

Seismisitas, Energi dan Percepatan Tanah Dalam Penentuan Tingkat Resiko Gempabumi Di Wilayah Sulawesi Tengah

Sri Mulyati¹, Abdullah², Icha Untari Meidji^{3*}

¹ Jurusan Teknik Arsitek, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Indonesia.

² Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tadulako, Indonesia.

² Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia.

*) Correspondence e-mail: ichautarimeiji10@ung.ac.id

ARTICLE INFO

Article History :

Received

Accepted

Available online

Keywords :

earthquake; seismicity; total energy; ground acceleration; risk level.

ABSTRACT

The characterization of the zero point correction (2 θ) has been carried out for several XRD instruments using the NIST SRM 640d Silicon standard sample. This research was conducted to determine the 2 θ position of three diffractometers, namely Shimadzu XRD-7000 Maxima-X at Hasanuddin University Makassar, Philips PW 1710 at the University of Indonesia and Pan Analytical X-Pert Pro at Malang State University. This 2 θ cost was performed using Fityk for single-line analysis and Rietica for Rietveld analysis. This study shows that each instrument has different characteristics of the zero point position referring to the difference in optical arrangement. The results of this study confirmed that the results of the XRD analysis using the Rietica program which had been corrected with 2 θ 99.79% were close to the values of the calculated lattice parameters.

1. Pendahuluan

Wilayah Sulawesi yang merupakan salah satu daerah yang terletak di Indonesia bagian timur, di mana daerah ini mempunyai tingkat tektonik dan kegempaan yang sangat rumit dan aktif [1,2,3,4]. Wilayah ini merupakan tempat pertemuan beberapa lempeng yang cukup besar, yaitu lempeng Indo Australia yang berada di sebelah selatan, Eurasia yang berada di sebelah barat laut dan Pasifik yang berada di timur laut [4,5]. Oleh karena itu, wilayah ini sangat sering terjadi bencana alam gempabumi setiap tahun baik dengan skala magnitudo kecil dan besar.

Gempabumi merupakan salah satu peristiwa alam yang terjadi akibat adanya gerakan tektonik yang menyebabkan permukaan tanah bergetar dan melepaskan sejumlah energi secara mendadak dari bergesernya suatu bidang [6]. Dalam pelepasan energi yang berupa

gelombang seismik dari dalam bumi yang menjalar ke segala arah sampai di permukaan melalui kerak-kerak yang berada di dalam bumi. Semakin besar energi yang dilepaskan, maka semakin kuat atau besar guncangan yang ditimbulkan [7].

Intensitas gempabumi yang terdapat di wilayah Sulawesi Tengah sebagian besar diakibatkan oleh pergerakan patahan-patahan minor dan mayor, salah satunya yang paling dominan adalah patahan Palu Koro [8,9,10]. Akibatnya terjadi kerusakan yang cukup dominan jika pergerakan tektonik di wilayah Sulawesi Tengah yang diakibatkan oleh patahan-patahan tersebut. Kejadian-kejadian gempabumi merusak tersebut telah menewaskan ratusan orang dan menyebabkan kerugian materi yang sangat besar di wilayah Sulawesi Tengah dan sekitarnya.

Oleh karena itu, melihat kondisi dari kelas tektonik dan resiko yang diakibatkan oleh gempabumi, maka perlu dilakukan analisis seismisitas dan kondisi percepatan tanah sehingga mampu menentukan tingkat resiko pembangunan infrastruktur wilayah maupun tempat alokasi pemukiman sehingga sesuai dengan kaidah pembangunan di wilayah rawan bencana agar bisa meminimalkan kerugian yang ditimbulkan. Perwilayahan resiko gempabumi akan sangat membantu sebagai referensi dalam perancangan bangunan dan mitigasi bencana.

2. Kajian Pustaka

Gempabumi yang terjadi akibat dari pergerakan tektonik yang berada di bawah permukaan bumi akan melepaskan energi secara tiba-tiba yang didapatkan dari berbagai sumber [11]. Gempabumi ini terbagi menjadi dua tipe, yaitu gempabumi tektonik dan gempabumi vulkanik. Adapun gempabumi tektonik, terjadi akibat adanya pergerakan tektonik yang berupa lempeng dan patahan yang berada di bawah permukaan bumi. Hal berbeda dengan gempabumi vulkanik yang disebabkan oleh adanya aktivitas gunung api.

Aktivitas dari gempabumi yang berupa gelombang atau sinyal seismik akan terekam dan terbaca sehingga dapat dilakukan analisis baik secara otomatis maupun secara manual sehingga akan mendapatkan beberapa parameter gempabumi. Parameter-parameter ini berupa informasi tentang kejadian gempabumi tersebut. Adapun beberapa parameter utama gempabumi, yaitu origin time (waktu kejadian gempabumi), magnitudo (kekuatan gempabumi), Episenter (posisi pusat terjadinya gempabumi), hiposenter (posisi tegak lurus dari episenter ke arah dalam bumi) dan intensitas gempabumi yang berupa besar kerusakan yang diakibatkan gempabumi [10,11].

Wilayah Sulawesi Tengah, khususnya daerah Palu dan sekitarnya merupakan daerah yang sangat rawan akan terjadinya gempabumi dan tsunami karena adanya suatu patahan yang berada di daerah tersebut [9]. Berdasarkan seismitas yang ditimbulkan oleh gempabumi, terdapat beberapa tempat yang menjadi klater aktivitas gempabumi. Dari beberapa kejadian

gempabumi di wilayah Sulawesi Tengah, sebagian besar didominasi oleh gempabumi tektonik yang mempunyai kedalaman dangkal berkisar antara 0 – 60 km dengan indikasi bahwa gempabumi ini ditimbulkan oleh adanya suatu pelepasan tegangan di kerak bumi yang dibangkitkan oleh patahan aktif [9,12,13,14].

Posisi kejadian terjadinya gempabumi di Sulawesi Tengah sebagian besar berada di daratan dan sebagian kecil berada di laut atau pinggiran pantai [12,14,15]. Tempat terjadinya ini sebagai gambaran bahwa daerah ini mempunyai tingkat nilai seismisitas yang sangat tinggi terhadap kejadian gempabumi maupun tsunami. Hal ini didukung dengan adanya pola seismisitas dan tektonik akan kejadian bahaya geologi khususnya gempabumi dengan skala magnitudo yang cukup besar dan kedalaman yang relatif dangkal.

Dalam melakukan evaluasi dari perencanaan suatu wilayah yang rawan akan kejadian bahaya geologi, perlu dilakukan juga analisis percepatan tanah maksimum wilayah tersebut. Hal ini berguna untuk mengetahui nilai dari getaran tanah secara kuantitatif yang terjadi yang diakibatkan oleh gempabumi dan bahaya geologi longsor [16,17], melakukan penyesuaian dalam mendirikan suatu bangunan [18], informasi dalam pembangunan tata ruang wilayah yang sering terjadi gempabumi [19].

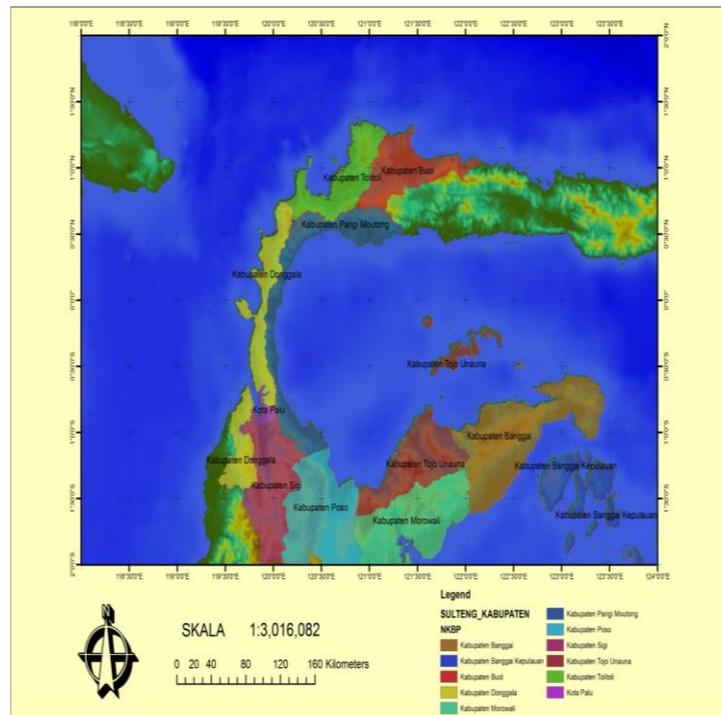
Nilai dari percepatan tanah ini dapat diperoleh menggunakan suatu alat pengukuran percepatan tanah atau akselerograf dengan pendekatan secara empiris [20]. Parameter percepatan tanah merupakan hal yang penting dalam kajian untuk mitigasi gempabumi atau teknik kegempaan. Pendekatan formula yang digunakan dalam menganalisis percepatan tanah di daerah penelitian Fukushima dan Tanaka [21].

3. Metodologi Penelitian

Lokasi dan Data Penelitian

Penelitian ini berlokasi di daerah Sulawesi Tengah dengan batasan koordinat 2o LU - 2o LS dan 118o – 124o BT, seperti yang terlihat pada Gambar 1. Adapun data gempabumi yang dipakai merupakan data sekunder yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) wilayah Palu dan International Seismological Centre (ISC) dengan kedalaman yang sama 0 – 100 Km serta magnitudo > 4 Mw untuk data dari BMKG dan ISC dengan magnitudo ≥ 3 Mw.

Dari kedua data tersebut, untuk menentukan seismisitas dan energi total gempa digunakan data dari ISC sedangkan data yang diperoleh dari BMKG digunakan untuk menentukan nilai percepatan tanah maksimum.



Gambar 1. Lokasi penelitian di wilayah Sulawesi Tengah yang terdiri dari beberapa kabupaten dengan ditandai adanya perbedaan warna

Seismisitas dan Energi Total

Dalam melakukan pemetaan distribusi seismisitas digunakan suatu pola yang nantinya secara otomatis akan memperlihatkan titik penyebaran pusat gempa bumi (episenter) sesuai dengan batasan daerah penelitian. Sedangkan untuk analisis distribusi energi total yang dilakukan dengan menggunakan konversi persamaan empiris oleh Bath (persamaan 1).

$$\text{Log } E = 5,78 + 2,4 M \quad [22] \quad (1)$$

dengan E adalah energi di pusat gempa bumi (erg), M adalah magnitudo gempa bumi (Mw).

Perhitungan energi total gempa bumi dilakukan dengan membagi daerah penelitian ke dalam sebuah grid dengan ukuran 0,50 x 0,50. Besarnya energi total yang timbul akibat gempa bumi dihitung dengan persamaan (2) dan hasil analisis digambarkan di sebuah peta.

$$\text{Log } E = 5,78 + 2,48 M_b \quad [23] \quad (2)$$

dengan M_b merupakan magnitudo bodi.

Percepatan Tanah Maksimum

Dalam hal ini, obyek dari penelitian diasumsikan mempunyai struktur kulit bumi yang homogen, penjarangan energi gelombang gempa adalah uniform (sama) serta model attenuasi (perambatan) ditentukan oleh parameter magnitudo dari gelombang dan jarak episenter.

Daerah penelitian dibagi menjadi sebuah grid dengan ukuran yang sama dengan analisis energi total. Metode pendekatan yang digunakan dalam analisis percepatan tanah maksimum yaitu fungsi attenuasi Fukushima dan Tanka, seperti yang terlihat pada persamaan (3) berikut.

$$\log A = 0,41Ms - \log(R + C (Ms)) - 0,0034R + 1,30 \tag{3}$$

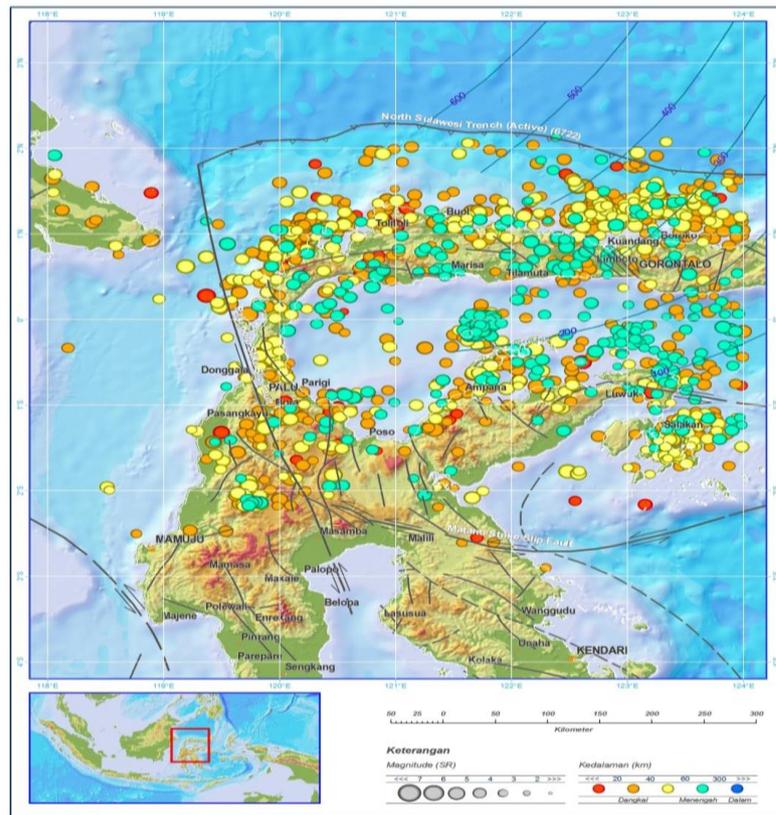
$$C (Ms) = 0,032 \times 10^{0,41Ms} \tag{4}$$

$$R = \sqrt{\Delta^2 + h^2} \tag{5}$$

dengan A merupakan percepatan tanah (gal), Ms = magnitudo gelombang permukaan (Mw), R = jarak hiposenter (km), Δ = jarak episenter (km) dan h = kedalaman (km). [20]

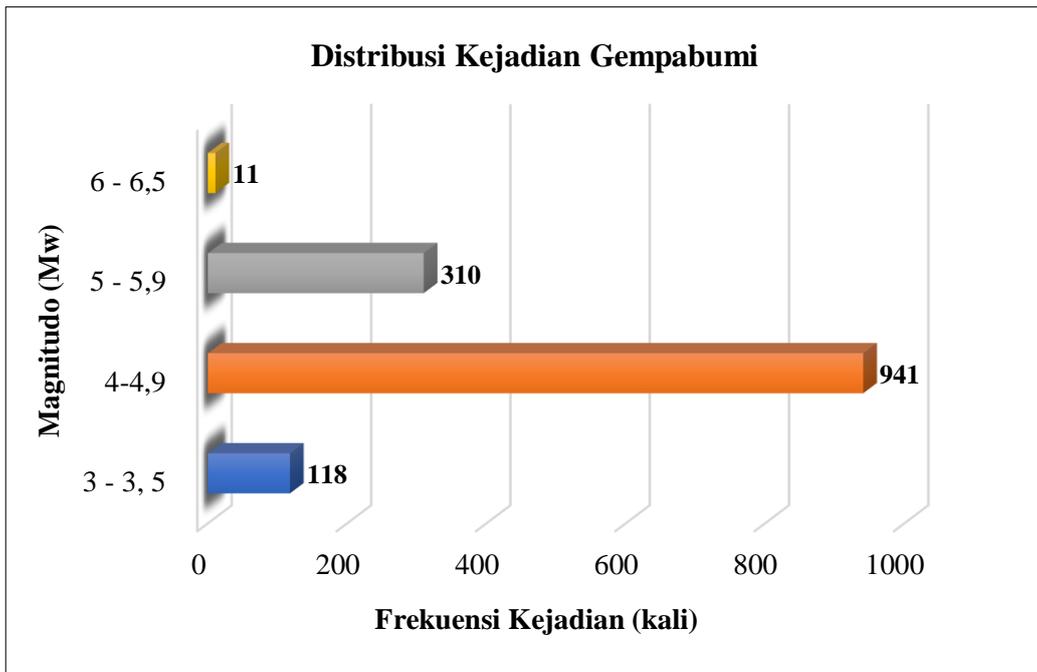
4. Hasil dan Pembahasan Seismisitas dan Energi Total

Berdasarkan data yang diperoleh dari BMKG Palu dan ISC di lokasi penelitian terdapat 2531 kali event gempa bumi terjadi. Event tersebut diplot ke dalam suatu peta dalam ruang lingkup wilayah Sulawesi Tengah sehingga diperoleh seismisitas seperti Gambar 2 berikut.

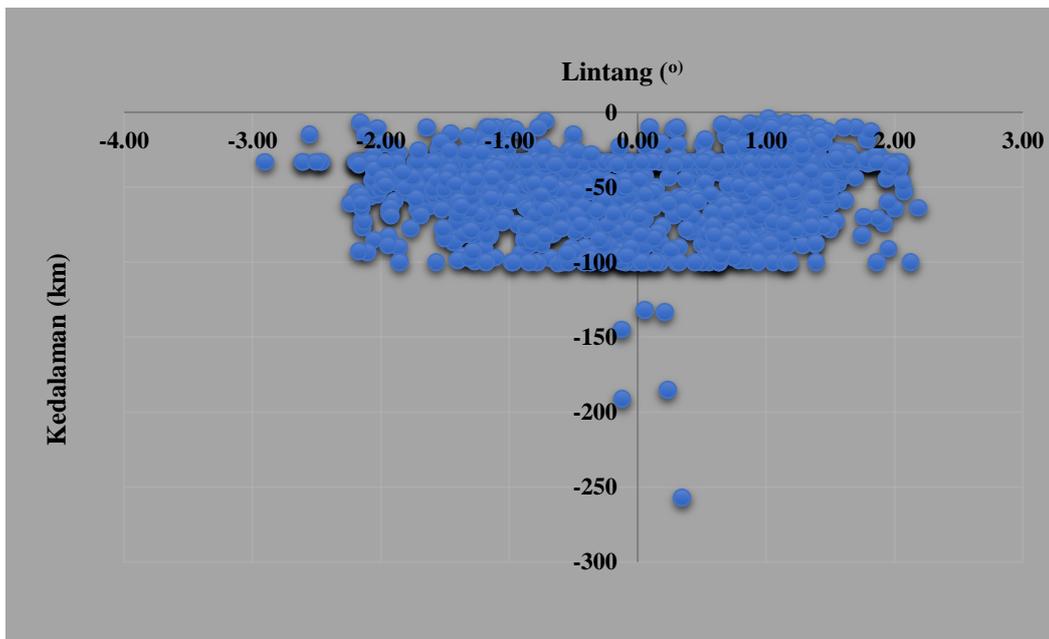


Gambar 2. Peta distribusi seismisitas gempa bumi di daerah penelitian dengan warna merah sampai orange menunjukkan kedalaman dangkal, warna kuning sampai hijau menunjukkan kedalaman menengah dan warna biru menunjukkan kedalaman dalam.

Peta di atas menggambarkan bahwa daerah penelitian di dominasi oleh kejadian gempa bumi dengan magnitudo yang berbeda-beda, seperti yang terlihat pada Gambar 3. Selain itu, hasil penggambaran penampang melintang episenter gempa bumi di daerah penelitian dapat terlihat di Gambar 4.



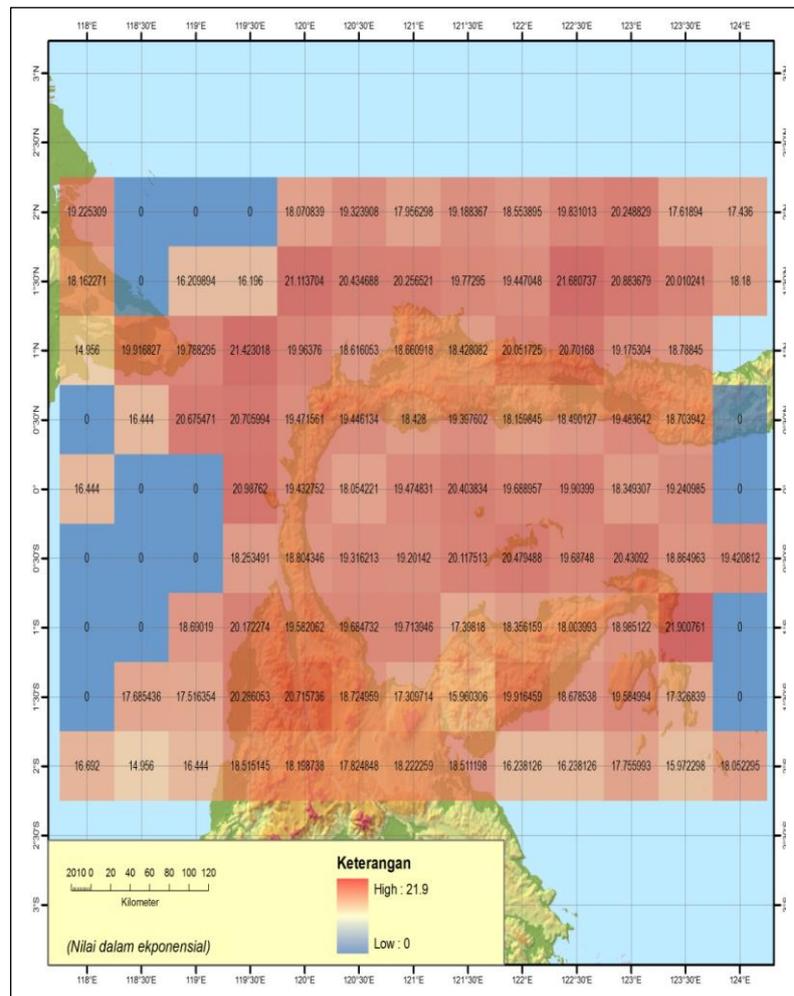
Gambar 3. Distribusi kejadian gempabumi wilayah penelitian dengan didominasi oleh magnitudo 4 – 4,9 Mw (warna oranye).



Gambar 4. Penampang melintang distribusi episenter gempabumi di wilayah penelitian.

Berdasarkan kedalaman gempabumi di daerah penelitian, sangat didominasi oleh gempa dengan kedalaman 33 km, yaitu sebanyak 313 kejadian gempabumi dengan pusat gempa terdistribusi secara merata di wilayah Sulawesi Tengah dengan kedalaman maksimal 250 km.

Dengan menggunakan perumusan empiris hubungan magnitudo dengan energi yang ditimbulkan diperoleh akumulasi energi total rata-rata di wilayah Sulawesi Tengah adalah 2,0367720 erg, di mana energi yang terbesar adalah 7,9572121 erg yang terletak di di daerah Luwuk dengan koordinat 1,17° LS dan 123,54° BT tepatnya di grid 90, seperti yang terlihat pada Gambar 5. Nilai energi total yang digunakan adalah nilai energi total maksimum/terbesar di setiap titik grid. Bila dalam satu titik grid menghasilkan beberapa nilai energi total maka dipilih nilai energi total tertinggi pada titik grid tersebut.

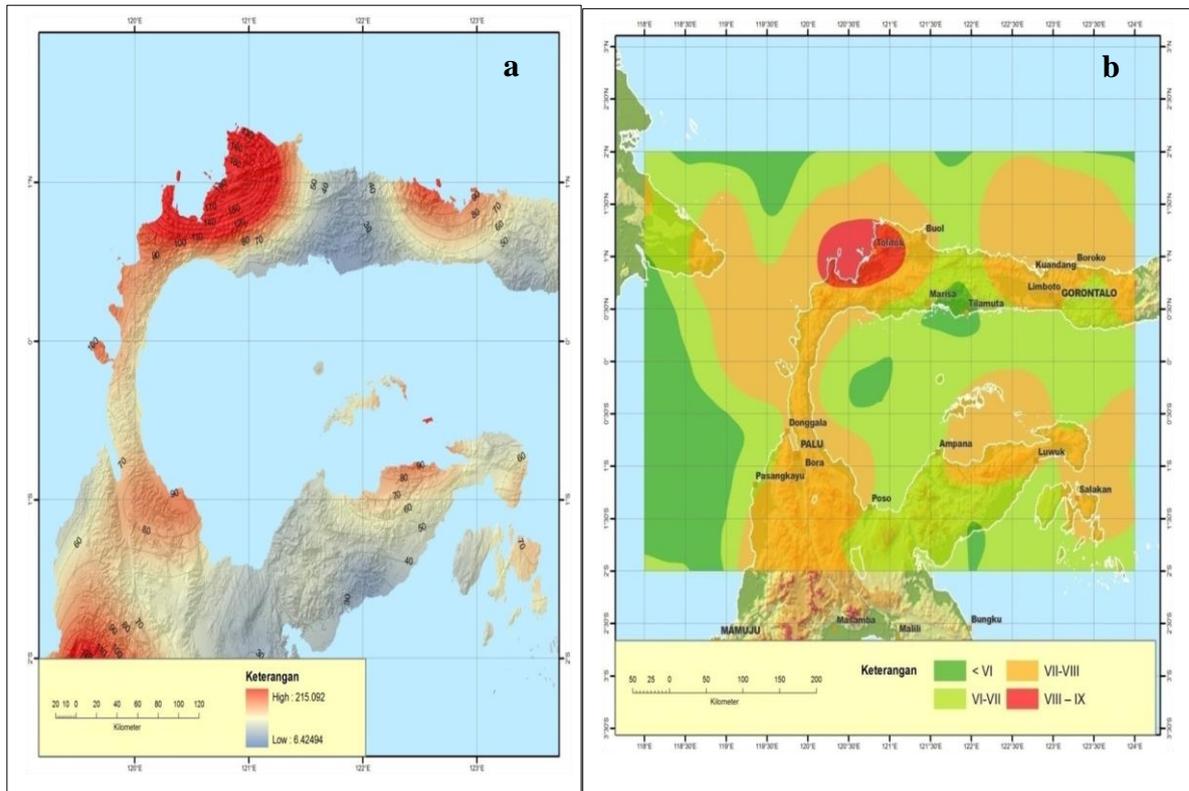


Gambar 5. Distribusi energi total tiap grid di wilayah penelitian

Percepatan Tanah Maksimum

Berdasarkan hasil perhitungan dengan rumus empiris Fukushima dan Tanaka, diperoleh nilai maksimum untuk percepatan tanah di wilayah penelitian sangat bervariasi. Daerah yang memiliki nilai percepatan tanah maksimum yang paling dominan adalah daerah Tolitoli dengan 1,02° LU dan 120,40° BT yaitu sebesar 215,6651 gal. Nilai maksimum tiap titik grid kemudian diplot ke dalam peta wilayah Sulawesi Tengah berupa peta kontur percepatan tanah maksimum akibat gempa bumi dengan menggunakan program Arc GIS, seperti yang terlihat pada Gambar 6a.

Nilai percepatan tanah maksimum yang diperoleh dipakai untuk menentukan pola dari intensitas maksimum. Oleh karena itu, dari nilai percepatan tanah maksimum yaitu 215,6651 gal diperoleh intensitas maksimum di daerah penelitian sebesar VIII-IX MMI (Modified Mercalli Intensity), seperti terlihat pada Gambar 6b.



Gambar 6 (a). Peta percepatan tanah maksimum dengan warna merah menggambarkan semakin tinggi percepatan tanah daerah tersebut dan (b). Intensitas maksimum di mana warna merah mempunyai tingkat intensitas gempa bumi yang tinggi.

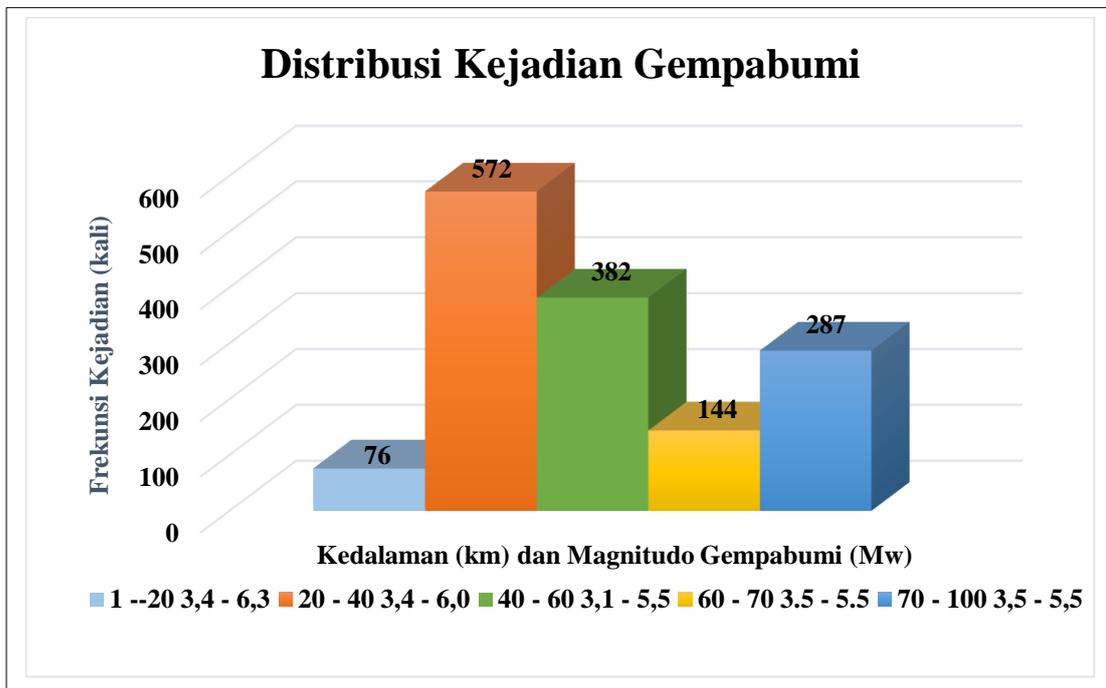
Berdasarkan hasil distribusi episenter pada Gambar 2, dapat digambarkan bahwa daerah penelitian mempunyai tingkat seismisitas yang tinggi. Hal ini terlihat pada sebaran titik pusat gempa sangat banyak dan tingkat kegempaan yang sangat kompleks [9,24], di mana banyak gempa yang terjadi baik dalam lingkup magnitudo kecil maupun besar serta dengan kedalaman dangkal sampai dalam.

Untuk gempa-gempa dangkal, distribusi kejadian gempa bumi di daerah penelitian sangat bervariasi, baik dalam hal besar magnitudo maupun tingkat kedalamannya. Adapun rincian distribusi gempa bumi tersebut, dapat dilihat pada Gambar 7.

Gempa-gempa dangkal yang terjadi mempunyai pusat gempa yang berada di hampir semua wilayah kabupaten di Sulawesi Tengah, antara lain di Boul, Toli-Toli, Ampana, Donggala, Palu, Parigi-Moutong, Poso dan Bangkep. Adapun penyebab dari gempa-gempa tersebut, sebagian besar pengaruh dari aktivitas sesar Palu Koro, sesar Matano dan sesar Gorontalo.

Wilayah Sulawesi Tengah tercatat banyak gempa-gempa kecil yang terjadi. Seringnya terjadi gempa-gempa kecil yang melepaskan energi sehingga adanya stress yang terkandung

dalam bumi tidak besar karena langsung terlepas. Jika gempa-gempa kecil jarang terjadi maka stress yang terkandung dalam bumi sangat besar dan pada suatu saat batuannya tidak mampu lagi menahan stress maka terjadi gempa dengan magnitudo yang besar. Gempa besar yang terjadi tersebut dapat menimbulkan kerusakan di permukaan bumi seperti bangunan yang runtuh akibat guncangan dan bahkan korban jiwa.



Gambar 7. Distribusi kejadian gempabumi di wilayah Sulawesi Tengah yang didominasi oleh gempa dangkal dengan kedalaman 20 – 40 km dan magnitudo 3,4 – 6.0 Mw yang ditandai dengan warna orange.

Dalam hal energi yang terjadi akibat gempabumi di wilayah penelitian, daerah Luwuk merupakan tempat yang mempunyai tingkat energi total yang paling besar, yaitu sebesar 7,9572121 erg. Hal ini diakibatkan oleh penumpukan energi pada batuan kuat di daerah tersebut sehingga pada saat terjadi gempa energi terakumulasi dan menyebabkan gempa yang cukup besar.

Selain daerah-daerah yang memiliki energi total yang tinggi ada pula daerah yang memiliki energi total cukup rendah bahkan tidak ada, hal ini disebabkan karena akumulasi kejadian gempa di daerah tersebut bernilai nol. Energi total gempa juga terjadi di wilayah perairan Laut Sulawesi tepatnya pada titik grid 30, 42, 43 dan 56 di mana daerah tersebut merupakan lajur sesar Palu-Koro. Secara umum energi total yang terjadi di wilayah Sulawesi Tengah terjadi di daerah-daerah yang merupakan jalur sesar aktif seperti di daerah Buol, Luwuk, Tolitoli, Donggala dan Palu.

Percepatan tanah maksimum diasumsikan bahwa daerah obyek penelitian mempunyai struktur kulit bumi yang homogen, penjalaran energi gelombang gempa adalah uniform (serba

sama). Nilai percepatan tanah maksimum yang paling besar berada di daerah Toli-Toli sebesar 215,6651 gal dengan koordinat lokasi 1,02o LU dan 120,40o BT pada kedalaman 4 km dan jarak epicenter 12 km dari stasiun perekaman gempa. Berdasarkan Gambar 6.a terlihat bahwa nilai percepatan tanah maksimum yang diperoleh dari hasil pengamatan sangat dipengaruhi oleh jarak episenter (titik gempabumi) dengan stasiun perekaman gempa.

Selain daerah Toli-Toli yang mempunyai nilai percepatan tanah maksimum yang tinggi, ada pula daerah yang mempunyai percepatan tanah maksimum yang tinggi, yaitu daerah Luwuk Banggai. Tetapi, daerah ini mempunyai jarak epicenter 25,79 km dan kedalaman gempa 6 km.

Di wilayah Sulawesi Tengah gaya yang bekerja cukup kompleks akibat kombinasi gaya sesar aktif dan subduksi. Seringnya terjadi gempa di wilayah Sulawesi Tengah ini menyebabkan daerah ini rawan bencana yang berakibat rusaknya infrastruktur. Nilai percepatan tanah tinggi maka intensitasnya pun tinggi, getaran secara horizontal gempabumi menyebabkan bangunan-bangunan yang berada di atasnya akan menerima getaran paksaan dan bila bangunannya tinggi maka akan beresiko bencana yang besar.

Nilai intensitas maksimum yang diperoleh cenderung tinggi pada daerah yang memiliki nilai percepatan maksimum yang tinggi pula. Faktor struktur geologi pada daerah yang memiliki intensitas maksimum yang cukup tinggi dikarenakan kondisi geologi daerah yakni endapan alluvium, bantuan malihan dan batuan sedimen termetamorfose rendah. Gelombang gempabumi cenderung teramplifikasi pada daerah-daerah dengan jenis batuan muda atau struktur yang lembek, sebaliknya gelombang gempabumi cenderung teredam jika melewati struktur batuan yang keras dan batuan yang berumur tua. Selain itu daerah yang memiliki intensitas cukup tinggi terjadi pula pada daerah Donggala, Palu dan Luwuk yaitu VII – VIII MMI di mana terdapat fasies gunung api Formasi Tinombo. Faktor infrastruktur di daerah dengan intensitas maksimum yang tinggi juga sangat berpengaruh, di mana di daerah tersebut banyak bangunan yang berumur puluhan tahun dan mudah rusak.

Penentuan wilayah tingkat resiko gempabumi diperoleh berdasarkan hasil perhitungan percepatan tanah maksimum dan intensitas maksimum. Di mana tingkat resiko paling besar terjadi di daerah Tolitoli tepatnya pada titik grid 32 koordinat 1,02o LU dan 120,4o BT dengan nilai percepatan tanah maksimum sebesar 215,6651 gal dan intensitas VIII-IX MMI. Tingkat resiko besar kedua terjadi di daerah yang sama pada titik grid 33 koordinat 1,09o LU dan 121o BT dengan nilai percepatan tanah 187,06648 gal dan intensitas VIII-IX MMI. Dua kejadian tingkat resiko terbesar terjadi di wilayah Tolitoli ini diakibatkan oleh penunjaman Sesar Gorontalo, pergerakan Lempeng Laut Sulawesi dan subduksi lengan utara Sulawesi. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa wilayah Sulawesi Tengah merupakan lokasi yang disebut sebagai lokasi rawan bencana terutama bencana gempabumi, untuk itu perlu dilakukan pewilayahan tingkat resiko bencana gempabumi sebagai acuan mitigasi bencana alam.

5. Kesimpulan

Berdasarkan kondisi tektonik yang sangat kompleks, wilayah Sulawesi Tengah merupakan daerah yang rawan akan terjadinya bahaya geologi akan adanya gempa bumi. Distribusi kejadian gempa bumi yang terjadi di daerah penelitian ini sangat bervariasi, baik dalam hal magnitudo, kedalaman dan lokasi pusat gempunya. Aktivitas gempa bumi di wilayah penelitian sangat didominasi oleh gempa bumi dengan kedalaman dangkal. Hal ini dipengaruhi oleh aktivitas sesar yang berada di wilayah Sulawesi Tengah, yaitu sesar Palu Koro. Akibatnya terdapat daerah yang memiliki tingkat energi total yang sangat tinggi, diantaranya daerah Luwuk, Boul dan Toli-Toli. Namun, dalam hal percepatan tanah maksimum dan intensitas maksimum, daerah Toli-Toli sangat mendominasi. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa wilayah Sulawesi Tengah sangat rentan akan resiko kejadian bencana geologi, khususnya daerah Toli-Toli. Pernyataan ini diakibatkan adanya jalur aktivitas sesar Palu Koro yang melintas dari selatan wilayah Sulawesi Tengah ke arah selatan menuju daerah Toli-Toli, sehingga bertemu dengan sesar Gorontalo.

6. Ucapan Terima Kasih

Kami menggunakan data dari instansi Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) wilayah stasiun Palu serta International Seismological Centre (ISC), untuk itu kami ucapkan terima atas penyediaan data online melalui web masing-masing instansi.

Daftar Pustaka

- [1] Hall, R., & Wilson, M. E. J. Neogene sutures in eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6), 781–808. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(00\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(00)00040-7), 2000.
- [2] Katili, J. A. A review of the geotectonic theories and tectonic maps of Indonesia. *Earth-Science Reviews*, 7(3), 143–163. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(71\)90006-7](https://doi.org/10.1016/0012-8252(71)90006-7), 1971.
- [3] Katili, J. A. Review of past and present geotectonic concepts of eastern Indonesia. *Netherlands Journal of Sea Research*, 24(2–3), 103–129. [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(89\)90143-9](https://doi.org/10.1016/0077-7579(89)90143-9), 1989.
- [4] Pakpahan, S., Ngadmanto, D., Rohadi, S., Widodo, H. S., Susilanto, P., Bmkg, P., & Angkasa, J., Analisis Kegempaan di Zona Sesar Palu Koro, Sulawesi Tengah. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 6(3), 253–264, 2015.
- [5] Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya, C., Puntodewo, S. S. O., & Calais, E., Crustal motion in Indonesia from Global Positioning System measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8). <https://doi.org/10.1029/2001JB000324>, 2003.
- [6] Jayadi, H., Analisis Seismotektonik Untuk Penanggulangan Daerah Rawan Bencana Gempa Bumi. *Jurnal Fisika dan Terapannya*, 3, 110–116, 2016.

- [7] Kasahara, K. Earthquake Mechanics Meteorology and Geophysics. New York: University Press Cambridge, 1969.
- [8] Bellier, O., Sebrier, M., Beaudouin, T., Villeneuve, M., Braucher, R., Bourles, D., Siame, L., Putranto, E., & Pratomo, I., High slip rate for a low seismicity along the Palu-Koro active fault in central Sulawesi (Indonesia). *Terra Nova*, 13(6), 463–470. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00382.x>, 2001.
- [9] Daryono. Tataan Tektonik Dan Sejarah Kegempaan Palu, Sulawesi Tengah. 3, 2011.
- [10] Garini, S. A., & Rahmawati, E., Relokasi Hiposenter Gempa Bumi di Sulawesi Tengah Dengan Menggunakan Metode Geiger Dan Coupled Velocity-Hypocenter. *Jurnal Fisika, Universitas Negeri Surabaya*, 3(2), 107–112, 2014.
- [11] Juwitarini, A., Analisis Model Kecepatan Tomografi 3d Body Waves Pada Gempa Bumi Di Wilayah Sulawesi Tengah Tahun 2008-2018 Menggunakan Lotos-12. 7, 2019.
- [12] Ismullah M., Muh. F., Lantu, Aswad, S., & Massinai, Muh. A., Tectonics earthquake distribution pattern analysis based focal mechanisms (Case study Sulawesi Island, 1993–2012). 030013. <https://doi.org/10.1063/1.4915021>, 2015.
- [13] Muhammad Fawzy Ismullah, M., Dian Nugraha, A., Ramdhan, M., & Wandono., Precise Hypocenter Determination around Palu Koro Fault: A Preliminary Results. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 62, 012056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/62/1/012056>, 2017.
- [14] Supendi, P., Nugraha, A. D., & Widiyantoro, S. Hypocenter relocation of the aftershocks of the Poso, Sulawesi (Mw 6.6, May 29, 2017) event using the BMKG network data. 020076. <https://doi.org/10.1063/1.5047361>, 2018.
- [15] Supendi, P., Nugraha, A. D., Widiyantoro, S., Pesicek, J. D., Thurber, C. H., Abdullah, C. I., Daryono, D., Wiyono, S. H., Shiddiqi, H. A., & Rosalia, S. Relocated aftershocks and background seismicity in eastern Indonesia shed light on the 2018 Lombok and Palu earthquake sequences. *Geophysical Journal International*, 221(3), 1845–1855. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa118>, 2020
- [16] Jayadi, H., Mukaddas, A., & Meidji, I. U., Investigasi Bidang Gelincir Pada Daerah Rawan Longsor Di Ruas Jalan Tawaeli-Toboli Menggunakan Metode Geolistrik Tahanan Jenis. *Jurnal Fisika Unand*, 9(3), 381–387. <https://doi.org/10.25077/jfu.9.3.381-387>, 2020.
- [17] Soehaimi, A., Mikrotremor Dan Percepatan Tanah Maksimum Kota Makassar. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 19(1), 37–45. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v19i1.192>, 2009
- [18] Sunarjo, G., & Pribadi, S., Gempa Bumi Edisi Populer. BMKG, Jakarta, 2010.
- [19] Kapojos, C. G., Tamuntuan, G., & Pasau, G., Analisis Percepatan Tanah Maksimum Dengan Menggunakan Rumusan Esteva Dan Donovan (Studi Kasus Pada Semenanjung Utara Pulau Sulawesi). *JURNAL ILMIAH SAINS*, 15(2), 99–104. <https://doi.org/10.35799/jis.15.2.2015.9225>, 2015.

- [20] Linkimer, L., Relationship Between Peak Ground Acceleration and Modified Mercalli Intensity in Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 38. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i38.4218>, 2007.
- [21] Fukushima, Y., & Tanaka, T., A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(4), 757–783, 1990.
- [22] Gutenberg, B., The energy of earthquakes. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 112(1–4), 1–14. <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1956.112.01-04.02>, 1956.
- [23] Bath, M. *Introduction to Seismology*. Birkhäuser, 2013.
- [24] Supartoyo, Sulaiman, C., & Junaedi, D., Kelas tektonik sesar Palu Koro, Sulawesi Tengah. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 5(2), 111–128, 2014.