

Penentuan Parameter Seismisitas *a-value* dan *b-value* serta Percepatan Tanah Maksimum (PGA) Sebelum dan Sesudah Gempa Ambon 2019 Menggunakan Metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA)

Indah Putri Utami, Dwi Pujiastuti*

Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 08 Agustus 2024
Direvisi: 16 Agustus 2024
Diterima: 19 September 2024

Kata kunci:

a-value
b-value
PGA
PSHA

Keywords:

a-value
b-value
PGA
PSHA

Penulis Korespondensi:

Dwi Pujiastuti
Email: dwipujiastuti@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Salah satu wilayah di Indonesia yang sering mengalami aktivitas seismik adalah Maluku. Pada 26 September 2019, gempa bumi besar mengguncang kota Ambon dan sekitarnya, menyebabkan kerusakan signifikan dan menimbulkan dampak luas bagi masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai parameter seismisitas, khususnya *b-value* (tingkat kerapuhan batuan) dan *a-value* (indeks seismisitas) serta melihat apakah terdapat perubahan nilai *peak ground acceleration* (PGA) untuk wilayah Maluku sebelum dan sesudah terjadinya gempa Ambon tahun 2019. Data seismik yang digunakan pada penelitian ini berasal dari katalog USGS yang direkam dari tahun 2000 hingga 2022. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa nilai dari parameter seismisitas *b-value* dan *a-value* wilayah Maluku secara keseluruhan mengalami penurunan setelah terjadinya gempa Ambon 2019. Sebelum gempa Ambon 2019, *b-value* diperoleh sebesar 1,15 dengan *a-value* sebesar 8,32. Sedangkan setelah terjadinya gempa Ambon 2019, *b-value* diperoleh 0,91 dengan *a-value* sebesar 6,9. Selain itu, diperoleh pula nilai PGA untuk wilayah Maluku sebesar 1,25g. Hasil ini memberikan kesimpulan bahwa wilayah Maluku termasuk pada zona dengan bahaya gempa menengah dengan tingkat kerusakan akibat gempa termasuk dalam kategori VI skala MMI, yakni kerusakan ringan pada bangunan seperti retak rambut pada dinding, genteng bergeser ke bawah dan sebagian berjatuh.

*One region in Indonesia that experiences frequent seismic activity is Maluku. On September 26, 2019, a large earthquake shook the city of Ambon and its surroundings, causing significant damage and causing widespread impacts on the community. This study aims to determine the value of seismicity parameters, especially *b-value* (rock fragility level) and *a-value* (seismicity index) and see if there are changes in peak ground acceleration (PGA) values for the Maluku region before and after the 2019 Ambon earthquake. The seismic data used in this study comes from the USGS catalog recorded from 2000 to 2022. The results of this study show that the values of the seismicity parameters *b-value* and *a-value* of the Maluku region as a whole decreased after the 2019 Ambon earthquake. Before the 2019 Ambon earthquake, the *b-value* was 1.15 with an *a-value* of 8.32. Meanwhile, after the 2019 Ambon earthquake, the *b-value* was 0.91 with an *a-value* of 6.9. In addition, the PGA value for the Maluku region was also obtained at 1.25g. These results provide the conclusion that the Maluku region is included in the zone with medium earthquake hazard with the level of damage caused by the earthquake included in category VI of the MMI scale, namely minor damage to buildings such as hair cracks on the walls, roof tiles shifted down and some fell.*

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai bagian dari Cincin Api Pasifik, merupakan salah satu negara dengan aktivitas seismik yang tinggi. Keberadaan berbagai sesar aktif dan zona subduksi di wilayah ini menjadikannya rentan terhadap bencana gempa bumi. Salah satu wilayah yang sering mengalami aktivitas seismik di Indonesia adalah Maluku, yang terletak di bagian timur Indonesia (Sianipar dkk., 2019). Pada 26 September 2019, gempa bumi besar mengguncang kota Ambon dan sekitarnya, menyebabkan kerusakan signifikan dan menimbulkan dampak luas bagi masyarakat (BMKG, 2019).

Untuk memahami potensi bahaya gempa di suatu wilayah, parameter seismisitas *a-value* dan *b-value* serta percepatan tanah maksimum (PGA) merupakan indikator penting dalam penilaian bahaya seismik. *a-value* dan *b-value* memberikan informasi tentang frekuensi gempa berdasarkan magnitudo, sedangkan PGA menggambarkan intensitas getaran tanah yang mungkin dirasakan selama gempa bumi serta kerusakan yang dapat ditimbulkannya (Setiawan dkk., 2023). Perhitungan nilai PGA pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode *probabilistic seismic hazard analysis* (PSHA) yang sering digunakan untuk mengestimasi risiko gempa bumi dengan mempertimbangkan berbagai skenario gempa dan karakteristik seismik yang relevan. PSHA memberikan pendekatan berbasis probabilitas untuk menilai kemungkinan terjadinya gempa bumi dengan intensitas tertentu dalam periode waktu tertentu (Ghassabian dkk., 2018).

Madlazim (2013) dalam risetnya mengungkapkan bahwa pendekatan secara statistik menggunakan *b-value* dengan formula dari Gutenberg-Richter dapat diterapkan dalam menganalisis dan memprediksi gempa bumi yang akan datang sehingga *b-value* dapat digunakan sebagai *precursor* gempa bumi. Nilai *b-value* memberikan korelasi pada tingkat *stress* yang terjadi, dimana nilainya bergantung pada karakteristik tektonik suatu wilayah. Nilai *b-value* yang relatif rendah, berhubungan dengan tingkat *stress* yang tinggi dan berpeluang terjadinya gempa besar. Namun sebaliknya, nilai *b-value* yang tinggi, berhubungan dengan tingkat *stress* yang rendah (Alabi dkk., 2012).

Irsyam dkk., (2020) melakukan penelitian dalam memetakan distribusi nilai PGA di seluruh wilayah Indonesia menggunakan metode PSHA sebagai bahan revisi dari data PUSGEN 2010, dan mendapatkan nilai PGA wilayah Maluku berkisar antara 0,6g – 0,8g dengan probabilitas terlampaui sebesar 2% dalam 50 tahun. Hal yang sama juga dilakukan oleh Setiawan (2023) dengan nilai PGA yang diperoleh sebesar 1,0g – 1,2g. Namun, kedua penelitian ini tidak menjelaskan bagaimana pola distribusi parameter seismisitas yang mengontrol daerah penelitian, sehingga sulit menentukan wilayah mana yang memiliki potensi tinggi mengalami kerusakan saat terjadi gempa besar seperti yang pernah terjadi di Ambon 2019 silam.

Dalam penelitian ini, fokus utama adalah menganalisis *b-Value* dan PGA di wilayah Maluku sebelum dan sesudah terjadinya gempa Ambon 2019. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan dalam pola seismik dan dampaknya terhadap bahaya gempa di wilayah tersebut. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman bahaya seismik di Maluku dan mendukung upaya peningkatan kesiapsiagaan serta pengurangan risiko bencana di wilayah ini.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang bersumber dari katalog gempa USGS (*United States Geological Survey*) yang direkam mulai dari tahun 2000-2022, magnitudo berkisar antara 4.0 SR – 9.0 SR, kedalaman $h \leq 360 \text{ km}$, dengan jumlah data yang berhasil direkam pada penelitian ini adalah sebanyak 4.739 data.

Data katalog gempabumi yang diperoleh dari USGS terdiri atas skala magnitudo badan (M_b) dan magnitudo permukaan (M_s), sehingga perlu dilakukan konversi magnitudo ke dalam skala magnitudo momen (M_w). Hal ini karena skala magnitudo momen (M_w) mampu mengukur total energi yang dilepaskan oleh gempa, sehingga tidak mengalami saturasi. Konversi skala magnitudo untuk wilayah Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Konversi Skala Magnitudo

Konversi	Range Magnitudo
$M_w = 1,0107M_s + 0,0801$	$3,7 \leq M_s \leq 8,2$
$M_w = 0,6016M_b + 2,476$	$2,8 \leq M_b \leq 6,1$
$M_w = 0,9239M_b + 0,5671$	$6,2 \leq M_b \leq 8,7$
$M_w = 0,74736M_l + 1,0651$	$3,0 \leq M_l \leq 7,5$

(Sumber: Irsyam, 2020)

Setelah melakukan konversi skala magnitudo, data dipisahkan menjadi data sebelum gempa pada September 2019, dan data setelah gempa pada September 2019. Data yang telah dikonversi dikelompokkan berdasarkan sumber seismiknya, dimana pada penelitian ini sumber seismik gempa terbagi atas zona subduksi, *shallow crustal fault*, *background*, dan *benioff*. Masing-masing data kemudian dilakukan *declustering* sehingga data yang tersisa hanyalah gempa utama saja. Selanjutnya ditentukan nilai parameter seismisitas berupa *a-value* dan *b-value* sebelum dan sesudah terjadinya gempa Ambon 2019 serta nilai PGA wilayah Maluku yang ditimbulkan oleh gempa.

Tingkat seismisitas suatu wilayah dapat diketahui dengan pendekatan empiris Gutenberg-Richter yang menunjukkan hubungan frekuensi gempa dengan magnitudo gempa. Hubungan ini menurut Gutenberg dan Richter (1944) dinyatakan pada Persamaan (1).

$$\log N(M - M_{\min}) = a - bM \quad (1)$$

Dimana $N(M)$ adalah jumlah kumulatif gempa bumi, M merupakan magnitudo yang digunakan dalam penelitian, *a-value* dan *b-value* adalah konstanta dalam parameter kegempaan. Nilai *a* merupakan konstanta seismisitas yang nilainya berbanding lurus dengan nilai *b* yang merupakan konstanta distribusi tegangan. Gempa bumi dengan magnitudo yang kecil lebih sering terjadi dibandingkan gempa bumi dengan magnitudo besar, hal ini dipengaruhi oleh tingkat kerapuhan batuan dan juga aktivitas seismik di wilayah tersebut.

Nilai indeks seismisitas (*a-value*) dan kerapuhan batuan (*b-value*) pada relasi Gutenberg-Richter dapat ditentukan dengan menggunakan metode Maximum Likelihood yang dinyatakan dalam Persamaan (2) dan Persamaan (3), dimana metode ini memiliki keunggulan untuk menghitung secara statistik nilai parameter keaktifan gempa bumi (Shepp & Vardi, 1982).

$$a = \log N(M \geq M_0) + \log(b \ln 10) + M_0 b \quad (2)$$

$$\hat{b} = \frac{\log e}{(M - M_0)} \quad (3)$$

dengan M_0 adalah magnitudo terkecil dan \bar{M} adalah magnitudo rata-rata pada wilayah penelitian.

Adapun menurut Mc Guirre (1963) dalam Leviana dkk., (2017) nilai PGA dinyatakan dengan persamaan matematis yang dapat dilihat pada Persamaan 3.

$$\alpha = 472,3 \times 10^{0,278M} \times (R + 25)^{-1,301} \quad (4)$$

dengan α adalah percepatan gerakan tanah (g), M adalah magnitudo gelombang permukaan (M_w) dan R adalah jarak hiponseter.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Perbandingan *a - Value* Sebelum dan Sesudah Gempa Ambon 2019

Nilai sebaran indeks seismisitas (*a-value*) untuk wilayah kepulauan Maluku secara keseluruhan adalah sebesar 8,32 sebelum terjadinya gempa Ambon 2019. Sedangkan setelah terjadinya gempa Ambon 2019, nilai *a-value* untuk wilayah Maluku secara keseluruhan adalah sebesar 6,9. Dari hasil ini, terjadi penurunan nilai *a-value* setelah terjadinya gempa Ambon 2019. Hal ini karena sebelum gempa besar terjadi, daerah seismik akan mengalami banyak gempa kecil sebagai pelepasan awal tegangan dalam batuan. Inilah mengapa *a-value* sebelum terjadinya gempa Ambon lebih tinggi. Setelah terjadinya gempa besar, banyak dari tegangan batuan yang dilepaskan, sehingga frekuensi gempa kecil menurun,

yang berdampak pada penurunan nilai *a-value*. Interval nilai *a-value* pada penelitian ini sebanding dengan yang dihasilkan oleh Setiawan (2023) dimana *a-value* pada zona 2 (wilayah Maluku Selatan) berkisar antara 6 – 12.

Adapun *a-value* untuk masing-masing zona sumber seismik sebelum dan sesudah terjadinya gempa Ambon 2019 dapat dilihat pada Tabel 3 dimana *a-value* mengalami peningkatan di semua zona sumber seismik setelah terjadinya gempa Ambon 2019. Peningkatan *a-value* ini menunjukkan masing-masing zona sumber seismik mengalami peningkatan aktivitas seismik yang ditandai dengan meningkatnya jumlah gempa bumi yang terjadi. Hal ini karena tekanan dalam kerak bumi dilepaskan secara lebih sering melalui gempa-gempa kecil yang menjadi mekanisme alamiah untuk mengurangi potensi gempa besar dengan melepaskan energi secara bertahap. Setelah gempa besar seperti yang terjadi di Ambon pada tahun 2019, wilayah tersebut akan mengalami proses penyesuaian atau pemulihan. Gempa besar dapat memicu aktivitas seismik di patahan-patahan yang berdekatan karena sedang dalam proses penyesuaian kembali ke keadaan yang lebih stabil yang berdampak pada peningkatan *a-value* (Bommer, 2022).

Tabel 2 Parameter *a-value* zona sumber seismik sebelum dan sesudah gempa Ambon 2019

Zona Sumber Seismik	<i>a-value</i>		<i>a-value</i> Annual	
	Sebelum	Setelah	Sebelum	Setelah
<i>Background</i>	11,90	12,40	10,60	11,10
<i>Shallow Crustal Fault</i>	7,53	8,05	6,25	6,70
Subduksi	10,90	11,20	9,65	9,87
<i>Benioff</i>	9,83	11,10	8,54	9,78

3.2 Perbandingan *b – Value* Sebelum dan Sesudah Gempa Ambon 2019

Tingkat kerapuhan batuan (*b-value*) wilayah Maluku secara keseluruhan sebelum dan sesudah gempa Ambon 2019 diperoleh sebesar 1,15 dan 0,91. Setelah terjadinya gempa Ambon 2019, nilai ini tergolong rendah sebab diperoleh $b \leq 1$ (Linda dkk., 2019). Rendahnya *b-value* setelah terjadinya gempa Ambon 2019 menandakan terjadi peningkatan aktivitas gempa dengan magnitudo yang lebih besar dibanding sebelumnya.

Adapun *b-value* untuk masing-masing zona sumber seismik sebelum dan sesudah terjadinya gempa Ambon 2019 dapat dilihat pada Tabel 4 dimana *b-value* untuk masing-masing zona sumber seismik setelah terjadinya gempa Ambon 2019 justru mengalami peningkatan dibanding sebelum terjadinya gempa Ambon 2019. Nilai ini tergolong tinggi sebab $b > 1$. Hal ini menunjukkan akumulasi *stress* yang dialami batuan bawah permukaan di wilayah Maluku relatif rendah, akumulasi energi seismik juga rendah jika dibandingkan dengan sebelum terjadinya gempa Ambon 2019. Ini berarti lapisan batuan geologi tidak membutuhkan banyak waktu untuk melepas energi seismik yang tersimpan melalui gempa tektonik (Risanti & Prastowo, 2021).

Tabel 3 Parameter *b – Value* zona sumber seismik sebelum dan sesudah gempa Ambon 2019

Zona Sumber Seismik	<i>b-value</i>	
	Sebelum	Sesudah
<i>Background</i>	2,02	2,11
<i>Shallow Crustal Fault</i>	1,15	1,21
Subduksi	1,64	1,68
<i>Benioff</i>	1,45	1,68

Meningkatnya *b-value* untuk masing-masing zona sumber seismik salah satunya disebabkan oleh heterogenitas seismik pada wilayah Maluku. Heterogenitas seismik merujuk pada variasi dalam karakteristik seismik di berbagai zona sumber seismik.

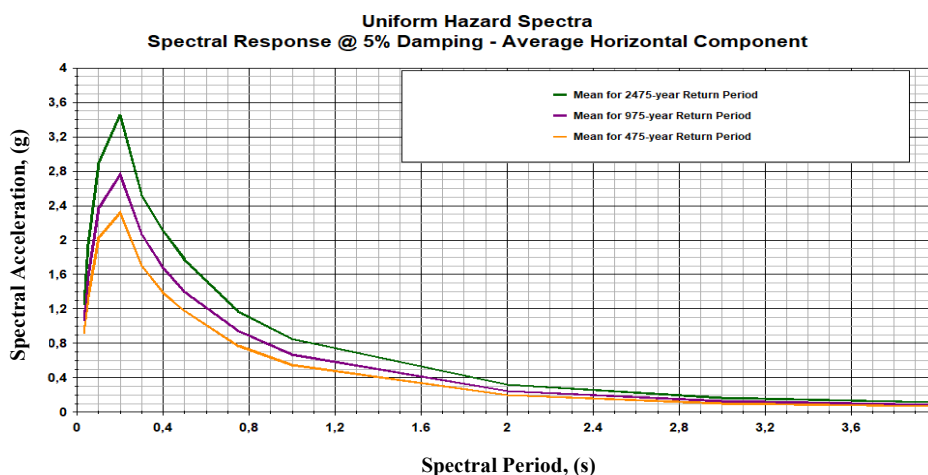
Maluku berada di zona konvergensi antara Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik. Interaksi antara lempeng-lempeng ini menciptakan berbagai jenis patahan dan zona subduksi yang menghasilkan aktivitas seismik yang berbeda. Maluku juga merupakan wilayah dengan berbagai jenis patahan yang kompleks, termasuk patahan sesar mendatar, sesar naik, dan sesar turun,

yang semuanya memiliki karakteristik gempa yang berbeda. Hal inilah yang menyebabkan Maluku termasuk wilayah dengan heterogenitas seismik yang tinggi (Setiawan dkk., 2023).

Ambon merupakan wilayah yang dibentuk oleh jenis batuan vulkanik, dimana salah satu karakteristik dari batuan ini adalah memiliki tingkat kerapuhan yang tinggi (Fadilah & Ronoatmojo, 2022). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang telah kita dapat, dimana Ambon pada penelitian ini kita kategorikan ke dalam zona *shallow crustal fault* yang berdasarkan data pada Tabel 4 termasuk pada wilayah dengan *b-value* tergolong tinggi. Wilayah dengan *b-value* yang tinggi memiliki tingkat kerapuhan batuan yang tinggi sehingga *stress* yang disimpan akan lebih mudah dilepaskan dalam bentuk gelombang seismik ke permukaan sebab struktur batumannya mudah bergeser.

3.3 Percepatan Tanah Maksimum (PGA)

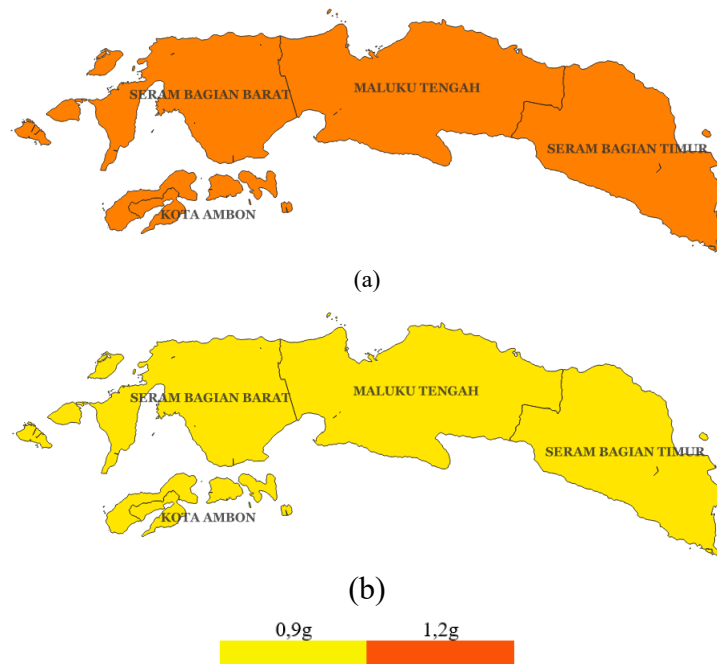
Berdasarkan Analisis respon spektra yang telah dilakukan, diperoleh kurva UHS (*Uniform Hazard Spectra*) untuk masing-masing probabilitas terlampaui yang dapat dilihat pada Gambar 1. Garis hijau mewakili probabilitas terlampaui sebesar 2% dalam 50 tahun. Garis jingga mewakili probabilitas terlampaui sebesar 10% dalam 50 tahun.



Gambar 1 Kurva *Uniform Hazard Spectra*

Berdasarkan pengolahan data yang telah dilakukan, diperoleh nilai PGA sebesar 1,25g untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun dan 0,9g untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun. Tidak terdapat variasi nilai PGA pada wilayah penelitian, yang artinya PGA bernilai sama untuk seluruh wilayah penelitian, baik sebelum maupun setelah gempa Ambon 2019. Nilai ini tidak jauh berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Irsyam dkk., (2020) yang memetakan distribusi nilai PGA wilayah Indonesia, dimana Maluku hanya didefinisikan dalam satu kotak warna, yang berarti nilai PGA pada wilayah tersebut bernilai sama yakni sebesar 0,6g – 0,8g, serta Setiawan dkk., (2023) dalam penelitiannya yang memetakan distribusi nilai PGA wilayah Maluku sebesar 1,0g – 1,2g untuk probabilitas terlampaui sebesar 2% dalam 50 tahun. Perbedaan nilai PGA yang diperoleh pada penelitian ini dan penelitian sebelumnya disebabkan oleh perbedaan luas cakupan daerah dan waktu perekaman gempa yang diolah. Peta nilai PGA pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.

Percepatan tanah di wilayah Maluku tergolong tinggi. Nilai ini termasuk pada skala MMI golongan VI dengan tingkat kerusakan ringan pada bangunan seperti retak rambut pada dinding, genteng bergeser ke bawah dan sebagian berjatuhan (BMKG, 2024). Nilai PGA yang diperoleh pada penelitian ini sama untuk seluruh wilayah penelitian, yang berarti tingkat kerusakan yang ditimbulkan akibat gempa merata di semua wilayah Maluku.



Gambar 2 Peta distribusi PGA (a) Probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (b) probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh bahwa nilai dari parameter seismisitas b -value dan a -value wilayah Maluku secara keseluruhan mengalami penurunan setelah terjadinya gempa Ambon 2019. Sebelum gempa Ambon 2019, b -value diperoleh sebesar 1,15 dengan a -value sebesar 8,32. Sedangkan setelah terjadinya gempa Ambon 2019, b -value diperoleh 0,91 dengan a -value sebesar 6,9. Menurunnya b -value setelah terjadinya gempa Ambon 2019 menandakan terjadi peningkatan aktivitas gempa dengan magnitudo yang lebih besar dibanding sebelumnya. Sedangkan penurunan a -value setelah terjadinya gempa Ambon 2019 menandakan terjadinya pelepasan tegangan batuan yang menyebabkan frekuensi gempa kecil menurun. Selain itu, diperoleh nilai PGA sebesar 1,25g untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun dan 0,9g untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun. Nilai PGA ini menunjukkan wilayah Maluku termasuk pada zona dengan bahaya gempa menengah dimana tingkat kerusakan akibat gempa termasuk dalam kategori VI skala MMI, yakni kerusakan ringan pada bangunan seperti retak rambut pada dinding, genteng bergeser ke bawah dan sebagian berjatuhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alabi, A. A., Akinyemi, O. D., & Adewale, A. (2012). Seismicity Pattern in Southern Africa from 1986 to 2009. *Earth Science Research*, 2(2). <https://doi.org/10.5539/esr.v2n2p1>
- BMKG. (2019). *Ulasan Guncangan Tanah Akibat Gempabumi di Ambon Maluku 26 September 2019*. BMKG. <https://www.bmkg.go.id/seismologi-teknik/ulasan-guncangan-tanah.bmkg?p=ulasan-guncangan-tanah-akibat-gempabumi-di-ambon-maluku-26-september-2019&tag=ulasan-guncangan-tanah&lang=ID>
- Bommer, J. J. (2022). Earthquake hazard and risk analysis for natural and induced seismicity : towards objective assessments in the face of uncertainty. In *Bulletin of Earthquake Engineering* (Vol. 20, Nomor 6). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01357-4>
- Fadilah, M. I., & Ronoatmojo, S. (2022). Analisis Tingkat Aktivitas Seismik Dan Kerapuhan Batuan Di Dataran Papua Dan Sekitarnya Pada Kedalaman 0-60 Km Analysis of Seismic Activity and Rock Friability Level in the Papua Land and Surroundings At a Depth of 0-60 Km. *Journal Of*

- Geoscience Engineering & Energy (JOGEE)*, III, 100–108. <https://trijurnal.lemlit.trisakti.ac.id/jogee>
- Ghassabian, N. N., Khatib, M. M., Nazari, H., & Heyhat, M. R. (2018). Regional variations and earthquake frequency–magnitude distribution and fractal dimension in the North of Central-East Iran Blocks (NCEIB). *Arabian Journal of Geosciences*, 11(11). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3506-6>
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4). <https://doi.org/10.1785/bssa0340040185>
- Irsyam, M., Cummins, P. R., Asrurifak, M., Lutfi, F., Natawidjaja Hilman, D., Widiyantoro, S., Meilano, I., Triyoso, W., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Ridwan, M., Hanifa, N. R., & Syahbana, A. J. (2020). *Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia*. 10. <https://doi.org/10.1177/8755293020951206>
- Leviana, M., Syafriani, & Sabarani, A. Z. (2017). Estimasi Nilai Percepatan Tanah Maksimum Wilayah Sumatera Barat Berdasarkan Skenario Gempabumi M8.8 SR Menggunakan Rumusan Empiris Mc. Guire (1963) dan Donovan (1973). *Pillar of Physics*, 10(1963), 55–62.
- Linda, Ihsan, N., & Palloan, P. (2019). Analisis Distribusi Spasial Dan Temporal Seismotektonik Berdasarkan Nilai *b-Value* Dengan Analysis Of Spatial And Temporal Distribution Of Seismotectonics Based On *b-Value* Using The Likelihood Method On Java Pendahuluan Gempa Bumi Sering Melanda Indonesia. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, April, 16–31.
- Madlazim, M. (2013). Kajian Awal Tentang *b Value* Gempa Bumi di Sumatera. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, 3(1). <https://doi.org/10.26740/jpfa.v3n1.p41-46>
- Risanti, H., & Prastowo, T. (2021). Estimasi Parameter *a-Value* dan *b-Value* Untuk Analisis Studi Seismisitas dan Potensi Bahaya Bencana Gempa Tektonik di Wilayah Maluku Utara. *Inovasi Fisika Indonesia*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.26740/ifi.v10n1.p1-10>
- Setiawan, Y., Fathani, T. F., & Faris, F. (2023). Seismic Hazard Assessment in Maluku Province Using PSHA. *INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 19(2), 223–232. <https://doi.org/10.21831/inersia.v19i2.66790>
- Shepp, L. A., & Vardi, Y. (1982). Maximum Likelihood Reconstruction for Emission Tomography. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1(2). <https://doi.org/10.1109/TMI.1982.4307558>
- Sianipar, D., Halauwet, Y., Daryono, & Karnawati, D. (2019). Studi Sumber Gempa Ambon 26 September 2019 Mw 6,5. *Preprints, September*, 1–20. <https://osf.io/preprints/inarxiv/6e9nm/>