

# Penyesuaian Nilai Percepatan Tanah Maksimum Berdasarkan Modifikasi Konstanta Atenuasi dengan Data *Accelerograph* Tahun 2020-2023 Wilayah Bali

## The Adjustment of Peak Ground Acceleration Value Based on Modification of Attenuation Constant with *Accelerograph* Data from 2020-2023 in Bali Region

Mayumi Cahyandari<sup>1</sup>, Winardi Tjahyo Baskoro<sup>1\*</sup>, I Putu Dedy Pratama<sup>2</sup>, I Made Yuliara<sup>1</sup>, Hery Suyanto<sup>1</sup>, I Gde Antha Kasmawan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Badung, Bali, Indonesia 80361

<sup>2</sup>BMKG Stasiun Geofisika Kelas II, Jl. Pulau Tarakan No. 1, Sanglah, Denpasar, Bali, Indonesia 80113

Email: [mayumi.cahyandari@gmail.com](mailto:mayumi.cahyandari@gmail.com); \*[winardi@unud.ac.id](mailto:winardi@unud.ac.id); [putu.pratama@bmkg.go.id](mailto:putu.pratama@bmkg.go.id); [imdyuliara@unud.ac.id](mailto:imdyuliara@unud.ac.id); [hery@unud.ac.id](mailto:hery@unud.ac.id); [anthakas67@unud.ac.id](mailto:anthakas67@unud.ac.id)

**Abstrak** – Penelitian ini bertujuan untuk menentukan model rumus empiris percepatan tanah maksimum atau peak ground acceleration (PGA) di wilayah Bali dengan memodifikasi konstanta atenuasi berdasarkan data *accelerograph* dari tahun 2020-2023 yang diperoleh dari BMKG Stasiun Geofisika Kelas II Sanglah. Data yang digunakan terdiri dari 443 rekaman *accelerograph* dari 146 kejadian gempa bumi, dengan cakupan wilayah 113,51°-115,83° BT dan 12,56°-7,71° LS. Melalui analisis regresi linier maka model empiris PGA untuk wilayah Bali diperoleh:  $\log_{10} \text{PGA} = (-1,817) \log_{10} (R) + (0,809)M - 0,089$ . Model ini juga dibandingkan dengan model atenuasi dari Donovan, Setiawan, serta Lin dan Wu, dengan hasil yang menunjukkan bahwa model yang dikembangkan memiliki korelasi yang sangat kuat sebesar 0,782 antara PGA hasil observasi dan PGA hasil model yang masuk dalam kategori sangat kuat. Selain itu, nilai MSE sebesar 0,209 dan RMSE sebesar 0,457 dari model ini menunjukkan bahwa model memiliki tingkat akurasi yang baik dalam memprediksi nilai PGA. Temuan ini memberikan kontribusi signifikan dalam memperbaiki prediksi risiko seismik di wilayah Bali, yang dapat digunakan sebagai dasar untuk perencanaan mitigasi bencana yang lebih efektif.

**Kata kunci:** *Accelerograph*; PGA; model empiris; atenuasi; mitigasi bencana

**Abstract** – This study aims to determine the empirical formula model of maximum ground acceleration (PGA) in the Bali region by modifying the attenuation constant based on *accelerograph* data from 2020-2023 obtained from the BMKG Class II Sanglah Geophysical Station. The data used consists of 443 *accelerograph* recordings from 146 earthquake events, with a coverage area of 113.51 ° - 115.83 ° E and 12.56 ° - 7.71 ° S. Through linear regression analysis, the empirical PGA model for the Bali region is obtained:  $\log_{10} \text{PGA} = (-1.817) \log_{10} (R) + (0.809) M - 0.089$ . This model is also compared with the attenuation model from Donovan, Setiawan, and Lin and Wu, with the results showing that the developed model has a very strong correlation of 0.782 between the PGA from observations and the PGA from the model which is included in the very strong category. In addition, the MSE value of 0.209 and RMSE of 0.457 from this model indicate that the model has a good level of accuracy in predicting PGA values. These findings provide a significant contribution in improving seismic risk prediction in the Bali region, which can be used as a basis for more effective disaster mitigation planning.

**Keywords:** *Accelerograph*; PGA; empirical model; attenuation; disaster mitigation.

### 1. Pendahuluan

Bali merupakan satu wilayah di Indonesia memiliki tingkat kerawanan terhadap gempa bumi. Kerentanan ini disebabkan oleh letak geografis Bali yang terletak di antara dua sumber gempa, yaitu di daerah Selatan Bali yang merupakan zona subduksi dan patahan naik busur belakang yang membentang dari Utara Bali

hingga Flores [1]. Beberapa gempa signifikan pernah terjadi di Bali, seperti gempa 1917 (M7,0), gempa Seririt 1976 (M6,2), gempa Karangasem 1979 (M6,0), dan gempa Karangasem 2004 (M6,2) yang telah menimbulkan kerusakan dan korban jiwa [2].

Untuk memahami potensi dampak gempa lebih mendalam, diperlukan pemahaman terhadap beberapa parameter gempa, seperti magnitudo, intensitas seismik, episenter, hiposenter, waktu kejadian, kedalaman, serta *peak ground acceleration* (PGA). PGA adalah indikator penting untuk menilai potensi kerusakan struktur bangunan dan infrastruktur [3]. Pengukuran nilai PGA dapat dilakukan melalui alat *accelerograph* serta pendekatan empiris. Metode Donovan dianggap yang paling sesuai untuk diterapkan di wilayah Bali [4], meskipun metode ini awalnya dikembangkan untuk wilayah California, Amerika Serikat, sehingga diperlukan pengembangan rumusan yang lebih spesifik untuk wilayah Bali.

Berbagai studi telah dilakukan untuk menentukan nilai PGA di Bali, menggunakan analisis regresi linier dan verifikasi statistik melalui koefisien korelasi serta nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) [5], [6]. Meski begitu, penelitian lanjutan masih dibutuhkan untuk memperdalam pemahaman mengenai karakteristik gempa di Bali dan untuk mengembangkan model rumusan empiris yang lebih akurat dalam memprediksi nilai PGA. Pemahaman yang lebih mendalam dapat diperoleh dengan memperhitungkan kondisi geologi lokal serta data terbaru.

Maksud dilakukannya penelitian ini ialah untuk menentukan rumusan atau formula atenuasi percepatan tanah yang tepat untuk wilayah Bali. Dengan adanya rumusan ini, diharapkan dapat digunakan untuk menghitung besarnya PGA di daerah tersebut. Selain itu, informasi yang diperoleh dari rumusan ini diharapkan dapat membantu dalam mengidentifikasi daerah-daerah yang berpotensi mengalami kerusakan saat terjadi gempabumi, serta ketika terjadi kerusakan pada sensor *accelerograph*.

## **2. Landasan Teori**

### *2.1. Gempabumi*

Gempabumi merupakan bencana alam yang ditandai oleh getaran bumi, yang dapat disertai tsunami. Terdapat beberapa jenis gempabumi berdasarkan penyebabnya, yaitu gempa tektonik, vulkanik, runtuh, dan buatan. Penyebab gempabumi dapat menciptakan kerusakan yang signifikan pada infrastruktur dan dapat melintasi batas negara dan benua [7].

### *2.2. Parameter gempabumi*

Setiap gempabumi menghasilkan parameter-parameter yang direkam dalam bentuk gelombang seismik. Parameter-parameter ini mencakup waktu kejadian, lokasi episenter, hiposenter, kedalaman, magnitudo, dan intensitas.

- Waktu kejadian gempabumi: merujuk pada saat terlepasnya energi, ditentukan menggunakan diagram Wadati untuk menghitung waktu awal kejadian.
- Episenter: titik di permukaan bumi yang berada tegak lurus terhadap hiposenter, dan merupakan area yang paling terdampak oleh getaran gempabumi.
- Hiposenter: pusat gempabumi di dalam bumi, yang dapat diidentifikasi melalui analisis gelombang seismik.
- Kedalaman sumber gempabumi: diukur dari hiposenter ke permukaan bumi, dan dibagi menjadi tiga kategori ( dangkal, sedang, dan dalam).
- Magnitudo gempabumi: mengukur kekuatan gempa berdasarkan energi seismik yang dipancarkan. Terdapat beberapa jenis magnitudo termasuk magnitudo lokal, *body*, permukaan, momen, dan durasi.
- Intensitas gempabumi: menunjukkan kekuatan gempabumi berdasarkan kerusakan yang ditimbulkan, dinyatakan dalam skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*).

### *2.3. Gelombang seismik*

Gelombang seismik adalah gelombang elastis. Gelombang ini bergerak melalui bumi akibat deformasi, tekanan, atau tarikan pada lapisan kerak bumi. Gelombang ini terbagi menjadi dua, yaitu gelombang badan dan gelombang permukaan [8].

#### a) Gelombang badan

Gelombang badan bergerak di dalam bumi. Gelombang ini terdiri dari dua tipe: gelombang primer (P) dan gelombang sekunder (S). Gelombang P merambat melalui berbagai jenis medium seperti padat, cair, dan gas, sedangkan gelombang S hanya bisa merambat melalui medium padat. Gelombang P

merupakan yang pertama terdeteksi oleh seismometer karena kecepatannya lebih tinggi dibanding gelombang S, sehingga tiba lebih awal.

b) Gelombang permukaan

Gelombang permukaan adalah jenis gelombang seismik yang merambat di sekitar permukaan batas antara dua medium. Gelombang ini terdiri dari gelombang *Rayleigh* dan gelombang *Love*. Gelombang *Rayleigh* bergerak di dekat permukaan bumi dan merambat melalui medium yang homogen. Sementara itu, gelombang *Love* adalah gelombang S horizontal yang bergerak sejajar dengan permukaan tanah, sehingga sering disebut sebagai gelombang transversal.

#### 2.4. Accelerograph

Getaran tanah yang kuat dapat direkam melalui alat *accelerograph*. Perangkat ini sering dipasang di daerah perkotaan dengan kepadatan penduduk tinggi untuk mengukur variasi guncangan seismik yang dipengaruhi oleh struktur geologi setempat. Data yang diperoleh dari *accelerograph* menyediakan informasi nilai PGA di suatu lokasi, baik akibat gempa kecil maupun besar [9]. Di wilayah Bali, terdapat 18 stasiun *accelerograph* yang tersebar yang ditunjukkan pada Tabel 1 [5].

**Tabel 1.** Sebaran peralatan *accelerograph* wilayah Bali [5].

No	Nama Stasiun	Keterangan	Lat. (°)	Lon. (°)	Kabupaten/ Kota
1	BDBI	<i>Accelerograph Colocated</i>	-8,52	115,21	Badung
2	DNP	<i>Accelerograph Colocated</i>	-8,68	115,21	Denpasar
3	GEBBI	<i>Accelerograph Colocated</i>	-8,16	114,71	Buleleng
4	IGBI	<i>Accelerograph Colocated</i>	-8,82	115,15	Badung
5	KBBI	<i>Accelerograph Colocated</i>	-8,29	115,25	Bangli
6	MAKBI	<i>Accelerograph Colocated</i>	-8,49	115,51	Karangasem
7	NJBM	<i>Accelerograph Colocated</i>	-8,31	114,62	Jembrana
8	NKBI	<i>Accelerograph Colocated</i>	-8,73	115,53	Klungkung
9	RTBI	<i>Accelerograph Colocated</i>	-8,46	114,94	Tabanan
10	SBBM	<i>Accelerograph Colocated</i>	-8,2	114,92	Buleleng
11	SRBI	<i>Accelerograph Colocated</i>	-8,08	115,21	Buleleng
12	DEBI	<i>Accelerograph Non Colocated</i>	-8,74	115,18	Denpasar
13	DEMO	<i>Accelerograph Non Colocated</i>	-8,75	115,18	Denpasar
14	KHBO	<i>Accelerograph Non Colocated</i>	-8,36	115,61	Karangasem
15	NEKI	<i>Accelerograph Non Colocated</i>	-8,34	114,62	Jembrana
16	BBBR	<i>Accelerograph REIS</i>	-8,74	115,18	Badung
17	KHK	<i>Accelerograph REIS</i>	-8,36	115,61	Karangasem
18	TTBR	<i>Accelerograph REIS</i>	-8,56	115,12	Tabanan

#### 2.5. Percepatan tanah maksimum

Percepatan menggambarkan perubahan yang mencapai kecepatan tertentu dari keadaan awal diam. Dalam konteks gempabumi, percepatan tanah mengacu pada percepatan maksimum yang tercatat di suatu lokasi akibat gempa [10]. Nilai percepatan tanah maksimum berkaitan dengan tingkat bahaya dan risiko gempa di suatu daerah. Semakin tinggi nilai PGA yang tercatat, semakin besar potensi bahaya dan risiko yang ditimbulkan [11].

#### 2.6. Rumus empiris percepatan tanah

Penelitian ini menggunakan model rumus empiris percepatan tanah yang didasarkan pada pendekatan Lin dan Wu, kemudian dibandingkan dengan model lain, seperti metode Donovan, Setiawan, serta Lin dan Wu, yang ditunjukkan pada Persamaan (1), (2), dan (3).

a) Donovan (1973)

$$\alpha = \frac{1080^{0,5} Ms}{(R+25)^{1,32}} \quad (1)$$

Dengan  $\alpha$  adalah percepatan,  $M_s$  merupakan magnitudo permukaan, serta  $R$  adalah jarak hiposenter (km).

b) Lin dan Wu (2010)

$$\log_{10}(PGA) = (-0,395) \log_{10}(R) + (0,125) M + 1,979 \quad (2)$$

Dengan  $a$  (-0,395) adalah koefisien empiris dari jarak gempabumi,  $b$  (0,125) adalah koefisien empiris dari magnitudo gempa,  $c$  (1,979) adalah konstanta, dan  $M$  merupakan magnitudo moment ( $M_w$ ).

c) Setiawan (2012)

$$\log_{10}(PGA) = (-2,0663) \log_{10}(R) + (0,90190) Mb + 0,1091 \quad (3)$$

Dimana PGA adalah nilai percepatan tanah maksimum,  $Mb$  adalah magnitudo badan.

### 2.7. Analisis regresi linier

Pada penelitian ini analisis regresi linier ditujukan untuk memahami pengaruh suatu variabel independen (magnitudo dan jarak hiposenter) terhadap variabel dependen (PGA), serta untuk memperkirakan nilai variabel dependen (PGA). Hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat bersifat linier, hal ini disebut inversi linier [12]. Jika data pengamatan ( $\mathbf{d}$ ), model ( $\mathbf{m}$ ), dan operator yang menghubungkan keduanya ( $\mathbf{G}(\mathbf{m})$ ) dinyatakan oleh vektor, maka:

$$G(m) = d \quad (4)$$

Kedua ruas dikalikan dengan  $G^T$ , menjadi:

$$G^T G(m) = G^T d \quad (5)$$

Kemudian dikalikan dengan  $[G^T G]^{-1} G^T$  dengan asumsi  $[G^T G]^{-1} G^T G = 1$ , maka diperoleh:

$$[G^T G]^{-1} G^T G m = [G^T G]^{-1} G^T d \quad (6)$$

$$m = [G^T G]^{-1} G^T d \quad (7)$$

Dimana  $T$  merupakan *transpose* dari matriks  $G$ , dan pangkat (-1) merupakan operasi invers.

### 2.8. Analisis korelasi

Koefisien korelasi adalah ukuran statistik yang menunjukkan kekuatan hubungan linier antara dua variabel. Nilai koefisien korelasi berada antara -1 hingga +1, dan mewakili kekuatan dan arah hubungan. Untuk memudahkan penjelasan hubungan kedua variabel, kriteria penilaian disajikan pada Tabel 2 [6].

**Tabel 2.** Interpretasi koefisien korelasi [6].

Interval Koefisien	Interpretasi
0,00	Tidak Ada Korelasi
>0,00 – 0,25	Korelasi Sangat Lemah
>0,25 – 0,50	Korelasi Cukup
>0,50 – 0,75	Korelasi Kuat
>0,75 – 0,99	Korelasi Sangat Kuat
1,00	Korelasi Sempurna

## 3. Metoda Penelitian

Penelitian ini menggunakan 443 rekaman *accelerograph* BMKG di wilayah Bali tahun 2020-2023, dengan 146 kejadian gempabumi terjadi pada koordinat wilayah 113,51°-115,83° BT dan 12,56°-7,71° LS. Dalam penelitian ini, rumusan empiris PGA diperoleh dengan mengadaptasi rumusan Lin dan Wu (2010). Nilai PGA pada rumusan ini didasarkan pada parameter jarak hiposenter dan magnitudo gempa. Rumusan empiris ini merupakan pengembangan dari persamaan umum percepatan tanah yang dinyatakan dalam Persamaan (6).

$$\log_{10}(PGA) = a \log_{10}(R) + bM + c \quad (6)$$

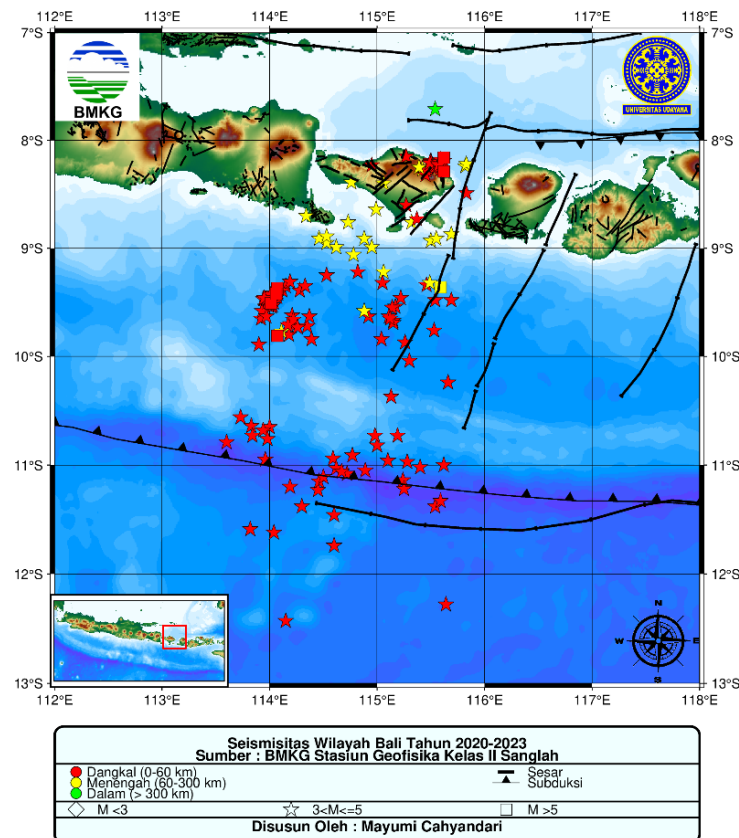
Dengan  $a$  menggambarkan pengaruh jarak hiposenter terhadap PGA,  $b$  menggambarkan pengaruh magnitudo terhadap PGA, dan  $c$  adalah konstanta. Rumusan empiris PGA untuk wilayah Bali dapat diperoleh dengan mencari koefisien  $a$ ,  $b$ , dan  $c$  berdasarkan nilai PGA yang dicatat oleh *accelerograph*.

Koefisien-koefisien ini dihitung dengan menggunakan analisis regresi linier berganda. Setelah model rumus empiris baru diperoleh, dilakukan verifikasi statistik untuk menilai kelayakan model tersebut melalui uji regresi linier berganda [13]. Model kemudian divalidasi dengan membandingkan nilai PGA model dan observasi, serta dengan rumus empiris dari Donovan, Lin dan Wu, serta Setiawan. Rumus empiris ini dapat digunakan untuk memodelkan sebaran nilai PGA di Bali pada saat terjadi gempa bumi.

#### 4. Hasil Dan Pembahasan

##### 4.1 Seismisitas Wilayah Bali

Data gempa yang diperoleh dari situs internal BMKG mencakup beberapa parameter, seperti lokasi episenter gempa, kedalaman hiposenter, magnitudo, waktu kejadian, dan intensitas seismik. Selama periode 2020-2023, aktivitas seismik di wilayah Bali menunjukkan pola yang konsisten, dengan gempa tersebar di berbagai zona tektonik di sekitar pulau. Gambar 1 menunjukkan distribusi aktivitas seismik berdasarkan data penelitian.



**Gambar 1.** Sebaran seismisitas Wilayah Bali tahun 2020-2023.

Gambar 1 memetakan seismisitas wilayah Bali, menunjukkan sebaran gempa dengan magnitudo 3,1–5,8 dan kedalaman bervariasi. Peta ini menggunakan magnitudo momen ( $M_w$ ) dan mengklasifikasikan kedalaman gempa sebagai dangkal (0-60 km), menengah (60-300 km), dan dalam (>300 km). Simbol pada peta menunjukkan kedalaman dan magnitudo gempa dengan warna dan bentuk berbeda; merah untuk gempa dangkal yang berbentuk diamond, kuning untuk gempa menengah yang berbentuk bintang, dan hijau untuk gempa dalam yang berbentuk kotak. Persebaran seismisitas menunjukkan gempa menengah di selatan dan utara Bali, serta gempa dalam dekat zona patahan naik di utara Bali. Gempa dangkal, yang terjadi di Kabupaten Karangasem dan laut selatan Bali, kemungkinan berasal dari aktivitas vulkanik Gunung Agung dan pergerakan Lempeng Indo-Australia.

##### 4.2 Penentuan model rumus empiris percepatan tanah maksimum

Dalam pengembangan model PGA, informasi yang dibutuhkan meliputi nilai PGA observasi, magnitudo gempa, dan jarak hiposenter dari *accelerograph*. Nilai PGA observasi didapat dari data rekaman sensor *accelerograph* yang terdapat pada 18 stasiun selama periode 2020-2023. Melalui analisis regresi linier

berganda, diperoleh koefisien  $a = -1,817$ , koefisien  $b = 0,809$ , dan koefisien  $c = -0,089$ . Dengan demikian, model rumus empiris untuk wilayah Bali yang diperoleh:

$$\log_{10}PGA = (-1,817)\log_{10}(R) + (0,809)M - 0,089 \quad (7)$$

#### 4.3 Verifikasi statistik model rumus empiris percepatan tanah maksimum

Verifikasi statistik model PGA empiris dilakukan dengan pengujian regresi linier berganda menggunakan *software* PSPP, untuk menguji kelayakan dan signifikansi variabel-variabel dalam model. Uji t menguji hipotesis apakah masing-masing variabel independen (magnitudo dan jarak hiposenter) secara individual mempengaruhi variabel dependen (PGA). Hipotesis nol ( $H_0$ ) menyatakan bahwa variabel independen tidak berpengaruh terhadap variabel dependen. Berdasarkan Tabel 3, nilai signifikansi untuk variabel independen adalah  $< 0,05$ , maka  $H_0$  ditolak, yang berarti kedua variabel mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap PGA. Selanjutnya, menggunakan uji F untuk menguji hipotesis apakah seluruh variabel independen secara bersamaan mempengaruhi PGA. Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai signifikansi uji F juga  $< 0,05$ , sehingga  $H_0$  ditolak, yang berarti keseluruhan model regresi signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa magnitudo dan jarak hiposenter secara bersama-sama mempengaruhi PGA, sehingga model ini efektif dalam memprediksi PGA [13].

**Tabel 3.** Hasil uji statistik uji t.

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-0,09	0,27	0,00	-0,33	0,74
Mag	0,81	0,05	0,52	17,58	0,00
Log10R	-1,82	0,09	-0,61	-20,34	0,00

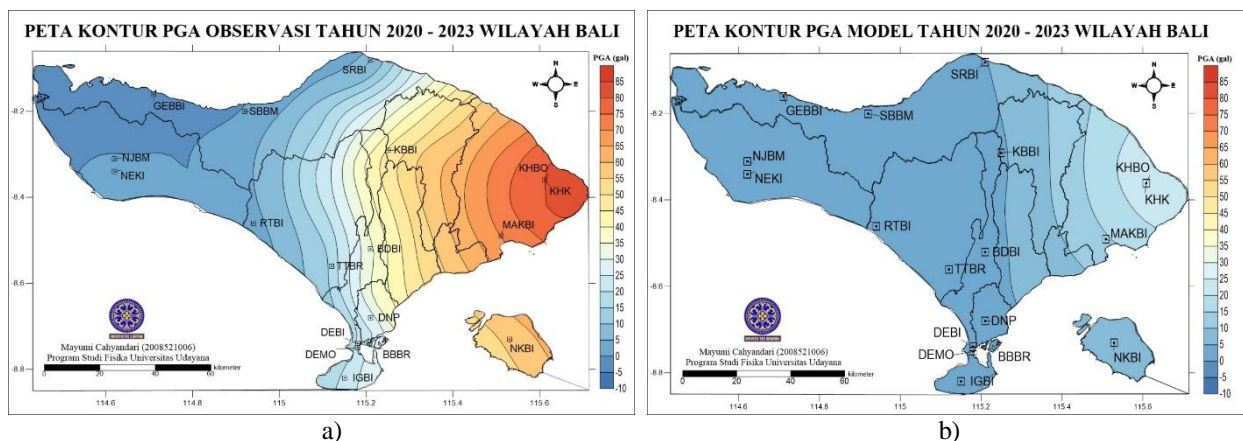
**Tabel 4.** Hasil uji statistik uji F

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	145,10	2,00	72,55	345,46	0,00
Residual	92,40	440,00	0,21		
Total	237,50	442,00			

#### 4.4 Validasi model rumus empiris percepatan tanah maksimum

##### a) Perbandingan nilai PGA observasi dengan nilai PGA model

Setelah diperoleh model rumus empiris PGA, dilakukan validasi dengan membandingkan nilai observasi *accelerograph* dengan hasil model yang diperoleh dari perhitungan untuk mengevaluasi kesesuaian dan keakuratan model. Perbandingan dua nilai PGA dapat dilihat menggunakan peta kontur pada Gambar 2.



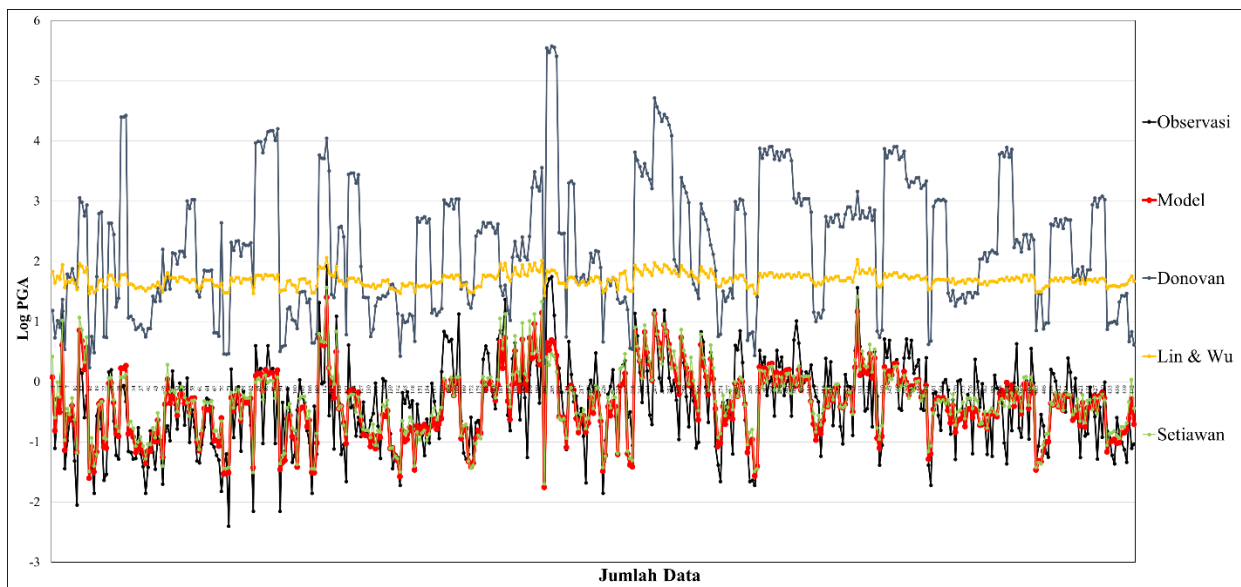
**Gambar 2.** Peta kontur PGA tahun 2020-2023 wilayah Bali: (a) peta kontur PGA observasi, dan (b) peta kontur PGA model.



Warna yang berbeda pada peta menunjukkan perbedaan besaran PGA akibat gempa. Perbedaan besaran tersebut dapat dipengaruhi oleh kondisi geologis seperti patahan dan jenis batuan suatu wilayah. Nilai PGA observasi didapatkan melalui hasil rekaman *accelerograph* yang berada tidak jauh dari lokasi kejadian sehingga nilainya dapat menjadi sangat rendah atau sangat tinggi. Selain itu, sensor *accelerograph* juga memiliki sensitivitas yang berbeda-beda tergantung pada jenis dan kualitasnya. Beberapa sensor mungkin lebih sensitif dalam menangkap guncangan tanah yang kuat, sehingga menghasilkan nilai PGA yang lebih tinggi, dan sebaliknya. Nilai PGA yang lebih tinggi terlihat terkonsentrasi di bagian Timur dan Selatan Bali. Ini menunjukkan bahwa wilayah tersebut mengalami percepatan tanah yang lebih tinggi selama gempa. Daerah ini terdiri dari lapisan sedimen tebal dan kondisi tanah yang lebih lunak, yang memperkuat gelombang seismik. Struktur geologi seperti patahan aktif juga berkontribusi pada tingginya nilai PGA di wilayah ini. Di bagian Timur Bali terdapat sesar aktif, sesar potensial aktif, dan sesar geser diantara Gunung Agung dan Gunung Batur [14].

b) Perbandingan nilai PGA model dengan metode PGA lainnya

Setelah melakukan perbandingan antara nilai PGA observasi dan model, dilakukan pula perbandingan dengan model empiris lainnya, yang pada saat ini digunakan tiga rumusan empiris yaitu Donovan, Lin dan Wu, serta Setiawan. Adapun untuk perbandingan dari nilai PGA ditunjukkan melalui grafik perbandingan nilai PGA seperti pada Gambar 3.

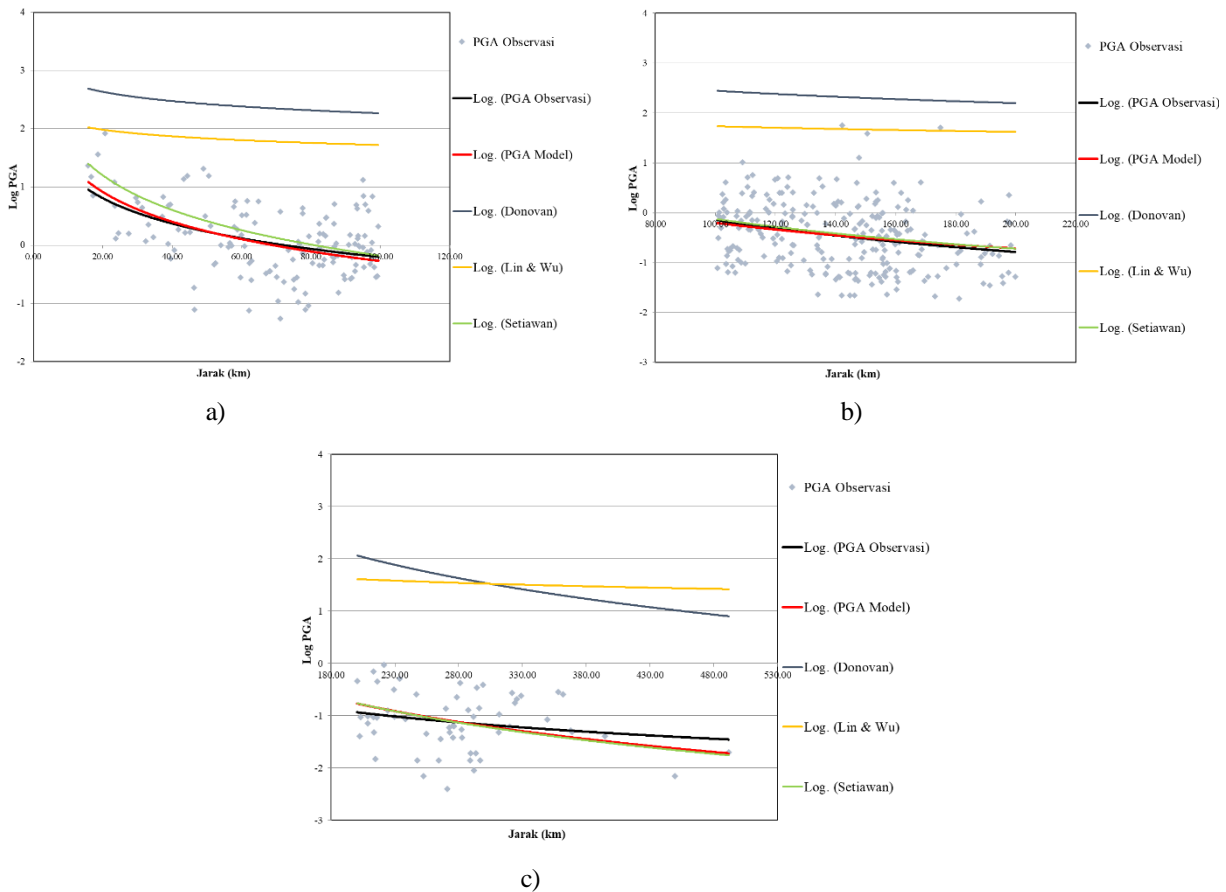


**Gambar 3.** Grafik perbandingan nilai PGA hasil observasi dengan nilai PGA model (rumus empiris) dan metode percepatan tanah lainnya menggunakan data tahun 2020-2023.

Dari Gambar 3, terlihat bahwa tren hasil PGA model baru dengan rumus Setiawan Y. A. relatif mendekati PGA Observasi. Sebaliknya, rumus Donovan serta Lin dan Wu menunjukkan hasil yang cukup jauh dari observasi. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan faktor tektonik di daerah penelitian masing-masing model, di mana model Lin dan Wu dikembangkan di Taiwan dan model Donovan di California, Amerika Serikat [12]. Akibatnya, model-model tersebut mungkin tidak sepenuhnya menangkap fitur spesifik dari gempa di wilayah Bali, seperti jenis batuan atau topografi lokal yang dapat mempengaruhi distribusi dan intensitas gelombang seismik. Berbeda dengan itu, model baru dan rumus Setiawan Y. A. mungkin telah menyesuaikan konstanta atenuasi atau parameter lain dalam modelnya berdasarkan data lokal, seperti jenis tanah, struktur geologi, dan distribusi sumber gempa.

c) Perbandingan fungsi atenuasi PGA model dengan metode PGA lainnya

Fungsi atenuasi menggambarkan hubungan antara intensitas getaran tanah (PGA) dengan magnitudo dan jarak dari sumber gempa ke titik pengamatan. Semakin besar magnitudo gempa, semakin tinggi intensitas getaran tanah yang dihasilkan, dan semakin dekat jarak sumber gempa ke titik pengamatan, semakin besar pula intensitas getaran tanah yang dirasakan di lokasi tersebut [5]. Hasil fungsi atenuasi ditunjukkan pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Grafik hasil fungsi atenuasi PGA observasi dan fungsi atenuasi dari rumusan empiris lainnya: (a) grafik fungsi atenuasi terhadap jarak *accelerograph* <100 km, (b) grafik fungsi atenuasi terhadap jarak *accelerograph* >100 km dan <200 km, dan (c) grafik fungsi atenuasi terhadap jarak *accelerograph* >200 km.

Grafik fungsi atenuasi menunjukkan penurunan nilai PGA seiring bertambahnya jarak, dengan perbedaan kemiringan yang mungkin disebabkan oleh rumusan empiris dan faktor geologi setempat. Gambar 4 menunjukkan bahwa fungsi atenuasi model dan fungsi Setiawan Y.A. memiliki kemiripan tren, kemungkinan karena formula yang sama meski dengan data yang berbeda. Atenuasi model lebih sesuai dengan observasi pada jarak <200 km, di mana gelombang seismik mengalami lebih sedikit gangguan, dibandingkan pada jarak >200 km, di mana ketidaksesuaian lebih besar karena pengaruh faktor lokal. Secara kualitatif, model ini menunjukkan kecocokan yang relatif kuat dibandingkan tiga model pembanding lainnya [5].

d) Verifikasi statistik nilai PGA model dengan metode PGA lainnya

Verifikasi hasil PGA dari model dan hasil observasi *accelerograph* serta rumusan empiris lainnya, dilakukan dengan menggunakan berbagai pendekatan seperti koefisien korelasi, MSE, dan RMSE. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa nilai koefisien korelasi ( $R$ ) untuk semua fungsi atenuasi PGA mendekati satu, yang menandakan adanya hubungan yang sangat kuat. Secara khusus, sebagaimana dijelaskan pada Tabel 2, model empiris mencapai koefisien korelasi tertinggi, yaitu 0,782 yang menunjukkan korelasi linier positif yang sangat kuat. Selain itu, nilai *Mean Squared Error* (MSE) terendah yaitu 0,209 dan RMSE sebesar 0,457. Secara keseluruhan, hasil verifikasi yang pada Tabel 5 menyatakan bahwa model PGA memberikan hasil yang lebih unggul dibandingkan fungsi atenuasi lainnya.

**Tabel 5.** Hasil verifikasi fungsi atenuasi terhadap hasil observasi.

Fungsi Atenuasi	Model	Donovan	Lin & Wu	Setiawan
$R$ (Korelasi)	0,782	0,620	0,770	0,767
MSE	0,209	7,661	4,742	0,544
RMSE	0,457	2,768	2,178	0,738



## 5. Kesimpulan

Model empiris untuk memprediksi nilai PGA yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan kesesuaian yang sangat kuat dengan hasil observasi, baik pada peta maupun grafik perbandingan serta melalui verifikasi statistik. Jika dibandingkan dengan metode empiris sebelumnya, model rumus empiris PGA yang baru ini menunjukkan akurasi yang lebih tinggi dan lebih sesuai dengan hasil observasi. Berdasarkan analisis regresi dari data *accelerograph* tahun 2020-2023, diperoleh koefisien  $a = -1,817$ ,  $b = 0,809$ , dan  $c = -0,089$ , dengan rumus empiris PGA di wilayah Bali sebagai berikut:

$$\log_{10}PGA = (-1,817)\log_{10}(R) + (0,809)M - 0,089$$

Model ini memiliki kesesuaian dengan tingkat korelasi sangat kuat sebesar 0,782 dengan nilai *error* terendah yaitu 0,209 untuk nilai MSE dan 0,457 untuk nilai RMSE.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Kepala dan seluruh staff BMKG Stasiun Geofisika Kelas II Sanglah, Denpasar serta Bapak/Ibu dosen di lingkungan Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Udayana atas fasilitas dan bimbingan yang telah diberikan pada penelitian ini.

## Pustaka

- [1] B. Baskara, I. K. Sukarasa, and A. Septiadhi, "Pemetaan Bahaya Gempa Bumi Dan Potensi Tsunami di Bali Berdasarkan Nilai Seismisitas," *Bul. Fis.*, vol. 18, no. 1, p. 20, 2017, doi: 10.24843/bf.2017.v18.i01.p04.
- [2] BMKG, "Sejarah Kegempaan Bali." Accessed: Mar. 25, 2024. [Online]. Available: <https://bbmkg3.bmkg.go.id/sejarah-gempa-merusak>
- [3] A. P. R, M. S. Purwanto, and A. Widodo, "Identifikasi Percepatan Tanah Maksimum (PGA) dan Kerentanan Tanah Menggunakan Metode Mikrotremor Jalur Sesar Kendeng," *J. Geosaintek*, vol. 3, no. 2, p. 107, 2017, doi: 10.12962/j25023659.v3i2.2966.
- [4] E. Ulfiana, S. A. Rummy, R. Pratama, and P. Ariyanto, "Analisis Pendekatan Empiris Pga (Peak Ground Acceleration) Pulau Bali Menggunakan Metode Donovan, Mc. Guirre, Dan M.V. Mickey," *J. Ilmu dan Inov. Fis.*, vol. 2, no. 2, pp. 155–161, 2018, doi: 10.24198/jiif.v2i2.19730.
- [5] D. K. Priyanto, K. N. Suarbawa, and A. Septiadhi, "Penentuan Model Formula Empiris Percepatan Getaran Tanah Daerah Denpasar," *Bul. Fis.*, vol. 19, no. 1, pp. 23–27, 2018.
- [6] I. P. A. P. Wiguna and I. M. Yuliara, "Penentuan Persamaan Empiris Percepatan Tanah Di Wilayah Bali Berdasarkan Data Gempabumi Periode 2008-2016," *Kappa J.*, vol. 3, no. 2, pp. 71–73, 2019.
- [7] L. Ambarwati, "Pemetaan dan Analisa PGA Maksimum Gempabumi Pada Provinsi Aceh Periode 2012 - 2017 dengan Metode Atenuasi," pp. 1–47, 2020.
- [8] D. Kiswiranti, *SEISMOLOGI (Dasar-dasar Seismologi dan Aplikasinya)*. Yogyakarta, 2019. [Online]. Available: <http://eprints.akprind.ac.id/306/1/SEISMOLOGI.pdf>
- [9] A. Sungkowo, "Perhitungan Nilai Percepatan Tanah Maksimum Berdasar Rekaman Sinyal Accelerograph di Stasiun Pengukuran UNSO Surakarta," *Indones. J. Appl. Phys.*, vol. 8, no. 1, p. 43, 2018, doi: 10.13057/ijap.v8i1.14326.
- [10] A. Rubaiyn, J. Safani, and K. Anwar, "Analisis Tingkat Seismisitas dan Percepatan Tanah Maksimum (PGA) Wilayah Sulawesi Tenggara Berdasarkan Data Gempabumi Periode 1973-2022," *J. Rekayasa Geofis. Indones.*, vol. 5, no. 02, pp. 70–81, 2023, doi: 10.56099/jrgi.v5i02.17.
- [11] M. A. Sari, N. B. Wibowo, and D. Darmawan, "Pemetaan Percepatan Getaran Tanah Maksimum dan Intensitas Gempabumi di Kawasan Jalur Sesar Sungai Oyo Yogyakarta," *J. Ilmu Fis. dan Ter.*, vol. 6, no. 2, pp. 359–360, 2006, doi: <https://doi.org/10.21831/fisika%20-%20s1.v6i2.5947>.

- [12] P. M. Meitawati *et al.*, “Perbandingan Nilai Percepatan Tanah Maksimum Berdasarkan Modifikasi Konstanta Atenuasi dan Data Accelerograph Tahun 2008-2016 pada Stasiun BMKG Lampung,” *J. Geofis. Eksplor.*, vol. 4, no. 2, pp. 201–215, 2017, doi: 10.23960/jge.v4i2.1.
- [13] I. Rohman, D. Darmawan, D. Nugroho, and B. Wibowo, “Penentuan Formula Empiris Percepatan Tanah Maksimum Di Daerah Istimewa Yogyakarta,” *J. Ilmu Fis. dan Ter.*, vol. 9, no. 1, pp. 26–27, 2022, doi: <https://doi.org/10.21831/fisika%20-%20s1.v9i1.17974>.
- [14] I. Dharmawan, “Analisis Pendekatan Empiris Nilai PGA (Peak Ground Acceleration) dengan Persamaan Metode Donovan, MC. Guirre, dan Esteva di Kabupaten Kerinci,” Universitas Jambi, 2023.