

Sebaran gempa utama berdasarkan magnitudo dan kedalaman di wilayah Mamuju dan sekitarnya

Wisnu Erlangga^{1,*}, Mochamad Teguh², Malik Mushthofa³, Imam Trianggoro Sapurto⁴, Gunawan Setiadi⁵

^{1,5}Badan Nasional Penanggulangan Bencana
^{2,3}Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia
⁴Prodi Diploma 4 Teknik Sipil Politeknik Saint Paul Sorong

Article Info

Article history:

Received: Nov 8, 2022
Revised: Dec 12, 2022
Accepted: Dec 14, 2022
Available online:
Dec 20, 2022

Keywords:

Main earthquake
Declustering
Earthquake magnitude
Earthquake depth
Mamuju

Abstract

Sulawesi is one of Indonesia's large islands with a high vulnerability to earthquakes due to its geographical location, which lies between the confluence of tectonic plates and several active faults. The earthquake events' intensity was relatively high with small to large magnitudes. One area recently hit by a large earthquake that caused material losses and casualties was found in Mamuju. Given this condition, it is essential to determine the latest seismicity mitigation in the Mamuju area and its surroundings to look at the distribution of the mainshock based on the magnitude and depth of the earthquake. Earthquakes that occur in a particular area and for a certain period can describe the concentration of earthquake activity. The earthquake data activity used in this study is to find earthquake data for the period 1960-2021, followed by a declustering process which is carried out to separate the mainshock from the aftershocks. Separating the mainshock from the aftershocks is performed using the time window and distance windows criteria. Based on the analysis, it was found that the number of mainshocks that occurred in the Mamuju region was 20.11% of the total earthquake events that occurred (5366 earthquake event data) with a dominance of moderate to large magnitude ($4 < M < 6$). Meanwhile, based on the depth of the earthquake, 54.19% of the earthquake event were shallow earthquakes ($0 \text{ km} < D < 60 \text{ km}$). This can be used as a basis for updating existing earthquake maps and for paying attention to the application of earthquake-resistant building regulations and building construction permits in the Mamuju area, considering that the vulnerability to earthquakes in this area is relatively high.

Corresponding Author:

Wisnu Erlangga
wisnuuangga@gmail.com

Copyright © 2022 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Latar Belakang

Salah satu fenomena alam yang sering terjadi di Indonesia ialah gempa bumi. Hal ini didasari oleh letak wilayah Indonesia yang berada di atas *ring of fire* (Bock et al, 1996). Dengan pergerakan tiga lempeng besar yang mengapit Indonesia, memunculkan gunung-gunung api dan aktifitas tektonik yang cukup signifikan (Sulistiyanto, 2020 dan Aldiamar,

2007). Selain itu, luasnya wilayah Indonesia yang terdiri dari kepulauan dan keadaan dan kondisi *seismic* yang berbeda-beda tiap wilayahnya menjadikan setiap wilayah memiliki tingkat risiko yang berbeda-beda. Hal ini menyebabkan gempa bumi menjadi kejadian alam yang paling banyak merusak dan merugikan di Indonesia karena kerawanan tingkat daerah berbeda-beda (Milson et al, 1992). Secara umum pelat

tektonik di Indonesia dibagi menjadi dua bagian yaitu barat dan timur. Bagian timur dengan batas pelat tektonik yang rumit dan bagian barat dengan batas pelat tektonik yang sederhana dan mudah dikenal.

Intensitas gempa bumi yang terjadi di Indonesia setiap tahunnya terus meningkat. Ini yang menyebabkan perlunya melakukan penelitian secara ilmiah yang mengidentifikasi daerah-daerah yang mempunyai risiko terjadinya gempa bumi berdasarkan kejadian-kejadian gempa yang pernah terjadi (Widodo, 2012). Penelitian ini bertujuan mengetahui konsentrasi aktifitas gempa bumi yang terjadi di Mamuju dan sekitarnya dengan melihat sebaran gempa utama berdasarkan magnitudo dan kedalaman.

Salah satu pulau di Indonesia yang memiliki potensi gempa bumi yang tinggi ialah Pulau Sulawesi. Dalam beberapa tahun terakhir terjadi kejadian gempa bumi dan tsunami di Kota Palu pada tahun 2018. Selain itu terdapat potensi likuifaksi yang menyebabkan Sulawesi menjadi daerah yang sangat rawan. Pada Januari 2021 terjadi gempa bumi di Sulawesi Barat tepatnya di Mamuju. Gempa terjadi dengan magnitudo 6,2 R dengan pusat gempa berada di 27 km arah Tenggara Kota Mamuju dengan kedalaman 10 km dan berpotensi tsunami. gempa ini merupakan jenis gempa dangkal akibat aktivitas Sesar Mamuju-Majene dengan mekanisme pergerakan naik (*thrust fault*). Frekuensi gempa susulan yang terjadi sangat banyak dan menyebabkan kerusakan parah pada bangunan. Sebelumnya pada tahun 1969 pernah terjadi gempa dengan *magnitude* gempa 6,9 R dan tsunami setinggi 10 m di Majene. Selain itu wilayah ini juga berpotensi longsor, mengingat kawasan ini tersusun oleh batuan berumur pratersier (batuan metamorf dan metasedimen), tersier (batuan sedimen, batu gamping dan gunung api) dan endapan kuartar (endapan pantai dan aluvial). Batuan berumur pratersier dan tersier yang telah mengalami pelapukan akan berpotensi terjadi gerakan tanah/ longSORan apabila dipicu

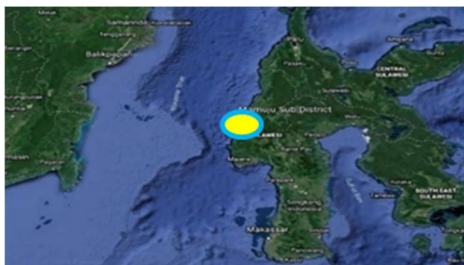
guncangan gempa bumi kuat di daerah ini (Choanji et al, 2019).

Pada saat terjadi gempa, bangunan yang runtuh maupun yang rusak, umumnya dibangun tidak sesuai dengan peraturan atau dibangun dengan peraturan lama. Pada peraturan yang terbaru (SNI 1726-2019) terdapat peningkatan beban gempa jika dibandingkan dengan peraturan lama. Pemutakhiran dan pembaruan secara terus menerus terhadap peta gempa Indonesia diperlukan demi keperluan kesiapsiagaan, penanggulangan kedaruratan, perencanaan pembangunan, pengambilan keputusan pemerintah, perencanaan investasi bisnis serta peningkatan *awareness* masyarakat (PusGen, 2017). Berdasarkan hal tersebut, perlu diperhatikan dan dievaluasi kembali kekuatan bangunan lama agar tetap sesuai dengan *new code*. Dalam mitigasi gempa bumi, salah satu caranya ialah metode struktural dengan membangun bangunan tahan gempa (Mahesworo, 2008) yang disesuaikan dengan keadaan seismologi, geologi dan geoteknik daerah sekitar bangunan yang akan dibangun (Irsyam et al, 2010). Metode mitigasi non-struktural ialah dengan memetakan lokasi bencana untuk memberikan informasi dan gambaran mengenai kondisi tingkat kerawanan suatu wilayah (Saputro dan Momot, 2020).

Pada penelitian ini, sebaran gempa bumi yang terjadi di wilayah Mamuju dan sekitarnya ialah gempa dalam kurun waktu 60 tahun (1960-2021). Data gempa yang digunakan menunjukkan daerah yang memiliki aktifitas gempa yang tinggi berdasarkan magnitudo dan kedalaman gempa. Kedua hal ini mempengaruhi potensi kerusakan yang dapat terjadi dan kemungkinan terjadi tsunami apabila terjadi gempa besar dengan kedalaman dangkal.

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada wilayah Mamuju dan sekitarnya (Gambar 1). Penelitian ini menggunakan sumber *hazard* gempa yang berasal dari sumber gempa subduksi dan *shallow crustal*.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Sebaran data gempa yang ditinjau adalah data gempa yang terjadi di wilayah Mamuju dengan latitude $-2,682$ dan longitude $119,3624$ yang terjadi selama 60 tahun terakhir pada kurun waktu 1960-2021.

Sumber Data Gempa

Keterbatasan rekaman data yang ada di Indonesia menjadi kendala yang sering terjadi karena belum terdapat jumlah alat perekam gempa yang memadai. Untuk meminimalisir kurangnya data gempa, data gempa yang digunakan berasal dari gabungan data gempa yang dicatat oleh instansi pemerintah Indonesia (BMKG) maupun instansi

internasional (ISS, ISC, BCIS, PDE, ANSS, USGS dan lain-lain) dan katalog yang disusun oleh individu seperti Abe, Abe dan Noguchi serta Gutenberg dan Richter pada kurun waktu 1960-2021.

Konversi Magnitudo Gempa

Magnitudo gempa merupakan skala kekuatan relatif gempa yang merupakan hasil dari pengukuran fase *amplitude*. Metode ini pertama kali dikemukakan oleh K. Wadati dan C. Richter pada tahun 1930 (Lay dan Wallace, 1995). Skala magnitudo terdiri dari magnitudo *surface* (M_s), magnitudo lokal (M_L), magnitudo *body* (m_b) dan magnitudo momen (M_w). Data gempa dikumpulkan dari berbagai sumber terdiri dari skala magnitudo yang bermacam-macam sehingga perlu dilakukan penyesuaian. Pada penelitian ini hanya menggunakan M_w sehingga data gempa dengan skala yang berbeda perlu dikonversi. Persamaan korelasi skala gempa untuk wilayah Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1.

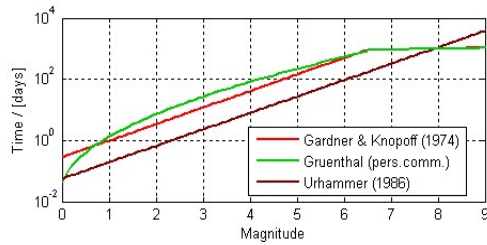
Tabel 1. Korelasi konversi antara beberapa skala magnitudo (Asurifak, 2010)

Korelasi Konversi	Events	Range Data	R ²
$M_w = 0,143M_s^2 - 1,051M_s + 7,285$	3,173	$4,5 \leq M_s \leq 8,6$	93,9%
$M_w = 0,114m_b^2 - 0,556m_b + 5,560$	978	$4,9 \leq m_b \leq 8,2$	72,0%
$M_w = 0,787M_E + 1,537$	154	$5,2 \leq M_E \leq 7,3$	71,2%
$m_b = 0,125M_L^2 - 0,389M_L + 3,513$	722	$3,0 \leq M_L \leq 6,2$	56,1%
$M_L = 0,717M_D + 1,003$	384	$3,0 \leq M_D \leq 5,8$	29,1%

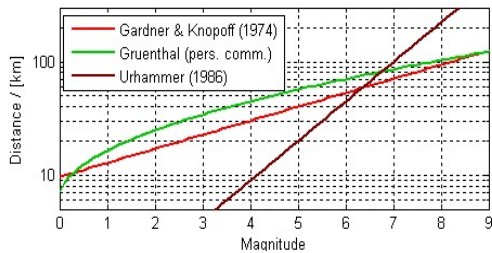
Proses Declustering

Proses *declustering* ialah proses pemisahan gempa utama dan gempa ikutan (*foreshock* dan *aftershock*) agar dapat menentukan tingkat hazard daerah penelitian. Gardner dan Knopoff (1974) mengusulkan suatu metode empiris untuk memisahkan gempa utama dan gempa susulannya dengan menggunakan kriteria rentang waktu dan jarak tertentu dari suatu kejadian gempa besar. Metode ini juga

dikembangkan oleh Uhrhammer pada tahun 1986. Pemisahan gempa utama dilakukan dengan menggunakan kriteria rentang waktu (*time windows*) dan rentang jarak (*distance windows*) dari Gardner dan Knopoff (1974) dan Uhrhammer (1986) dengan bantuan program ZMAP (Wiemer, 2001). Gambar 2 dan gambar 3 menunjukkan kriteria rentang waktu dan rentang jarak dari beberapa peneliti.



Gambar 2. Kriteria Rentang Waktu untuk Analisis Pemisahan Gempa Utama



Gambar 3. Kriteria Rentang Jarak untuk Analisis Pemisahan Gempa Utama

Analisis Kelengkapan Data Gempa (*Magnitude Completeness*)

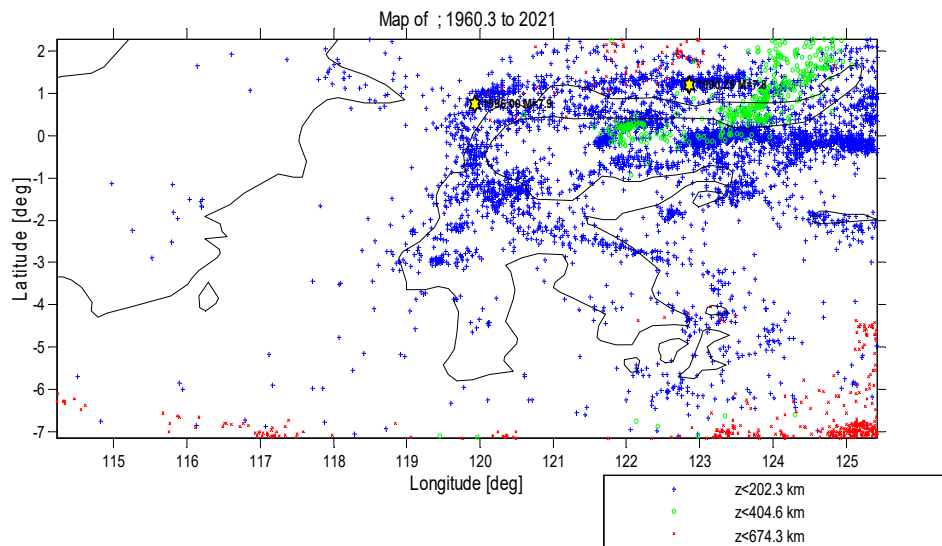
Historis kejadian gempa sangat penting dalam menentukan *hazard* gempa suatu daerah. Estimasi *hazard* gempa memerlukan kurun

waktu tertentu, dimana suatu kejadian gempa *independent* dalam *magnitude* tertentu dapat dikatakan lengkap dalam katalog gempa. Jika data yang tidak lengkap (*incompleteness*) digunakan dalam analisis *hazard* gempa maka akan mengakibatkan parameter *hazard* gempa yang dihasilkan akan menjadi terlalu kecil (*under estimated*) atau terlalu besar (*over estimated*). Analisis kelengkapan data gempa dilakukan dengan bantuan *software* ZMAP (Wiemer, 2001).

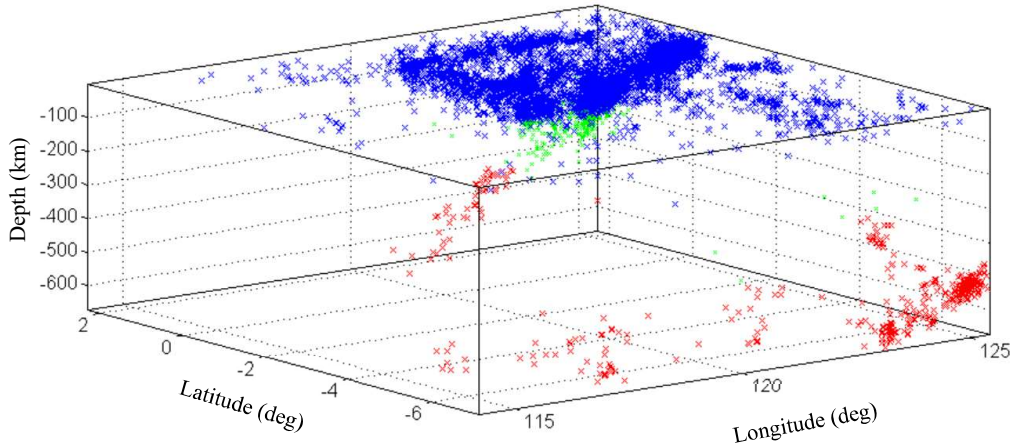
Hasil dan Pembahasan

Pengumpulan Data Gempa

Penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi koordinat letak dari Mamuju. Data gempa yang diambil merupakan gempa yang terjadi dalam kurun waktu 60 tahun yaitu pada periode 1960-2021 (Gambar 4 dan Gambar 5). Sumber data pada penelitian ini diambil dari katalog gempa National Earthquake Information Center U.S. Geological Survey (NEIC-USGS) berasal dari Amerika Serikat, yang merupakan kompilasi dari beberapa katalog dari sumber seperti BCIs, ISSN, ISC, PDE dan katalog yang disusun oleh individu seperti: Abe, Abe dan Noguchi serta Gutenberg dan Richter (1994).

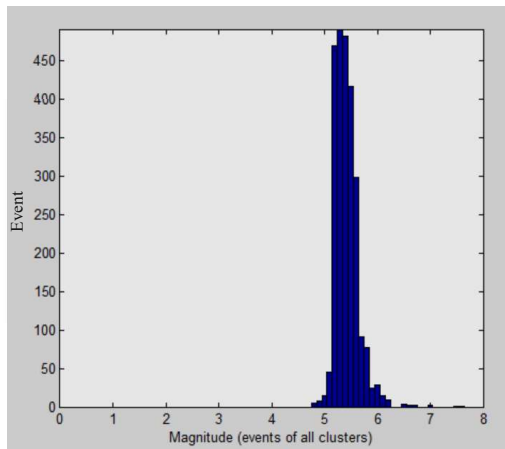


Gambar 4. Kejadian Gempa di Sekitar Mamuju Tahun 1960-2021



Gambar 5. Pemodelan 3D Kejadian Seluruh Gempa di Sekitar Mamuju Tahun 1960-2021

Data gempa bumi yang diperoleh dari hasil pengumpulan tercatat berjumlah 5366 data gempa yang terdiri dari tanggal, waktu terjadinya gempa, koordinat longitude, koordinat latitude, magnitudo gempa, dan kedalaman gempa. Jumlah data tersebut merupakan gabungan gempa utama (*mainshock*) dan gempa susulan (*aftershock*). Data gempa tersebut kemudian dianalisis menggunakan *software* ZMAP. Hasil Sebaran magnitudo gempa tersaji pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Sebaran Magnitudo Gempa

Sebaran Gempa di Wilayah Mamuju

Pengumpulan data gempa pada periode 1960-2021 mencatat 5366 data gempa. Data tersebut kemudian dibagi menjadi 3 interval magnitudo gempa seperti pada Tabel 2. Pada Tabel 2 terlihat bahwa kejadian gempa bumi banyak didominasi oleh gempa bumi dengan magnitudo besar. Besarnya magnitudo gempa berbanding lurus dengan besarnya kerusakan yang ditimbulkan begitu juga sebaliknya.

Tabel 2. Data Magnitudo Gempa Bumi Periode 1960-2021 di Wilayah Mamuju

No	Magnitudo (M)	Jumlah Data
1	$2 < M \leq 4$	0
2	$4 < M \leq 6$	5175
3	$6 < M \leq 8$	191

Berdasarkan hasil sebaran gempa berdasarkan magnitudo didapatkan bahwa kejadian-kejadian gempa kecil banyak yang tidak tercatat. Jika data yang tidak lengkap digunakan dalam analisis risiko gempa maka hasil yang didapatkan akan terlalu kecil untuk kejadian gempa kecil dan terlalu besar untuk kejadian gempa besar (Hutapea dan Mangape, 2009).

Parameter lain yang mempengaruhi tingkat kerusakan ialah kedalaman gempa. Kedalaman gempa terbagi menjadi 3 kategori (Mustafa, 2010), yaitu:

1. Gempa dangkal: berpusat ≤ 60 km.
2. Gempa menengah: berpusat antara 60 sampai dengan 300 km.
3. Gempa dalam: berpusat > 300 km.

Tabel 3. Data Kedalaman Gempa Bumi Periode 1960-2021 di Wilayah Mamuju

No	Kedalaman (D)	Jumlah Data
1	$0 < D \leq 60$	2829
2	$60 < D \leq 300$	2085
3	$300 < D$	452

Kedalaman gempa yang perlu diwaspadai ialah yang disebabkan oleh sesar/fault yaitu gempa dangkal. Hal ini disebabkan letaknya yang berada di darat sehingga pada saat pelepasan energi gempa memiliki daya rusak yang tinggi terhadap bangunan sekitarnya.

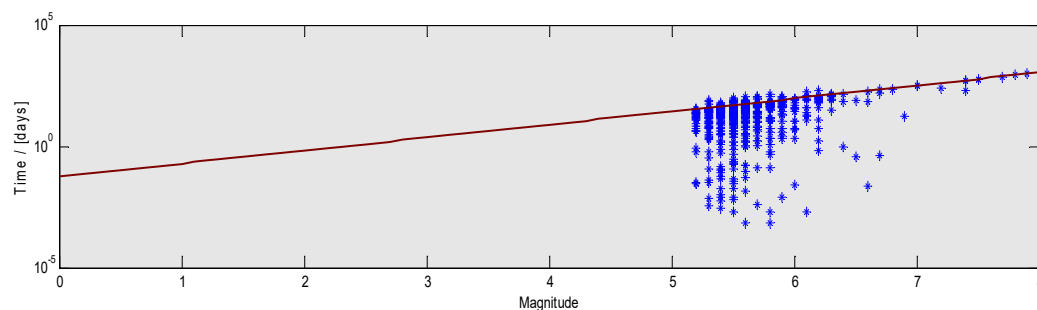
Hasil analisis menunjukkan pada wilayah Mamuju, sebaran gempa bumi didominasi oleh gempa dangkal yaitu sebesar 52,72% kejadian gempa dari total keseluruhan gempa yang berjumlah 5366 (Tabel 3). Sebaran gempa bumi berdasarkan kedalaman ini dominannya terjadi dan bersumber dari lempengan *megathrust* dan *shallow crustal*. Dominasi kejadian gempa dangkal

menandakan karakteristik kejadian gempa bumi di wilayah Mamuju pada umumnya bersifat merusak.

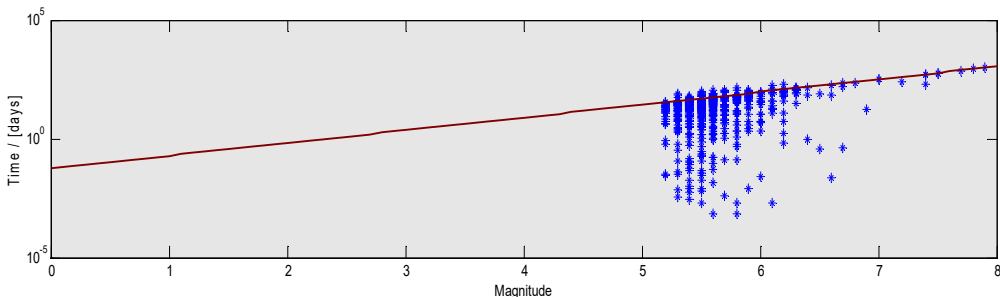
Pemisahan Gempa Utama dan Gempa Susulan

Proses pemisahan gempa utama dan gempa susulan menggunakan kriteria rentang waktu dan jarak. Proses pemisahan ini sering disebut dengan *declustering*. Sebelum proses *declustering*, dilakukan penyeragaman skala magnitudo untuk data-data gempa yang terkumpul. Dalam analisis bahaya gempa probabilistik digunakan gempa independen atau gempa utama (Teguh dan Erlangga, 2019; Erlangga et al, 2020; Erlangga, 2020). Penggunaan gempa dependen atau gempa susulan mengakibatkan sedikit peningkatan pada hasil analisis (Purbandini et al, 2017) sehingga perlu dipisahkan antara gempa utama dan gempa susulan.

Pemisahan gempa utama dilakukan dengan menggunakan kriteria rentang waktu (*time windows*) dan rentang jarak (*distance windows*) dari Gardner dan Knopoff (1974) dan Uhrhammer (1986) dengan bantuan program ZMAP (Wiemer, 2001). Hasil pemisahan gempa utama menggunakan program ZMAP dapat dilihat pada Gambar 7, 8, 9 dan 10.



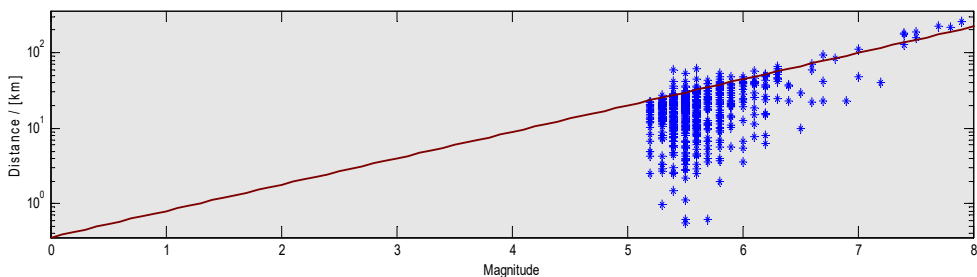
Gambar 7. Analisis *Time Windows* Gardner dan Knopoff (1974)



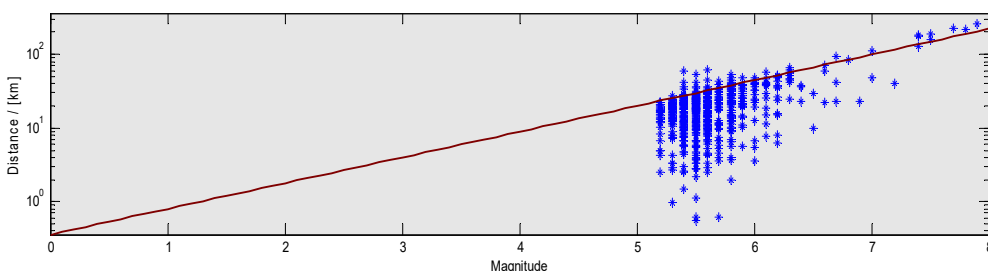
Gambar 8. Analisis *Time Windows* Uhrhammer (1986)

Gempa bumi terjadi diakibatkan adanya pelepasan energi yang telah terakumulasi dengan rentang waktu ulang tertentu. Rentang waktu yang sama dibutuhkan untuk

menghasilkan pelepasan energi yang sama besarnya. Berdasarkan hal tersebut maka kejadian gempa yang berada di bawah garis merah sesuai Gambar 7 dan 8 merupakan gempa susulan yang harus dieliminasi.



Gambar 9. Analisis *Distance Windows* Gardner dan Knopoff (1974)

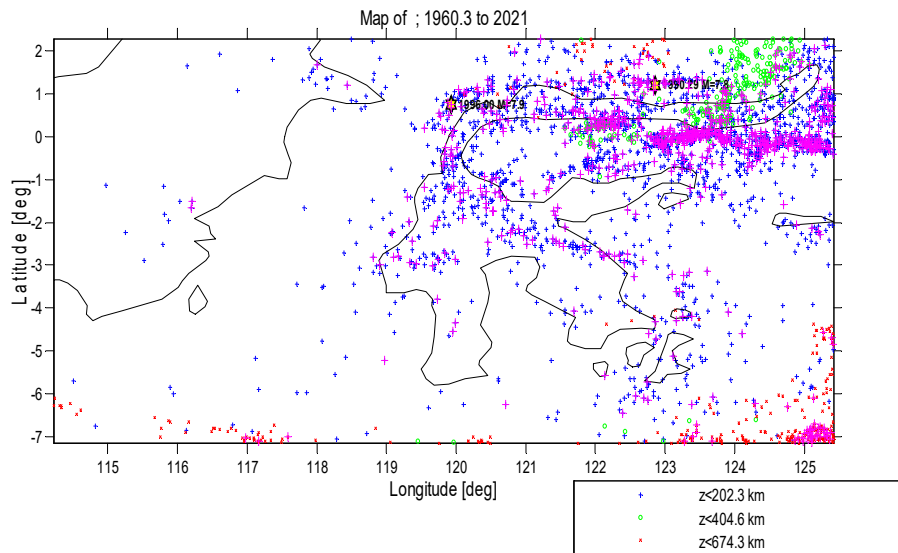


Gambar 10. Analisis *Distance Windows* Uhrhammer (1986)

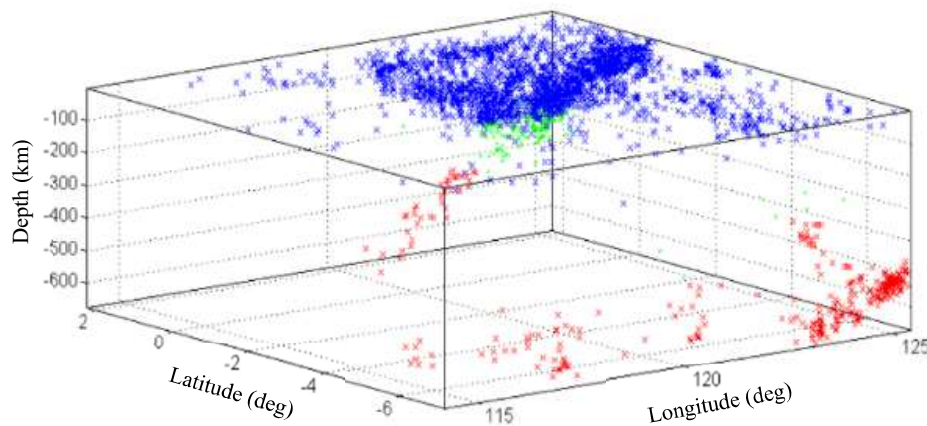
Gempa utama biasanya diikuti dengan gempa-gempa susulan sehingga perlu di analisa apabila terjadi gempa di wilayah tertentu dengan selang waktu yang berdekatan. Jika jarak kedua episenter gempa tersebut masih dalam kriteria sesuai dengan Gambar 9 dan 10, maka dapat dipastikan

bahwa gempa tersebut ialah gempa susulan. Namun apabila gempa tersebut di luar jarak yang disyaratkan maka gempa tersebut merupakan gempa utama dengan sumber gempa yang berbeda.

Pemisahan Gempa Utama di Wilayah Mamuju



Gambar 11. Gempa Utama di Sekitar Mamuju Tahun 1960-2021



Gambar 12. Pemodelan 3D Gempa Utama di Sekitar Mamuju Tahun 1960-2021

Proses *declustering* mendapatkan hasil gempa utama sebanyak 1240 dari total data gempa 5366. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan terdapat 79,89% kejadian gempa susulan dari semua total kejadian gempa yang ada.

Sebaran gempa utama di wilayah Mamuju dan sekitarnya dapat dilihat pada Gambar 11 dan 12, distribusi *magnitude* gempa utama pada Tabel 4 dan distribusi kedalaman gempa utama pada Tabel 5.

Tabel 4. Data Magnitudo Gempa Utama Periode 1960-2021 di Wilayah Mamuju

No	Magnitudo (M)	Jumlah Data
1	$2 < M \leq 4$	0
2	$4 < M \leq 6$	1156
3	$6 < M \leq 8$	84

Tabel 5. Data Kedalaman Gempa Utama Periode 1960-2021 di Wilayah Mamuju

No	Kedalaman (D)	Jumlah Data
1	$0 < D \leq 60$	672
2	$60 < D \leq 300$	364
3	$300 < D$	204

Berdasarkan Tabel 4 dan 5, gempa utama yang terjadi di wilayah Mamuju didominasi oleh gempa dangkal dengan magnitudo antara 4 hingga 6. Hal ini yang menjadi dasar perhatian oleh pemerintah untuk memperkuat penerapan peraturan pembangunan bangunan tahan gempa mengingat wilayah Mamuju didominasi gempa dangkal yang berpotensi besar merusak.

Kesimpulan

Hasil analisis yang dilakukan pada penelitian ini menunjukkan jumlah gempa utama yang terjadi di wilayah Mamuju ialah 20,11% dari seluruh total kejadian gempa yang terjadi dengan dominasi magnitudo sedang hingga besar. Sedangkan gempa yang terjadi di wilayah Mamuju didominasi oleh gempa dangkal dengan persentase 54,19% dari total seluruh kejadian gempa. Berdasarkan hasil tersebut yang dapat dijadikan dasar agar lebih diperhatikan penerapan peraturan bangunan tahan gempa pada pembangunan rumah di wilayah Mamuju mengingat tingkat kerentanan terhadap gempa bumi pada daerah ini tergolong tinggi.

Pemisahan gempa utama yang dilakukan pada penelitian ini (Gambar 11 dan 12) dapat dijadikan sebagai acuan pemutakhiran peta sumber dan bahaya gempa bumi dengan mempertimbangkan magnitudo dan kedalaman gempa dominan di wilayah Mamuju dan sekitarnya berdasarkan katalog gempa yang lebih lengkap dan lebih akurat

dengan *update* katalog gempa sampai tahun 2021.

Daftar pustaka

- Aldiamar, F., (2007). “*Analisa Resiko Gempa dan Pembuatan Respon Spektra Desain untuk Jembatan Suramadu dengan Permodelan Sumber Gempa 3D*”, Program Pascasarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITB, Bandung.
- Asrurrifak, M. (2010). “*Peta Respon Spektra Indonesia untuk Perencanaan Struktur Bangunan Tahan Gempa dengan Model Sumber Tiga Dimensi dalam Analisis Probabilistik*”. Disertasi, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Bock, R. Genrich J. F., Y. McCaffrey, E. Calais, C.W. Stevens, and C. Subarya. (1996). “*Accretion of the southern Banda arc to the Australian plate margin determined by Global Positioning System measurements*”, *Tectonics*. 15. 288-295.
- Choanji, T., Yuskar, Y., dan Cahyaningsih, C. (2019). Kajian Pemetaan Struktur dan Potensi Longsor Berdasarkan Digital Elevation Model dan Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Daerah Pangkalan, Sumatera Barat. *Jurnal Geografi*, Vol 11 No.2, 163-170.
- Erlangga, W. (2020). “Karakteristik dan Parameter Subduksi Sumber Gempa Pulau Jawa”. *Teknisia*, Vol 25, No. 2, 88-98.
- Erlangga, W., Teguh, M., dan Makrub. L. (2020). “The analysis of performance level on an existing multi-story building structure using the time history based on the subduction earthquake source”. *E3S Web of Conferences*. Vol 156. 4th International Conference on Earthquake Engineering & Disaster Mitigation (ICEEDM 2019). Padang, Indonesia.
- Gardner, J. K. and Knopoff, L., Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, With Aftershocks Removed, Poissonian?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64, 1,363–1,367, 1974.

- Gutenberg, B. and Richter, C.F., (1944), "Frequency of Earthquakes in California". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 185-188.
- Hutapea, B. M., dan Mangape, I. (2009). Analisis Hazard Gempa dan Usulan Ground Motion pada Batuan Dasar untuk Kota Jakarta. *Jurnal Teknik Sipil*, 16(3), 121-132.
- Irsyam, M., Sengara I.W., Adiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Natawidjaja, D.H., Kertapati, E., Meilano, I., Suhardjono, Asrurifak, M., dan Ridwan, M. (2010). "Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia", Bandung.
- Lay, T. dan Wallace, T.C. (1995). "Modern Global Seismology". Academic Press, San Diego, California.
- Mahesworo, R. P. (2008). "Usulan Ground Motion Untuk Empat Kota Besar Di Wilayah Sumatera Berdasarkan Hasil Analisis Seismic Hazard Menggunakan Model Sumber Gempa 3 Dimensi", Tesis, Institut Teknologi Bandung.
- Makrup, L. (2009). "Pengembangan Peta Deagregasi Hazard untuk Indonesia Melalui Pembuatan Software dengan Pemodelan Sumber Gempa Tiga Dimensi". Disertasi. Institut Teknologi Bandung. Indonesia
- Milson, J., Masson D., Nichols G., Sikumbang N., Dwiyanto B., Parson L., Kallagher H. (1992). "The Manokwari Trough and The Western End of The New Guinea Trench," *Tectonics*. 11. 145-153.
- Mustafa, B. (2010). Analisis Gempa Nias Dan Gempa Sumatera Barat Dan Kesamaannya Yang Tidak Menimbulkan Tsunami. *Jurnal Ilmu Fisika*, Universitas Andalas, 2(1), 44-50.
- Nicolaou.A.S. (1998). "A GIS Platform for Earthquake Risk Analysis". Dissertation, Faculty of the Graduate School of State University of New York at Buffalo USA.
- Purbandini, P., Santosa, B. J., dan Sunardi, B. (2017). Analisis Bahaya Kegempaan di Wilayah Malang Menggunakan Pendekatan Probabilistik. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 6(2), B20-B24.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Saputro, I.T. dan Momot, H. (2020). Pemutakhiran Peta Sebaran Gempa Bumi Berdasarkan Magnitudo dan Kedalaman di Wilayah Provinsi Papua Barat pada 50 Tahun Terakhir, *TAPAK Vol.10 No.1*, 1-9.
- SNI 1726-2019. (2019). "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung". Badan Standarisasi Nasional (BSN). Jakarta.
- Sulistiyanto, Iwan Gatot. (2009), "Geografi 1: untuk Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah Kelas X". Departemen Pendidikan Nasional. Jakarta.
- Teguh, M. dan Erlangga, W. (2019). "Comparison of Bedrock and Surface Time Histories Subjected to Subduction Earthquake in a Selected Location of Yogyakarta", *Journal of GEOMATE*. 17. Issue 63. pp. 77 -86.
- Uhrhammer, R.A., Characteristics of Northern and Central California Seismicity, *Earthquake Notes*, Vol. 57, No. 1, pp. 21, 1986.
- Widodo. (2012). "Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan". Pustaka Pelajar. Yogyakarta
- Wiemer, S., A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, Vol. 72, 373-382, 2001.