualisasikan pada Gambar 5.19. Daerah Mentawai menunjukkan kepadatan seismisitas tinggi (warna biru muda hingga tua pada peta kepadatan gempa), tetapi distribusi stasiun (segitiga merah) masih terkonsentrasi di daratan utama Pulau Sumatra. Ketidakseimbangan ini mengakibatkan cakupan spasial yang tidak merata, sehingga prediksi lokasi awal (lingkaran kuning) dan lokasi sebenarnya (tanda silang hijau) cenderung memiliki deviasi yang signifikan, terutama untuk gempa-gempa di laut. Hal ini juga terlihat dari banyaknya garis koneksi yang membentang dari episenter laut ke stasiun daratan. Diagram sisipan kiri bawah juga memperlihatkan bahwa kepadatan gempa prediksi secara sistematis melebihi nilai sebenarnya yang mengindikasikan bias estimasi akibat keterbatasan cakupan spasial.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Untuk mengevaluasi kualitas prediksi lokasi gempa oleh model dibandingkan hasil estimasi terhadap data sebenarnya dalam lintang, bujur, dan kedalaman. Gambar 5.20 memperlihatkan perbandingan antara lokasi gempa sebenarnya dan prediksi model. Secara horizontal, hasil prediksi menunjukkan konsistensi yang baik dengan nilai RMSE sebesar 0,34° untuk lintang dan 0,36° untuk bujur. Sebaran titik mendekati garis identitas yang menunjukkan bahwa model mampu mengenali pola spasial lokasi gempa secara relatif akurat, terutama di wilayah yang sering mengalami gempa dan memiliki cakupan stasiun yang cukup.

Ketidakakuratan mulai terlihat signifikan pada estimasi kedalaman. RMSE mencapai 26,04 km dan banyak prediksi kedalaman menyimpang jauh dari nilai sebenarnya. Kesalahan ini cenderung terjadi pada gempa-gempa yang lebih dalam, terutama di wilayah dengan jumlah data terbatas. Hal ini menunjukkan bahwa representasi gempa dalam di *dataset* masih belum mencukupi sehingga model kesulitan menangkap karakteristik *waveform* yang merepresentasikan kedalaman. Dengan demikian, peningkatan akurasi prediksi lokasi khususnya dimensi kedalaman memerlukan data yang lebih kaya dari berbagai tipe gempa.

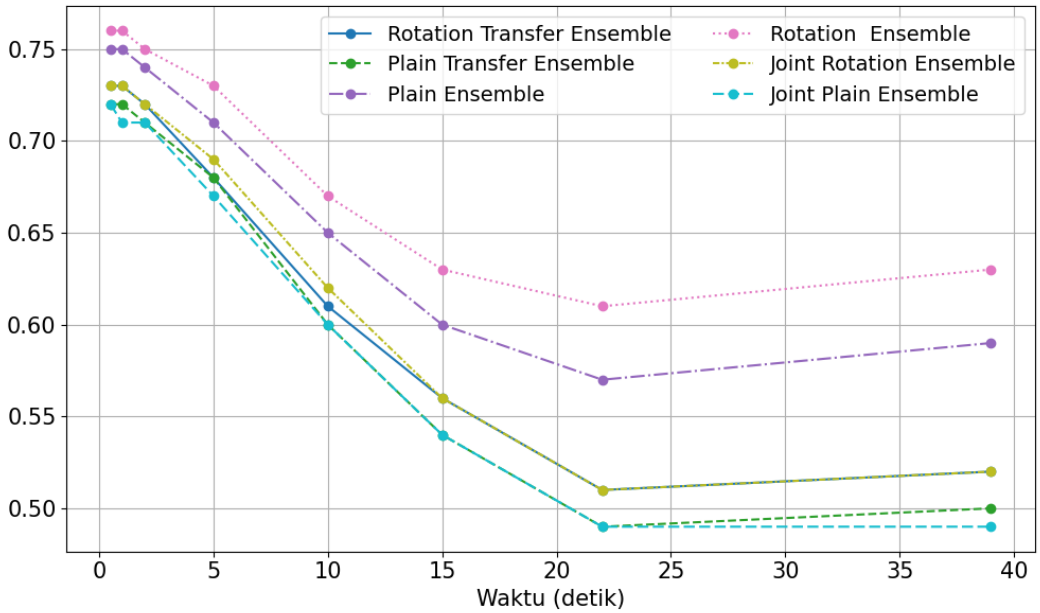


Gambar 5.20 Perbandingan antara lokasi gempa sebenarnya dan hasil prediksi model dalam *latitude* atau lintang (kiri), *longitude* atau bujur (tengah), dan kedalaman (kanan) pada detik ke-22. Garis putus-putus merah menunjukkan garis identitas *y=x* sebagai referensi kesesuaian dan garis titik-titik berwarna merah menunjukkan nilai ± standar deviasi (σ).

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.2.3 PGA dan Waktu Peringatan

Berdasarkan evaluasi MAE terhadap waktu prediksi PGA untuk enam konfigurasi model *ensemble*, semua konfigurasi menunjukkan penurunan MAE yang signifikan pada 22 detik pertama (Gambar 5.21). Hal tersebut mencerminkan peningkatan akurasi prediksi PGA seiring bertambahnya informasi. Konfigurasi *Joint Plain Ensemble* menunjukkan performa terbaik secara konsisten dengan nilai MAE mencapai titik minimum di kisaran 0,57–0,58.

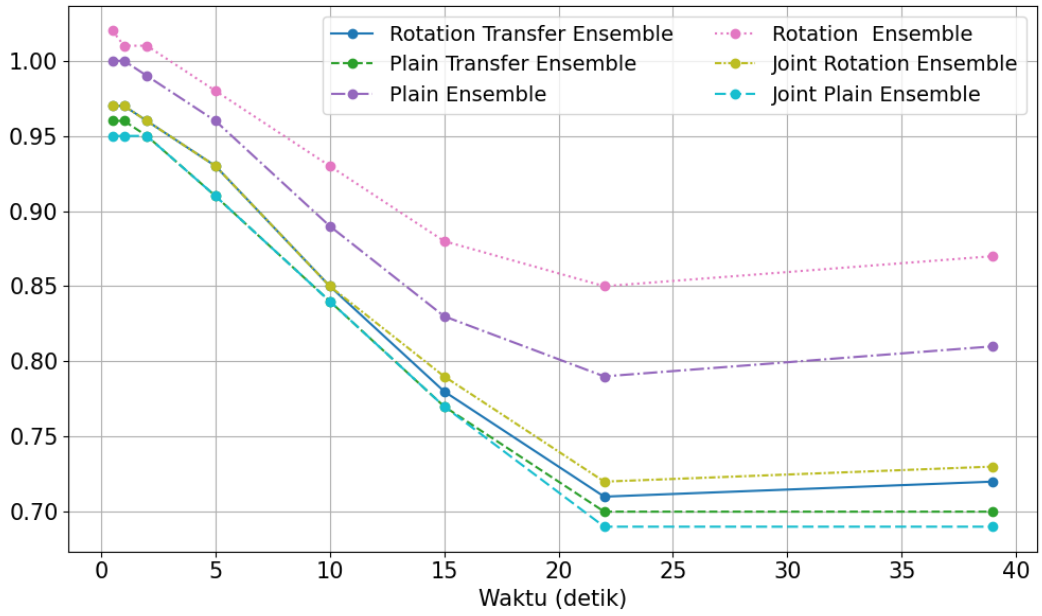


Gambar 5.21 Perbandingan nilai MAE (sumbu y) terhadap waktu prediksi (sumbu x) dalam detik setelah waktu tiba gelombang P di stasiun pertama untuk enam konfigurasi model *ensemble*

Konfigurasi *Rotation Ensemble* dan *Plain Ensemble* mengalami kesulitan mempertahankan performa pada waktu prediksi yang lebih panjang. Meskipun mengalami penurunan MAE di awal, kedua model ini menunjukkan peningkatan galat setelah 22 detik yang mengindikasikan potensi *overfitting* atau keterbatasan dalam generalisasi. Temuan ini menunjukkan bahwa strategi *joint training* antara data Sumatra Barat dan Jepang berkontribusi terhadap peningkatan prediksi PGA.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Berdasarkan evaluasi RMSE untuk model PGA, seluruh model menunjukkan penurunan RMSE yang substansial hingga sekitar 22 detik (Gambar 5.22). Model *Joint Plain Ensemble* menonjol dengan nilai RMSE terendah dan menunjukkan bahwa estimasi PGA dari model ini memiliki deviasi terkecil terhadap data observasi.



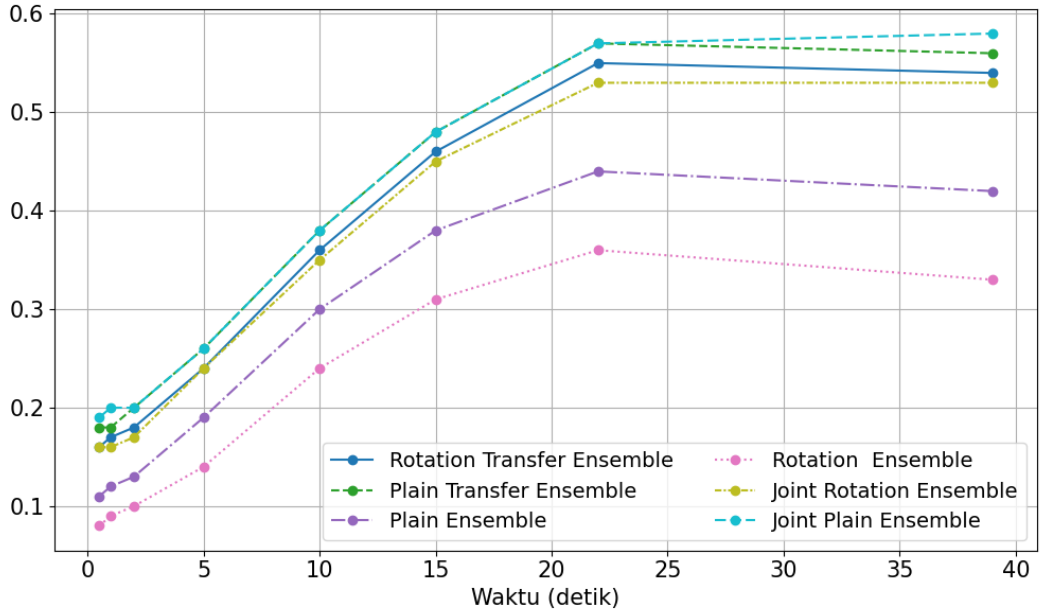
Gambar 5.22 Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) (sumbu y) terhadap waktu prediksi (sumbu x) dalam detik setelah waktu tiba gelombang P di stasiun pertama untuk enam konfigurasi model *ensemble*

Konfigurasi *Rotation Ensemble* dan *Plain Ensemble* memperlihatkan nilai RMSE yang relatif tinggi sepanjang waktu di banding konfigurasi lain. Hal tersebut mencerminkan kurang optimalnya representasi fitur dan kapasitas prediktif dari konfigurasi tersebut. Peningkatan kembali nilai RMSE setelah 22 detik pada model tertentu juga dapat mengindikasikan ketidakstabilan model. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa pendekatan *Joint Rotation Ensemble* secara konsisten memberikan performa yang baik dalam estimasi PGA.

Berdasarkan evaluasi R^2, seluruh konfigurasi meningkat secara progresif hingga sekitar 22 detik (Gambar 5.23). Model *Joint Plain Ensemble* mencapai nilai

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

R^2 tertinggi (0,58) yang menunjukkan bahwa prediksi PGA dari model ini paling mendekati dengan nilai observasi. Konfigurasi *Rotation Ensemble* dan *Plain Ensemble* memiliki nilai R^2 yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan model lainnya, bahkan tidak melebihi 0,45 pada waktu prediksi maksimum. Hal ini menunjukkan keterbatasan kapasitas model-model tersebut dalam menangkap kompleksitas hubungan antara fitur input dan PGA aktual. Dengan demikian, penggunaan arsitektur *joint ensemble* terbukti efektif dalam mendukung generalisasi model prediktif untuk estimasi PGA.



Gambar 5.23 Grafik R^2 (sumbu y) terhadap waktu prediksi (sumbu x) dalam detik setelah waktu tiba gelombang P di stasiun pertama untuk enam konfigurasi model *ensemble*

Hasil evaluasi RMSE dan MAE dari prediksi magnitudo, hiposenter, dan PGA dari beberapa konfigurasi mengalami peningkatan setelah 22 detik sejak kedatangan gelombang P. Hal tersebut terlihat jelas dalam model prediksi hiposenter. Fenomena ini mengindikasikan adanya penurunan akurasi seiring bertambahnya waktu. Dalam konteks ini, TEAM dan TEAM-LM hanya memanfaatkan potongan sinyal berdurasi 30 detik yang terdiri dari 5 detik sebelum

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

dan 25 detik setelah kedatangan gelombang P (Münchmeyer dkk., 2021b, 2021a). Dengan jendela waktu tetap seperti ini, prediksi pada waktu lebih dari 25 detik pascagelombang P tidak disertai tambahan informasi aktual sehingga performa model dapat menurun karena ketergantungan pada informasi awal yang terbatas.

Fenomena ini menjadi semakin kritis jika dikaitkan dengan gempa Mentawai 25 Oktober 2010 yang merupakan *tsunami earthquake* dengan rupture lambat. Gempa ini memiliki lokasi slip maksimum di zona dangkal dekat palung dan jauh dari estimasi hiposenter awal. Studi oleh Lay dkk., (2011) menunjukkan bahwa energi dominan dari gempa ini baru muncul signifikan setelah puluhan detik sehingga estimasi berbasis *waveform* awal memiliki risiko bias. Selain itu, sistem EEW yang tidak mampu memperbarui prediksi setelah waktu *input* berakhir akan menghasilkan estimasi akhir yang tidak responsif terhadap dinamika sumber yang sedang berlangsung.

Meier (2017) menegaskan pentingnya pendekatan *progressive updating*, yaitu estimasi gempa disempurnakan seiring masuknya data baru. Namun, pendekatan jendela waktu tetap pada TEAM dan TEAM-LM justru membatasi kemampuan pembaruan prediktif secara *real-time*. Untuk mengatasi degradasi ini, strategi *curriculum learning* (Bengio dkk., 2009) dapat digunakan agar model terlatih memahami *waveform* secara bertahap dari durasi pendek ke panjang. Selain itu, penyesuaian pada mekanisme temporal *attention* (Vaswani dkk., 2017) memungkinkan model memfokuskan perhatian pada segmen *waveform* yang relevan secara dinamis khususnya ketika gelombang S atau permukaan mulai mendominasi. Pendekatan ini penting bagi kawasan seperti Sumatra Barat yang memiliki potensi terhadap *tsunami earthquake* dan gempa dari multi segmen di mana informasi krusial kerap muncul di luar jendela awal 30 detik.

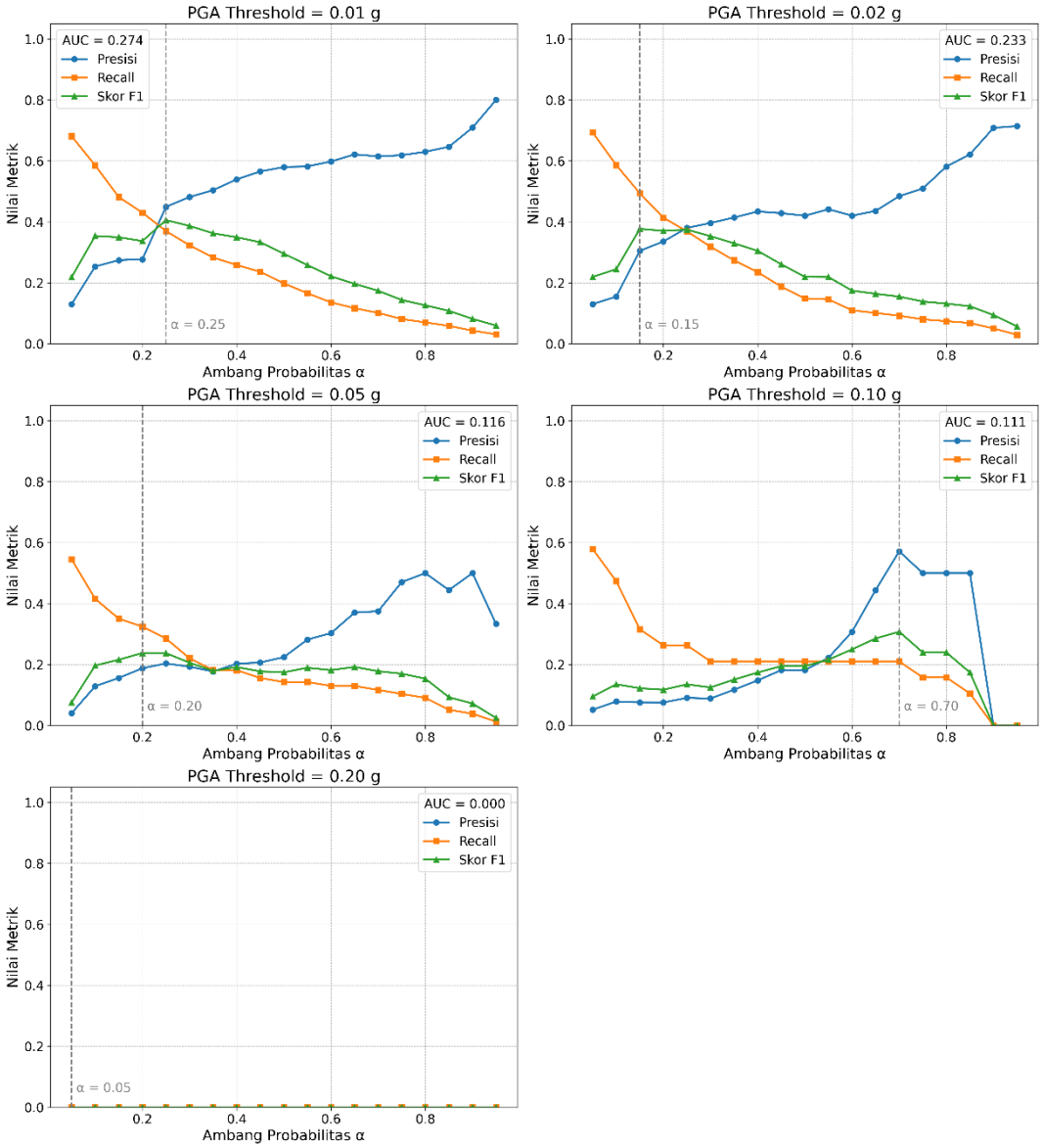
Berdasarkan hasil evaluasi metrik *precision, recall*, dan Skor F1 terhadap nilai ambang batas probabilitas α untuk masing-masing ambang batas PGA, terlihat bahwa α optimal berbeda-beda untuk setiap ambang batas (Gambar 5.24). Untuk PGA 0,01 g dan 0,02 g, α optimal berada di kisaran rendah dengan nilai masing-masing 0,25 dan 0,15. Skor F1 untuk ambang batas tersebut masing-masing sebesar 0,406 dan 0,377. Nilai F1 di ambang batas rendah 0,01 g, membuat sistem

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

menunjukkan performa paling seimbang. Cocok untuk sistem peringatan dini bersifat sensitif, meskipun mungkin menimbulkan banyak *false positives*. Sementara itu, untuk ambang batas 0,05 g dan 0,10 g, α optimal memiliki nilai masing-masing 0,20 dan 0,70. Sementara itu, skor F1 justru menurun menjadi 0,238 dan 0,308. Pada ambang batas tertinggi, tidak ada deteksi yang efektif. Nilai α kecil pada ambang batas 0,01 g s.d. 0,05 g memberikan *recall* tinggi (lebih banyak peringatan muncul). Nilai α besar seperti 0.70 pada ambang batas 0,1 g, meningkatkan *precision* (peringatan lebih yakin).

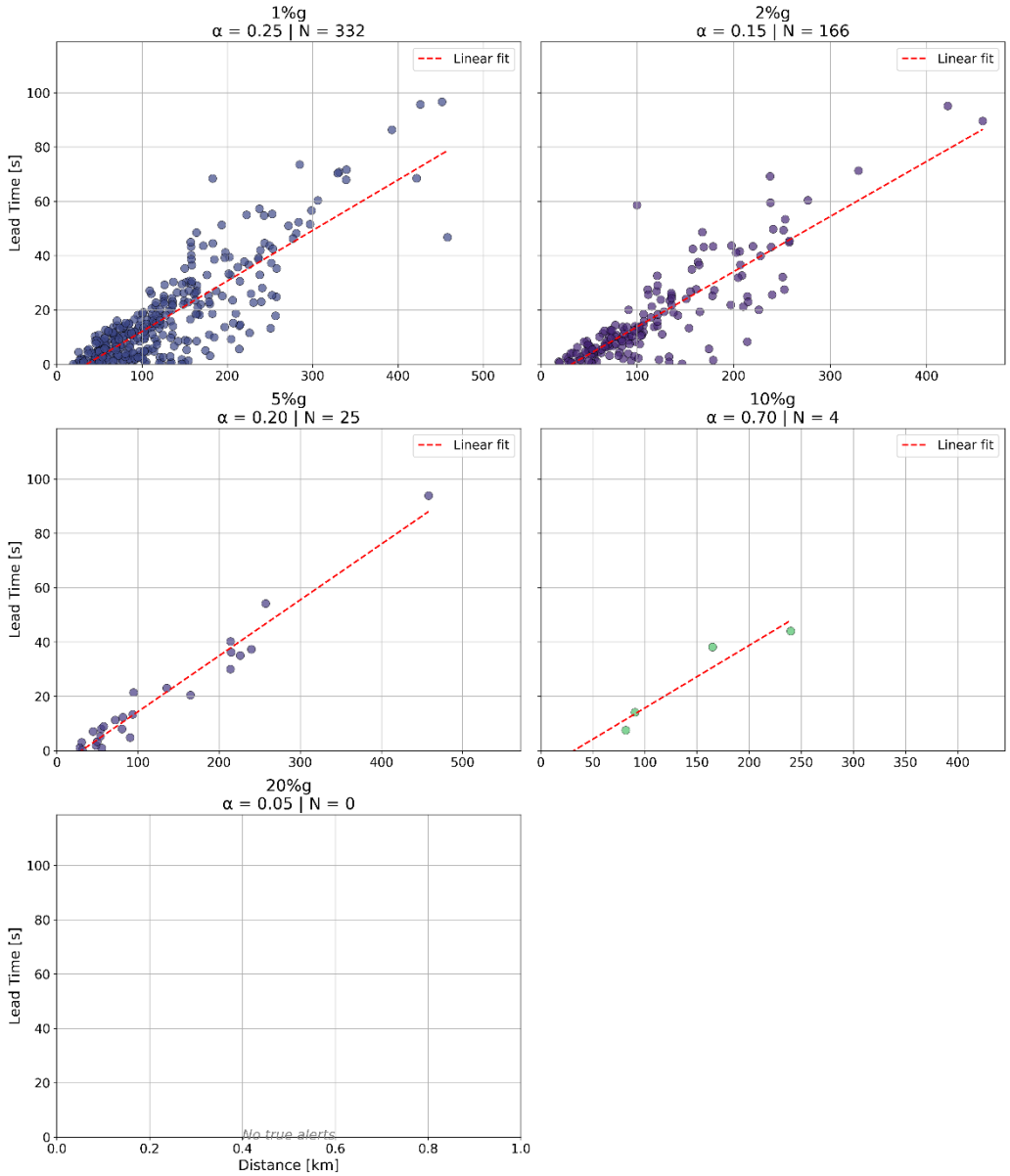
Nilai *Area Under the Curve* (AUC) yang menggambarkan keseimbangan antara *precision* dan *recall* di seluruh rentang α juga memperkuat temuan ini. AUC tertinggi dicapai pada ambang batas PGA 1% g dan 2% g dengan nilai masing-masing 0,274 dan 0,233. Hal ini menunjukkan performa sistem yang relatif stabil pada peringatan dini untuk gempa kecil. Namun, AUC menurun drastis pada ambang batas yang lebih tinggi, yakni 5% g dengan nilai 0,116 dan 10% g dengan nilai 0,111. Hal ini menunjukkan bahwa performa sistem EEW menurun signifikan seiring dengan meningkatnya ambang batas PGA.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 5.24 Evaluasi presisi, *recall*, dan skor F1 terhadap nilai ambang batas probabilitas α pada masing-masing ambang batas PGA. Ambang batas 20% g tidak terdapat peringatan.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 5.25 Hubungan antara *lead time* (detik) dan *distance* (km) atau jarak stasiun ke hiposenter untuk setiap ambang batas PGA dengan nilai α optimal per *threshold*. Garis putus-putus menunjukkan hasil regresi linier. Ambang batas 20% g tidak terdapat peringatan. N adalah jumlah stasiun.

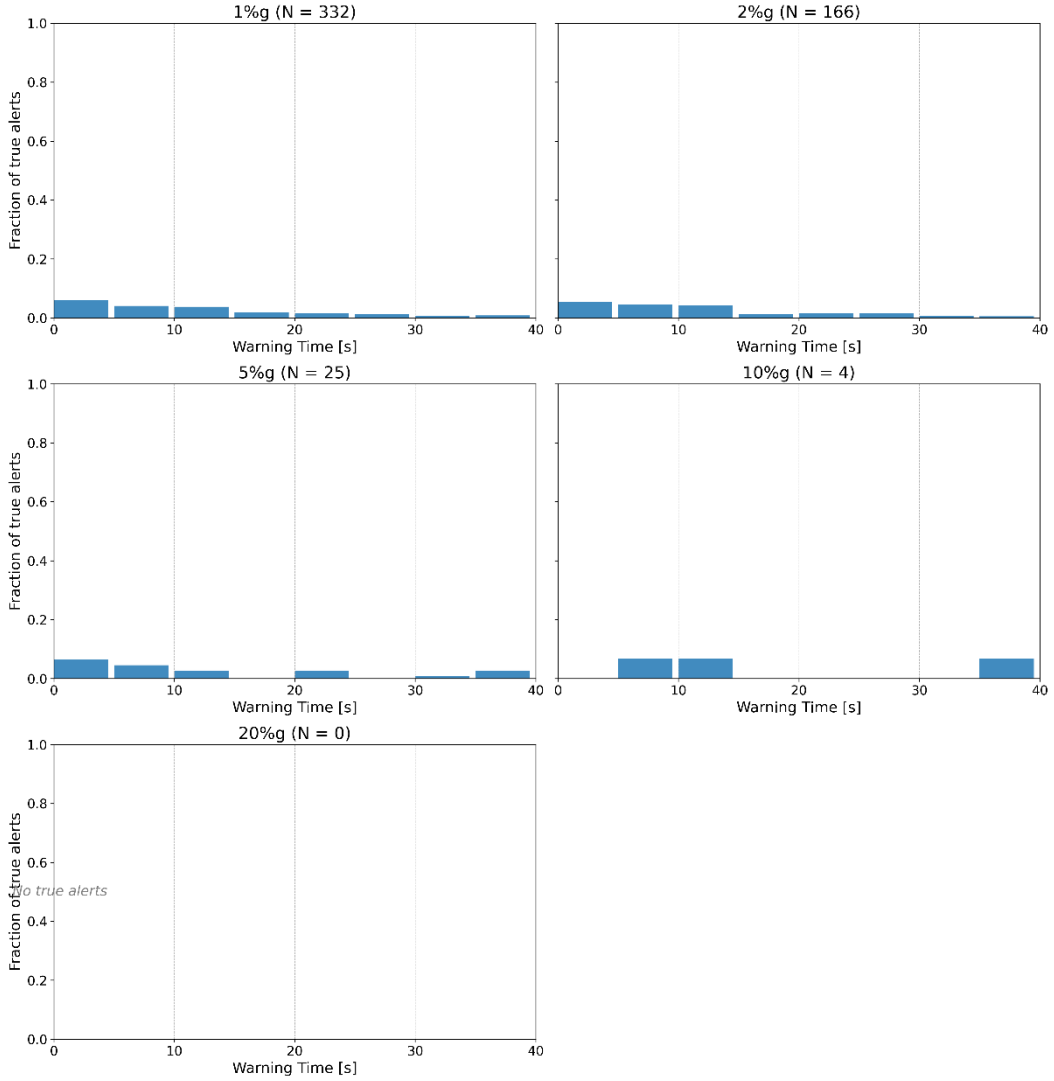
Untuk mengevaluasi hubungan spasial dalam sistem peringatan, dibuat plot antara *lead time* dan jarak stasiun terhadap episenter. Gambar 5.25 menunjukan bahwa secara umum terdapat korelasi positif antara jarak dan *lead time*. Stasiun yang berjarak lebih jauh dari sumber memiliki waktu peringatan lebih panjang. Hal

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ini sesuai dengan prinsip dasar penyebaran gelombang seismik, di mana stasiun yang dekat dengan pusat gempa memiliki waktu reaksi yang lebih singkat. Namun, variasi *lead time* pada jarak yang sama juga memperlihatkan adanya ketidakpastian aleatorik yang berasal dari faktor-faktor yang tidak terhitung dalam model. Ketidakpastian ini membuat kesalahan seperti *false alerts* (peringatan salah) dan *missed alerts* (peringatan terlewat) menjadi hal yang tidak dapat sepenuhnya dihindari. Plot ini juga menunjukkan bahwa kemampuan sistem untuk memberikan peringatan yang berguna dengan waktu sangat terbatas pada stasiun-stasiun di dekat sumber.

Distribusi waktu peringatan dari kejadian yang berhasil diprediksi (t*rue alerts*) ditampilkan dalam bentuk histogram pada Gambar 5.26. Visualisasi ini mengukur seberapa cepat sistem dapat memperingatkan pengguna sebelum ambang batas PGA benar-benar terlampaui di stasiun tertentu. Untuk ambang batas rendah (1% dan 2% g), distribusi relatif menyebar mulai dari sekitar 5 detik hingga 35 detik, menandakan efektivitas sistem dalam memberikan peringatan dini. Namun, untuk ambang batas lebih tinggi seperti 10% g, jumlah peringatan benar sangat sedikit (hanya 4) dan terkonsentrasi dalam waktu yang sangat pendek. Tidak ada *true alert* tercatat untuk ambang batas 20% g. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan sistem dalam memberikan peringatan yang berguna secara waktu semakin menurun pada ambang batas intensitas yang lebih tinggi.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 5.26 Histogram waktu peringatan dari kejadian yang berhasil diprediksi (*true alerts*) untuk tiap ambang batas PGA. N adalah jumlah stasiun di mana sistem memberi peringatan yang benar dan tepat waktu. *Warning time* adalah waktu selisih antara waktu dikeluarkannya peringatan dan saat ambang batas PGA terlampaui. *Fraction of true alerts* adalah proporsi peringatan yang benar (*true alerts*) dalam setiap interval waktu peringatan.

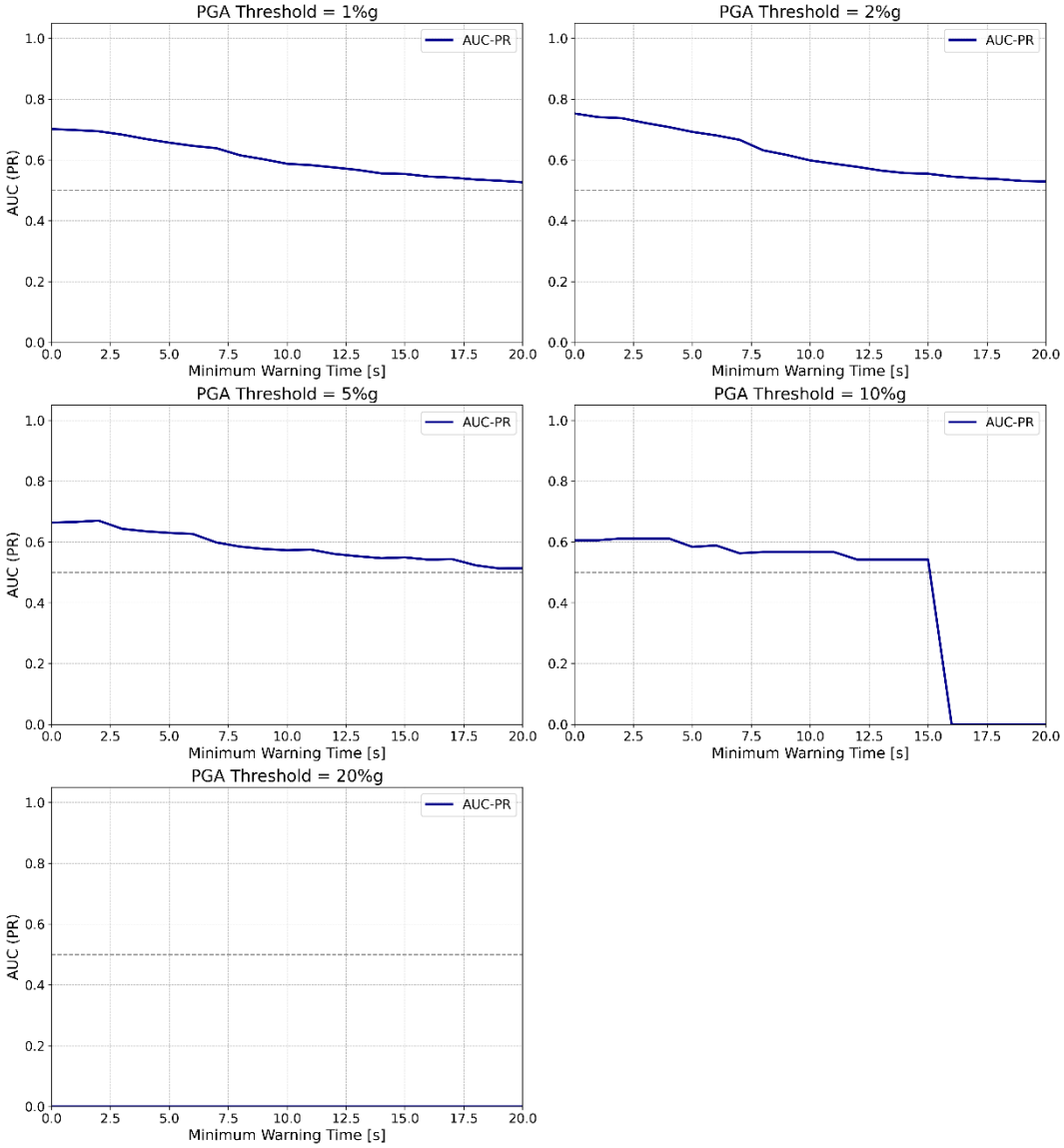
Dari total 104.885 data yang dianalisis pada berbagai ambang batas PGA dengan nilai α optimal, hanya sekitar 1.514 data (1,44%) yang benar-benar mengalami pelampauan ambang batas PGA. Pada ambang batas rendah seperti 1% g, dari 739 kejadian aktual, sistem berhasil mendeteksi 332 kasus dengan *false negative* 407 kasus. Performa menurun tajam pada ambang batas lebih tinggi,

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

seperti 20% g, yang hanya mencatatkan satu kasus aktual dan tidak berhasil diprediksi. Meskipun peningkatan nilai α pada ambang batas 10% g dan menghasilkan sensitivitas yang tinggi (TP 4 dari 7), jumlah kasus aktual yang sangat sedikit membatasi efektivitas sistem secara umum. Secara keseluruhan, sistem menunjukkan kecenderungan memberikan peringatan yang lambat atau bahkan tidak memberikan peringatan terutama pada gempa dengan PGA tinggi.

Gambar 5.27 memperlihatkan bagaimana performa sistem yang diukur menggunakan AUC. Dalam gambar tersebut terlihat performa sistem menurun ketika diterapkan batas minimum waktu peringatan yang dibutuhkan oleh pengguna. Untuk ambang batas PGA rendah, performa awalnya cukup tinggi (AUC > 0,6), namun secara konsisten menurun seiring meningkatnya syarat waktu minimum. Hal ini mencerminkan bahwa sebagian besar peringatan datang terlambat. Pada ambang batas lebih tinggi seperti 10% g, performa turun drastis jika waktu minimum peringatan melebihi 15 detik. Untuk ambang batas 20% g, tidak terdapat peringatan yang memenuhi kriteria ini. Hasil ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa performa sistem sangat sensitif terhadap batas waktu minimum yang dibutuhkan oleh pengguna, terutama untuk kejadian guncangan kuat.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 5.27 Nilai AUC (sumbu y) terhadap waktu minimum peringatan (sumbu x) dalam detik untuk setiap ambang batas PGA

5.2.4 Performa Model pada Beberapa Kejadian Gempa Bumi

Model-model hasil TEAM dan TEAM-LM dievaluasi performanya dengan memasukan tiga gempa besar yang akan diuji. Masing-masing gempa tersebut adalah gempa 24 April 2023 dengan magnitudo M_W 6,94 di Mentawai, gempa 22 Februari 2022 dengan magnitudo M_W 6,14 di Pasaman Barat, dan gempa 8 Januari 2024 dengan magnitudo M_W 5,0 di Mentawai. Gempa bumi di Mentawai

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

bersumber dari zona subduksi segmen Mentawai-Siberut sedangkan gempa Pasaman Barat bersumber dari Sesar Sumatra.

Setiap model dalam TEAM dan TEAM-LM memiliki keunggulan tersendiri dalam memprediksi parameter gempa, seperti magnitudo, lokasi, PGA dan waktu peringatan. Tidak ada satu model pun yang konsisten unggul dalam semua situasi, sehingga tidak dapat dikatakan ada model yang secara absolut superior. Oleh karena itu, dilakukan pendekatan evaluasi berbasis per-*event* dan per-waktu untuk menentukan model terbaik secara dinamis. Penentuan model terbaik ini dilakukan dengan menghitung total galat yang telah dinormalisasi dari estimasi magnitudo dan lokasi hiposenter. Model yang menghasilkan total galat normalisasi terkecil pada tiap kombinasi *event* dan waktu dianggap sebagai model terbaik untuk kasus tersebut.

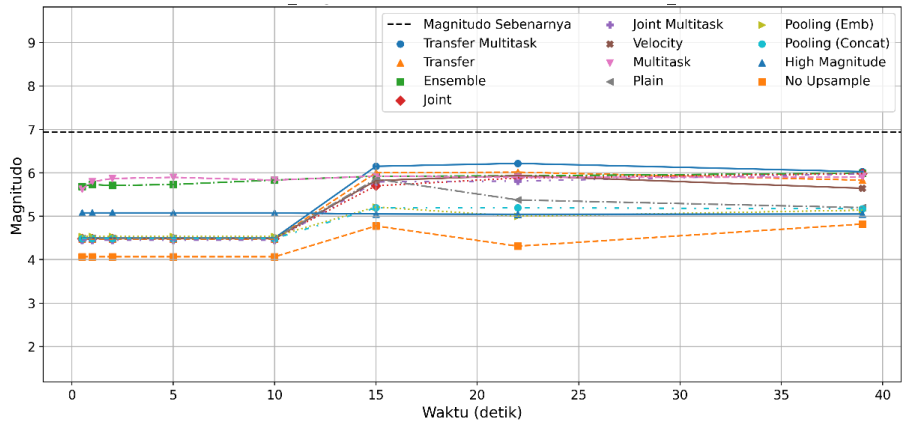
Sebagai pelengkap visual, simulasi interaktif sistem peringatan dini gempa berdasarkan hasil prediksi model dapat diakses melalui https://github.com/sigiteko/eew_simulation. Untuk memberikan gambaran yang lebih konkret mengenai efektivitas masing-masing model, hasil evaluasi dan analisis performa sistem terhadap ketiga gempa tersebut disajikan secara terpisah pada bagian berikut.

a. Gempa bumi Mentawai 24 April 2023

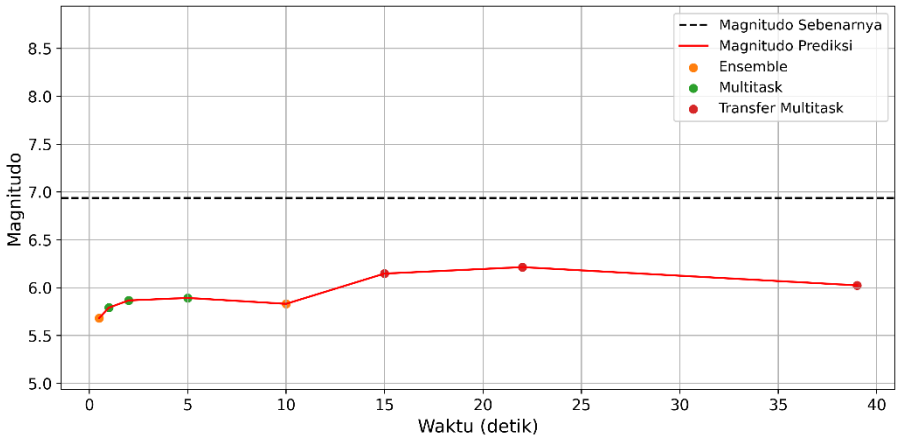
Gempa bumi Mentawai terjadi pada 24 April 2023 berpusat di sebelah utara Pulau Siberut, Kepulauan Mentawai pukul 20:00:54 UTC. Berdasarkan analisis awal BMKG, gempa ini berpotensi menimbulkan tsunami sehingga dikeluarkan peringatan dini tsunami-1. Setelah dilakukan observasi lebih lanjut, tidak terdeteksi adanya tsunami sehingga peringatan tersebut diakhiri dengan peringatan dini tsunami-4. Sumber gempa ini berasal dari zona subduksi segmen Mentawai-Siberut. BMKG mencatat gempa ini memiliki magnitudo M_W 6,94, dengan hiposenter pada koordinat 0.98° LS dan 98.34° BT, serta kedalaman 11 km. Parameter gempa ini dikeluarkan dalam waktu 89,8 detik setelah *origin time*. Jika dihitung dari waktu pertama kali gelombang P tiba di stasiun terdekat, parameter dikeluarkan dalam waktu 71,3 detik.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Model TEAM-LM mulai melakukan estimasi magnitudo dalam waktu 0,5 detik setelah gelombang P tiba pertama kali di stasiun dengan nilai magnitudo yang bervariasi. Semua model mengalami *underestimate* dengan nilai magnitudo prediksi terbesar sebesar 6,21 di detik ke-22. Hasil evaluasi magnitudo tersebut menunjukkan nilai galat absolut 0,72. Evaluasi magnitudo tiap satuan waktu dapat dilihat pada Gambar 5.28.



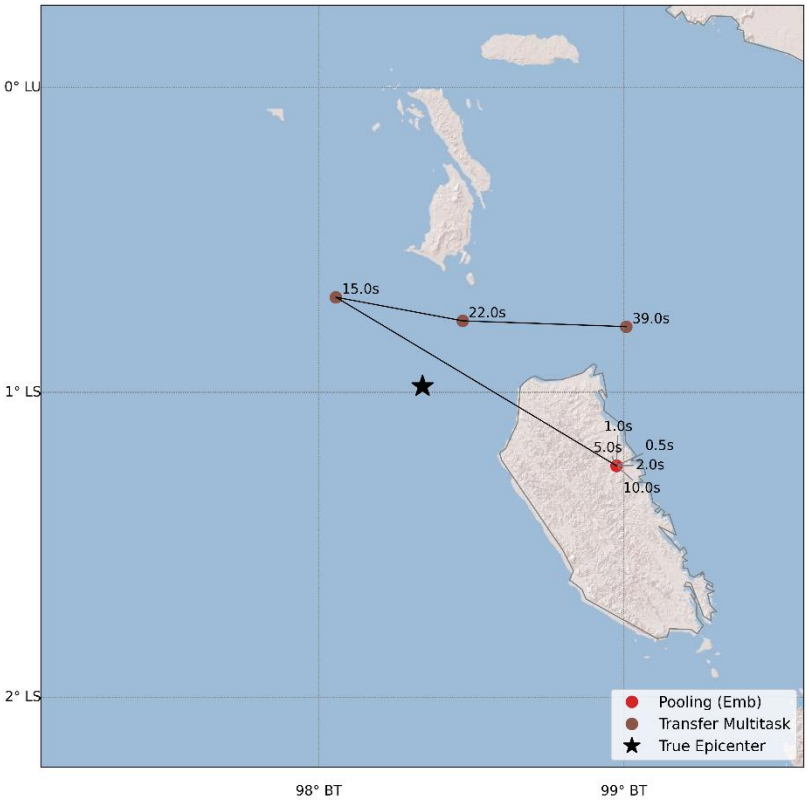
(a)



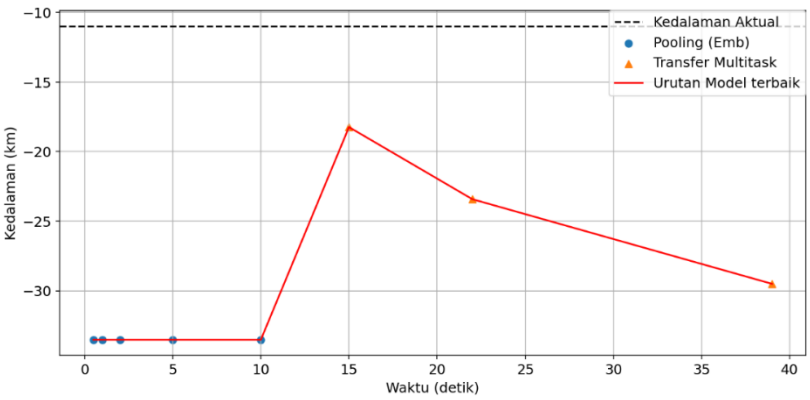
(b)

Gambar 5.28 (a) Perbandingan estimasi magnitudo prediksi terhadap waktu untuk berbagai konfigurasi model. Garis menunjukkan bagaimana prediksi magnitudo dari masing-masing model berkembang terhadap waktu. (b) Evaluasi prediksi magnitudo terbaik dibandingkan dengan magnitudo sebenarnya (garis putus-putus hitam) terhadap waktu dalam satuan detik.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



(a)



(b)

Gambar 5.29 (a) Evaluasi prediksi episenter terbaik untuk gempa Mentawai 24 April 2023 dibandingkan episenter sebenarnya (bintang hitam). Garis menunjukkan bagaimana perubahan prediksi episenter dari masing-masing model terhadap waktu. (b) Evaluasi prediksi kedalaman terbaik dibandingkan kedalaman sebenarnya (bintang hitam) terhadap waktu dalam satuan detik.

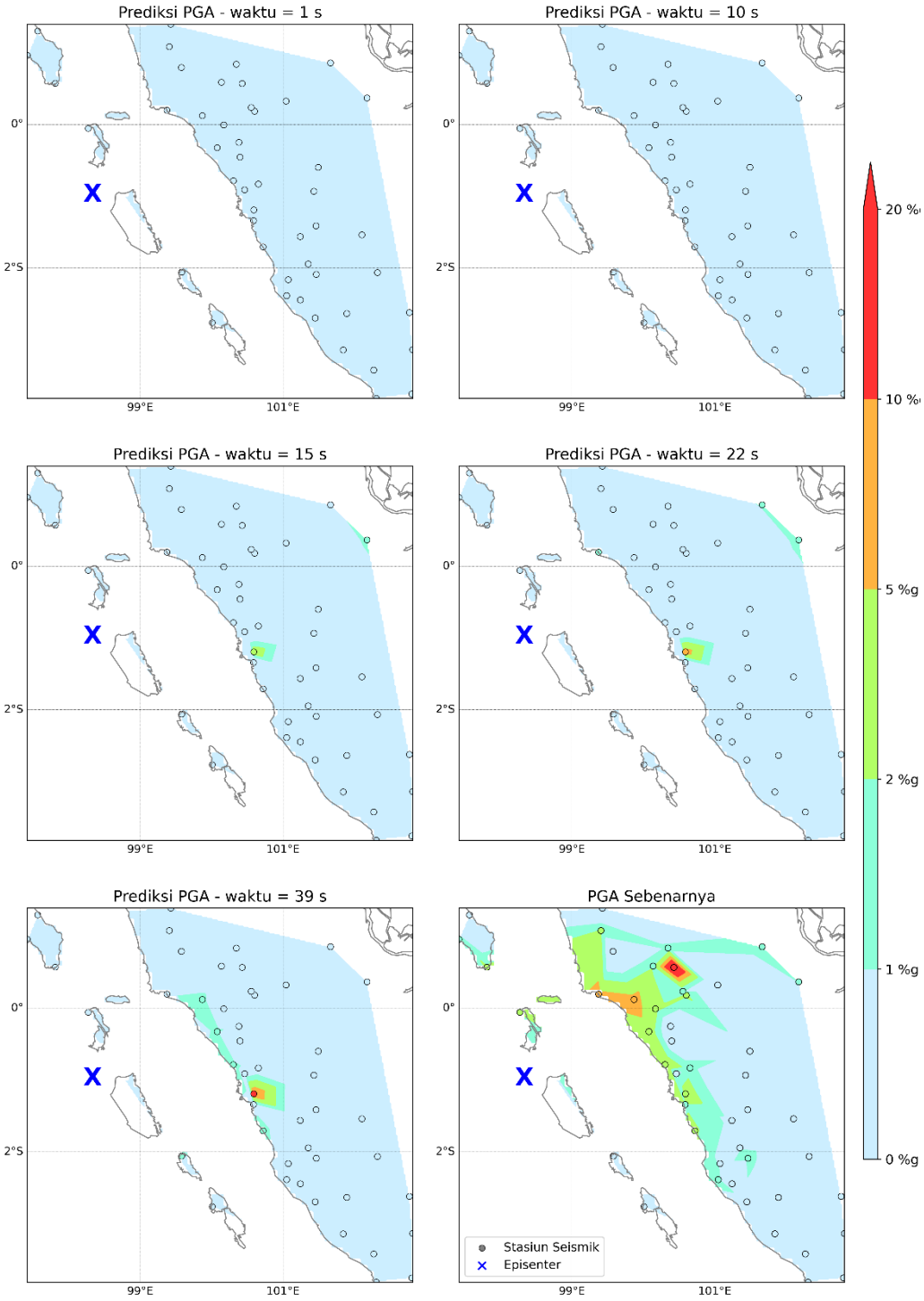
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Prediksi awal lokasi hiposenter sudah dilakukan model TEAM-LM pada detik ke-0,5 pada Gambar 5.29. Nilai awal prediksi memiliki galat absolut episenter dan hiposenter masing-masing 76,27 km dan 99,52 km. Nilai tersebut kemudian diperbaiki pada detik ke-22 masing-masing menjadi 27,90 km untuk episenter dan 38,35 km untuk hiposenter. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa model memiliki akurasi yang cukup baik dalam menentukan lokasi hiposenter dan episenter. Prediksi awal estimasi kedalaman dari *Ensemble* pada detik ke-0,5 diinisiasi pada kedalaman 33,5 km. Perbaikan estimasi mulai terlihat pada detik ke-15, di mana *Transfer Multitask* memprediksi kedalaman sebesar 14,3 km. Setelah itu, nilai kembali naik menjadi 29,49 km pada detik ke-39.

Evaluasi kemampuan model TEAM memprediksi PGA untuk gempa 25 Februari 2022 menunjukan prediksi belum menunjukkan sebaran PGA yang berarti di sekitar episenter dalam 1 hingga 10 detik setelah gelombang P pertama tiba. Prediksi PGA menunjukkan kemunculan nilai di atas 1% g di wilayah terbatas, meskipun masih jauh dari pusat distribusi guncangan aktual pada detik ke-15 hingga 22. Pada detik ke-39, model mulai mendeteksi adanya peningkatan signifikan hingga ambang batas 5% g di sekitar pesisir barat Sumatra.

Jika dibandingkan dengan peta PGA sebenarnya (Gambar 5.30), terlihat model gagal menangkap puncak PGA di wilayah timur episenter, terutama pada zona yang mencatat nilai di atas 10% g. Hal ini menunjukkan bahwa model TEAM masih mengalami keterlambatan dalam mengenali perkembangan spasial guncangan kuat, serta cenderung melakukan *underestimation* terhadap PGA sebenarnya pada tahap-tahap awal gempa.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



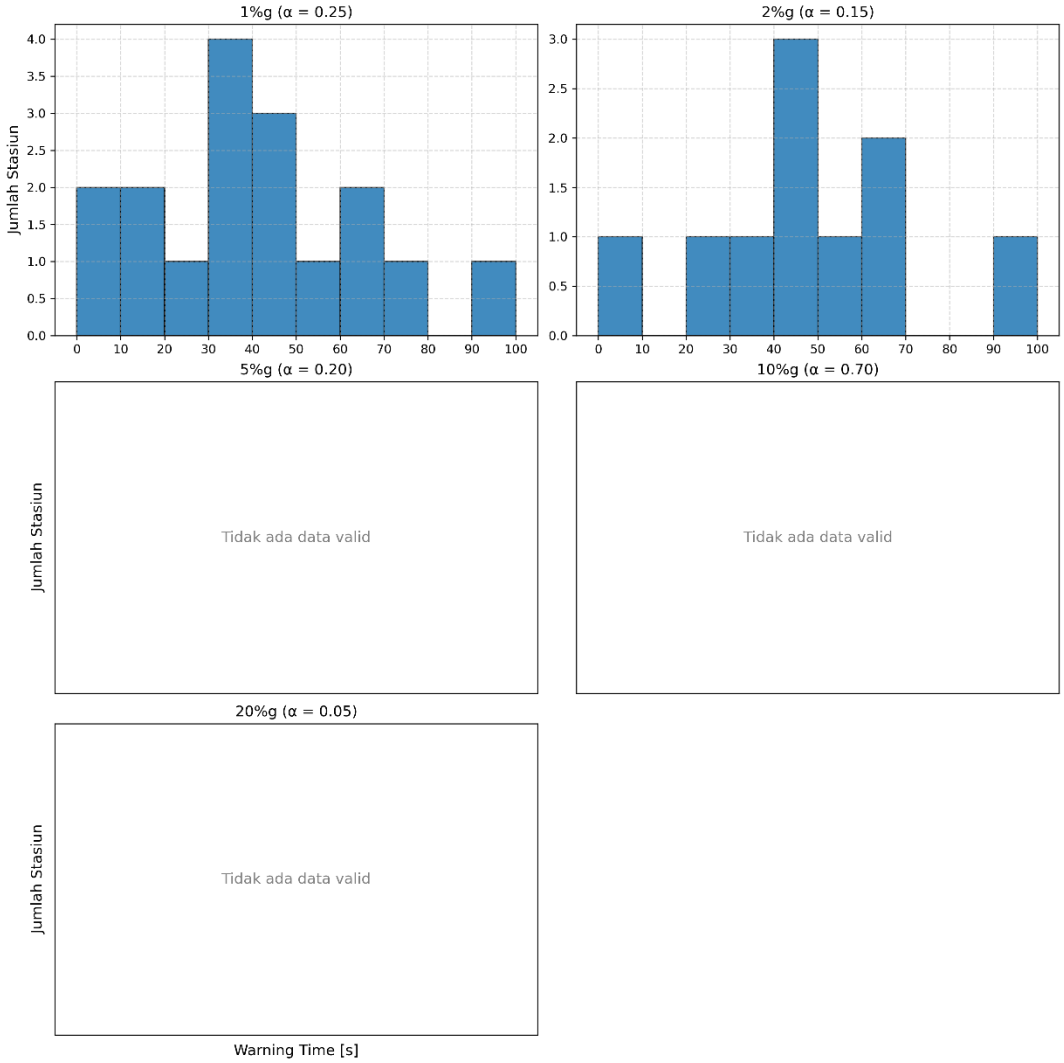
Gambar 5.30 Peta PGA prediksi pada detik ke 1, 10, 15, 22, 39 dan PGA sebenarnya gempa Mentawai 24 April 2023 dengan M_w 6,9 yang merupakan gempa terbesar dalam set pengujian Sumatra Barat. X adalah episenter gempa dan lingkaran adalah stasiun seismik. Skala warna menunjukan besarnya nilai prediksi PGA dalam satuan % g.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Evaluasi peringatan untuk Mentawai 24 April 2023 menunjukkan bahwa efektivitas sistem sangat dipengaruhi oleh ambang batas PGA yang digunakan (Gambar 5.31). Pada ambang batas 1% g ($\alpha = 0.25$), sebanyak 17 dari 48 stasiun berhasil diperingatkan sebelum ambang batas terlampaui (*true positive*). Waktu peringatan untuk kasus ini bervariasi antara 5,06 hingga 96,60 detik dengan rata-rata sekitar 42,03 detik. Demikian pula pada ambang batas 2% g ($\alpha = 0.15$), terdapat 10 stasiun yang menerima peringatan dengan rentang waktu antara 5,66 hingga 95,09 detik, dan rata-rata 47,96 detik. Tidak terdapat *false negative* akibat prediksi terlambat pada kedua ambang batas ini, yang menandakan bahwa sistem mampu memberikan peringatan cukup awal ketika ambang batas rendah digunakan.

Pada ambang batas yang lebih tinggi (5%, 10%, dan 20% g), tidak ada satu pun stasiun yang menerima peringatan. Semua kasus pada ambang batas ini diklasifikasikan sebagai *false negative* atau tidak ada prediksi. Hal tersebut menunjukkan kegagalan sistem dalam mendeteksi dan memperingatkan potensi guncangan kuat. Kondisi ini mengindikasikan bahwa model cenderung melakukan *underestimation* terhadap nilai PGA aktual, terutama untuk kejadian dengan intensitas tinggi.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 5.31 Grafik distribusi waktu peringatan (*warning time*) dalam detik terhadap jumlah stasiun untuk gempa Mentawai 24 April 2023 M_w6,9. Ambang batas 5%, 10%, dan 20% g tidak terdapat data yang valid.

Secara keseluruhan, model TEAM-LM melakukan *underestimation* dalam memprediksi magnitudo, lokasi episenter, serta PGA Gempa Mentawai 24 April 2023. Meskipun masih terdapat beberapa keterbatasan, model ini mampu memberikan parameter gempa sejak 0,5 detik setelah gelombang P pertama tiba di stasiun terdekat. sistem mampu memberikan peringatan cukup awal ketika ambang batas rendah digunakan. Evaluasi sistem peringatan menunjukkan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

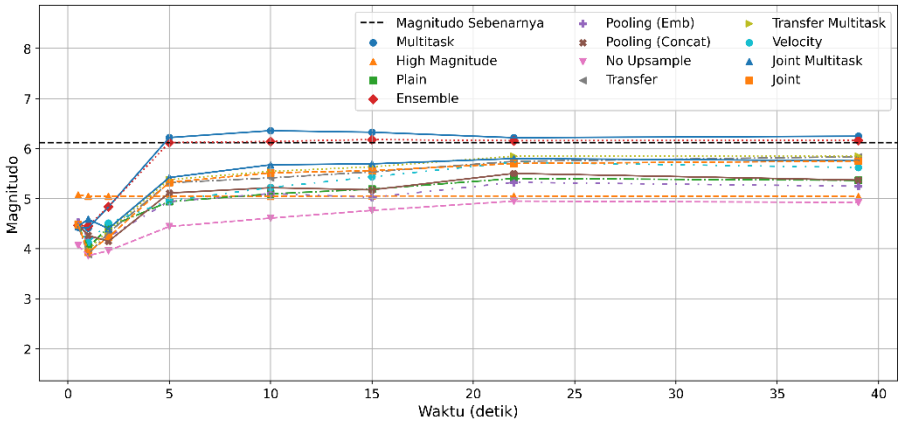
sistem masih efektif pada ambang batas PGA rendah dan membutuhkan peningkatan dalam menangani gempa dengan PGA yang lebih besar.

b. Gempa bumi Pasaman Barat 25 Februari 2022

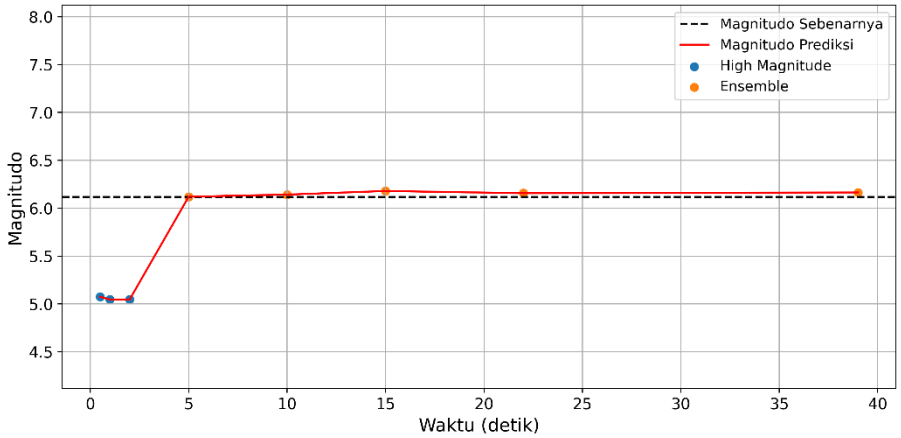
Gempa bumi Pasaman Barat terjadi 25 Februari 2022 dengan magnitudo M_W 6,14 pukul 01:39:28.8 UTC. Pusat gempa terletak pada koordinat 0.17° LU, 99.95°BT berada pada kedalaman 10 km. Dengan memperhatikan lokasi hiposenternya yang berada di darat, gempa yang terjadi merupakan jenis gempa dangkal akibat adanya aktivitas pergeseran sesar Sumatra. Parameter gempa ini pertama kali dikeluarkan 68,2 detik setelah *origin time* atau 62,4 detik setelah gelombang P tiba di stasiun pertama.

Model TEAM-LM mampu memperkirakan magnitudo gempa 25 Februari 2022 sejak detik-detik awal kejadian. Semua model mengalami *underestimation* dengan nilai magnitudo prediksi di bawah nilai sebenarnya selama 5 detik awal (Gambar 5.32 (a)). Nilai awal magnitudo yang mendekati nilai magnitudo sebenarnya adalah 5,07 dengan nilai galat absolut 1,074. Di detik ke-5, barulah nilai prediksi magnitudo 6,12 hanya dalam detik. Meskipun prediksi tidak menunjukkan titik stabilisasi yang konsisten dalam interval waktu tertentu, nilai estimasi magnitudo tetap berada dekat dengan nilai sebenarnya setelah detik ke-5. Hasil evaluasi kuantitatif menunjukkan bahwa model menghasilkan nilai galat absolut sebesar 0,0001 s.d. 0,06 dari detik ke-5 s.d. ke-39. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa secara rata-rata prediksi cukup dekat dengan magnitudo sebenarnya. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun model efektif dalam mencapai estimasi mendekati nilai referensi, konsistensinya terhadap dinamika temporal masih perlu ditingkatkan.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



(a)

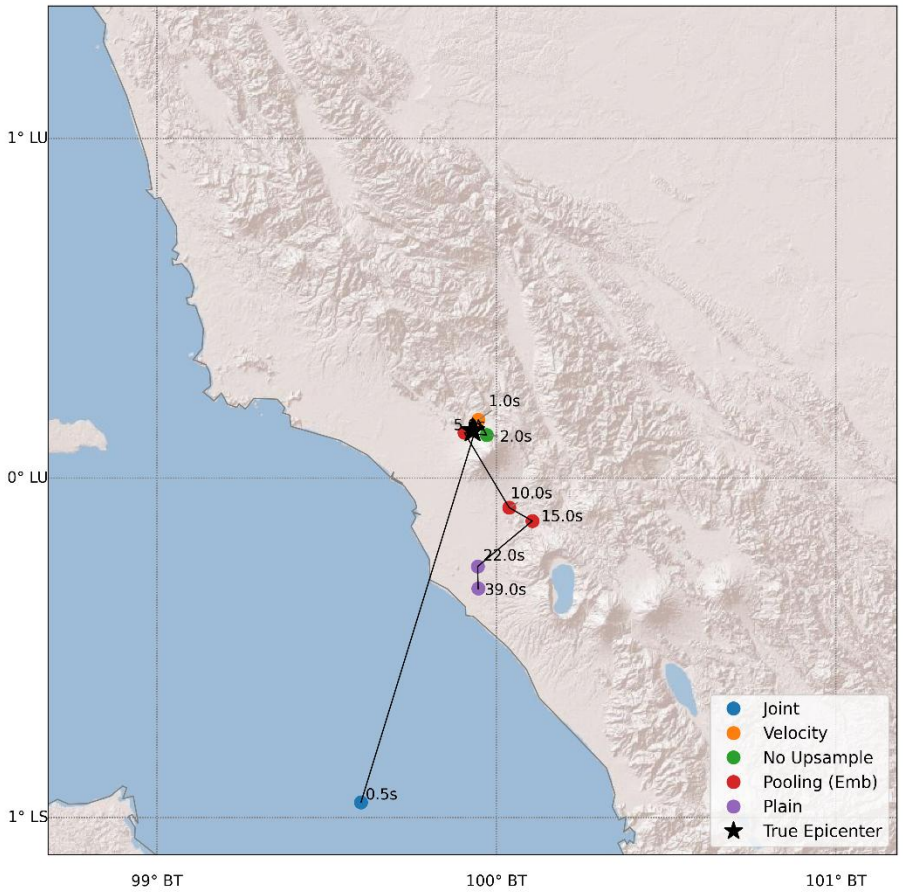


(b)

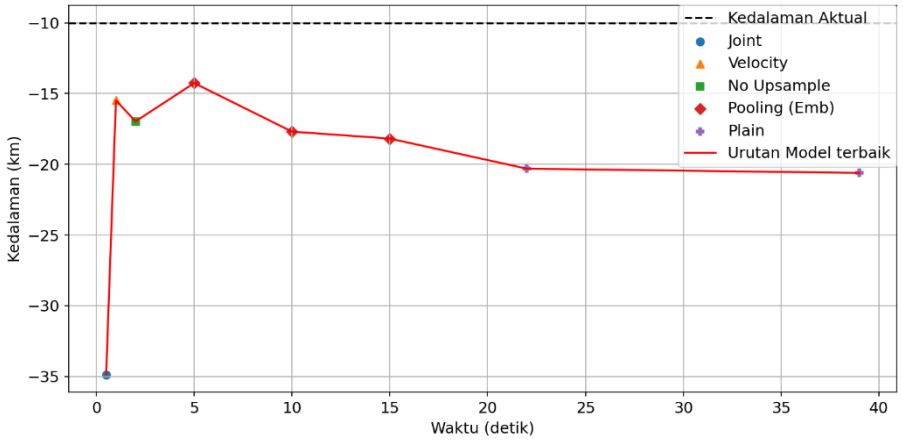
Gambar 5.32 (a) Perbandingan estimasi magnitudo prediksi terhadap waktu untuk berbagai konfigurasi model. Garis menunjukkan bagaimana prediksi magnitudo dari masing-masing model berkembang terhadap waktu. (b) Evaluasi prediksi magnitudo terbaik dibandingkan dengan magnitudo sebenarnya (garis putus-putus hitam) terhadap waktu dalam satuan detik.

Evaluasi lintasan spasial dari konfigurasi terbaik yang dipilih secara adaptif pada tiap waktu ditunjukan pada Gambar 5.33 (a). Titik awal dimulai dari model *Joint* yang pada detik ke-0,5 yang memberikan estimasi lokasi sangat jauh dari episenter sebenarnya. Kemudian, lokasi prediksi secara progresif mendekat melalui konfigurasi *Velocity*, *No Upsample*, dan *Pooling (Emb)*, hingga akhirnya berada relatif dekat dengan posisi aktual pada waktu 15–39 detik menggunakan model *Plain*.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



(a)



(b)

Gambar 5.33 (a) Evaluasi prediksi episenter terbaik untuk gempa Pasaman Barat 25 Februari 2022 dibandingkan episenter sebenarnya (bintang hitam) terhadap waktu dalam satuan detik. (b) Evaluasi prediksi

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

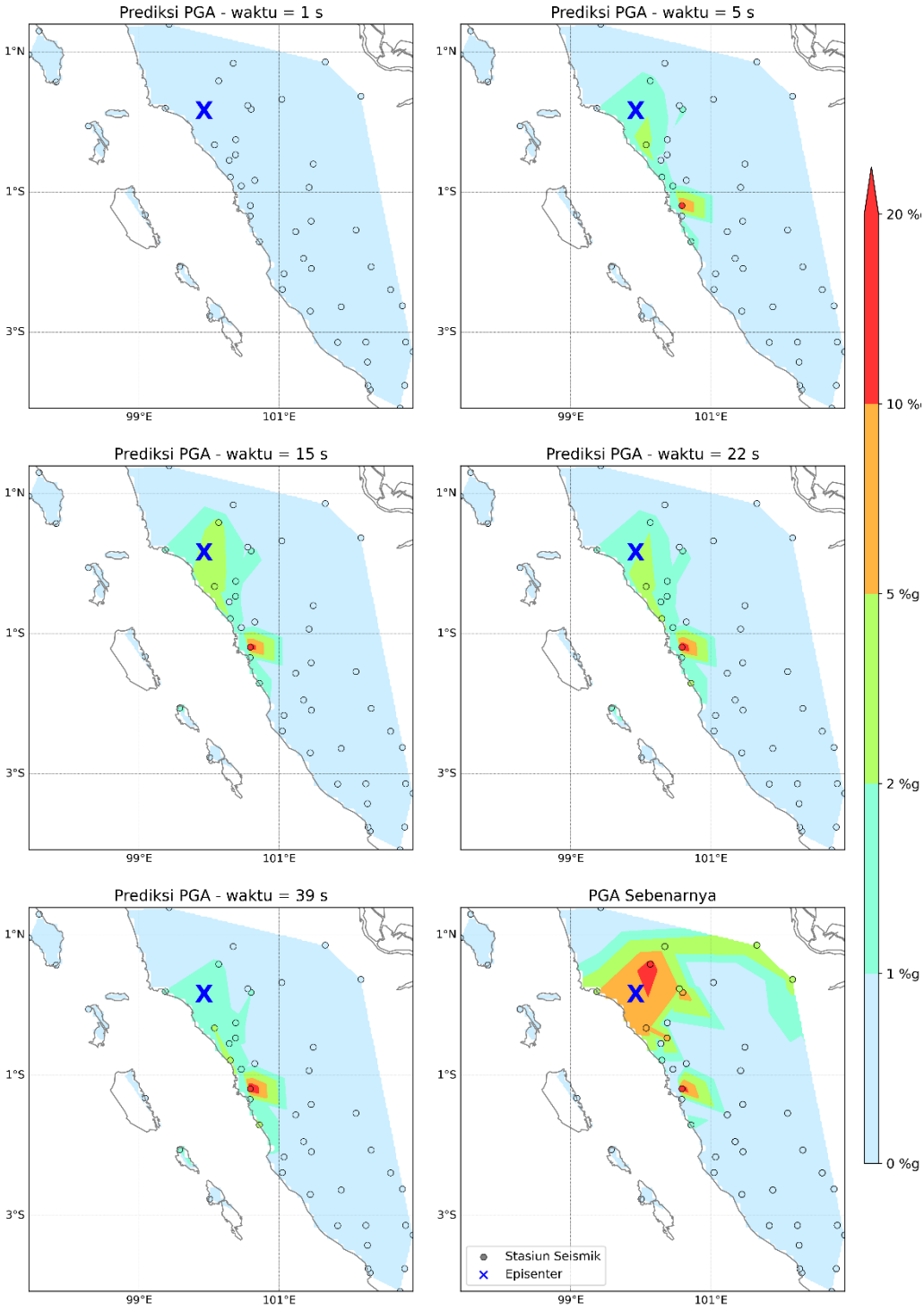
kedalaman terbaik dibandingkan kedalaman sebenarnya (bintang hitam) terhadap waktu dalam satuan detik.

Gambar 5.33 (b) menampilkan urutan model terbaik berdasarkan waktu yang menunjukkan perbaikan bertahap dalam estimasi kedalaman. Transisi dari konfigurasi *Joint* ke *Velocity* dan *Pooling (Emb)* dalam 15 detik awal menghasilkan estimasi yang lebih mendekati nilai referensi. Konfigurasi *Plain* mempertahankan kedalaman relatif stabil di kisaran 19–20 km hingga akhir periode. Hasil ini menunjukkan bahwa strategi pemilihan model adaptif berdasarkan waktu dapat meningkatkan akurasi estimasi kedalaman dibandingkan penggunaan satu model secara tetap.

Prediksi PGA oleh model TEAM pada gempa Pasaman Barat 25 Februari 2022 menunjukkan area yang diprediksi mengalami guncangan masih sangat terbatas dan belum menunjukkan nilai signifikan pada 1 detik setelah gelombang P pertama tiba di stasiun terdekat (Gambar 5.34). Pada detik ke-5, model sudah mulai memprediksi nilai PGA >2% g di sekitar episenter dan pada 15–22 detik, model berhasil mendeteksi area yang mengalami percepatan tanah tinggi, termasuk prediksi >10% g di wilayah pesisir barat Sumatra. Cakupan ini terus berkembang hingga waktu 39 detik yang mana pola distribusi PGA diprediksi semakin menyerupai observasi aktual.

Jika dibandingkan dengan peta PGA aktual, terlihat bahwa model mampu mengenali secara dini area pusat guncangan kuat yang mencapai >20% g. Model berhasil mengidentifikasi zona kritis dalam 15–22 detik setelah gempa. Hal ini menunjukkan performa yang relatif baik dibandingkan kasus sebelumnya yang keterlambatan dan *underestimation* lebih dominan. Meskipun demikian, cakupan dan intensitas area prediksi masih sedikit lebih sempit dibandingkan kondisi sebenarnya, sehingga masih terdapat ruang untuk peningkatan akurasi prediksi PGA.

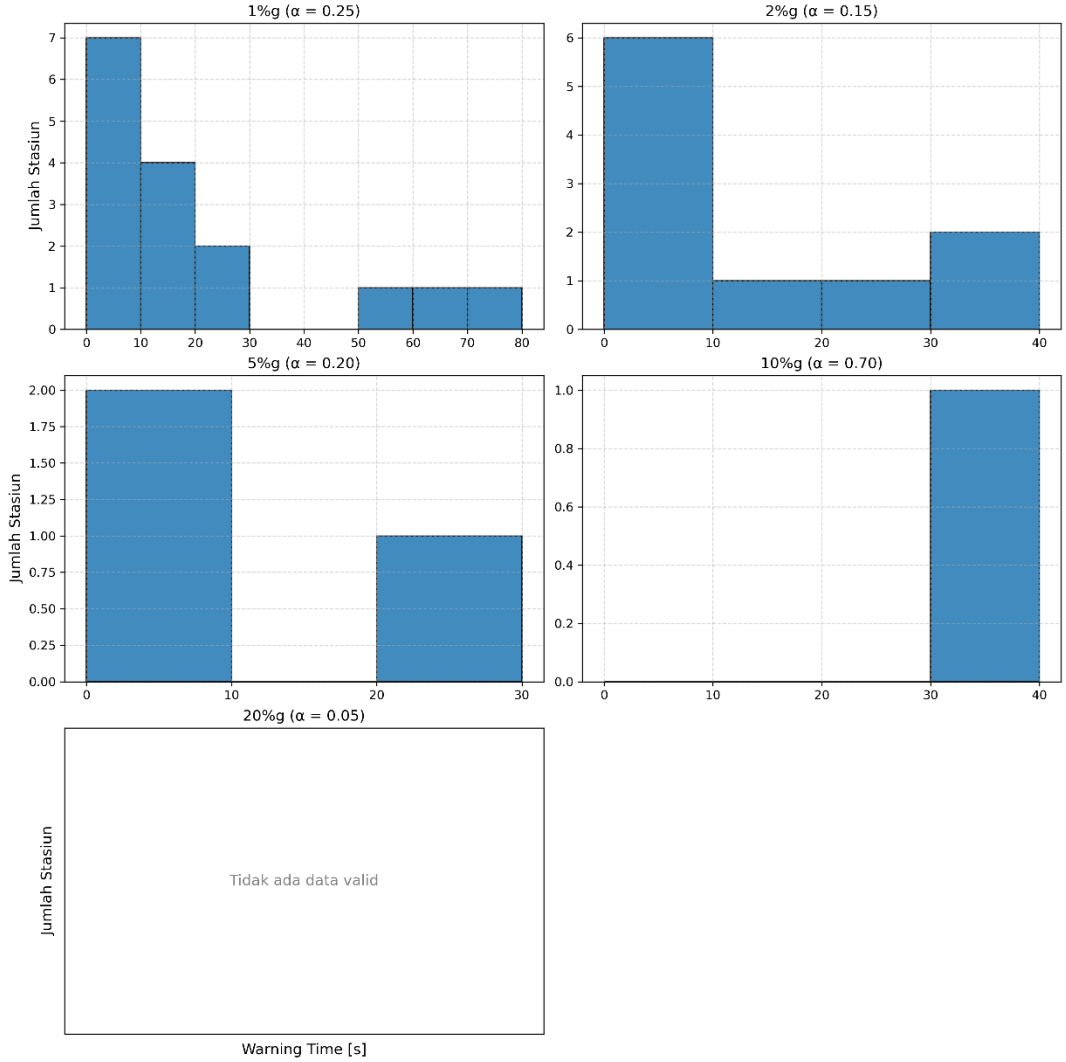
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.edu.id/



Gambar 5.34 Peta PGA prediksi pada detik ke 1, 5, 15, 22, 39 dan PGA aktual gempa Pasaman Barat 25 Februari 2022 dengan M_w6,2. X adalah episenter gempa dan lingkaran adalah stasiun seismik. Skala warna menunjukan besarnya nilai prediksi PGA dalam satuan %g.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Evaluasi peringatan pada gempa Pasaman Barat 25 Februari 2022 menunjukkan model TEAM memiliki performa terbaik pada ambang batas PGA rendah, khususnya 1% g dan 2% g (Gambar 5.35). Pada ambang batas 1% g, sebanyak 16 stasiun berhasil menerima peringatan (*true positive*) dengan rentang waktu peringatan antara 1,42 hingga 73,49 detik dan rata-rata sebesar 20,54 detik. Pada ambang batas 2% g, 10 stasiun berhasil diperingatkan dengan *warning time* antara 2,08 hingga 32,68 detik dan rata-rata 14,17 detik.



Gambar 5.35 Grafik distribusi waktu peringatan minimum (*warning time*) dalam detik terhadap jumlah stasiun untuk setiap ambang batas PGA gempa Pasaman Barat 25 Februari 2022 M_w6,2. Ambang batas 20% g tidak terdapat data yang valid.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Seiring meningkatnya ambang batas PGA, jumlah stasiun yang berhasil menerima peringatan menurun drastis. Pada ambang batas 5% g, hanya 3 stasiun yang menerima peringatan dengan rata-rata waktu peringatan 9,79 detik. Pada ambang batas 10% g, hanya satu stasiun yang warning time sebesar 38,13 detik. Tidak ada stasiun valid untuk ambang batas 20% g. Temuan ini menegaskan bahwa model masih memiliki keterbatasan dalam mendeteksi gempa besar dan cenderung melakukan *underestimation* terhadap nilai PGA aktual.

Secara keseluruhan, model TEAM-LM menunjukkan kinerja yang cukup baik dalam memprediksi magnitudo dan hiposenter yang cukup baik. Nilai PGA masih mengalami *underestimation* untuk gempa dengan nilai PGA yang besar. Cakupan PGA area prediksi masih sedikit lebih sempit dibandingkan kondisi sebenarnya. Sistem peringatan dapat memberikan peringatan pada kejadian dengan ambang batas PGA ringan hingga sedang.

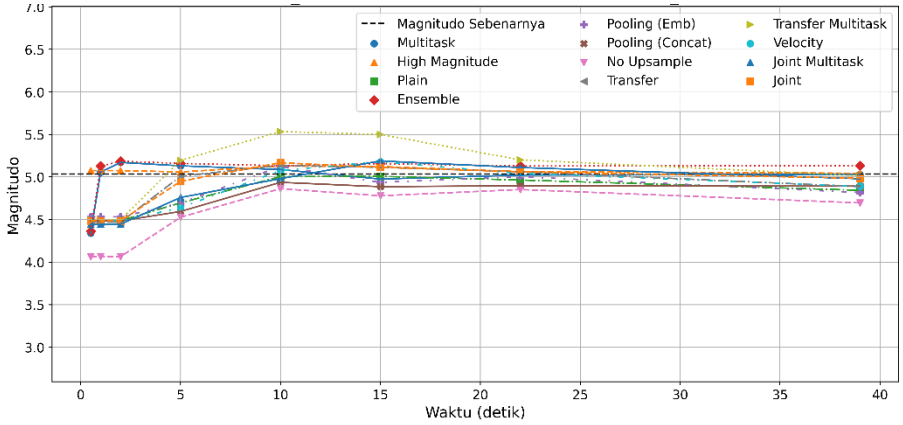
c. Gempa bumi Mentawai 8 Januari 2024

Gempa bumi Pasaman Barat terjadi 8 Januari 2024 dengan magnitudo M_w 5,00 pukul 09:51:32 UTC. Gempa ini memiliki koordinat episenter pada -2.27° LS dan 99.65° BT dengan kedalaman 29 km. Magnitudo gempa ini adalah M_w 5,0. *Azimuthal gap* gempa sebesar 170° mencerminkan distribusi spasial stasiun seismik yang digunakan dalam analisis lokasi. Proses parameter gempa ini didapatkan 80,5 detik setelah *origin time*.

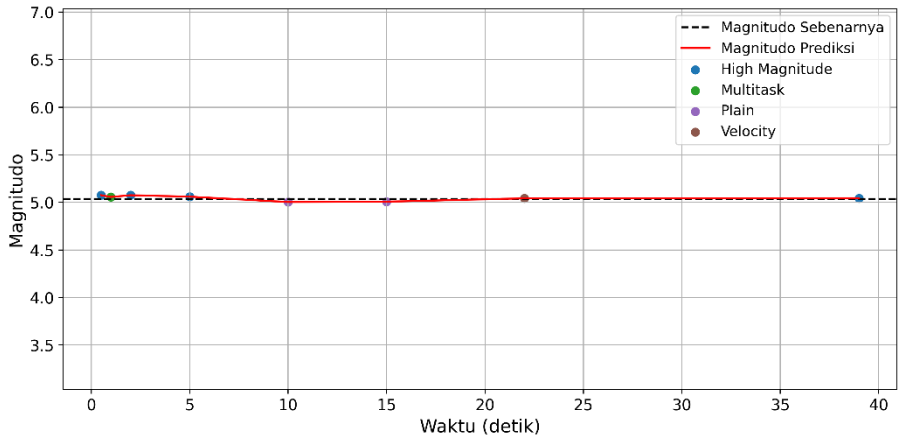
Evaluasi prediksi magnitudo untuk gempa 8 Januari 2024 pada Gambar 5.36 (a) menunjukkan bahwa sebagian besar model mengalami peningkatan estimasi setelah 10 detik pertama. Namun, tidak semua model mampu mempertahankan estimasi yang mendekati magnitudo sebenarnya secara konsisten. Model *Multitask* dan *Velocity* mencapai estimasi mendekati 5,1 pada detik ke-10, sementara *High Magnitude* dan *Plain* mampu mempertahankan nilai antara 5,0 hingga 5,2 hingga detik ke-39. Sebaliknya, model seperti *Pooling (Concat)* dan *No Upsample* menunjukkan bias sistematis dengan prediksi yang stagnan di kisaran 4,4–4,8. Untuk gempa ini, penggunaan model *High Magnitude*, *Multitask*, *Plain*, dan *Velocity* menunjukkan prediksi yang konsisten

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

dan stabil, yang ditandai dengan penyimpangan minimal terhadap magnitudo referensi sepanjang waktu, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5.36 (b).



(a)



(b)

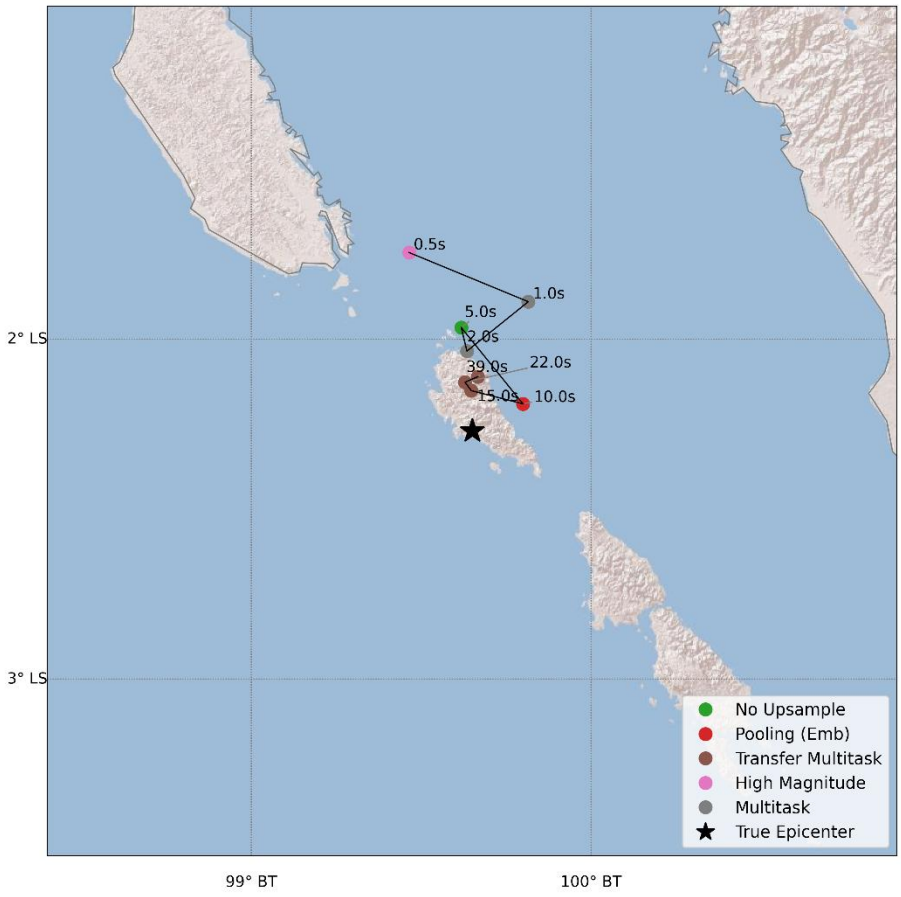
Gambar 5.36 (a) Perbandingan estimasi magnitudo prediksi terhadap waktu (detik) untuk berbagai konfigurasi model. Garis menunjukkan bagaimana prediksi magnitudo dari masing-masing model berkembang terhadap waktu. (b) Evaluasi prediksi magnitudo terbaik dibandingkan dengan magnitudo sebenarnya (garis putus-putus hitam) terhadap waktu dalam satuan detik.

Berdasarkan analisis lokasi gempa pada Gambar 5.37 (a) menunjukkan model-model terbaik dengan deviasi spasial relatif kecil terhadap lokasi gempa sebenarnya. Sebagai contoh, model *Pooling (Emb)* pada detik ke-10 memiliki galat absolut hanya 5,1 km, jauh lebih presisi dibanding model-model lainnya.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

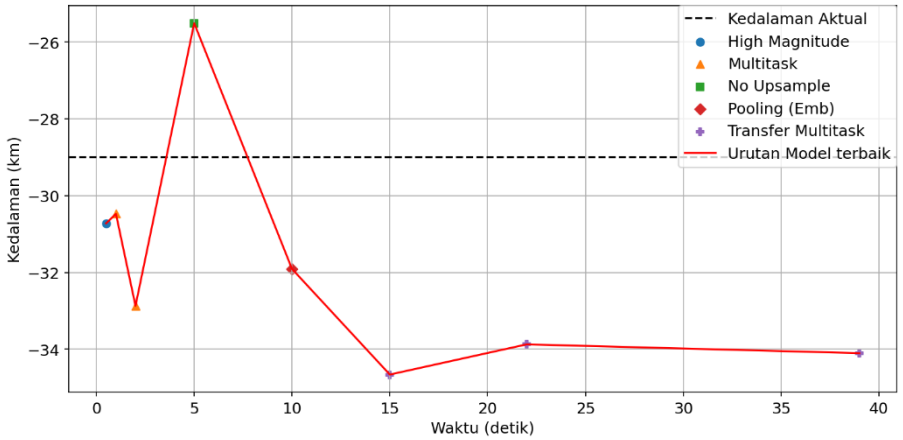
Hal ini menegaskan bahwa meskipun pada tahap awal banyak model belum konvergen ke lokasi yang tepat, pemilihan model terbaik secara waktu adaptif dapat secara signifikan meningkatkan akurasi spasial dalam EEW.

Estimasi kedalaman gempa 8 Januari 2024 oleh berbagai model terhadap waktu ditampilkan pada Gambar 5.37 (b). Gambar tersebut menyajikan urutan model terbaik berdasarkan waktu yang menunjukkan bahwa estimasi awal didominasi oleh model *High Magnitude* dan *Multitask*, namun prediksi mulai mendekati nilai aktual pada detik ke-10 oleh *Pooling (Emb)*. Estimasi nilai semakin stabil melalui *Transfer Multitask* pada detik ke-15 hingga 39. Meskipun tidak ada model yang benar-benar tepat, pendekatan pemilihan adaptif terhadap waktu menghasilkan estimasi kedalaman yang lebih stabil dan mendekati kondisi aktual dibandingkan penggunaan satu model secara tetap.



(a)

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



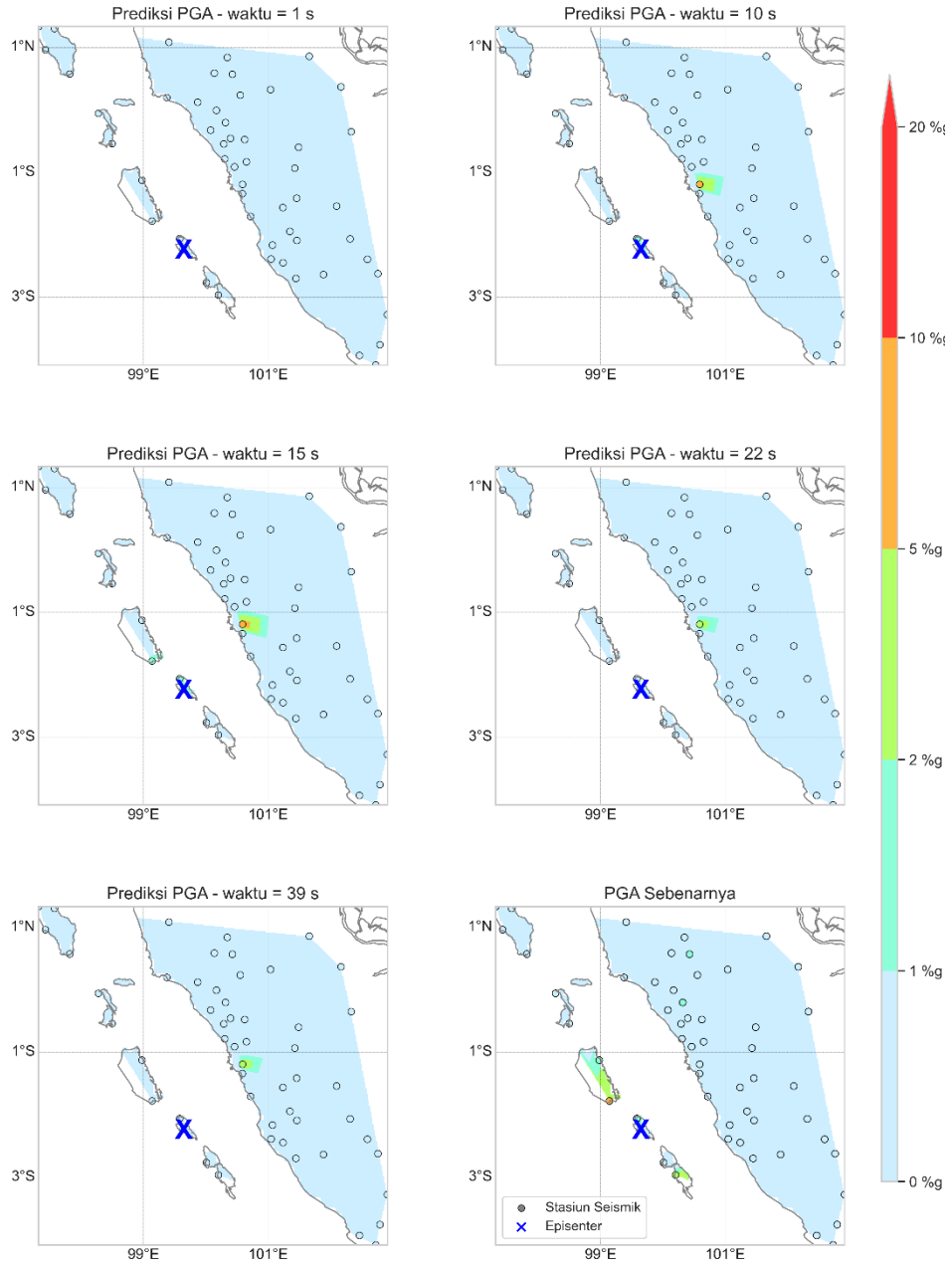
(b)

Gambar 5.37 (a) Evaluasi prediksi episenter terbaik (titik) dibandingkan episenter sebenarnya (bintang hitam) terhadap waktu dalam satuan detik. (b) Evaluasi prediksi kedalaman terbaik dibandingkan kedalaman sebenarnya (bintang hitam) terhadap waktu dalam satuan detik.

Evaluasi spasial terhadap prediksi PGA gempa 8 Januari 2024 ditampilkan pada Gambar 5.38. Pada detik ke-1 dan 10 setelah gelombang P tiba di stasiun terdekat, prediksi masih sangat terbatas dan belum menunjukkan adanya guncangan signifikan. Pada detik ke-15, model mulai mendeteksi peningkatan percepatan tanah di wilayah pesisir barat Sumatra, meskipun intensitasnya masih di bawah 5% g. Prediksi ini berlanjut dan sedikit berkembang pada 22 hingga 39 detik, namun cakupan spasialnya tetap sempit dan terbatas hanya pada area dekat sumber.

Jika dibandingkan dengan peta PGA aktual, terlihat bahwa area dengan percepatan tanah di atas 2% g lebih luas dari yang diprediksi model. Meski model mampu mengenali sebagian lokasi guncangan, model gagal menangkap cakupan penuh dan intensitas maksimal dari distribusi sebenarnya. Keterlambatan dan keterbatasan cakupan prediksi ini menandakan bahwa model TEAM masih kurang sensitif terhadap gempa dengan intensitas ringan hingga sedang yang terjadi di wilayah selatan episenter. Hasil ini mengindikasikan perlunya peningkatan sensitivitas model, khususnya pada gempa di area dengan distribusi stasiun yang jarang.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

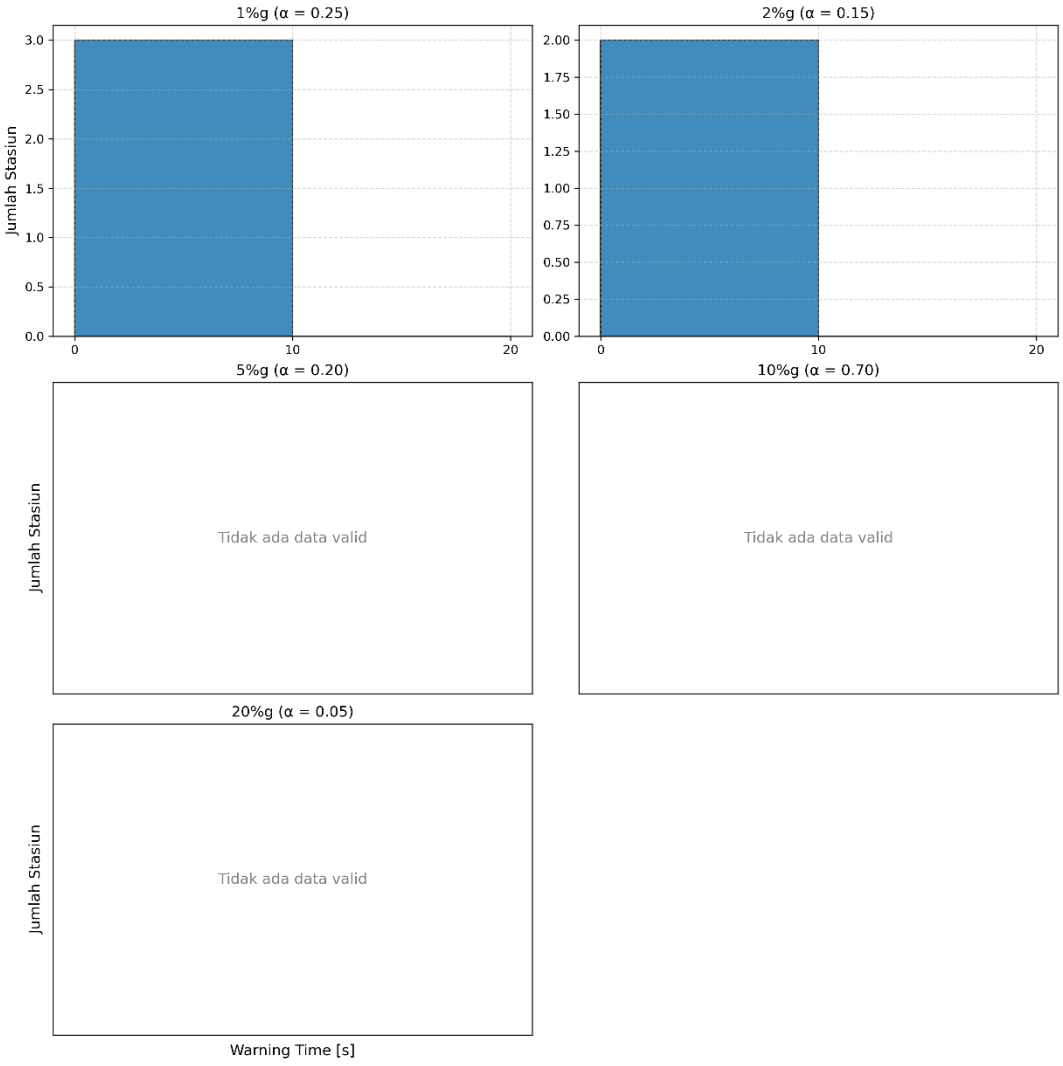


Gambar 5.38 Peta PGA prediksi pada detik ke 1, 10, 15, 22, 39 dan PGA aktual gempa Mentawai 8 Januari 2024 dengan M_w5,0 yang merupakan gempa terbesar dalam set pengujian Sumatra Barat. X adalah episenter gempa dan lingkaran adalah stasiun seismik. Skala warna menunjukan besarnya nilai prediksi PGA dalam satuan % g.

Evaluasi waktu peringatan untuk gempa Mentawai 8 Januari 2024 menunjukkan sistem berhasil memberikan peringatan dengan jumlah masing-masing sebanyak 3 stasiun untuk ambang batas 1% g dan dan 2 stasiun pada

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

untuk 2% g (Gambar 5.39). Seluruh peringatan yang diberikan berada pada waktu di bawah 10 detik sehingga tergolong sangat terbatas. Untuk ambang batas 5% g, 10% g, dan 20% g, tidak ditemukan stasiun yang valid. Hal tersebut menandakan bahwa sistem belum berhasil memberikan peringatan dikarenakan faktor *underestimation* model dan tidak ada data untuk ambang batas PGA tersebut.

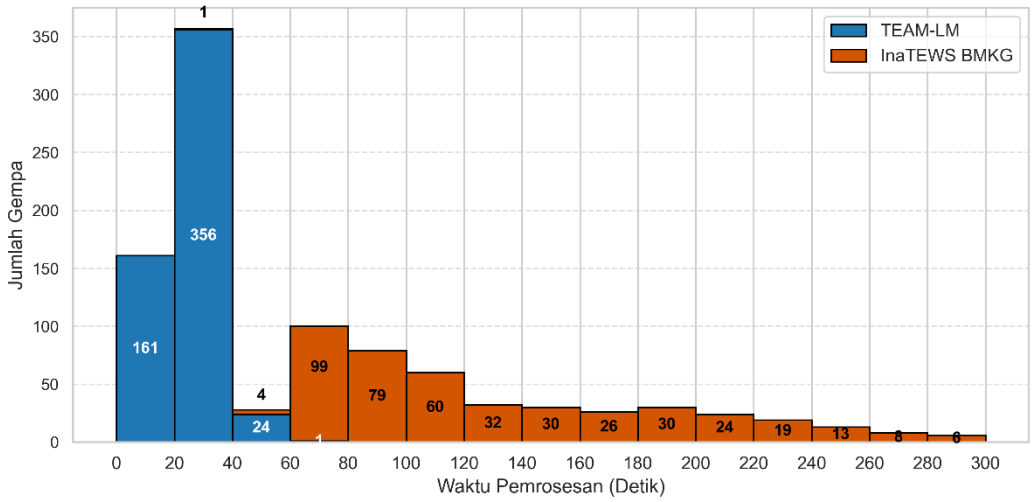


Gambar 5.39 Grafik distribusi waktu peringatan (*warning time*) dalam detik terhadap jumlah stasiun untuk gempa Mentawai 8 Januari 2024 M_w5,0

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.3 Perbandingan Model dengan InaTEWS

Waktu pemrosesan gempa hasil inferensi menggunakan model TEAM-LM dibandingkan dengan sistem InaTEWS BMKG. Dari 1.000 data uji TEAM-LM, dilakukan seleksi untuk mencari gempa yang hasil analisisnya relatif baik untuk dibandingkan dengan hasil dari InaTEWS BMKG. Parameter gempa yang baik sangat berpengaruh dikarenakan TEAM-LM sudah dapat melakukan estimasi prediksi pada detik ke-0,5 setelah gelombang P tiba di stasiun. Kriteria yang digunakan adalah perubahan nilai magnitudo tiap satuan waktu tidak berubah sebesar 0,5 Mw dan nilai hiposenter sebesar 70 km. Hasilnya didapatkan 540 gempa yang dibandingkan dengan hasil InaTEWS BMKG.



Gambar 5.40 Gambar distribusi waktu pemrosesan untuk membuat parameter gempa bumi dari TEAM-LM dan InaTEWS BMKG

Berdasarkan histogram distribusi waktu pemrosesan TEAM-LM dan InaTEWS BMKG (Gambar 5.40), terlihat bahwa TEAM-LM mampu menghasilkan parameter gempa bumi yang lebih cepat dibandingkan InaTEWS BMKG. Sebagian besar gempa diproses TEAM-LM dalam rentang waktu 0 hingga 40 detik dengan puncak pada interval 20–40 detik (353 kejadian) dan sebagian kecil dalam 0–20 detik (161 kejadian) sejak *origin time*. Sebaliknya, sistem InaTEWS BMKG menunjukkan waktu pemrosesan yang jauh lebih lambat, dengan mayoritas gempa

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

baru terdeteksi dalam interval 60 hingga 120 detik, khususnya pada 80–100 detik (79 kejadian) dan 100–120 detik (60 kejadian) sejak *origin time*. Jumlah gempa yang diproses oleh InaTEWS BMKG dalam waktu kurang dari 60 detik sangat kecil. Distribusi ini mendemostrasikan efektivitas model TEAM-LM meskipun waktu proses ini tidak mencakup latensi sistem secara penuh.

Selain kecepatan, aspek lain yang dapat ditingkatkan dari model TEAM-LM adalah akurasi estimasi lokasi dan magnitudo. Meskipun estimasi magnitudo menunjukkan performa sangat baik untuk gempa kecil hingga menengah, model cenderung mengalami *underestimation* pada magnitudo gempa-gempa besar. Hal ini dapat disebabkan oleh ketimpangan distribusi data latih yang didominasi oleh gempa dengan magitudo rendah, sehingga pelatihan model kurang optimal dalam mengenali karakteristik gempa besar.

Akurasi lokasi juga masih memiliki galat yang cukup tinggi, terutama untuk gempa subduksi dan gempa dalam. Model belum membedakan karakteristik spasial dari masing-masing jenis gempa, sehingga hasil estimasi lokasi bersifat terlalu umum. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut perlu mempertimbangkan pemisahan model berdasarkan jenis sumber gempa, seperti gempa kerak dangkal, *megathrust*, dan gempa dalam. Selain itu, integrasi fitur spasial seperti distribusi stasiun terhadap episenter, serta karakteristik sinyal seperti durasi dan frekuensi dominan, berpotensi meningkatkan ketepatan estimasi lokasi dan magnitudo secara signifikan.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB VI
KESIMPULAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan evaluasi terhadap kinerja model TEAM-LM dalam memprediksi parameter-parameter gempa bumi, beberapa poin kesimpulan utama dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Model TEAM-LM mampu memprediksi magnitudo secara progresif dari 0,5 detik hingga 39 detik setelah gelombang P tiba di stasiun terdekat. Akurasi estimasi magnitudo meningkat seiring waktu dan mendekati nilai aktual ketika lebih banyak data tersedia. Nilai galat MAE dan RMSE terbaik dicapai oleh *Multitask* dengan nilai MAE 0,14 dan RMSE 0,18 sejak detik ke-10. Sebagian besar konfigurasi mencapai MAE < 0,23 dan RMSE < 0,34 setelah 22 detik. Hal tersebut menandakan akurasi yang cukup baik untuk waktu pemrosesan *realtime*. Model cenderung melakukan *underestimation* pada waktu prediksi awal (0,5 s – 5 s) terutama untuk gempa besar.
2. Estimasi lokasi gempa oleh TEAM-LM menunjukkan galat cukup besar pada waktu awal, namun menurun secara signifikan dengan bertambahnya data sepanjang waktu berjalan. Pada waktu 0,5 detik, kesalahan RMSE hiposenter terkecil berada *Multitask* dengan nilai 121,39 km. Pda detik ke-22, model *Joint Multitask* memperbaiki galat RMSE Hiposenter menjadi 60,19 km. Namun, setelah 22 detik, terjadi peningkatan galat karena terbatasnya jendela *input waveform* sebesar 30 detik yang menghambat pembaruan prediksi secara progresif dan menyebabkan degradasi akurasi. Kesalahan dan akurasi lokasi dipengaruhi oleh distribusi spasial stasiun, cakupan azimutal, serta kedalaman gempa.
3. Evaluasi prediksi PGA menunjukkan bahwa akurasi meningkat seiring waktu, dengan nilai R^2 tertinggi sebesar 0,58 dan RMSE serta MAE terendah masing-masing 0,69 dan 0,49 pada detik ke-39. *Joint Plain Ensemble* memberikan performa terbaik dibandingkan model lainnya. Estimasi PGA mencapai akurasi yang baik untuk PGA rendah (misalnya 1–5% g), namun menurun secara

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

signifikan pada PGA tinggi (misalnya 10–20% g). Model cenderung memberikan peringatan yang terlambat pada gempa dengan PGA besar.

4. Sistem peringatan dini TEAM menunjukkan performa terbaik pada ambang batas PGA rendah (0,01–0,02 g). Ambang batas PGA ini menghasilkan skor F1 tertinggi (0,406 dan 0,377) serta nilai AUC terbesar (0,274 dan 0,233), meskipun masih disertai dengan banyak *false positives*. Efektivitas sistem menurun drastis pada ambang batas PGA tinggi yang ditandai dengan rendahnya *recall*, berkurangnya *true alerts*, dan tidak adanya peringatan untuk ambang batas 0,2 g. Distribusi waktu peringatan juga menunjukkan bahwa sebagian besar peringatan untuk ambang batas tinggi datang terlalu lambat atau tidak muncul sama sekali.
5. TEAM-LM menunjukkan keunggulan dalam kecepatan pemrosesan parameter gempa dibandingkan InaTEWS BMKG. TEAM-LM mampu menghasilkan estimasi parameter gempa mulai dari detik ke-0,5 dan mencapai puncak frekuensi pemrosesan pada rentang 20–40 detik dengan jumlah 353 kejadian. Sebaliknya, sistem InaTEWS BMKG baru mengeluarkan parameter gempa secara dominan pada rentang waktu 60–120 detik dengan puncak pada 80–100 detik (633 kejadian) dan hanya sebagian kecil kejadian yang dapat diproses dalam waktu < 60 detik.

6.2 Saran

Hasil penelitian ini penting bagi pengembangan EEW di Sumatra Barat. Penelitian menunjukkan bahwa jaringan pemantauan seismik BMKG, yang awalnya dirancang untuk observasi gempa dan sistem peringatan dini tsunami (TEWS), juga dapat dimanfaatkan untuk EEW. Namun, kapasitas dan cakupan jaringan tersebut masih perlu ditingkatkan, terutama untuk mendeteksi dan memprediksi gempa dangkal besar di zona subduksi.

Beberapa perbaikan dapat dilakukan dalam penelitian ini. Pertama, masih terdapat kesalahan dalam hasil picking waktu kedatangan gelombang P, khususnya pada data dengan tingkat noise tinggi, dan tidak dilakukan pengecekan ulang terhadap katalog BMKG. Kedua, dapat dilakukan pelatihan model menggunakan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

data sintetik yang dikonstruksi berdasarkan katalog historis dan skenario sumber gempa yang realistis untuk mengatasi keterbatasan jumlah data latih gempa besar. Ketiga, peningkatan jumlah stasiun seismik, khususnya di wilayah Kepulauan Mentawai, sangat penting untuk meningkatkan akurasi gempa yang berasal dari zona *megathrust*.

Hasil evaluasi lain menunjukkan bahwa model TEAM dan TEAM-LM mengalami peningkatan galat setelah 22 detik akibat keterbatasan input sinyal yang hanya 30 detik (5 detik sebelum dan 25 detik setelah kedatangan gelombang P), tanpa adanya mekanisme pembaruan informasi setelah jendela waktu tersebut berakhir. Oleh karena itu, perlu dikembangkan arsitektur model dengan mekanisme *progressive updating* dan penerapan strategi seperti *curriculum learning* agar model mampu beradaptasi secara dinamis terhadap *waveform* berdurasi panjang dan kompleks khususnya untuk jenis gempa seperti *tsunami earthquake* yang karakteristiknya baru muncul jelas setelah puluhan detik.

Model TEAM dan TEAM-LM pada penelitian ini belum mempertimbangkan secara eksplisit jenis sumber gempa berdasarkan kontrol geologi dan tektonik wilayah. Karakteristik *waveform* dari gempa subduksi, gempa kerak dangkal dari sesar aktif, dan gempa kedalaman dalam memiliki karakter yang berbeda. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya sebaiknya memisahkan pelatihan model berdasarkan tipe tektonik wilayah dan jenis sumber gempa, agar tidak menghasilkan model yang terlalu umum dan justru kehilangan sensitivitas terhadap karakteristik gempa lokal.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR PUSTAKA

Allen, R. M., & Melgar, D. (2019). *Earthquake Early Warning: Advances, Scientific Challenges, and Societal Needs*. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018

Anikiev, D., Waheed, U. bin, Staněk, F., Alexandrov, D., Hao, Q., Iqbal, N., & Eisner, L. (2022). Traveltime-based microseismic event location using artificial neural network. *Frontiers in Earth Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/feart.2022.1046258

Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2022). *Shakemap gempa bumi Solok Selatan, Sumatera Barat*. Diakses 14 Agustus 2024, dari https://www.bmkg.go.id

Barber, A., & Crow, M. J. (2008). Structure of Sumatra and its implications for the tectonic assembly of Southeast Asia and the destruction of Paleotethys. *Island Arc*, *18*, 3–20. https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2008.00631.x

Barber, A. J., Crow, M. J., & Milsom, J. S. (2005). *Sumatra: Geology, Resources and Tectonic Evolution*. Geological Society of London. https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2005.031

Belkin, M., Hsu, D., Ma, S., & Mandal, S. (2019). Reconciling modern machine-learning practice and the classical bias–variance trade-off. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *116*, 201903070. https://doi.org/10.1073/pnas.1903070116

Bengio, Y., Louradour, J., Collobert, R., & Weston, J. (2009). Curriculum learning. *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Machine Learning*, 41–48. https://doi.org/10.1145/1553374.1553380

Beyreuther, M., Barsch, R., Krischer, L., Megies, T., Behr, Y., & Wassermann, J. (2010). ObsPy: A Python Toolbox for Seismology. *Seismological Research Letters*, *81*(3), 530–533. https://doi.org/10.1785/gssrl.81.3.530

Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G. (2015). A Survey of Augmented Reality. *Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction*, *8*(2–3), 73–272. https://doi.org/10.1561/1100000049

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Bishop, C. M. (1994). *Mixture Density Networks*. http://www.ncrg.aston.ac.uk/

Böse, M., Smith, D. E., Felizardo, C., Meier, M. A., Heaton, T. H., & Clinton, J. F. (2018). FinDer v.2: Improved real-time ground-motion predictions forM2-M9 with seismic finite-source characterization. *Geophysical Journal International*, *212*(1), 725–742. https://doi.org/10.1093/gji/ggx430

Chang, C. C., Chan, C.-H., & Ma, K.-F. (2023). Feasibility of Applying the Transformer Earthquake Alerting Model to Regional Earthquake Early Warning in Taiwan. *AGU Fall Meeting Abstracts*, *2023*, S31F-0405.

Chen, Y., Saad, O. M., Savvaidis, A., Chen, Y., & Fomel, S. (2022). 3D Microseismic Monitoring Using Machine Learning. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *127*(3). https://doi.org/10.1029/2021JB023842

Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C. (CIRES). (2024). *Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX)* [Diagram]. Diakses pada 14 Agustus 2024 dari https://www.cires.org.mx

Cremen, G., & Galasso, C. (2020). Earthquake early warning: Recent advances and perspectives. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 205). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103184

Daryono, M. R., Natawidjaja, D. H., & Sieh, K. (2012). Twin-surface ruptures of the March 2007 M > 6 earthquake doublet on the Sumatran fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *102*(6), 2356–2367. https://doi.org/10.1785/0120110220

Diantari, H. C., Suryanto, W., Anggraini, A., Irnaka, T. M., Susilanto, P., & Ngadmanto, D. (2018). Preliminary Magnitude of Completeness Quantification of Improved BMKG Catalog (2008-2016) in Indonesian Region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *132*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/132/1/012026

Douglas, J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews*, *61*(1), 43–104. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00112-5

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Farnham, B., Tokyo, S., Boston, B., Sebastopol, F., & Beijing, T. (2019). *Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems SECOND EDITION*.

Geron, A. (2019). *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems* (2nd ed.). O'Reilly Media, Inc.

Ghosal, D., Singh, S. C., Chauhan, A. P. S., & Hananto, N. D. (2012). New insights on the offshore extension of the Great Sumatran fault, NW Sumatra, from marine geophysical studies. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *13*(1). https://doi.org/10.1029/2012GC004122

Grigoli, F., Cesca, S., Amoroso, O., Emolo, A., Zollo, A., & Dahm, T. (2014). Automated seismic event location by waveform coherence analysis. *Geophysical Journal International*, *196*(3), 1742–1753. https://doi.org/10.1093/gji/ggt477

Hall, R., & Blundell, D. J. (1996). *Tectonic evolution of Southeast Asia*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128715516

Hoshiba, M. (2014). Chapter 19 - Review of the Nationwide Earthquake Early Warning in Japan during Its First Five Years. In J. F. Shroder & M. Wyss (Eds.), *Earthquake Hazard, Risk and Disasters* (pp. 505–529). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394848-9.00019-5

Irsyam, M., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., Meilano, I., Rudyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, N. R., Djarwadi, D., Faizal, L., & Sunarjito. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Kementerian PUPR.

Jozinović, D., Lomax, A., Štajduhar, I., & Michelini, A. (2022). Transfer learning: improving neural network based prediction of earthquake ground shaking for an area with insufficient training data. *Geophysical Journal International*, *229*(1), 704–718. https://doi.org/10.1093/gji/ggab488

Kanamori, H. (2005). REAL-TIME SEISMOLOGY AND EARTHQUAKE DAMAGE MITIGATION. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*,

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

33(Volume 33, 2005), 195–214. https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122626

Kanasewich, E. R. (1981). *Time Sequence Analysis in Geophysics: Third Edition*. University of Alberta Press. https://books.google.de/books?id=k8SSLy-FYagC

Kodera, Y., Yamada, Y., Hirano, K., Tamaribuchi, K., Adachi, S., Hayashimoto, N., Morimoto, M., Nakamura, M., & Hoshiba, M. (2018). The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) Method: A Simple and Robust Seismic Wavefield Estimation Approach for Earthquake Early Warning. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *108*(2), 983–1003. https://doi.org/10.1785/0120170085

Konca, A. O., Avouac, J.-P., Sladen, A., Meltzner, A. J., Sieh, K., Fang, P., Li, Z., Galetzka, J., Genrich, J., Chlieh, M., Natawidjaja, D. H., Bock, Y., Fielding, E. J., Ji, C., & Helmberger, D. V. (2008). Partial rupture of a locked patch of the Sumatra megathrust during the 2007 earthquake sequence. *Nature*, *456*(7222), 631–635. https://doi.org/10.1038/nature07572

Lanczos, C. (1950). An iteration method for the solution of the eigenvalue problem of linear differential and integral operators. *J. Res. Natl. Bur. Stand. B*, *45*, 255–282. https://doi.org/10.6028/jres.045.026

Lanczos, C. (1952). Solution of Systems of Linear Equations by Minimized Iterations1. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, *49*, 33. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7484650

Lay, T., Ammon, C. J., Kanamori, H., Yamazaki, Y., Cheung, K. F., & Hutko, A. R. (2011). The 25 October 2010 Mentawai tsunami earthquake (Mw 7.8) and the tsunami hazard presented by shallow megathrust ruptures. *Geophysical Research Letters*, *38*(6). https://doi.org/10.1029/2010GL046552

Mai, H., Audet, P., Perry, H. K. C., Mousavi, S. M., & Zhang, Q. (2023). Blockly earthquake transformer: A deep learning platform for custom phase picking. *Artificial Intelligence in Geosciences*, *4*, 84–94. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aiig.2023.05.003

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Manalip, S. H., Windah, R. S., & Dapas, S. O. (2014). ANALISIS PUSHOVER PADA STRUKTUR GEDUNG BERTINGKAT TIPE PODIUM. *Jurnal Sipil Statik*, *2*(4), 201–213.

McCloskey, J., Lange, D., Tilmann, F., Nalbant, S. S., Bell, A. F., Natawidjaja, D. H., & Rietbrock, A. (2010). The September 2009 Padang earthquake. *Nature Geoscience*, *3*(2), 70–71. https://doi.org/10.1038/ngeo753

Meier, M. A. (2017). How "good" are real-time ground motion predictions from Earthquake Early Warning systems? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *122*(7), 5561–5577. https://doi.org/10.1002/2017JB014025

Meier, M. A., Kodera, Y., Böse, M., Chung, A., Hoshiba, M., Cochran, E., Minson, S., Hauksson, E., & Heaton, T. (2020). How Often Can Earthquake Early Warning Systems Alert Sites With High-Intensity Ground Motion? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *125*(2). https://doi.org/10.1029/2019JB017718

Meier, M.-A., Ampuero, J. P., & Heaton, T. (2017). The hidden simplicity of subduction megathrust earthquakes. *Science*, *357*, 1277–1281. https://doi.org/10.1126/science.aan5643

Minson, S. E., Baltay, A. S., Cochran, E. S., Hanks, T. C., Page, M. T., McBride, S. K., Milner, K. R., & Meier, M. A. (2019). The Limits of Earthquake Early Warning Accuracy and Best Alerting Strategy. *Scientific Reports*, *9*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-019-39384-y

Mousavi, S. M., & Beroza, G. C. (2022). Deep-learning seismology. *Science*, *377*(6607). https://doi.org/10.1126/science.abm4470

Mousavi, S. M., Ellsworth, W. L., Zhu, W., Chuang, L. Y., & Beroza, G. C. (2020). Earthquake transformer—an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking. *Nature Communications*, *11*(1), 3952. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17591-w

Mukti, M. M. R., Singh, S. C., Deighton, I., Hananto, N. D., Moeremans, R., & Permana, H. (2012). Structural evolution of backthrusting in the Mentawai Fault Zone, offshore Sumatran forearc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *13*(12). https://doi.org/10.1029/2012GC004199

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Münchmeyer, J., Bindi, D., Leser, U., & Tilmann, F. (2021a). Earthquake magnitude and location estimation from real time seismic waveforms with a transformer network. *Geophysical Journal International*, *226*(2), 1086–1104. https://doi.org/10.1093/gji/ggab139

Münchmeyer, J., Bindi, D., Leser, U., & Tilmann, F. (2021b). The transformer earthquake alerting model: A new versatile approach to earthquake early warning. *Geophysical Journal International*, *225*(1), 646–656. https://doi.org/10.1093/gji/ggaa609

Nakamura, Y. (1988). *On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS)*.

Natawidjaja, D. H. (2007). The Sumatran Fault Zone-from Source to Hazard. In *Journal of Earthquake and Tsunami* (Vol. 1, Issue 1).

Natawidjaja, D. H. (2018). Updating active fault maps and sliprates along the Sumatran Fault Zone, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *118*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012001

Natawidjaja, D. H., Sieh, K., Chlieh, M., Galetzka, J., Suwargadi, B. W., Cheng, H., Edwards, R. L., Avouac, J. P., & Ward, S. N. (2006). Source parameters of the great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *111*(6). https://doi.org/10.1029/2005JB004025

Pan, S. J., & Yang, Q. (2010). A Survey on Transfer Learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, *22*(10), 1345–1359. https://doi.org/10.1109/TKDE.2009.191

Panchuk, K. (2021). *Physical Geology (H5P Edition)*. BCcampus.

Polkowski, M., Plesiewicz, B., Wiszniowski, J., Wilde-Piórko, M., Geissler, W. H., Plomerová, J., Grad, M., Babuška, V., Brückl, E., Cyziene, J., Czuba, W., England, R., Gaczyński, E., Gazdova, R., Gregersen, S., Guterch, A., Hanka, W., Hegedűs, E., Heuer, B., … Wiejacz, P. (2016). Local Seismic Events in the Area of Poland Based on Data from the PASSEQ 2006-2008 Experiment.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Acta Geophysica, *64*(6), 2092–2113. https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0091

Prawirodirdjo, L., Bock, Y., Genrich, J. F., Puntodewo, S. S. O., Rais, J., Subarya, C., & Sutisna, S. (2000). One century of tectonic deformation along the Sumatran fault from triangulation and Global Positioning System surveys. In *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (Vol. 105, Issue B12, pp. 28343–28361). Blackwell Publishing Ltd. https://doi.org/10.1029/2000jb900150

Ruder, S. (2017). An Overview of Multi-Task Learning in Deep Neural Networks. *CoRR*, *abs/1706.05098*. http://arxiv.org/abs/1706.05098

Saad, O. M., Chen, Y., Trugman, D., Soliman, M. S., Samy, L., Savvaidis, A., Khamis, M. A., Hafez, A. G., Fomel, S., & Chen, Y. (2022). Machine Learning for Fast and Reliable Source-Location Estimation in Earthquake Early Warning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *19*, 1–5. https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3142714

Sieh, K., Natawidjaja, D. H., Meltzner, A. J., Shen, C. C., Cheng, H., Li, K. S., Suwargadi, B. W., Galetzka, J., Philibosian, B., & Edwards, R. L. (2008). Earthquake supercycles inferred from sea-level changes recorded in the corals of west Sumatra. *Science*, *322*(5908), 1674–1678. https://doi.org/10.1126/science.1163589

Snoek, J., Ovadia, Y., Fertig, E., Ren, J., Nado Google Research, Z., Nowozin Google Research, S., Dillon Google Research, J. V, & Lakshminarayanan, B. (2019). *Can You Trust Your Model's Uncertainty? Evaluating Predictive Uncertainty Under Dataset Shift*. https://github.com/google-research/google-research/tree/master/uq

Supendi, P., Rawlinson, N., Prayitno, B. S., Sianipar, D., Simanjuntak, A., Widiyantoro, S., Palgunadi, K. H., Kurniawan, A., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D., Sahara, D. P., Daryono, D., Triyono, R., Adi, S. P., Karnawati, D., Daniarsyad, G., Ahadi, S., Fatchurochman, I., Anugrah, S. D., … Sudrajat, A. (2023a). A previously unidentified fault revealed by the February 25, 2022

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

(Mw 6.1) Pasaman Earthquake, West Sumatra, Indonesia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *334*. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2022.106973

Supendi, P., Rawlinson, N., Prayitno, B. S., Sianipar, D., Simanjuntak, A., Widiyantoro, S., Palgunadi, K. H., Kurniawan, A., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D., Sahara, D. P., Daryono, D., Triyono, R., Adi, S. P., Karnawati, D., Daniarsyad, G., Ahadi, S., Fatchurochman, I., Anugrah, S. D., … Sudrajat, A. (2023b). A previously unidentified fault revealed by the February 25, 2022 (Mw 6.1) Pasaman Earthquake, West Sumatra, Indonesia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *334*. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2022.106973

Sutrisno, L., Bonte, D., Daud, Y., Smit, J., Beekman, F., Diederik, J., Wees, V., & Purwanto, W. (2019). *Assessing the role of pull-apart basins for high-temperature geothermal resources in transcurrent tectonic setting: Sumatra and California compared*. European Geothermal Congress 2019 Den Haag.

Tajima, F., & Hayashida, T. (2018). Earthquake early warning: what does “seconds before a strong hit” mean? In *Progress in Earth and Planetary Science* (Vol. 5, Issue 1). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1186/s40645-018-0221-6

Tan, P.-N., Steinbach, M., Karpatne, A., & Kumar, V. (2018). *Introduction to Data Mining (2nd Edition)* (2nd ed.). Pearson.

van den Ende, M. P. A., & Ampuero, J. P. (2020). Automated Seismic Source Characterization Using Deep Graph Neural Networks. *Geophysical Research Letters*, *47*(17). https://doi.org/10.1029/2020GL088690

Vaswani, A., Brain, G., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., & Polosukhin, I. (2017). *Attention Is All You Need*. 5998–6008.

Wald, D. J. (2020). Practical limitations of earthquake early warning. *Earthquake Spectra*, *36*(3), 1412–1447. https://doi.org/10.1177/8755293020911388

Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., & Kanamori, H. (1999). Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and Modified Mercalli Intensity in California. *Earthquake Spectra*, *15*(3), 557–564. https://doi.org/10.1193/1.1586058

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Widiyantoro, S., Supendi, P., Rawlinson, N., Daryono, M. R., & Rosalia, S. (2024). A note on the seismicity of Sumatra, western Sunda Arc, Indonesia, in relation to the potential for back-arc thrusting. *Scientific Reports*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-64076-7

Wu, Y. M., & Kanamori, H. (2005). Rapid assessment of damage potential of earthquakes in Taiwan from the Beginning of P waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *95*(3), 1181–1185. https://doi.org/10.1785/0120040193

Wurman, G., Allen, R. M., & Lombard, P. (2007). Toward earthquake early warning in northern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *112*(8). https://doi.org/10.1029/2006JB004830

Xiao, Z., Wang, J., Liu, C., Li, J., Zhao, L., & Yao, Z. (2021). Siamese Earthquake Transformer: A Pair-Input Deep-Learning Model for Earthquake Detection and Phase Picking on a Seismic Array. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *126*(5), e2020JB021444. https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020JB021444

Zuccolo, E., Cremen, G., & Galasso, C. (2021). Comparing the Performance of Regional Earthquake Early Warning Algorithms in Europe. *Frontiers in Earth Science*, *9*. https://doi.org/10.3389/feart.2021.686272

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

LAMPIRAN

Tabel Lampiran 1: Nama Eksperimen Untuk Tabel Hasil

Magnitudo dan Lokasi	
Nama	Keterangan
Plain	Model dilatih dengan satu *loss* saja, baik untuk magnitudo atau lokasi
Multitask	Model dilatih dengan dua *loss*: satu untuk magnitudo dan satu untuk lokasi
High magnitude	Model hanya dilatih pada gempa dengan magnitudo di atas 4.5
Transfer	Model dilatih dengan *transfer learning* dan satu *loss*
Multitask transfer	Model dilatih dengan *transfer learning* dan dua *loss*
Joint	Model dilatih secara bersama pada semua *dataset* dengan satu *loss*
Joint multi-task	Model dilatih secara bersama pada semua *dataset* dengan dua *loss*
Velocity	Model dilatih dengan sinyal percepatan yang diintegrasikan menjadi kecepatan
Ensemble	Model dilatih sebagai sebuah *ensemble* berukuran 10
No upsample	Model dilatih tanpa melakukan *upsample* pada magnitudo besar
Pooling (Emb)	Model dilatih dengan arsitektur *pooling* yang menggunakan *embedding* posisi
Pooling (Concat)	Model dilatih dengan arsitektur *pooling* yang menggabungkan (*concatenate*) koordinat
PGA dan Waktu Peringatan	
Nama	Keterangan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Plain Ensemble	Model dilatih sebagai sebuah *ensemble* berukuran 10 tanpa teknik tambahan seperti rotasi atau *transfer learning*.
Rotation Ensemble	Model dilatih sebagai sebuah *ensemble* berukuran 10 dengan variasi rotasi koordinat stasiun
Joint Plain Ensemble	Model dilatih secara bersama pada semua dataset sebagai sebuah *ensemble* berukuran 1 tanpa rotasi koordinat.
Joint Rotation Ensemble	Model dilatih secara bersama pada semua dataset sebagai sebuah *ensemble* berukuran 10 dengan rotasi koordinat
Transfer Plain Ensemble	Model dilatih sebagai sebuah *ensemble* berukuran 10 dengan *transfer learning* ke wilayah target tanpa rotasi koordinat
Transfer Rotation Ensemble	Model dilatih sebagai sebuah *ensemble* berukuran 10 dengan *transfer learning* dengan rotasi koordinat

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel Lampiran 2: Estimasi R^2 dan RMSE magnitudo pada data uji untuk seluruh rentang magnitudo terhadap waktu dalam detik.

	R^2								RMSE							
	0.5 s	1 s	2 s	5 s	10 s	15 s	22 s	39 s	0.5 s	1 s	2 s	5 s	10 s	15 s	22 s	39 s
Multitask	**0.26**	**0.49**	**0.71**	**0.77**	**0.79**	**0.81**	**0.8**	**0.8**	**0.35**	**0.29**	**0.22**	**0.19**	**0.18**	**0.18**	**0.18**	**0.18**
High Magnitude	-0.24	-0.25	-0.25	-0.26	-0.26	-0.24	-0.22	-0.19	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.49	0.49
Plain	-0.73	-0.7	-0.61	-0.29	0.32	0.58	0.7	0.68	0.53	0.53	0.51	0.46	0.33	0.26	0.22	0.23
Ensemble	0.25	0.44	0.66	0.72	0.75	0.75	0.76	0.77	0.35	0.3	0.23	0.22	0.2	0.2	0.2	0.2
Pooling (Emb)	-0.91	-0.85	-0.76	-0.38	0.27	0.55	0.66	0.69	0.56	0.55	0.54	0.47	0.35	0.27	0.24	0.23
Pooling (Concat)	-0.72	-0.67	-0.59	-0.25	0.3	0.53	0.63	0.68	0.53	0.52	0.51	0.45	0.34	0.28	0.24	0.23
No Upsample	-0.01	-0.01	0	0.07	0.15	0.27	0.38	0.31	0.41	0.41	0.4	0.39	0.37	0.34	0.32	0.34
Transfer	-0.6	-0.59	-0.53	-0.23	0.34	0.6	0.74	0.77	0.51	0.51	0.5	0.45	0.33	0.26	0.21	0.2
Transfer Multitask	-0.7	-0.69	-0.63	-0.31	0.29	0.58	0.77	0.78	0.53	0.52	0.52	0.46	0.34	0.26	0.2	0.19
Velocity	-0.72	-0.69	-0.61	-0.28	0.31	0.59	0.76	0.71	0.53	0.53	0.51	0.46	0.33	0.26	0.2	0.22
Joint Multitask	-0.5	-0.46	-0.42	-0.16	0.35	0.63	0.78	0.73	0.5	0.49	0.48	0.44	0.33	0.25	0.19	0.21
Joint	-0.66	-0.63	-0.58	-0.27	0.34	0.6	0.78	**0.8**	0.52	0.52	0.51	0.46	0.33	0.26	0.19	**0.18**

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel Lampiran 3: Estimasi MAE magnitudo pada data uji untuk seluruh rentang magnitudo terhadap waktu dalam detik.

	MAE							
	0.5 s	1 s	2 s	5 s	10 s	15 s	22 s	39 s
Multitask	**0.26**	**0.22**	**0.16**	**0.15**	**0.14**	**0.14**	**0.14**	**0.14**
High Magnitude	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.42
Plain	0.45	0.44	0.43	0.36	0.24	0.18	0.16	0.17
Ensemble	0.27	0.23	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15	0.15
Pooling (Emb)	0.48	0.46	0.45	0.38	0.25	0.19	0.17	0.17
Pooling (Concat)	0.45	0.44	0.42	0.36	0.24	0.2	0.18	0.17
No Upsample	0.29	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.23	0.27
Transfer	0.42	0.42	0.41	0.35	0.23	0.18	0.16	0.15
Transfer Multitask	0.44	0.44	0.43	0.36	0.24	0.18	0.15	0.15
Velocity	0.45	0.44	0.43	0.36	0.24	0.18	0.15	0.17
Joint Multitask	0.41	0.4	0.39	0.34	0.23	0.17	**0.14**	0.17
Joint	0.43	0.43	0.42	0.36	0.23	0.18	**0.14**	**0.14**

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel Lampiran 4: Estimasi RMSE hiposenter pada data uji untuk seluruh rentang magnitudo terhadap waktu dalam detik.

	RMSE (km)							
	0.5 s	1 s	2 s	5 s	10 s	15 s	22 s	39 s
Multitask	**121.39**	**105.65**	**96.33**	**96.26**	**96.03**	**95.17**	94.89	94.93
High Magnitude	258.46	257.82	256.52	251.49	240.42	207.27	121.23	152.86
Plain	207.15	205.66	203.57	186.6	154.95	114.6	68.65	94.32
Ensemble	206.33	204.88	203.08	185.69	152.11	116.61	78.82	103.28
Pooling (Emb)	207.2	205.62	203.41	184.06	148.02	116.67	83.63	104.89
Pooling (Concat)	213.57	213.14	212.08	203.19	186.37	170.96	156.92	163.69
No Upsample	207.66	206.31	204.18	188.56	158.29	119.29	74.48	110.5
Transfer	207.8	206.3	205.02	187.84	154.87	114.29	66.75	**80.19**
Transfer Multitask	206.98	205.37	203.77	185.63	150.32	110.96	62.39	81.11
Velocity	209.4	207.9	206.1	188.67	155.04	114.79	67.45	109.04
Joint Multitask	204.96	203.92	203.14	188.05	157.54	116.25	**60.19**	87.51
Joint	207.61	206.7	205.68	191.54	161.78	118.81	61.72	80.96

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel Lampiran 5: Estimasi MAE hiposenter pada data uji untuk seluruh rentang magnitudo terhadap waktu dalam detik.

	MAE (km)							
	0.5 s	1 s	2 s	5 s	10 s	15 s	22 s	39 s
Multitask	**100.34**	**85.29**	**75.65**	**74.94**	**75.1**	74.43	73.69	74.18
High Magnitude	230.03	228.7	227.1	218.76	198.29	165.79	109.22	145.49
Plain	180.08	177.46	173.81	146.91	107.78	75.36	51.81	79.48
Ensemble	180.87	178.36	175.09	148.86	108.47	82.06	64.18	92.15
Pooling (Emb)	181.78	178.95	174.71	145.13	102.15	79.34	63.72	92.22
Pooling (Concat)	192.86	192.25	190.82	179.9	160.89	149.28	140.29	145.87
No Upsample	179.16	176.53	172.76	147.15	109.76	81.41	61.58	99.12
Transfer	180.98	178.43	175.05	148.33	108.13	74.72	48.6	65.15
Transfer Multitask	179.7	176.71	172.59	144.18	102.54	69.49	43.1	64.47
Velocity	183.2	180.34	176.05	148.53	107.35	74.69	52.07	96.25
Joint Multitask	174.18	171.81	168.78	143.43	106.95	**73.27**	42.81	71.39
Joint	176.29	174.21	171.07	146.34	109.41	73.39	**42.42**	**62.93**

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel Lampiran 6: Estimasi RMSE episenter pada data uji untuk seluruh rentang magnitudo terhadap waktu dalam detik.

	RMSE (km)							
	0.5 s	1 s	2 s	5 s	10 s	15 s	22 s	39 s
Multitask	**117.36**	**101.08**	**91.51**	**91.37**	**91.31**	**90.35**	89.98	90.02
High Magnitude	257.12	256.48	255.16	250.1	238.98	205.62	118.59	150.67
Plain	204.72	203.25	201.16	184.12	152.06	110.8	62.26	89.26
Ensemble	203.98	202.54	200.74	183.23	149.13	112.78	73.19	98.81
Pooling (Emb)	204.9	203.32	201.09	181.56	144.9	112.61	77.88	100.05
Pooling (Concat)	211.23	210.83	209.78	200.93	183.95	168.31	154.03	160.9
No Upsample	205.34	203.99	201.86	186.14	155.44	115.41	67.76	105.78
Transfer	205.44	203.95	202.67	185.37	151.98	110.58	60.93	**75.32**
Transfer Multitask	204.65	203.05	201.45	183.17	147.39	107.34	57.51	77.11
Velocity	207.07	205.57	203.78	186.2	152.04	110.71	60.27	104.55
Joint Multitask	202.61	201.58	200.81	185.63	154.77	112.65	**54.27**	83.06
Joint	205.3	204.4	203.39	189.15	159.02	115.3	55.4	76.37

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel Lampiran 7: Estimasi MAE episenter pada data uji untuk seluruh rentang magnitudo terhadap waktu dalam detik.

	MAE (km)							
	0.5 s	1 s	2 s	5 s	10 s	15 s	22 s	39 s
Multitask	**96.69**	**81.27**	**71.15**	**70.1**	**70.36**	69.51	68.66	69.15
High Magnitude	228.42	227.08	225.45	217.12	196.43	163.88	107.18	143.59
Plain	177.21	174.63	170.93	143.83	103.64	70.36	46	74.42
Ensemble	178.3	175.8	172.49	145.97	104.3	77.05	58.59	87.51
Pooling (Emb)	179.35	176.54	172.2	142.25	97.78	73.73	57.51	87.42
Pooling (Concat)	190.13	189.55	188.14	177.43	158.18	146.27	137.18	142.85
No Upsample	176.38	173.76	169.92	144.07	105.46	75.53	54.34	93.56
Transfer	178.33	175.79	172.31	145.24	104.13	69.39	42.27	59.64
Transfer Multitask	177.16	174.2	169.96	141.3	98.57	64.81	38.06	60.12
Velocity	180.52	177.65	173.25	145.33	102.9	68.65	45.26	91.17
Joint Multitask	171.3	168.97	165.89	140.32	102.93	68.4	37.5	67.02
Joint	173.35	171.3	168.1	143.06	105.22	**68.08**	**36.45**	**57.93**

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel Lampiran 8: Estimasi R^2 dan RMSE PGA pada data uji untuk seluruh rentang magnitudo terhadap waktu dalam detik.

	R^2								RMSE (log m/s^2)							
	0.5 s	1 s	2 s	5 s	10 s	15 s	22 s	39 s	0.5 s	1 s	2 s	5 s	10 s	15 s	22 s	39 s
Rotation Transfer Ensemble	0.16	0.17	0.18	0.24	0.36	0.46	0.55	0.54	0.97	0.97	0.96	0.93	0.85	0.78	0.71	0.72
Plain Transfer Ensemble	0.18	0.18	**0.2**	**0.26**	**0.38**	**0.48**	**0.57**	0.56	0.96	0.96	**0.95**	**0.91**	**0.84**	0.77	0.7	0.7
Plain Ensemble	0.11	0.12	0.13	0.19	0.3	0.38	0.44	0.42	1	1	0.99	0.96	0.89	0.83	0.79	0.81
Rotation Ensemble	0.08	0.09	0.1	0.14	0.24	0.31	0.36	0.33	1.02	1.01	1.01	0.98	0.93	0.88	0.85	0.87
Joint Rotation Ensemble	0.16	0.16	0.17	0.24	0.35	0.45	0.53	0.53	0.97	0.97	0.96	0.93	0.85	0.79	0.72	0.73
Joint Plain Ensemble	**0.19**	**0.2**	**0.2**	**0.26**	**0.38**	**0.48**	**0.57**	**0.58**	**0.95**	**0.95**	**0.95**	**0.91**	**0.84**	**0.77**	**0.69**	**0.69**

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Penerapan Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM) dan TEAM-Location and Magnitude untuk Peringatan Dini Gempa Bumi di Sumatra Barat
Sigit Eko Kurniawan, Dr. Theodosius Marwan Irnaka, S.Si., M.Sc.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel Lampiran 9: Estimasi MAE PGA pada data uji untuk seluruh rentang magnitudo terhadap waktu dalam detik.

	MAE (log m/s^2)							
	0.5 s	1 s	2 s	5 s	10 s	15 s	22 s	39 s
Rotation Transfer Ensemble	0.73	0.73	0.72	0.68	0.61	0.56	0.51	0.52
Plain Transfer Ensemble	**0.72**	0.72	**0.71**	0.68	**0.6**	**0.54**	**0.49**	0.5
Plain Ensemble	0.75	0.75	0.74	0.71	0.65	0.6	0.57	0.59
Rotation Ensemble	0.76	0.76	0.75	0.73	0.67	0.63	0.61	0.63
Joint Rotation Ensemble	0.73	0.73	0.72	0.69	0.62	0.56	0.51	0.52
Joint Plain Ensemble	**0.72**	**0.71**	**0.71**	**0.67**	**0.6**	**0.54**	**0.49**	**0.49**