

**ANALISIS ESTIMASI CEPAT MAGNITUDO GEMPA BALI MENGGUNAKAN
MPD, $M_{\tau C}$, DAN MCAA**

***RAPID ANALYSIS OF BALI EARTHQUAKE MAGNITUDE ESTIMATION USING
THE MPD, $M_{\tau C}$, AND MCAA METHODS***

Egidio Ridwan, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG)
Ariska Rudyanto, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
Muzli Muzli*, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG)
Qisthi Mursyida, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG)
*e-mail: muzli@bmkg.go.id

Abstrak. Bali merupakan wilayah dengan aktivitas tektonik kompleks yang memiliki risiko gempa tinggi, sehingga memerlukan sistem peringatan dini gempa bumi (*Earthquake Early Warning System/EEWS*) yang cepat dan akurat untuk meminimalkan kepanikan publik. Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan formulasi empiris lokal untuk estimasi cepat magnitudo serta mengevaluasi performa tiga parameter seismik, yaitu *Peak Displacement* (M_{Pd}), Karakteristik Periode ($M_{\tau C}$), dan *Cumulative Absolute Absement* (M_{CAA}). Pendekatan kuantitatif diterapkan menggunakan data rekaman akselerometer BMKG periode 2017–2024 dari 71 kejadian gempa bumi ($M_w \geq 5.0$) di wilayah Bali. Seluruh parameter diekstraksi dari durasi konstan 3 detik pertama setelah kedatangan gelombang P melalui analisis regresi linear berganda. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa metode M_{Pd} dan M_{CAA} memiliki performa terbaik dengan standar deviasi masing-masing sebesar $\pm 0,3344$ ($R = 0,6022$) dan $\pm 0,3531$ ($R = 0,5803$). Walaupun M_{Pd} sangat presisi, parameter ini mengalami saturasi (*underestimation*) pada gempa besar ($M_w \geq 6.5$), sementara M_{CAA} terbukti lebih stabil dan objektif. Sebaliknya, metode $M_{\tau C}$ menghasilkan ketidakpastian yang lebar ($\pm 0,6209$, $R = 0,3277$) akibat distorsi lintasan gelombang. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi metode M_{CAA} dan M_{Pd} sangat ideal untuk diintegrasikan ke dalam sistem operasional EEWS di Bali.

Kata Kunci: *Peringatan Dini Gempa Bumi, Bali, Peak Displacement, Cumulative Absolute Absement, Estimasi Magnitudo.*

Abstrak. Bali is a region with complex tectonic activity and high seismic risk, necessitating a rapid and accurate Earthquake Early Warning System (EEWS) to minimize public panic. This study aims to formulate local empirical relations for rapid magnitude estimation and evaluate the performance of three seismic parameters: Peak Displacement (M_{Pd}), Characteristic Period ($M_{\tau C}$), and Cumulative Absolute Absement (M_{CAA}). A quantitative approach was applied using BMKG accelerometer records from 2017 to 2024, encompassing 71 earthquake events ($M_w \geq 5.0$) in the Bali region. All parameters were extracted from a constant 3-second window after the P-wave arrival using multiple linear regression analysis. The evaluation results indicate that the M_{Pd} and M_{CAA} methods exhibit the best performance, with standard deviations of ± 0.3344 ($R = 0.6022$) and ± 0.3531 ($R = 0.5803$), respectively. Although M_{Pd} is highly precise, it suffers from saturation (*underestimation*) for large earthquakes ($M_w \geq 6.5$), whereas M_{CAA} proves to be more stable and objective. Conversely, the $M_{\tau C}$ method yields wide

uncertainty (± 0.6209 , $R = 0.3277$) due to wave path distortions. This study concludes that the combination of the M_{CAA} and M_{Pd} methods are ideal for integration into the operational EEWS in Bali.

Keywords: *Earthquake Early Warning System, Bali, Peak Displacement, Cumulative Absolute Absement, Magnitude Estimation.*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan kawasan dengan aktivitas seismik yang sangat tinggi karena posisinya yang diapit oleh sabuk Cincin Api Pasifik serta zona tumbukan Lempeng Indo-Australia dan Eurasia. Tingginya risiko kebencanaan ini menempatkan Indonesia pada peringkat kedua sebagai negara dengan risiko bencana alam tertinggi di dunia (World Population Review, 2026). Pulau Bali, sebagai salah satu destinasi pariwisata utama internasional, tidak luput dari ancaman tersebut karena terletak pada zona transisi tektonik yang kompleks, dipengaruhi oleh aktivitas subduksi di bagian selatan, sesar lokal, hingga sesar naik busur belakang (*Flores back-arc thrust*) di utara (BBMKG Wilayah III, 2023; Faiza & Ariyanto, 2024). Gangguan akibat gempa bumi berskala besar, seperti peristiwa gempa tenggara Denpasar bermagnitudo 5,6 pada tahun 2017, dapat menimbulkan kerusakan infrastruktur yang berdampak serius pada menurunnya kunjungan wisatawan dan stabilitas ekonomi lokal (Bali Expat, 2024; WINDONESIA, 2025).

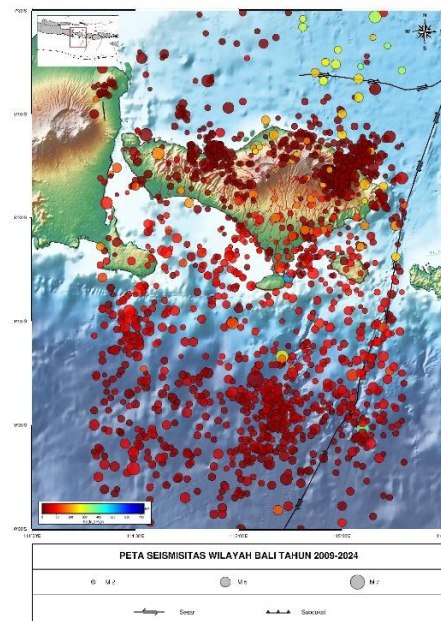
Tingginya potensi ancaman gempa bumi di wilayah Bali menuntut optimalisasi penanggulangan bencana, salah satunya melalui implementasi *Earthquake Early Warning System* (EEWS). Saat ini, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) telah mengoperasikan sistem diseminasi informasi gempa bumi, namun operasional tersebut masih dihadapkan pada sejumlah tantangan (Pramono et al., 2023). Kesenjangan utama yang terjadi saat ini adalah masih adanya keterlambatan (delay) serta parameter peringatan dini yang terkadang terlalu luas, sehingga sistem rentan memicu peringatan yang berlebihan dan kepanikan publik yang tidak perlu (Mufid et al., 2025). Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang mampu menjembatani kondisi saat ini dengan kondisi ideal, yaitu dengan menghasilkan estimasi magnitudo yang sangat cepat dan akurat segera setelah gempa bumi terdeteksi oleh sensor.

Dalam perkembangan sistem peringatan dini mutakhir, penentuan magnitudo secara cepat diekstraksi menggunakan beberapa detik pertama dari kedatangan gelombang P, sebelum gelombang S yang lebih merusak tiba di permukaan. Beberapa metode yang lazim digunakan adalah parameter *Peak Displacement* (P_d) dan Karakteristik Periode (τ_c) (Wu & Kanamori, 2005). Namun, metode P_d dan τ_c rentan mengalami saturasi (underestimasi) pada gempa bumi besar dengan magnitudo lebih dari 6,5 (Wu & Zhao, 2006). Mengatasi hal tersebut, kajian mutakhir mulai mengembangkan metode *Cumulative Absolute Absement* (CAA) yang didefinisikan sebagai nilai integral absolut pergerakan tanah dari tiga komponen perpindahan (Wu et al., 2023). Kajian membuktikan bahwa M_{CAA} lebih representatif dalam menangkap karakteristik energi gelombang frekuensi rendah dan memberikan estimasi yang lebih stabil di tahap awal ruptur gempa, dibandingkan parameter berbasis amplitudo tunggal (Lin & Wu, 2025; Wu et al., 2023).

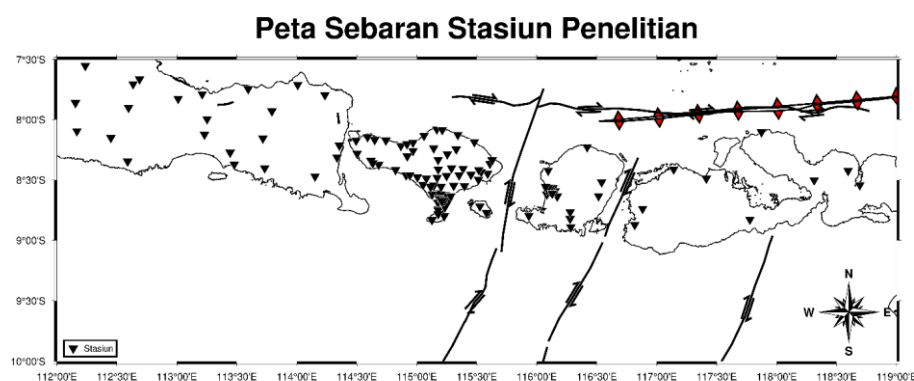
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan data rekaman *accelerometer* BMKG secara efektif dalam merumuskan formulasi empiris estimasi magnitudo cepat pada tiga detik pertama gelombang P guna mendukung *Earthquake Early Warning System* (EEWS). Lebih lanjut, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan dan menentukan performa metode mana yang paling tepat dan akurat untuk diaplikasikan di wilayah Bali, di antara pendekatan M_{Pd} , M_{τ_c} , atau M_{CAA} .

METODE

Penelitian kuantitatif ini menggunakan pendekatan komputasi kebencanaan dengan fokus pada analisis seismologi terapan. Subjek utama dalam penelitian ini adalah data rekaman gelombang akselerasi tiga komponen (*vertical, north-south, east-west*) yang diperoleh dari jaringan sensor Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) di wilayah Bali dan sekitarnya yang diilustrasikan pada Gambar 1. Data yang dianalisis mencakup rentang waktu historis dari tahun 2017 hingga 2024, yang merekam kejadian gempa bumi tektonik berpusat di sekitar lempeng tektonik Bali dengan rentang magnitudo $M \geq 5.0$. Kriteria pemilihan data (*event selection*) ditentukan secara ketat berdasarkan kejelasan onset gelombang P, serta tercatat oleh sedikitnya tiga stasiun seismik secara simultan untuk menjamin validitas pembacaan spasial. Didapatkan 71 kejadian gempa bumi yang direkam dari sensor sekitar wilayah Bali.



Gambar 1. Peta Seismisitas Wilayah Bali



Gambar 2. Peta Persebaran Stasiun Penelitian

Instrumen utama pengumpul data di lapangan terdiri dari dua jenis akselerograf operasional milik BMKG, yaitu *Force Balance Accelerograph* (FBA) untuk pengamatan sensitivitas tinggi dan sensor berbasis *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS) untuk jaringan pemantauan rapat yang tersebar pada Gambar 2. Sebagai instrumen pemrosesan data digital, digunakan perangkat lunak Python dengan memanfaatkan pustaka khusus seismologi,

yakni ObsPy. Penggalan bahan kontrol pemrosesan data meliputi penerapan koreksi *baseline* untuk menghilangkan tren linier serta penghilangan respons instrumen guna mengonversi nilai mentah (*counts*) menjadi nilai percepatan tanah riil dalam satuan meter per sekon kuadrat (m/s^2). Sinyal akselerasi kemudian ditapis menggunakan *highpass filter* rekursif tipe Butterworth orde 2 pada rentang frekuensi batas 0.075 Hz guna mengeliminasi bising lingkungan frekuensi tinggi.

Rekaman gelombang seismik mentah (*waveform*) dari jaringan sensor FBA dan MEMS BMKG mengalami serangkaian tahapan pra-pemrosesan untuk menjamin kualitas data sebelum parameterisasi dilakukan. Langkah awal pra-pemrosesan meliputi koreksi garis dasar (*baseline correction*) dan penghilangan respons instrumen (*remove instrument response*). Sinyal akselerasi kemudian diintegrasikan secara numerik satu kali untuk menghasilkan sinyal perpindahan (*displacement*) guna mengekstraksi parameter P_d dan τ_c . Sinyal tersebut diintegrasikan kembali untuk mendapatkan komponen *absement* yang digunakan dalam perhitungan parameter CAA. Untuk mereduksi gangguan *noise* frekuensi rendah serta efek *drift* akibat integrasi numerik, filter *high-pass Butterworth* ordo kedua diterapkan pada sinyal dengan frekuensi batas (*cut-off*) sebesar 0.075 Hz.

Penentuan seluruh parameter seismik dilakukan pada jendela waktu konstan selama 3 detik pertama setelah waktu tiba gelombang P. Parameter amplitudo puncak perpindahan (P_d) ditentukan dari nilai absolut maksimum perpindahan komponen vertikal. Karakteristik periode (τ_c) dihitung berdasarkan rasio integral kuadrat kecepatan terhadap integral kuadrat perpindahan. Ide ini awalnya diperkenalkan oleh Kanamori (2005) yang versinya dimodifikasi dari metode yang secara orisinil dikembangkan oleh Nakamura (1988) yang mengandalkan *waveform* beberapa detik setelah gelombang P dengan persamaan berikut :

$$\tau_c = \frac{2\pi}{\sqrt{r}} \quad (1)$$

Dengan r merupakan:

$$r = \frac{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt} \quad (2)$$

Dengan u adalah perpindahan (*displacement*) komponen vertikal gerakan tanah yang telah difilter dengan high-pass filter, dan $\dot{u}$ adalah kecepatan (*velocity*) yang diperoleh dari hasil diferensiasi terhadap u .

Sementara itu, parameter *Cumulative Absolute Absement* (CAA) yang digagas oleh Wu et al. (2023) dihitung dengan mengintegrasikan akar kuadrat jumlah kuadrat dari tiga komponen perpindahan (D_v, D_n, D_e) secara kumulatif sepanjang jendela waktu 3 detik melalui formulasi berikut :

$$CAA = \int_{T_p}^{T_{p+i}} \sqrt{Dv^2 + Dn^2 + De^2} dt \quad (3)$$

Setelah nilai P_d , τ_c , dan CAA sudah diperoleh, besaran M_{P_d} , M_{τ_c} , dan M_{CAA} dapat dirumuskan melalui persamaan regresi berikut:

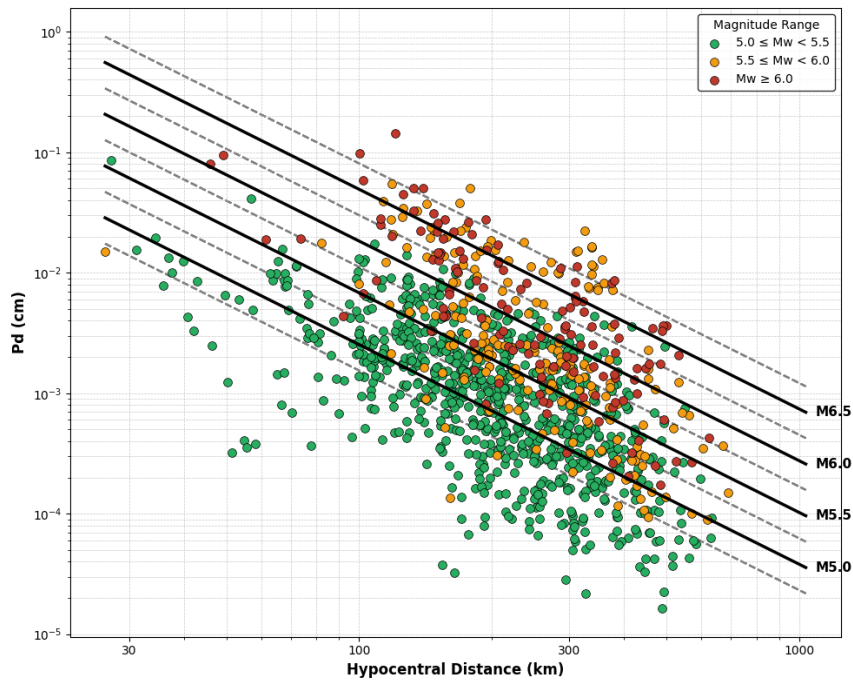
$$\log(P_d) = a + b \times Mw + c \times \log(R) \quad (4)$$

$$\log \tau_c = p + q * Mw \quad (5)$$

$$\log(CAA) = a + b \times Mw + c \times \log(R) \quad (6)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Estimasi magnitudo menggunakan P_d



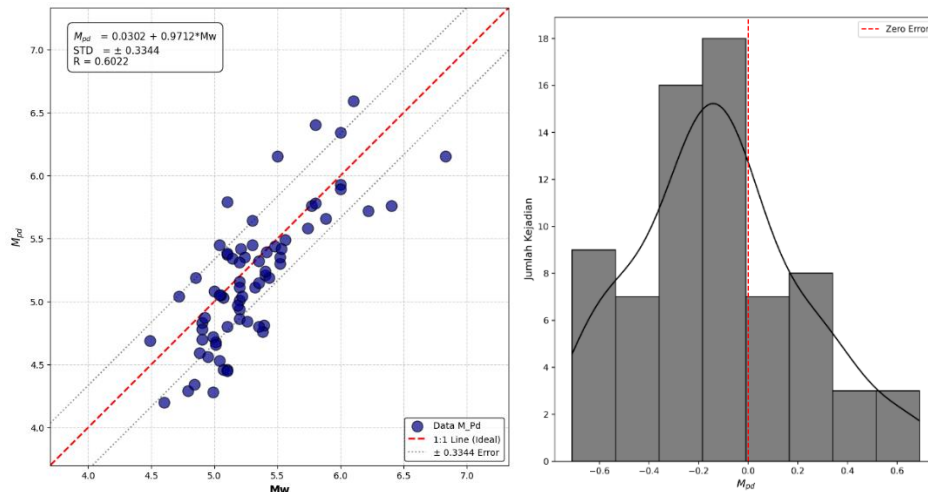
Gambar 3. Grafik Atenuasi Parameter P_d terhadap Hiposenter. Garis tebal menunjukkan estimasi persebaran atenuasi P_d terhadap Hiposenter pada masing-masing klasifikasi magnitudo di susul dengan garis putus-putus sebagai pembatas toleransi. Titik-titik berwarna sebagai nilai P_d yang didapatkan dari stasiun yang merekam kejadian gempa bumi

Parameter amplitudo perpindahan puncak (P_d) dihitung dari nilai absolut maksimum gelombang P pada komponen vertikal dalam jendela waktu konstan 3 detik pertama setelah *P-onset*. Berdasarkan analisis regresi linier berganda yang diterapkan pada dataset 71 kejadian gempa bumi regional Bali, hubungan empiris (*scaling law*) antara parameter P_d , magnitudo momen (M_w), dan jarak hiposenter (R_0) dalam satuan kilometer berhasil dimodelkan yang diilustrasikan pada Gambar 3. Persamaan regresi pelemahan (*attenuation relation*) lokal untuk wilayah Bali diperoleh sebagai berikut:

$$\log(P_d) = -3.2391 + 0.8569 * M_w - 1.8216 * \log(R_0) \pm 0.4554 \quad (7)$$

$$M_{P_d} = 3.7801 + 1.1670 * \log(P_d) + 2.1258 * \log(R_0) \quad (8)$$

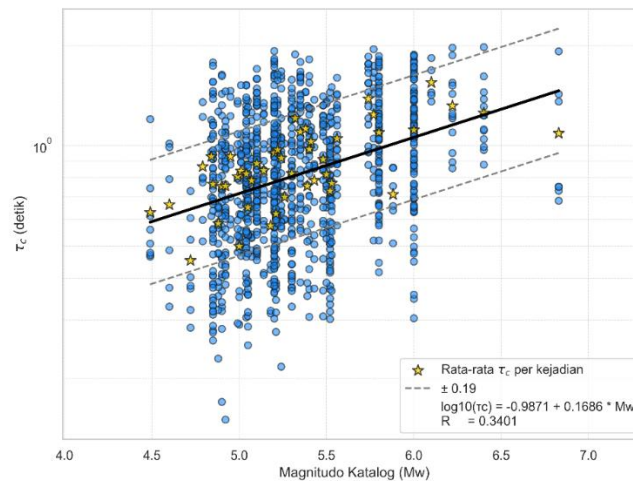
Gambar 4 menyajikan performa dari model M_{P_d} lokal ini menunjukkan tingkat akurasi dan stabilitas yang tinggi untuk wilayah kajian. Pengujian statistik menghasilkan nilai koefisien korelasi (R) sebesar 0.6022, yang mengindikasikan adanya hubungan linier yang kuat dan searah antara amplitudo awal gelombang P yang terekam dengan magnitudo aktual gempa bumi. Selain itu, tingkat ketidakpastian (*uncertainty*) dari estimasi model ini tergolong rendah, ditunjukkan oleh nilai standar deviasi (STD) sebesar ± 0.3344 unit magnitudo. Serta persebaran *error* antara M_{P_d} dengan M_w tersebar pada sekitar ± 0.6 dengan jumlah kejadian mayoritas terpusat pada sekitar nol.



Gambar 4. a. Grafik persebaran b. Distribusi histogram dari komparasi antara M_{pd} dengan M_w dengan kedua gambar memiliki garis putus-putus berwarna merah menjadi *error* bernilai nol

Seperti yang dikemukakan oleh Wu & Zhao (2006) bahwa memang sudah terbukti juga pada penelitian ini terdapat satu kejadian gempa bumi dengan $M_w \geq 6.5$ mengalami *underestimation* dalam mendapatkan nilai M_{pd} sehingga hal ini menjadi kekurangan bagi metode ini untuk pengoperasionalan peringatan dini gempa bumi (EEW) ketika terjadi gempa bermagnitudo besar.

Estimasi magnitudo menggunakan τ_c



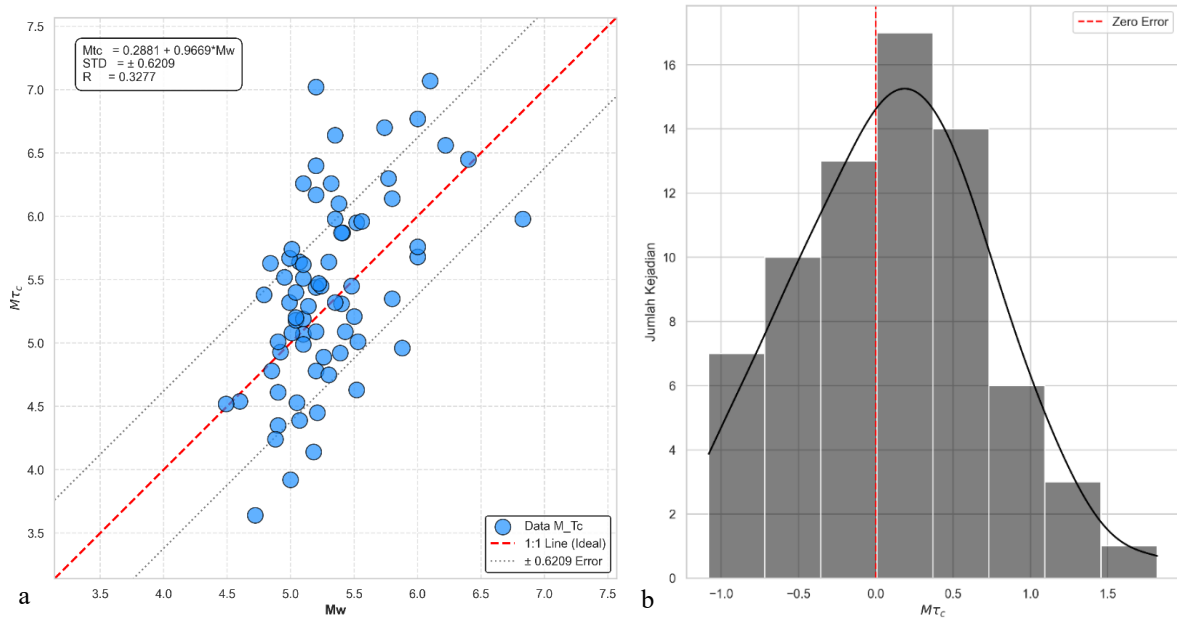
Gambar 5. Plot hubungan antara magnitudo katalog (M_w) dan nilai τ_c . Nilai rata-rata τ_c pada masing-masing kejadian gempa divisualisasikan dengan simbol bintang.

Selain menggunakan parameter amplitudo (*Peak Displacement*), pengembangan sistem *Earthquake Early Warning* (EEW) regional wilayah Bali dalam penelitian ini juga dilakukan dengan memanfaatkan parameter periode karakteristik (τ_c). Parameter τ_c dihitung menggunakan rasio integral dari kuadrat perpindahan (*displacement*) terhadap kuadrat kecepatan (*velocity*) pada jendela waktu 3 detik pertama setelah kedatangan gelombang P. Berdasarkan hasil plot hubungan linier antara magnitudo momen (M_w) katalog BMKG dengan nilai $\log(\tau_c)$ yang terukur pada stasiun seismik pada Gambar 5, diperoleh persamaan regresi empiris baru untuk wilayah Bali sebagai berikut:

$$\log \tau_c = -0.9871 + 0.1686 * M_w \pm 0.1868 \quad (9)$$

$$M_{\tau c} = 5.8534 + 5.9296 * \log \tau_c \quad (10)$$

Kinerja formulasi empiris ini kemudian dievaluasi melalui komparasi linear antara magnitudo estimasi ($M_{\tau c}$) dengan magnitudo katalog acuan (M_w). Hasil komparasi tersaji pada Gambar 6 menghasilkan nilai standar deviasi yang cukup besar, yaitu ± 0.62 , dan koefisien korelasi $R = 0.3277$. Meskipun nilai *slope* (0.9669) mendekati angka satu yang secara fisis membuktikan bahwa tren estimasi magnitudo berjalan konsisten searah dengan kenaikan M_w , sebaran deviasi data pada parameter ini dinilai cukup lebar dibandingkan pendekatan parameter lainnya.



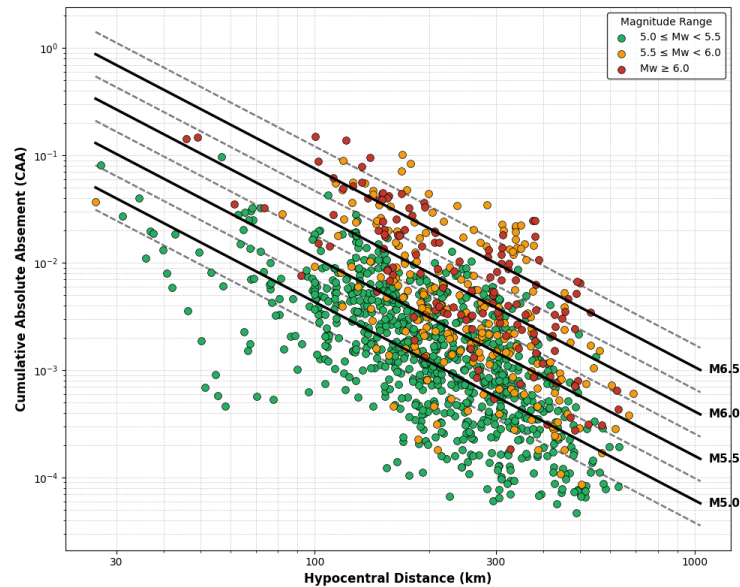
Gambar 6. a. Grafik persebaran b. Distribusi histogram dari komparasi antara $M_{\tau c}$ dengan M_w dengan kedua gambar memiliki garis putus-putus berwarna merah menjadi *error* bernilai nol

Yamada & Mori (2009), menerangkan bahwa τ_c merepresentasikan kandungan frekuensi awal dari gerakan tanah. Gempa bumi berskala besar ($M_w \geq 6.0$) cenderung melepaskan energi berfrekuensi rendah dan menghasilkan nilai τ_c yang lebih panjang dan stabil apabila didekat episenter.

Berdasarkan analisis fisis, tingginya ketidakpastian dan lebarnya sebaran data residual pada model $M_{\tau c}$ ini dipicu oleh beberapa kondisi seismik dan jaringan pengamatan. Kepadatan stasiun di wilayah Bali masih relatif renggang, sehingga banyak rekaman gempa berada pada zona medan jauh (*far-field*). Jarak yang cukup jauh ini menyebabkan pelemahan SNR dan efek redaman lintasan, yang memicu distorsi *underestimation* secara drastis, terutama pada rentang gempa kecil hingga sedang ($M_w < 6.0$). Sebaliknya, untuk gempa bermagnitudo besar yang direkam pada stasiun di zona sangat dekat dengan sumber gempa (*near-field*), rekaman getaran sering kali mendistorsi perhitungan frekuensi awal gelombang. Kehadiran gelombang berperiode panjang ini menghasilkan kalkulasi τ_c yang jauh lebih panjang dari karakteristik sumber aslinya, atau terjadi *overestimation* (Yamada & Mori, 2009).

Estimasi magnitudo menggunakan CAA

Selanjutnya, dalam menentukan kekuatan gempa secara cepat dilakukan dengan menerapkan parameter *Cumulative Absolute Absement* (CAA) untuk wilayah Bali. Penggunaan metode ini ditujukan untuk mengatasi keterbatasan pada parameter P_d yang hanya mengandalkan nilai puncak amplitudo perpindahan tanpa informasi tambahan, serta kelemahan parameter τ_c yang rentan terhadap gangguan *noise* lingkungan sehingga dapat memengaruhi stabilitas nilainya.



Gambar 7. Grafik atenuasi hubungan antara CAA, M_w , dan Jarak Hiposenter. Garis tebal menunjukkan estimasi persebaran atenuasi CAA terhadap Hiposenter pada masing-masing klasifikasi magnitudo di susul dengan garis putus-putus sebagai pembatas toleransi. Titik-titik berwarna sebagai nilai CAA yang didapatkan dari stasiun yang merekam kejadian gempa bumi

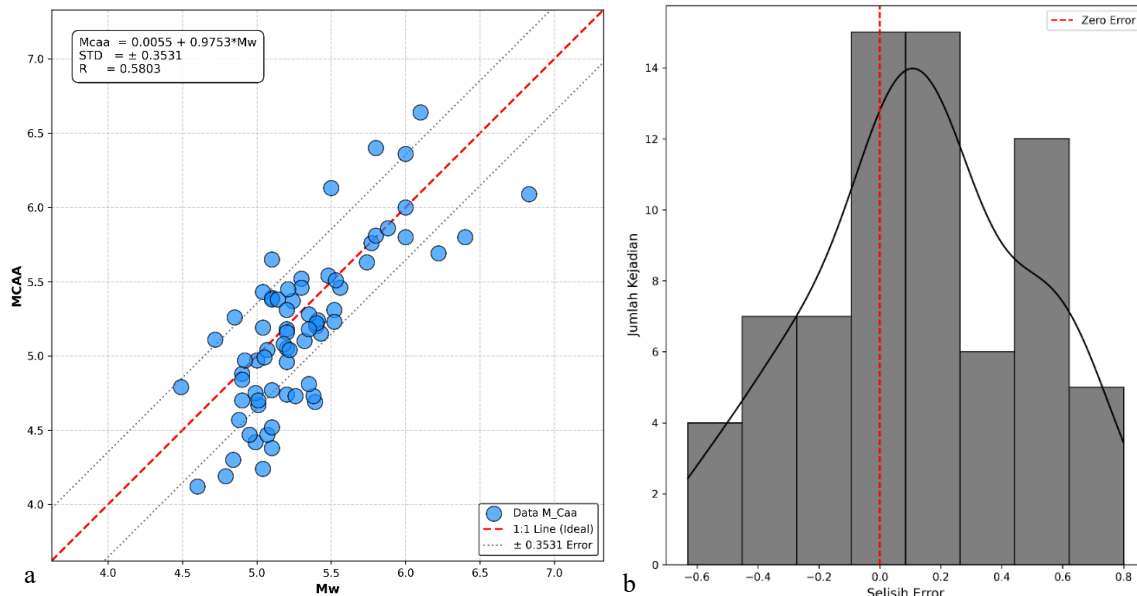
Untuk mengaplikasikan parameter CAA pada sistem peringatan dini gempa bumi, diperlukan sebuah hubungan empiris yang mengikat antara nilai CAA, magnitudo katalog (M_w), dan jarak hiposenter (R_0). Serupa dengan karakteristik parameter P_d , nilai CAA menunjukkan adanya peluruhan (atenuasi) secara konsisten seiring bertambahnya jarak stasiun terhadap pusat gempa, namun besaran nilainya tetap bergantung pada magnitudo M_w yang dihasilkan. Melalui grafik hubungan antara parameter CAA, M_w , dan jarak hiposenter pada Gambar 7, terlihat bahwa gempa bumi berkekuatan besar ($M_w \geq 6.5$) mendominasi area atas grafik dengan perolehan nilai CAA yang lebih tinggi dibandingkan magnitudo di bawahnya. Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan analisis regresi linear dalam bentuk logaritmik terhadap 71 kejadian gempa bumi yang terekam oleh sensor, diperoleh persamaan atenuasi empiris lokal sebagai berikut:

$$\log CAA = -2.8119 + 0.8283 * M_w - 1.8474 * \log(R) \pm 0.4656 \quad (11)$$

$$M_{CAA} = 3.3949 + 1.2073 * \log CAA - 2.2304 * \log(R) \quad (12)$$

Melalui visualisasi Gambar 8 yang berupa hubungan linear antara parameter nilai M_{CAA} terhadap magnitudo acuan (M_w) yang dirilis dalam katalog BMKG, tingkat konsistensi serta persebaran deviasi data pada berbagai skala kekuatan gempa bumi dapat diidentifikasi secara jelas. Hasil plot komparasi menunjukkan bahwa sebagian besar titik data terdistribusi secara rapat di sekitar garis ideal 1:1 ($M_w = M_{CAA}$) dan berada dalam batas standar deviasi model

sebesar ± 0.35 . Rentang nilai standar deviasi yang berada di bawah ± 0.5 ini membuktikan keandalan dan keakuratan metode CAA sebagai salah satu parameter estimasi magnitudo cepat yang andal untuk diterapkan dalam operasional EEWS di wilayah Bali.



Gambar 8. a. Grafik persebaran b. Distribusi histogram dari komparasi antara M_{CAA} dengan M_w dengan kedua gambar memiliki garis putus-putus berwarna merah menjadi *error* bernilai nol

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil merumuskan dan mengevaluasi formulasi empiris estimasi magnitudo cepat menggunakan parameter *Peak Displacement* (P_d), Karakteristik Periode (τ_c), dan *Cumulative Absolute Absement* (CAA) pada 3 detik pertama gelombang P untuk mendukung optimalisasi operasional *Earthquake Early Warning System* (EEWS) di wilayah Bali. Berdasarkan hasil evaluasi komparatif, metode estimasi berbasis CAA dan P_d menunjukkan performa yang jauh lebih andal dan akurat dibandingkan dengan parameter τ_c . Parameter P_d mampu memberikan estimasi dengan tingkat ketidakpastian yang sangat rendah (standar deviasi ± 0.3344), meskipun memiliki kelemahan fisis berupa saturasi atau *underestimation* pada kejadian gempa bumi besar dengan magnitudo $M_w \geq 6.5$. Parameter CAA hadir menutupi kelemahan tersebut dengan tingkat stabilitas yang tinggi dan standar deviasi sebesar ± 0.3531 , sehingga terbukti objektif dan representatif untuk diterapkan di kawasan Bali. Sebaliknya, parameter τ_c kurang ideal untuk digunakan karena menghasilkan tingkat ketidakpastian yang sangat lebar (± 0.6209) akibat rentannya nilai frekuensi awal terhadap distorsi jarak stasiun pengamatan (*far-field* dan *near-field*).

Oleh karena itu, integrasi pemodelan M_{CAA} dan M_{Pd} secara terpadu merupakan solusi yang paling kompatibel untuk menjembatani kebutuhan estimasi magnitudo yang cepat dan akurat guna meminimalkan alarm palsu serta kepanikan publik pada sistem peringatan dini BMKG. Sebagai prospek pengembangan ke depan, formulasi empiris yang dihasilkan dari penelitian ini direkomendasikan untuk diuji coba ke dalam modul operasional EEWS secara *real-time*. Selain itu, untuk menekan nilai *error* estimasi di masa mendatang, pengembangan sistem perlu diiringi dengan peningkatan kerapatan spasial jaringan stasiun akselerograf di wilayah Bali dan sekitarnya agar parameter gelombang dapat ditangkap secara lebih presisi tanpa kendala pelemahan rasio *signal-to-noise* (SNR).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) atas penyediaan akses data katalog gempa bumi serta data rekaman *waveform* dari jaringan sensor akselerograf (*Force Balance Accelerograph* dan MEMS) di wilayah Bali yang sangat esensial dalam menunjang keberhasilan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG) atas dukungan fasilitas serta lingkungan akademik yang kondusif selama proses pelaksanaan penelitian hingga penyusunan artikel ini. Terakhir, penulis mengapresiasi seluruh pihak yang telah memberikan saran, diskusi analitis, maupun kontribusi lainnya yang turut menyempurnakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bali Expat. (2024). Tourism and investments drive Bali's 2024 growth. From <https://baliexpat.com/2025/02/08/tourism-and-investments-drive-balis-2024-growth/>
- BBMKG Wilayah III. (2023). Sejarah kegempaan Pulau Bali dan Sumbawa. From <https://bbmkg3.bmkg.go.id/sejarah-gempa-merusak>
- Faiza, N. N., & Ariyanto, P. (2024). Analisis tingkat seismisitas dan risiko kegempaan tektonik berdasarkan nilai variasi spasio-temporal wilayah Bali dan Nusa Tenggara. *Buletin Meteorologi, Klimatologi Dan Geofisika*, 5(2), 18–25. From https://balai2bmkg.id/index.php/buletin_mkg/article/view/75
- Kanamori, H. (2005). Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1), 195–214. doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122626
- Mufid, M. R., Firdaus, I. R., Turmudzi, M., Basofi, A., & Setiyadi, A. T. (2025). Development of an Enhanced Earthquake Warning System Using IoT and BMKG API with Attenuation- Based Impact Estimation. In *Proceedings of the International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science 2025 (ICAST-ES 2025)* (pp. 459–467). Springer Nature. doi: 10.2991/978-94-6463-926-1_52
- Nakamura, Y. (1988). On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS). In *Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 7, pp. 673–678).
- Pramono, S., Utama, M. R. J., Swastikarani, R., Sabtaji, A., Wijaya, A., Utomo, F. B., Sakti, A. P., Rudiyanto, A., Reza, D. T., Owen, R., Miftakhunnisa, A. F., Adi, S. P., Muzli, M., & Karnawati, D. (2023). Implementation early design of prototype EEWS development in Indonesia. doi: 10.21203/rs.3.rs-2774584/v1
- WINDONESIA. (2025). BI: Investment, tourism supports Bali's 5.48 percent economic growth in 2024. From <https://windonesia.com/article/bi-investment-tourism-supports-balis-548-percent-economic-growth-in-2024>
- World Population Review. (2026). Natural disaster risk by country 2025. From <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/natural-disaster-risk-by-country>
- Wu, Y.-M., Mittal, H., Lin, Y. H., & Chang, Y. H. (2023). Magnitude determination using cumulative absolute absement for earthquake early warning. *Geoscience Letters*, 10(59). doi: 10.1186/s40562-023-00314-6
- Wu, Y., & 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. doi: 10.1785/0120040193
- Wu, Y., & Zhao, L. (2006). Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning. *Geophysical Research Letters*, 33(16). doi: 10.1029/2006GL026871
- Yamada, M., & Mori, J. (2009). Using τ_c to estimate magnitude for earthquake early warning and effects of near-field terms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B5).