

Analisis Bahaya Kegempaan Di Wilayah Provinsi Sulawesi Utara

M.Zulkifli^{1,2}, Sesar Prabu Dwi Sriyanto² & Lusinda Indri Astuti²

¹Earth Sciences Graduate Program, Faculty of Earth Sciences and Technology, Bandung Institute of Technology, Bandung, Indonesia.

²Agency for Meteorology, Climatology, and Geophysics (BMKG), Indonesia
Email: zulkifligeoph45@gmail.com

Abstract. Pada penelitian ini digunakan model probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) untuk menggambarkan kontribusi peak ground acceleration (PGA) di wilayah Provinsi Sulawesi Utara. Sumber gempa subduksi, fault dan background diterapkan dalam perhitungan PSHA. Adapaun Model gridded seismicity diterapkan untuk mengarakterisasi model background source berdasarkan seismicity rate pada setiap grid berukuran 10 x 10 derajat. Hasil yang diperoleh adalah kontribusi PGA di Provinsi Sulawesi Utara untuk probabilitas terlewat 10% dalam 50 tahun pada kondisi $T = 0$ detik sebesar 0.5 g - 0.7, $T = 0.2$ detik sebesar 1.4 g - 1.5 g dan $T = 1$ detik sebesar 0.6 g - 0.7 g.

Keywords: *psha; pga; fault; subduksi; background.*

1 Pendahuluan

Wilayah Sulawesi Utara merupakan salah satu daerah yang realtif berkembang pesat dari segi pembangunan infrastruktur di Indonesia. Sejak ditetapkan sebagai kawasan ekonomi khusus (KEK) kota Bitung pada tahun 2014 dan destinasi pariwisata super prioritas di Likupang tahun 2021 pemerintah Indonesia telah melakukan project pembangunan infrastruktur secara massif. Menurut BPS [1], infrastruktur yang dibangun berupa jalan tol dari Manado - Bitung, jalan tol Manado - Likupang, serta pembangunan infrastruktur jalan dan jembatan.

Namun, secara seismotektonik kawasan ini berpotensi terdampak bencana gempa bumi karena berada di sekitar daerah sesmik aktif. Interaksi tektonik regional seperti aktivitas divergen double subduction (DDS) Molucca Sea Plate (Zhang et.al [2], North Sulawesi trench (Hall [3], dan sesar aktif sebagai generator gempa bumi yang menyebabkan daerah tersebut memiliki seismisitas tinggi.

Catatan kejadian masa lalu bersumber dari katalog BMKG tahun 2018 (Tabel 1) [4], Kota Manado beberapa kali telah diguncang gempa merusak. Gempa bumi tahun 2014 Mw 7.4, Gempa ini dilaporkan beberapa rumah, hotel dan jembatan rusak. Gempa bumi tahun 1997 Mw 7.0, tercatat ada 90 bangunan rusak di Kota

Manado dan beberapa gempa signifikan lain yang sudah terdokumentasikan dengan baik. Akan tetapi, tantangan yang dihadapi saat ini adalah gempa bumi belum bisa diprediksi secara akurat, bersifat merusak, dan menimbulkan korban jiwa.

Sebagai upaya pengurangan risiko, desain bangunan tahan gempa bumi dirancang dengan tujuan agar mampu menahan guncangan tanah tanpa menimbulkan kerusakan yang berlebihan (Asrurifak et al [5]). Seismic hazard analysis merupakan salah satu metode standar yang ideal untuk menghitung besarnya tingkat guncangan tanah (peak ground acceleration) akibat dari gempa bumi serta menjadi acuan untuk estimasi risiko kerugian pada suatu hunian infrastruktur (Petersen et.al [6]).

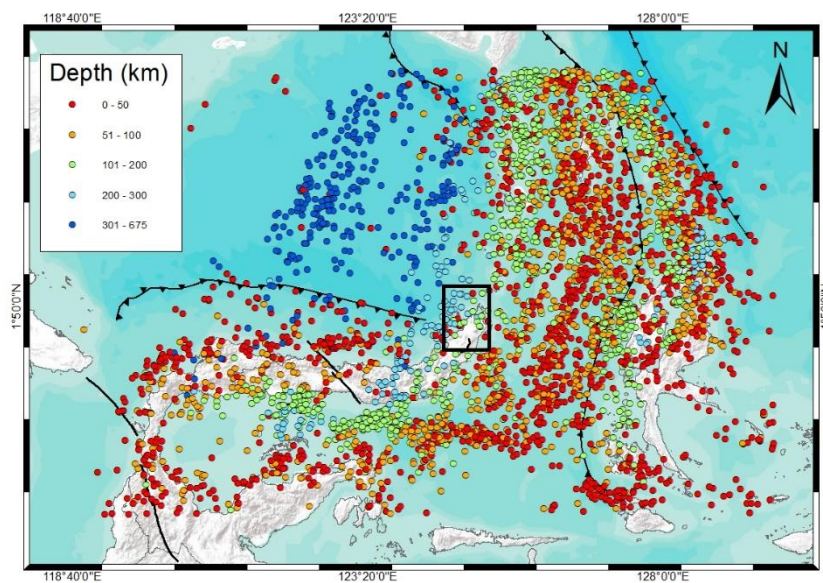
Studi terbaru sebelumnya, Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN) tahun 2017 [7] telah merilis pembaharuan peta sumber dan bahaya gempa di Indonesia. Namun, hasil kajian dari peta hazard tersebut terbatas pada skala regional Indonesia. Mikrozonasi PSHA (probabilistic seismic hazard analysis) perlu dilakukan untuk melihat lebih rinci potensi seismic hazard skala lokal wilayah Sulawesi Utara. Kami menggunakan studi PSHA pada penelitian ini untuk melihat seberapa jauh kontribusi berbagai sumber gempa bumi untuk menghasilkan guncangan tanah (peak ground acceleration) di wilayah Sulawesi Utara.

Table 1. Sejarah gempa bumi merusak di Sulawesi Utara

Source	Year	Mw	Damage
Molucca sea	2014	7.3	Kerusakan ringan - sedang di beberapa hotel dan RS di Kota Manado, jembatan Mahakam di Manado mengalami keretakan
Molucca sea	2001	7.1	Manado : bangunan dan rumah dari batu bata roboh
Molucca sea	1998	6.5	Korban meninggal : - 7 orang Korban luka-luka : - 18 orang
Minahasa	1997	7.0	Sedikitnya 90 bangunan rusak di Manado
North Sulawesi Trench	1988	5.2	Korban Meninggal : 1 orang Korban luka-luka : Beberapa orang Kerusakan: Banyak rumah, gedung pemerintahan, dan bangunan lainnya rusak parah

2 Data dan Metode

Data yang digunakan pada studi ini adalah gabungan katalog gempa bumi yang dari BMKG (Agency for Meteorology, Climatology, and Geophysics) dan ISC (International Seismological Centre) selama periode 1907 hingga 2020 pada koordinat geografis $0,3^{\circ}\text{LS}$ - 5°LU dan 118°BT - 129°BT . Katalog tersebut memiliki magnitudo yang beragam, kami menggunakan persamaan regresi dari Idriss [8] untuk dikonversi ke magnitudo momen (M_W). Tahap selanjutnya, dilakukan decluster menggunakan software Zmap yang dikembangkan oleh Wiemer [9], proses ini bertujuan memisahkan gempa utama terhadap kumpulan gempa susulan. Jumlah gempa dengan rate earthquake konstan dari hasil decluster adalah 3832 event pada rentang $4.5 \leq M_W \leq 7.9$ (gambar 1).



Gambar 1: Plot distribusi mainshock berdasarkan kedalaman. Sumber gempa dari katalog BMKG dan ISC periode 1907-2020. Peta dasar diperoleh dari peta dasar Esri World Terrain [10].

Selanjutnya, kami menerapkan algoritma Frankel [11] untuk mengkarakterisasi sumber background berdasarkan laju produksi gempa (10^A value) pada ukuran grid 0.1×0.1 derajat, seperti yang dilakukan oleh peneliti yang lain misalnya Triyoso et al [12]. Petersen et al [13] menjelaskan model gridded (smoothed) seismicity digunakan untuk mengestimasi rate dari kejadian gempa kecil sampai sedang yang akan terjadi di daerah sesar dan gempa-gempa acak di luar sesar. Metode ini menggunakan analisis kejadian gempa yang ternormalisir pada grid yang telah ditentukan untuk selanjutnya dihitung probabilitas kegempaan. nilai grid ini

kemudian dilakukan smoothed spatially dengan mengalikan pada fungsi Gaussian bersama corelation distance. Hasil dari proses ini adalah berupa nilai laju produksi gempa (10^A value) di setiap grid dengan ukuran 0.1×0.1 derajat. Dimana, kuantitas itu ekuivalen dengan nilai A dalam persamaan Gutenberg–Richter [14].

Metode ini memiliki tingkat justifikasi yang lebih kuat karena dapat mempresentasikan karakter gempa pada luasan yang lebih sempit serta menghindari subjectivitas. Model gridded ini dalam analisisnya dibagi dalam lima interval kedalaman yaitu: shallow background source (0-50km), dan deep background source (50-100 km), (100-150 km), (150- 200 km) dan (200-300 km).

Data selanjutnya yang digunakan adalah data dari sumber subduksi (megathrust) dan data sesar (fault). Parameter-parameter yang digunakan dalam input model sumber gempa sesar dan subduksi adalah: *trace*, *slip-rate*, *dip*, dan *b value*. Adapaun untuk model sumber subduksi kami menggunakan subduksi laut Sulawesi (*North Sulawesi Trench*). Sumber sesar yang digunakan adalah patahan *west molucast* dan *east molucast*. kedua data ini bersumber dari publikasi tim Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN) tahun 2017 [7].

2.1 GMPE (ground motion prediction equation)

GMPE ini digunakan untuk perkiraan tingkat guncangan tanah PGA akibat gempa berdasarkan magnitudo, jarak dari sumber ke lokasi pengamatan, kondisi sumber gempa tertentu dan pengaruh geologi lokal setempat. Dalam studi ini persamaan atenuasi yang digunakan untuk sumber background pada tabel 2 dibawah ini:

Table 2. Fungsi atenuasi yang digunakan di PSHA

Source Model	GMPE
Shallow crustal fault dan Background source	1. Boore–Atkinson NGA (Boore and Atkinson 2008) [15]
	2. Campbell–Bozorgnia NGA (Campbell and Bozorgnia 2008) [16]
	3. Chiou–Youngs NGA (Chiou and Youngs 2008)[17]
Deep background	1. Geomatrix subduction (Youngs et al. 1997) [18]
	2. Atkinson-Boore BC rock & global source (Atkinson and Boore,2007) [19]
	3. Atkinson–Boore intraslab (Atkinson and Boore 2003) [20]
Subduction interface (Megathrust)	1.Young et al. (1997) [18] 2.Atkinson-Boore (2003) [20] 3.Abrahamson et al. (2014) [21] 4. Zhao et.al (2006) [22]

2.2 Logic Tree

Menurut Power et.al [23] logic tree merupakan suatu model yang digunakan dalam studi PSHA bertujuan memperhitungkan ketidakpastian baik saat kejadian gempa, lokasi gempa akan terjadi, ukuran kekuatan gempa, karakter gempa. Hasil tiap analisis diberikan oleh nilai bobot kemungkinan relatif dari kombinasi cabangndengan hasil akhir diambil sebagai penjumlahan dari nilai bobot bernilai 1. Pembobotan logic tree pada studi ini ditampilkan pada tabel 3 diabwah ini.

Source Model	Fault Mechanisme Uncertainties	GMPE Uncertainties
Shallow Crustal Fault	Strike slip (0.5)	Boore–Atkinson NGA 2008 (0.33)
	Reverse (0.25)	Campbell–Bozorgnia NGA 2008 (0.33)
	Normal (0.25)	Chiou–Youngs NGA 2008 (0.33)
Deep Background	Strike slip (0.5)	Geomatrix subduction (Youngs et al. 1997) (0.33)
	Reverse (0.25)	Atkinson and Boore 2007 (0.33)
	Normal (0.25)	Atkinson–Boore intraslab (0.33)
Subduction Source	Strike slip (0.5)	Youngs et al ,1997 (0.15)
	Reverse (0.25)	Atkinson and Bore 2003 (0.15)
	Normal (0.25)	Zhao et al. 2006 (0.30) Abrahamson et al. 2014 (0.40)

2.3 Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA)

PSHA berkaitan dengan tingkat gerakan tanah yang diperkirakan selama periode waktu tertentu. Penilaian probabilistik mempertimbangkan faktor ketidakpastian dalam sumber gempa, jalur, kondisi lokasi dan periode ulang kejadian gempa bumi. Secara umum persamaan matematis ditulis mengikuti persamaan Cornell [24] sebagai berikut:

$$P[I \geq i] = \int \int P[I \geq i | m \text{ dan } r] f_M(m) f_R(r) dm dr \quad (1)$$

F_M = fungsi kepadatan probabilitas dari magnitudo

F_R = fungsi probabilitas jarak hiposenter

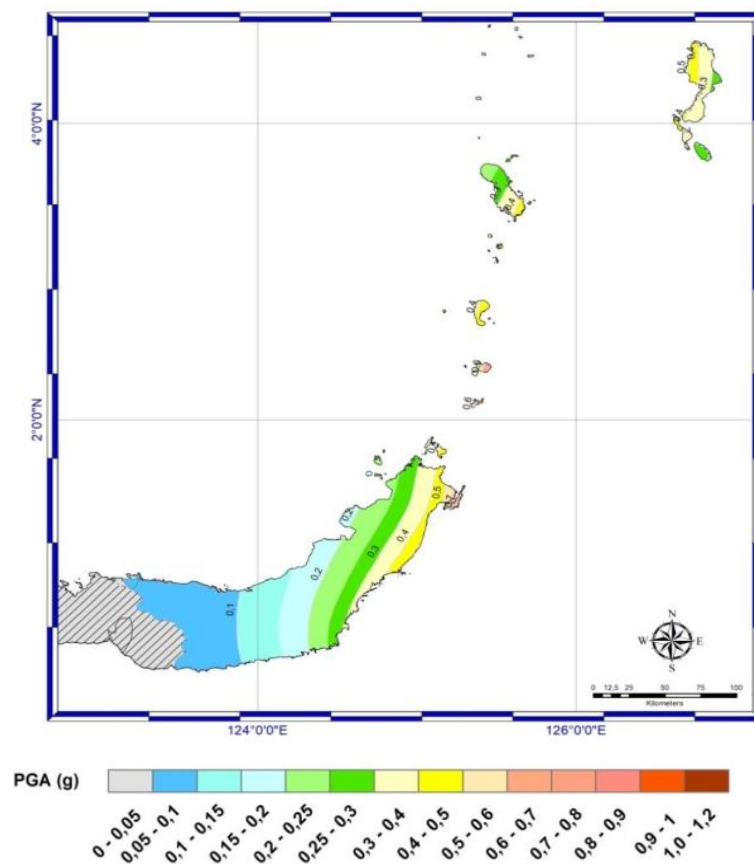
$P[I \geq i | m, r]$ = kondisi probabilitas acak intensitas I yang melampaui nilai (i) pada lokasi akibat magnitudo gempa (M) dan jarak hiposenter (R).

Pada penelitian ini perhitungan PSHA dilakukan dengan perangkat lunak dari Harmsen [25]. Jarak spasi site adalah $0,10 \times 0,10$ (latitude, longitude). Analisa meliputi probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun pada kondisi peak ground acceleration (PGA) pada periode $T=0,0$ detik, peak spectra acceleration (psa)

$T=0,2$ detik dan PSA $T=1,0$ detik dengan periode ulang 500 tahun. Hasil akhir analisa hazard ini adalah meliputi pembuatan peta bahaya di wilayah Sulawesi Utara yang berupa distribusi peta percepatan tanah.

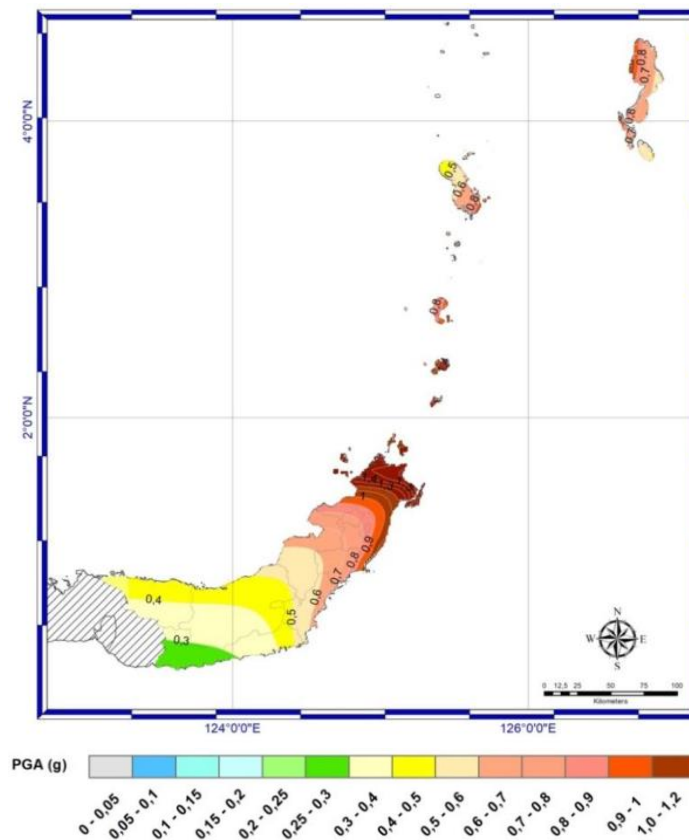
3 Hasil dan Diskusi

Setelah dilakukan pengolahan data, maka didapatkan model percepatan tanah di wilayah Sulawesi Utara dengan probabilitas 10% dalam 50 tahun atau dengan periode ulang gempabumi 500 tahun. Model percepatan tanah yang dihasilkan terdiri dari 3 jenis, yaitu PGA atau pada periode $T=0,0$ detik, pada periode $T=0,2$ detik, dan pada periode $T=1,0$ detik, yang masing-masing disajikan pada gambar berikut.



Gambar 2: Peta bahaya gempa bumi Provinsi Sulawesi Utara periode $T=0,0$ detik untuk probabilitas 10% dalam 50 tahun (periode ulang 500 tahun)

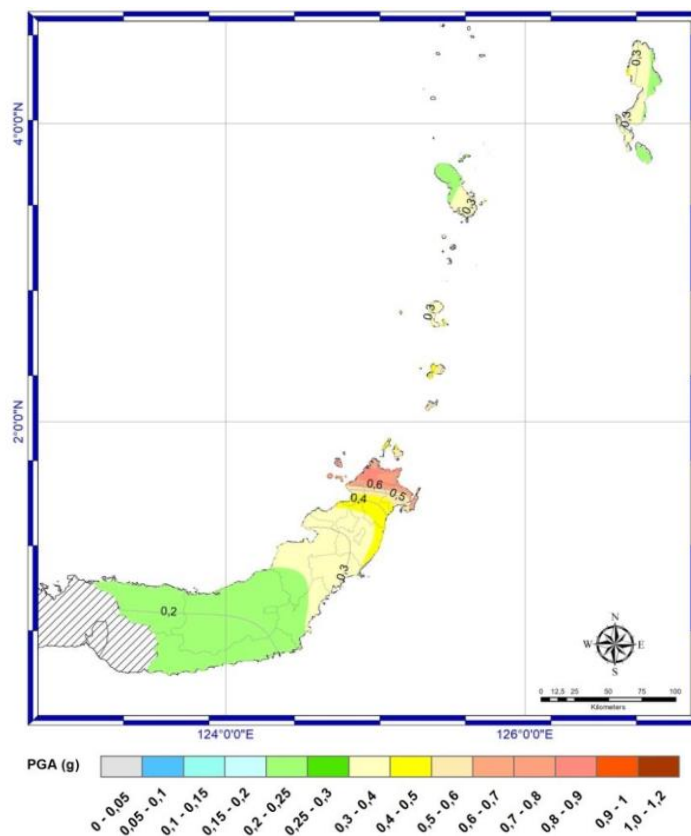
Pada peta bahaya dengan periode $T=0,0$ detik (gambar 2), dapat dilihat bahwa nilai tertinggi PGA ada di daerah Bitung dengan nilai lebih dari 0,7 g diikuti wilayah Kepulauan Siau Tagulandang Biaro dengan nilai antara 0,6-0,7 g. Hal ini disebabkan karena bahaya seismik di wilayah Sulawesi Utara pada periode $T=0,0$ detik didominasi oleh sesar West Molucca Sea. Dominasi sesar ini menyebabkan nilai PGA semakin rendah bila menjauh dari bidang sesar yang memanjang dari selatan di tenggara Bitung hingga ke utara di antara Kepulauan Sangihe dengan Kepulauan Talaud. Nilai PGA terendah di wilayah Sulawesi Utara berada di Bolaang Mongondow yang berbatasan dengan Provinsi Gorontalo dengan nilai PGA kurang dari 0,1 g.



Gambar 3: Peta bahaya gempabumi Provinsi Sulawesi Utara periode $T=0,2$ detik untuk probabilitas 10% dalam 50 tahun (periode ulang 500 tahun).

Berbeda dengan peta bahaya pada periode $T=0,0$ detik, peta bahaya pada periode $T=0,2$ detik dominasi bahaya seismik tidak hanya akibat sesar West Molucca Sea tetapi juga berasal dari North Sulawesi Trench (NST) yang lokasinya di utara Pulau Sulawesi memanjang dari barat ke timur hingga sebelah barat Manado.

Dominasi dari dua sumber gempa ini menyebabkan nilai PSA tertinggi terletak di wilayah Kota Bitung, Minahasa Utara, Kota Manado, dan Kepulauan Siau Tagulandang Biaro dengan nilai antara 1,4-1,5 g, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai PSA pada periode $T=0,2$ detik ini juga menjadi nilai PSA tertinggi dibanding dengan nilai PSA pada periode $T=0,0$ detik atau $T=1$ detik. Secara spasial, di bagian Pulau Sulawesi nilai PSA menurun semakin ke arah selatan seiring bertambah jarak dari sumber-sumber gempa yang mendominasi tersebut, dengan nilai terendah kurang dari 0,3 g di wilayah Bolaang Mongondow Selatan. Wilayah Kepulauan Sangihe dan Talaud hanya terdampak dari sumber sesar West Molucca Sea karena cukup jauh dari sumber North Sulawesi Trench sehingga nilai PSA tertinggi wilayah ini berada di pesisir yang dekat dengan sesar West Molucca Sea. Selanjutnya, untuk peta bahaya gempa bumi pada periode $T=1,0$ detik memiliki pola yang mirip dengan peta bahaya seismik pada periode $T=0,2$ detik.



Gambar 4: Peta bahaya gempabumi Provinsi Sulawesi Utara periode $T=1,0$ detik untuk probabilitas 10% dalam 50 tahun (periode ulang 500 tahun)

Dari Gambar 4 yang menunjukkan peta bahaya seismik pada periode $T=1,0$ detik dapat dilihat bahwa nilai PSA tertinggi berada di wilayah Bitung dan Minahasa Utara dengan nilai 0,6-0,7 g. Untuk nilai PSA terendah berada di wilayah Bolaang Mongondow, bagian utara Pulau Sangihe, dan pesisir timur Pulau Talaud dengan nilai PSA kurang dari 0,2 g.

Berdasarkan 3 jenis peta bahaya yang telah diperoleh dari pengolahan PSHA maka dapat diketahui bahwa nilai PSA pada periode $T=0,2$ detik selalu memiliki nilai tertinggi dibanding pada periode $T=0,0$ detik dan $T=1,0$ detik di setiap titik area penelitian. Nilai PSA wilayah Sulawesi Utara pada periode $T=0,2$ detik, $T=1,0$ detik, dan $T=0,0$ detik masing-masing memiliki rentang nilai 0,3-1,5 g, 0,2-0,7 g, dan 0,1- 0,7 g. Dari peta bahaya tersebut juga diketahui bahwa daerah yang memiliki tingkat bahaya seismik tertinggi di wilayah Sulawesi Utara berada di ujung utara Pulau Sulawesi yang secara administrasi termasuk dalam Kabupaten Minahasa Utara dan Kota Bitung, serta di wilayah Kepulauan Siau Tagulandang Biaro. Daerah-daerah ini memiliki tingkat bahaya seismik yang tinggi karena lokasinya yang cukup dekat dengan sumber gempa bumi baik sesar West Molucca Sea maupun North Sulawesi Trench.

4 Kesimpulan dan Rekomendasi

Nilai PSA pada periode $T=0,2$ detik selalu memiliki nilai tertinggi dibanding pada periode $T=0,0$ detik dan $T=1,0$ detik di setiap titik area penelitian. Daerah yang memiliki tingkat bahaya seismik tertinggi di wilayah Sulawesi Utara berada di ujung utara Pulau Sulawesi yang secara administrasi termasuk dalam Kabupaten Minahasa Utara dan Kota Bitung, serta di wilayah Kepulauan Siau Tagulandang Biaro karena lokasinya yang cukup dekat dengan sumber gempa bumi baik sesar West Molucca Sea maupun North Sulawesi Trench.

Mempertimbangkan Provinsi Sulawesi Utara saat ini dengan pembangunan infrastruktur yang massif serta jumlah penduduk yang padat perlu dilakukan Analisa model deterministik sebagai perbandingan dengan hasil PSHA.

References

- [1] Central Agency of Statistics. (2020). North Sulawesi Province in Figures 2020. ISBN : 0215-2274.
- [2] Zhang Q, Guo F, Zhao L, Wu Y, 2017. Geodynamics of divergent double subduction: 3-D numerical modeling of a Cenozoic example in the Molucca Sea region, Indonesia
- [3] Hall, R. (2018). The subduction initiation stage of the Wilson cycle. Geological Society, London, Special Publications, SP470.3. doi:10.1144/sp4703.

- [4] Sadly M, Triyono R, Prasetya T, Daryono, Yatimantoro T, Anggraini S, Rahayu R H, Priyobudi, Setiyono U, Gunawan I, Yogaswara DS, Apriani M, Kriswinarso T, Julius A M, Hidayanti, Anugerah S D. (2018). Catalogue of Significant and Destructive Earthquakes in 1821-2018. BMKG Earthquake and Tsunami Center.
- [5] Asrurifak M, Irsyam, M, Budiono, B, Triyoso, W, Hendriyawan. (2010). Development of Spectral Hazard Map for Indonesia with a Return Period of 2500 Years using Probabilistic Method. Civil Engineering Dimension, Vol. 12, No. 1, March 2010, 52-62 ISSN 1410-9530 ISSN 1979-570.
- [6] Petersen, M.D., Harmsen, S.C., Jaiswal, K.S., Rukstales, K.S., Luco, N., Haller, K.M., Mueller, C.S., and Shumway, A.M., 2018, Seismic Hazard, Risk, and Design for South America: U.S. Geological Survey data release, <https://doi.org/10.5066/F7Wm1BK1>.
- [7] Irsyam M, Cummins PR, Asrurifak M, Faizal F, Danny Hilman Natawidjaja DH, Widiyantoro S, Meilano I, Triyoso W, Rudiyanto A, Hidayati S, Ridwan M, Hanifa NR, and Syahbana AJ. (2020). Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. Earthquake Spectra journals, doi: 10.1177/8755293020951206.
- [8] Idriss, I.M, (1985), Evaluating Seismic Risk Engineering Practic, Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 1, 255-320
- [9] Wiemer, S., 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. Seismological Research Letters, 72(3), pp.373-382 <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>
- [10] Esri. "Topographic" [basemap]. Scale Not Given. "World Topographic Map". February 19, 2021. <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f>. (July 26, 2021).
- [11] Frankel, A. (1995). Mapping seismic hazard in the central and eastern United States. Seismological Research Letters, 66(4), 8-21.
- [12] Triyoso W, Suwondo A, Yudistira T, and Sahara DP. (2020) Seismic Hazard Function (SHF) study of coastal sources of Sumatra Island: SHF evaluation of Padang and Bengkulu cities, Geosci. Lett. (2020) 7:2, <https://doi.org/10.1186/s40562-020-00151-x>
- [13] Petersen, Mark D., Mueller, Charles S., Frankel, Arthur D., Zeng, Yuehua, (2008) Spatial Seismicity Rates and Maximum Magnitudes for Background Earthquakes, USGS Open-File Report.
- [14] Gutenberg, B., and Richter, C., 1944. Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34, 185–188.
- [15] Boore DM and Atkinson GM (2008) Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. Earthquake Spectra 24(1): 99–138

- [16] Campbell KW and Bozorgnia Y (2008) NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra* 24(1): 139–171.
- [17] Chiou B, Darragh R, Gregor N and Silva W (2008) NGA project strong-motion database. *Earthquake Spectra* 24(1): 23–44.
- [18] Youngs RR, Chiou SJ, Silva WJ and Humphrey JR (1997) Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters* 68(1): 58–73.
- [19] Atkinson GM and Dan Boore DM (2003) Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America* 93(4): 1703–1729.
- [20] Atkinson, G.M., and Boore, D.M., 2007. Erratum – earthquake ground-motion prediction equations for eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 1032.
- [21] Abrahamson, N., Gregor, N. and Addo, K., 2016. BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), pp.23-44
- [22] Zhao, J.X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P.G., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T. and Ogawa, H., 2006. An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), pp.914-925.
- [23] Power MS, Coppersmith KJ, Youngs RR, Schwartz DP and dan Swan RH (1981) Seismic exposure analysis for the WNP-2 and WNP-1/4 site: Appendix 2.5K to Amendment No. 18. Final Safety Analysis Report for WNP-2, San Francisco, CA: Woodward-Clyde Consultants, p. 63.
- [24] Cornel, C.A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol 58, No.5: 1583-1606.
- [25] Harmsen, S., 2008. USGS Software for Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), Draft Document, received by hand (unpublished).