

## Hasil Awal Analisis *Peak Ground Acceleration* di Bali

D.R.A.Gandini<sup>1,\*</sup>, Y.A.Setiawan<sup>2</sup>, I.Madrinovella<sup>1</sup>, A.Abdullah<sup>1</sup>, B.Pranata<sup>2</sup>, S.K.Suhardja<sup>1</sup>, S.R.Aisy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Exploration and Production Technology, University of Pertamina

<sup>2</sup>Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics

\*Email: dhyanarara@gmail.com

Submit: 2022-04-10 ; Revised: 2022-08-23 ; Accepted: 2022-10-08

**Abstrak:** Wilayah Bali merupakan daerah dengan tingkat seismisitas yang tinggi karena terletak di Zona Subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Eurasia (selatan) serta adanya struktur *back arc thrust* (utara). Gempabumi Seririt yang terjadi pada tanggal 14 Juli 1976 dengan magnitudo 6.2 SR merupakan salah satu gempa paling merusak di Bali. Oleh karena itu perlu dilakukan upaya mitigasi untuk melihat tingkat potensi bahaya bencana gempabumi di wilayah Bali. *Peak Ground Acceleration* (PGA) merupakan pendekatan yang dapat dilakukan dengan cara menentukan intensitas seismik dari gempabumi di suatu wilayah sehingga dapat diperkirakan risiko paling parah yang dapat dihasilkan dari suatu kejadian gempabumi. Perhitungan nilai PGA dapat dilakukan melalui suatu pendekatan rumus empiris atenuasi khusus wilayah tertentu. Data yang digunakan berasal dari katalog gempabumi ISC (1970-2019), USGS (1963-2019), dan data rekaman accelerograph BMKG (2012-2016) di wilayah Bali. Rumus empiris atenuasi dipilih dengan mempertimbangkan jenis gempabumi dominan dan kondisi geologi di wilayah Bali. Terdapat tiga rumus empiris atenuasi yang digunakan yaitu oleh McGuire (1977); Donovan (1973), dan Esteva dan Villaverde (1973). Rumus empiris atenuasi oleh McGuire (1977) menghasilkan nilai error terkecil berdasarkan perbandingan nilai PGA observasi dan nilai PGA kalkulasi. Analisis tingkat potensi risiko akibat gempabumi dapat dilakukan berdasarkan peta percepatan tanah maksimum dan peta intensitas seismik maksimum di Wilayah Bali. Kabupaten Buleleng dan sekitarnya serta daerah paling timur dari Kabupaten Karangasem merupakan wilayah yang berpotensi terkena dampak paling parah jika terjadi gempabumi bersifat merusak, sedangkan daerah paling selatan dari Pulau Bali memiliki dampak yang relatif ringan jika terjadi gempabumi yang bersifat merusak.

**Kata kunci:** *Peak Ground Acceleration*, Bali, Seismisitas, Gempabumi, Mitigasi

*Abstract:* Bali region is an area with a high level of seismicity because it is located in the Subduction Zone between the Indo-Australian and Eurasian Plates (south) and has a back-arc thrust structure (north). The Seririt Earthquake, which occurred on July 14, 1976, with a magnitude of 6.2 on the Richter Scale, was one of the most destructive earthquakes in Bali. Therefore, it is necessary to carry out mitigation efforts to reduce the level of potential earthquake hazards in the Bali region. *Peak Ground Acceleration* (PGA) is an approach that can be done by determining the seismic intensity of an earthquake in an area so that the

most severe risk that can be generated from an earthquake can be estimated. The calculation of the PGA value can be done through an empirical attenuation formula approach specific to a particular region. The data used comes from the ISC earthquake catalog (1970-2019), USGS (1963-2019), and BMKG accelerograph data (2012-2016) in the Bali region. The empirical attenuation formula was chosen by considering the dominant earthquake type and geological conditions in the Bali region. There are three empirical attenuation formulas used, namely by McGuire (1977); Donovan (1973), and Esteva dan Villaverde (1973). The empirical attenuation formula by McGuire (1977) produces the smallest error value based on the comparison of the observed PGA value and the calculated PGA value. Analysis of the potential level of risk due to earthquakes can be carried out based on the maximum ground acceleration map and the maximum seismic intensity map in the Bali Region. Buleleng Regency and its surroundings, as well as the easternmost area of Karangasem Regency, are the areas that are potentially most severely affected in the event of a destructive earthquake, while the southernmost area of the island of Bali has a relatively mild impact in the event of a destructive earthquake.

**Keywords:** Peak Ground Acceleration, Bali, Seismicity, Earthquake, Mitigation

### 1 PENDAHULUAN

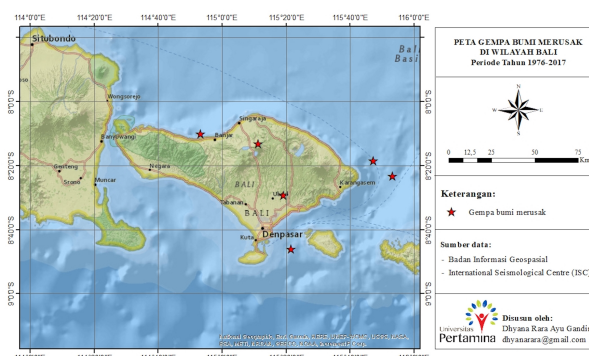
Gempabumi merupakan peristiwa bergetar atau berguncangnya bumi karena pergerakan/pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi secara tiba-tiba akibat pergerakan lempeng tektonik (Pawirodikromo, 2012). Pergerakan tiba-tiba dari lapisan batuan tersebut menghasilkan energi yang dipancarkan ke segala arah berupa gelombang seismik. Di Indonesia, gempabumi sering terjadi karena lokasi Indonesia yang berada pada pertemuan tiga lempeng yaitu lempeng Eurasia yang bergerak relatif ke arah tenggara dengan kecepatan kurang lebih 0,4 cm/tahun, lempeng Indo-Australia yang bergerak relatif ke arah utara dengan kecepatan kurang lebih 0,7 cm/tahun, dan lempeng Pasifik yang bergerak relatif ke arah barat dengan kecepatan kurang lebih 11 cm/tahun (Rasimeng dan Riyanti, 2019). Sebagai bagian dari wilayah Indonesia, Provinsi Bali merupakan daerah yang juga rawan terhadap kejadian gempabumi. Hal tersebut dikarenakan

daerah ini terletak di antara dua zona penyebab gempa-bumi, yaitu wilayah selatan merupakan daerah pertemuan dua lempeng bumi (zona subduksi) yaitu lempeng Eurasia dan Indo-Australia dan di wilayah sebelah utara terdapat patahan naik busur belakang atau back arc thrust (Darsono dkk., 2014). Berdasarkan catatan sejarah gempabumi menurut Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), sudah beberapa kali terjadi gempabumi merusak di wilayah Bali yaitu pada tahun 1917, 1976, 1977, 1979, 2004, dan 2017. Salah satu dari gempa tersebut adalah Gempabumi Seririt yang terjadi pada tanggal 14 Juli 1976 dan memiliki kekuatan 6.2 SR dengan sumber gempabumi yang berada di daratan (Setiyono dkk., 2019). Gempabumi ini menelan 559 korban jiwa, 850 korban luka berat, dan 3200 korban luka ringan. Dilaporkan juga bahwa hampir 75% dari seluruh bangunan rumah di Tabanan dan Jembrana mengalami kerusakan. Melihat parahnya bahaya yang terjadi akibat gempabumi merusak tersebut, perlu dilakukan mitigasi bencana dengan cara menentukan daerah di wilayah Bali yang kemungkinan dapat terdampak parah jika kembali terjadi gempabumi merusak seperti itu. Hal yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan analisis nilai percepatan tanah maksimum atau PGA di wilayah Bali. PGA ini dapat digunakan untuk menentukan intensitas seismik dari gempabumi di suatu wilayah sehingga dapat diperkirakan bahaya paling parah yang kemungkinan terjadi. Perhitungan nilai PGA ini dilakukan menggunakan suatu rumus empiris atenuasi khusus untuk daerah tertentu. Namun, karena belum adanya rumus empiris atenuasi khusus untuk wilayah Bali, dalam penelitian ini harus menggunakan rumus untuk wilayah lain. Pemilihan rumus ini harus memperhatikan kesamaan jenis gempabumi dominan dan kondisi geologis di kedua wilayah tersebut (Cotton dkk., 2006). Berdasarkan hal tersebut, penulis mencoba untuk memilih rumus empiris atenuasi terbaik untuk menghitung nilai PGA di wilayah Bali dan melakukan analisis nilai PGA maksimum untuk melihat tingkat bahaya bencana gempabumi di wilayah Bali.

## 2 DATA DAN METODE

### 2.1 Data

Daerah penelitian terdapat di wilayah Bali dengan koordinat  $7,65^{\circ}$ – $9,25^{\circ}$ LS dan  $114^{\circ}$ – $116^{\circ}$ BT. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data parameter gempabumi dari katalog International Seismological Centre (ISC) dan United States Geological Survey (USGS) serta rekaman accelerograph, berupa data percepatan gelombang akibat gempabumi di wilayah Bali dari tahun 2012–2016 dengan magnitudo  $\geq 4.5$  SR. Data parameter gempabumi dari katalog ISC digunakan untuk membuat peta seismisitas tahun 1970-2019. Sedangkan katalog dari USGS digunakan untuk melihat parameter enam gempabumi merusak dalam sejarah yang pernah terjadi di wilayah Bali seperti pada Tabel 1 yang dipakai dalam perhitungan nilai PGA kalkulasi. Hal ini dikarenakan adanya parameter gempa yang tidak diketahui dari katalog milik BMKG maupun ISC.



**Gambar 1.** Peta gempabumi merusak di wilayah Bali tahun 1976-2017

**Tabel 1.** Daftar kejadian gempabumi merusak di wilayah Bali pada Gambar 1 (Sumber: BMKG dan USGS)

Origin Time	Lat	Lon	Mag	Depth
14 Juli 1976, 07:13:24 UTC	8,17 LS	114,89 BT	6,5 Ms	40 km
26 Januari 1977, 13:11:29 UTC	8,22 LS	115,19 BT	5,2 Mb	33 km
17 Desember 1979, 19:58:23 UTC	8,39 LS	115,89 BT	6,3 Ms	33 km
2 Januari 2004, 20:59:31 UTC	8,31 LS	115,79 BT	5,8 Mw	44,5 km
15 September 2004, 08:35:10 UTC	8,77 LS	115,36 BT	5,4 Mw	98,4 km
22 Maret 2017, 23:10:25 UTC	8,49 LS	115,32 BT	5,6 Mw	111,71 km

### 2.2 Metode

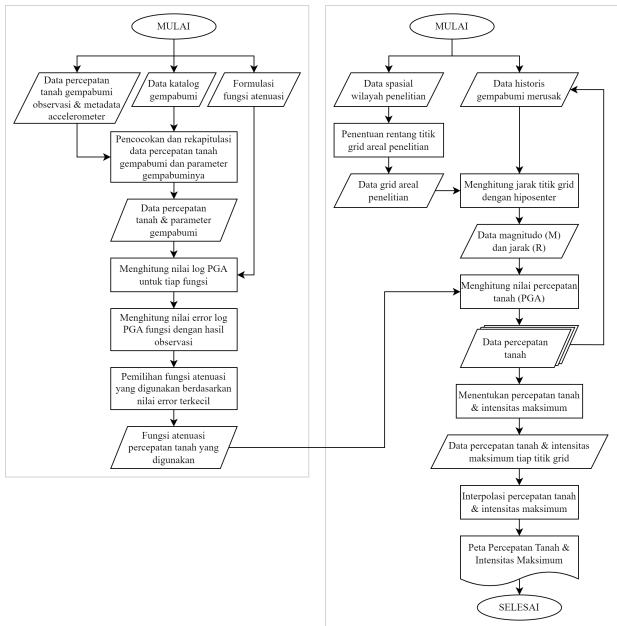
Pengolahan data gempabumi ini menggunakan software Microsoft Excel dan ArcMap yang terdiri dari pembuatan peta seismisitas, penentuan rumus atenuasi terbaik, dan pembuatan peta intensitas seismik maksimum di wilayah Bali.

#### (i) Pembuatan Peta Seismisitas Wilayah Bali

Peta seismisitas wilayah Bali yang dibuat adalah untuk periode tahun 1970–2019 sesuai data yang diperoleh pada katalog gempabumi ISC. Data tersebut ditampilkan dalam software Microsoft Excel dan dikelompokkan ke dalam tiga jenis gempa berdasarkan kedalaman pusat gempanya yaitu gempa dangkal (kedalaman  $\leq 60$  km), gempa menengah (kedalaman 60–300 km), dan gempa dalam (kedalaman  $\geq 300$  km). Data inilah yang kemudian akan ditampilkan dalam bentuk peta seismisitas menggunakan software ArcMap. Setelah itu, tipe gempabumi dominan dapat diidentifikasi berdasarkan peta seismisitas wilayah Bali yang diperoleh.

#### (ii) Penentuan Rumus Atenuasi Terbaik di Wilayah Bali

Rumus atenuasi yang digunakan harus memperhatikan kesamaan dari tipe gempabumi dominan dan kondisi tektonik wilayah Bali. Ketiga rumus yang dibuat oleh peneliti sebelumnya digunakan untuk menghitung nilai PGA kalkulasi berdasarkan data gempa yang terekam oleh accelerograph BMKG di wilayah Bali. Kemudian, nilai PGA tersebut dibandingkan dengan nilai PGA observasi dari rekaman accelerograph BMKG. Rumus atenuasi dengan nilai error



Gambar 2. Peta gempabumi merusak di wilayah Bali tahun 1976-2017

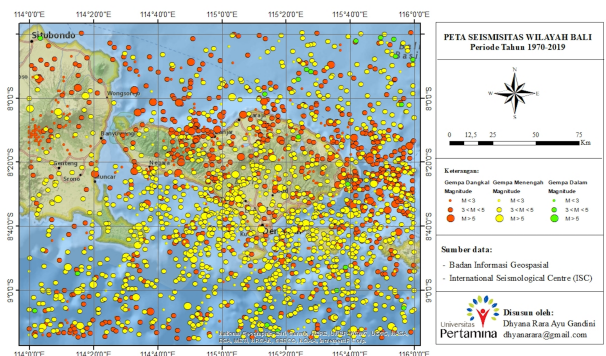
terendah adalah rumus atenuasi terbaik yang akan digunakan untuk perhitungan nilai PGA wilayah Bali menggunakan parameter gempa merusak di wilayah Bali seperti pada Tabel 1.

(iii) Pembuatan Peta Percepatan Tanah dan Intensitas Seismik Maksimum di Wilayah Bali

Dalam tahap ini, hal pertama yang harus dilakukan adalah membuat titik-titik grid yang tersebar di wilayah Bali. Dalam penelitian ini, titik grid yang digunakan adalah sebanyak 357 titik yang masing-masing berjarak 0.1° dalam batasan wilayah 7.65°–9.25°LS dan 114°–116°BT. Di setiap titik-titik grid itulah nilai PGA akan dihitung menggunakan rumus atenuasi terbaik. Setelah memperoleh nilai PGA wilayah Bali, tahap selanjutnya yang harus dilakukan adalah menampilkan peta percepatan tanah maksimum di wilayah Bali menggunakan software ArcMap. Nilai PGA yang diperoleh tersebut juga dapat digunakan untuk mengetahui intensitas seismik. Nilai intensitas seismik tersebut dapat digunakan untuk melihat tingkat resiko bencana gempabumi sehingga peta tingkat bahaya bencana gempabumi di wilayah Bali dapat ditampilkan menggunakan software ArcMap.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3 menunjukkan gempa yang terjadi dibedakan menjadi tiga jenis yaitu gempa dangkal (merah), gempa menengah (kuning), dan gempa dalam (hijau). Kemudian, jenis gempa yang dominan terjadi di wilayah Bali adalah gempa menengah dengan jumlah 1379 gempa. Gempa menengah di wilayah tersebut diduga disebabkan oleh penunjaman lempeng Indo-Australia ke bawah lempeng Eurasia dan struktur patahan naik busur belakang (back arc thrust) akibat penunjaman kedua lempeng tersebut (Darsono dkk., 2014) Maka dari itu, rumus empiris atenuasi yang dipilih untuk



Gambar 3. Peta seismisitas di wilayah Bali tahun 1970-2019

perhitungan PGA harus merupakan rumus yang dibuat untuk zona subduksi dan wilayah sering terjadi gempa dangkal hingga menengah. Dengan memperhatikan hal tersebut, ada beberapa rumus yang kemungkinan cocok untuk digunakan di wilayah Bali. Rumus empiris atenuasi oleh McGuire (1977) yang ditulis dalam persamaan 1 berikut:

$$PGA = \frac{472 * 10^{0.278M}}{(R + 25)^{1.301}} \tag{1}$$

di mana PGA adalah percepatan tanah maksimum, gal, M adalah magnitudo (Ms), R adalah jarak antara hiposenter gempa dan titik observasi, km, sering digunakan untuk menghitung nilai PGA di zona gempabumi dalam. Kemudian, rumus empiris atenuasi oleh (Donovan, 1973) yang ditulis dalam persamaan 2 untuk menghitung nilai PGA di zona subduksi:

$$PGA = \frac{1080 * e^{0.5M}}{(R + 25)^{1.32}} \tag{2}$$

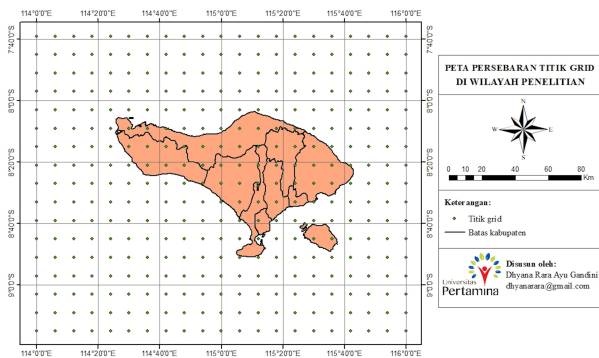
Rumus empiris atenuasi oleh Esteva dan Villaverde (1973) ditulis dalam persamaan 3 untuk wilayah yang sering terjadi gempa bumi dangkal

$$PGA = \frac{5600 * e^{0.8M}}{(R + 25)^2} \tag{3}$$

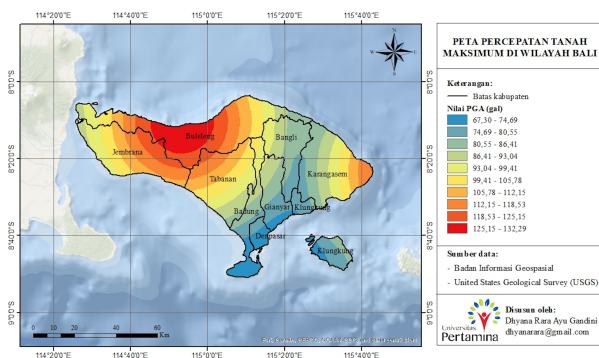
Untuk menentukan rumus empiris atenuasi terbaik di antara ketiga rumus tersebut, dilakukan perbandingan antara nilai PGA yang diperoleh dari data rekaman accelerograph milik BMKG di wilayah Bali dengan nilai PGA hasil perhitungan menggunakan ketiga rumus atenuasi tersebut. Data rekaman accelerograph yang digunakan sebagai acuan adalah data rekaman percepatan gelombang gempabumi di wilayah Bali dari tahun 2012–2016 dengan magnitudo ≥ 4,5 Mb.

Seperti salah satu data rekaman gempabumi pada Tabel 2, suatu gempa akan menghasilkan amplitudo maksimum untuk masing-masing komponen Z, N, dan E jika berhasil direkam oleh accelerograph yang terdapat pada stasiun BMKG di wilayah Bali. Nilai paling besar akan digunakan sebagai nilai PGA observasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 dengan angka bercetak tebal untuk selanjutnya dibandingkan dengan nilai PGA kalkulasi yang menggunakan tiga rumus empiris atenuasi. Dari nilai PGA observasi dan kal-





Gambar 4. Peta persebaran titik grid di wilayah penelitian

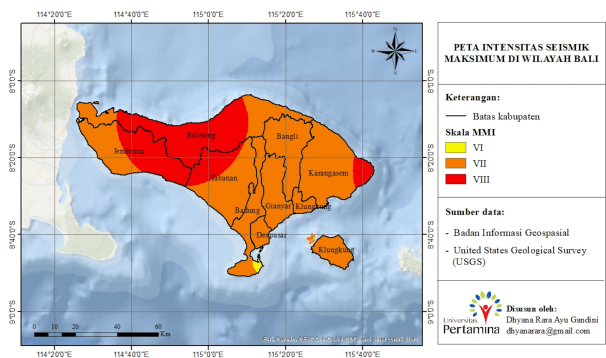


Gambar 5. Peta percepatan tanah maksimum di wilayah Bali

kulasi, dihitung nilai error-nya menggunakan *Mean Absolute Error*. Meskipun pada Tabel 3 nilai rata-rata error rumus atenuasi *Esteva dan Villaverde (1973)* adalah yang terkecil, hasil perbandingan nilai PGA observasi dan kalkulasi seluruh data rekaman gempa bumi oleh *accelerograph BMKG* menunjukkan bahwa rumus atenuasi *McGuire (1977)* menghasilkan nilai PGA kalkulasi paling mirip dengan nilai PGA observasi karena memiliki rata-rata error paling kecil. Setelah memperoleh rumus atenuasi terbaik, hal berikutnya yang dilakukan adalah pembuatan peta percepatan tanah maksimum. Peta ini dibuat dari hasil interpolasi Kriging menggunakan nilai PGA maksimum di 357 titik grid dengan jarak sebesar  $0,1^\circ$  (Gambar 4). Nilai PGA maksimum untuk setiap titik dicari menggunakan rumus atenuasi *McGuire (1977)* berdasarkan data enam gempa bumi merusak di wilayah Bali dalam sejarah, yaitu yang terjadi di tahun 1976, 1977, 1979, 2004, dan 2017 (Tabel 1) karena memiliki dampak bencana yang paling besar di wilayah Bali.

Dari Gambar 5 di atas, dapat dilihat bahwa nilai PGA maksimum di wilayah Bali berkisar antara 67,3 hingga 132,29 gal. Berdasarkan peta kontur PGA maksimum untuk daerah Bali tersebut, terlihat bahwa nilai PGA tinggi berada di wilayah sebagian Buleleng (Bali Utara) dan sebagian Karangasem (Bali Timur). Hal ini dikarenakan secara historis pernah terjadi gempa besar di wilayah Seririt (Buleleng) dan Karangasem. Gempa-gempa ini dipengaruhi oleh aktivitas patahan aktif yang berada di wilayah Laut Bali. Ini menunjukkan bahwa potensi bahaya gempa bumi di wilayah Bali utara relatif lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah Bali selatan.

Dari nilai PGA yang diperoleh, dilakukan perhitungan



Gambar 6. Peta intensitas seismik maksimum di wilayah Bali

skala MMI pada setiap titik grid yang sama menggunakan persamaan 4 berikut:

$$MMI = 3.00 \log PGA + 1.50 \quad (4)$$

Setelah itu, dilakukan interpolasi Kriging dan ditampilkan ke dalam peta intensitas seismik maksimum di wilayah Bali seperti pada Gambar 6 di atas. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa intensitas seismik maksimum di wilayah Bali berkisar antara skala VI hingga skala VIII. Setelah diperhatikan, wilayah dengan nilai PGA tinggi juga akan memiliki skala intensitas seismik yang tinggi. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa Kabupaten Buleleng dan sekitarnya dan bagian paling timur dari Kabupaten Karangasem dapat terkena dampak paling parah jika terjadi gempa bumi merusak, sedangkan daerah paling selatan dari Pulau Bali memiliki dampak paling kecil jika terjadi gempa bumi merusak.

#### 4 KESIMPULAN

Tipe gempa bumi di wilayah Bali didominasi oleh gempa bumi dangkal hingga menengah. Hal ini disebabkan oleh keberadaan Pulau Bali yang terletak di antara zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Eurasia serta adanya struktur back-arc thrust. Berdasarkan hal tersebut maka digunakan 3 rumus empiris atenuasi yaitu *McGuire (1977)*; *Donovan (1973)*, dan *Esteva dan Villaverde (1973)*. Rumus empiris atenuasi oleh *McGuire (1977)* memberikan hasil yang optimal di wilayah Bali karena menghasilkan nilai error terkecil. Hasil akhir pengolahan data menghasilkan peta percepatan tanah maksimum dan peta intensitas seismik maksimum. Berdasarkan kedua peta tersebut, dapat ditarik kesimpulan bahwa Kabupaten Buleleng dan sekitarnya serta bagian paling timur Kabupaten Karangasem merupakan wilayah yang berpotensi terkena dampak paling parah jika terjadi gempa bumi merusak. Sementara itu daerah paling selatan dari Pulau Bali memiliki dampak paling ringan jika terjadi gempa bumi yang bersifat merusak.

#### 5 UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang telah memberikan akses data katalog gempa sehingga penelitian ini berjalan dengan lancar.



**Tabel 2.** Salah satu data gempabumi yang direkam oleh accelerograph milik BMKG di wilayah Bali

Gempa Denpasar Bali, 22 November 2012, 09:09:32 UTC						
Lat: 9.38 LS, Lon: 115.01 BT, Mag: 5.2 SR, Depth: 35 Km, 84 Km BD Denpasar						
Stasiun	Kode	LAT	LON	Z (gal)	N (gal)	E (gal)
Balai Besar Wil III Denpasar	DEBI	-8.74	115.18	9.74	12.55	23.75
Sta Met Ngurah Rai Denpasar	DEMO	-8.74	115.18	11.95	17.13	19.49
Denpasar	DNP	-8.68	115.21	8.39	22.61	13.22
Singaraja Bali	SRBI	-8.08	115.21	0.29	0.56	0.59

**Tabel 3.** Perhitungan nilai error PGA setiap rumus atenuasi untuk kejadian gempabumi di Tabel 2

Stasiun	Kode	PGA obs	Mcguire		Donovan		Esteva Villavende	
			PGA kal	Abs error	PGA kal	Abs error	PGA kal	Abs error
Balai Besar Wil III Denpasar	DEBI	23.75	17.02	0.28	19.51	0.18	4.99	0.79
Sta Met Ngurah Rai Denpasar	DEMO	19.5	17.1	0.12	19.59	0	5.02	0.74
Denpasar	DNP	22.61	15.71	0.3	17.98	0.2	4.48	0.8
Singaraja Bali	SRBI	0.59	8.95	14.18	10.16	16.23	2.05	2.48
Rata-rata absolut error			3.72		4.15		1.2	

Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Sandy K. Suhardja, Bapak M. Ramdhan, para Dosen, dan rekan lainnya yang selalu memberi dukungan positif sehingga penelitian ini dapat terwujud.

log gempabumi signifikan dan merusak tahun 1821-2018. *Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.*

**Pustaka**

Cotton, F., Scherbaum, F., Bommer, J.J. dan Bungum, H. (2006): Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: Application to central europe and rock sites. *Journal of Seismology*, **10**(2), 137–156.

Darsono, R., Sukarasa, I.K. dan Setiawan, Y.A. (2014): Analisa tingkat risiko bencana gempa bumi di wilayah bali. *Skripsi, Program Studi Fisika FMIPA Universitas Udayana, Jimbaran.*

Donovan, N.C. (1973): A statistical evaluation of strong motion data: Including the February 9, 1971 San Fernando earthquake, vol. 1. Proceedings of Fifth World Conference on Earthquake Engineering.

Esteva, L. dan Villaverde, R. (1973): Seismic risk, design spectra and structural reliability. *Proceedings of Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, vol. 2, 2586–2596.

McGuire, R.K. (1977): Seismic design spectra and mapping procedures using hazard analysis based directly on oscillator response. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **5**(3), 211–234.

Pawirodikromo, W. (2012): Seismologi teknik and rekayasa kegempaan.

Rasimeng, S. dan Riyanti, A. (2019): Analisis zona bahaya gempabumi berdasarkan metode deterministik dan pendekatan geomorfologi kota padang sumatera barat. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, **5**(2), 15–25.

Setiyono, U., Gunawan, I. dan Priyobudi (2019): Kata-